

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Научно-технический журнал

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: • 01.01.00 Математика • 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника • 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы • 05.12.00 Радиотехника и связь • 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

Учредитель: ООО «ИД Медиа Паблшер». **Издатель:** СВЕТЛАНА ДЫМКОВА. H&ES Research зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Издательская лицензия ПИ № ФС 77-60899.

Язык публикаций: русский, английский.

Периодичность выхода – 6 номеров в год.

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; ГОНЧАРОВСКИЙ 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; МАНУЙЛОВ 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.

Адрес редакции: 111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514; 194044, Россия, СПб, 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.

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.

© ООО «ИД Медиа Паблшер» 2017

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Scientific and Technical Journal

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: • 01.01.00 Mathematics • 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware • 05.11.00 Instrument engineering, metrology and information-measuring devices and systems • 05.12.00 RF technology and communication • 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

Founder: "Media Publisher", LLC. **Publisher:** SVETLANA DYMKOVA.

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.

Language of publications: Russian, English.

Periodicity – 6 issues per year.

Editor in chief: KONSTANTIN LEGKOV

Editorial board: BOBROWSKY V.I., Ph.D., associate professor; BORISOV V.V., Ph.D., professor; BUDKO P.A., Ph.D., professor; BUDNIKOV S.A., Ph.D., associate professor, Actual Member of the Academy of Education Informatization; VERHOVA G.V., Ph.D., professor; GONCHAREVSKY V.S., Ph.D., professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation; KOMASHINSKIY V.I., Ph.D., professor; KIRPANEEV A.V., Ph.D., associate professor; KURNOSOV V.I., Ph.D., 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., Ph.D., professor; MOROZOV A.V., Ph.D., professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences; MOSHAK N.N., Ph.D., associate professor; PROROK V.Y., Ph.D., professor; SEMENOV S.S., Ph.D., associate professor; SINICYN E.A., Ph.D., professor; SHATRAKOV Y.G., Ph.D., professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation.

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 advertising department: Olga Doroshkevich, ovd@media-publisher.ru, tel.: 8(916) 951-55-36.

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.

© "Media Publisher", LLC 2017

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

Васильев А.П., Степанов С.Н.

Построение и анализ математической модели с ожиданием и динамическим распределением канального ресурса при групповом поступлении запросов на передачу данных 6

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Абдулов Р.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г.

Обеспечение визуальной скрытности разведывательных беспилотных летательных аппаратов нижнего эшелона от летательных средств верхнего эшелона в условиях гомогенного и гетерогенного загрязнения атмосферы аэрозолями 14

Пашаев Н.М.

Тепловизуальный метод высотного обнаружения низколетящих дронов с электронно-цветовым камуфлированием поверхности 22

Тарасов А.Г., Минаков Е.П.

Метод планирования применения робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций в процессе подготовки и пуска ракет космического назначения 29

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смагин В.А., Лавров Р.О., Богданец А.В., Ширямов О.А.

Расчёт показателя вероятности выполнения измерительной задачи информационно-измерительной системой с временной избыточностью 42

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Белянский В.Б., Пронина Е.Д.

Широкодиапазонные антенны первого типа, преодолевающие предел Чу-Харрингтона-Фано 48

Чертова О.Г., Новак К.В.

Возможные способы организации связи при построении сети морских робототехнических комплексов 54

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Басыров А.Г., Широбоков В.В.

Методика функционально-распределенной обработки информации в перспективных кластерах микроспутников дистанционного зондирования Земли 62

Синюк А.Д., Остроумов О.А.

Комплексная модель открытого установления сетевой криптосвязности 71

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Буренин А.Н., Легков К.Е.

Основы обеспечения эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами в условиях воздействий 79

Хомоненко А.Д., Лохвицкий В.А., Халил М.М.

Расчет распределения времени ожидания в очереди многоканальных немарковских систем массового обслуживания с «охлаждением» и «разогревом» 88

CONTENTS

MATHEMATICS

Vasiliev A.P., Stepanov S.N.

The construction and analysis of mathematical models with a dynamic distribution channel resource for group requests of data transfer and buffer utilization 6

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Abdulov R.N., Abdullayev N.A., Asadov H.H.

Questions on providing for visual reticence of reconnaissance UAV of lower echelon from flying objects of higher echelon 14

Pashayev N.M.

Assessment of effectiveness of thermo-visual method for detection of drones provided with electrochrom camouflage on surface 22

Tarasov A.G., Minakov E.P.

A method for scheduling use of robotic systems the elimination of extreme situations in the process of preparing and launching space rockets 29

INSTRUMENT, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING

DEVICES AND SYSTEMS

Smagin V.A., Lavrov R.O., Bogdanetc A.V., Shiryamov O.A.

Calculation of the indicator of probability of performance of the measuring problem by information-measuring system with time redundancy 42

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Belyansky V.B., Pronina E.D.

Wide-type broadcasting antennas overcoming Chu-Harrington-Fano 48

Chertova O.G., Novak K.V.

Possible ways of organization a communication in the construction networks of marine robotic complexes 54

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Basyrov A.G., Shirobokov V.V.

Methodology of functionally-distributed information processing in the prospective clusters of microsatures of remote sensing of the Earth 62

Sinyuk A.D., Ostroumov O.A.

The complex model of open net cryptoconnectivity setting 71

PUBLICATIONS IN ENGLISH

Burenin A.N., Legkov K.E.

Framework for ensuring effective functioning of information subsystems of the automated control systems for complex organizational and technical objects in the conditions of essential impacts 79

Khomonenko A.D., Lokhvitskiy V.A., Khalil M.M.

Calculation of waiting time distribution in multi-channel non-markovian queuing systems with "cooling" and "heat-up" 88

ИТОГИ ВЫСТАВКИ «СВЯЗЬ-2017»

29-я международная выставка информационных и коммуникационных технологий

С 25 по 28 апреля 2017 года в Москве, в ЦВК «Экспоцентр» состоялась 29-я международная выставка «Связь-2017», ставшая центральной площадкой индустрии связи, телекоммуникаций и информационных технологий. Выставка, организованная «Экспоцентром», проводилась при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, Федерального агентства связи (Россвязь), под патронатом Торгово-промышленной палаты России.

«Связь-2017» в очередной раз доказала свой статус важнейшего смотра достижений в сфере индустрии связи, демонстрируя передовые разработки и технологии, соответствующие актуальным мировым трендам в сфере информационных технологий.

Второй год подряд выставка «Связь» проходила в рамках «Российской недели высоких технологий», которая объединила международные выставки «Связь», «Навитех», Большой Медиа-Коммуникационный Форум, Международный навигационный форум и другие отраслевые мероприятия.

В церемонии официального открытия выставки приняли участие председатель Комитета Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации по информационной политике, информационным технологиям и связи **Леонид Левин**, вице-президент ТПП



РФ **Владимир Дмитриев**, руководитель Федерального агентства связи **Олег Духовницкий**, заместитель руководителя Департамента информационных технологий г. Москвы **Александр Горбатко**, генеральный директор АО «Экспоцентр» **Сергей Беднов**, представители столичных и региональных государственных структур, связанных с коммуникациями, а также представители бизнеса. Почетным гостем открытия стал заместитель министра связи и высоких технологий Азербайджанской Республики **Эльмир Тофиг оглы Велизаде**, чья страна впервые выступила страной-партнером выставки «Связь-2017».

Федеральное агентство связи традиционно более восьми лет участвует в выставке «Связь».

Государство активно поддерживает отрасль связи, создавая благоприятные условия для совместной работы правительственных органов, операторов-поставщиков новых телекоммуникационных услуг и частных инвесторов, а также для скорейшей модернизации и развития телекоммуникационной инфраструктуры в нашей стране.

На церемонии открытия выставки были погашены почтовые конверты с символикой выставки «Связь-2017», традиционно выпущенные к началу выставки. В этот же день они поступили в почтовые отделения по всей стране.

В экспозиции на площади **20 тыс. кв. м** были отражены приоритетные направления развития отрасли, представлены решения для фиксированной, сотовой, спутниковой и волоконно-оптической связи, сетей передачи данных, телекоммуникационное, серверное и сетевое оборудова-

ние, системы телевидения для кабельного и спутникового ТВ, программное обеспечение, центры обработки данных, интернет-технологии, информационная безопасность.

В этом году свое оборудование и технологии продемонстрировали 325 экспонентов из 22 стран.

В выставке традиционно приняли участие компании из стран Европы – Германии, Италии, Кипра, Нидерландов, Финляндии, Франции. Ближний Восток и Азиатский регион представили экспоненты из Израиля, Индии, Китая, Республики Корея, Японии. К участию в мероприятии вновь присоединились Испания, Польша, Украина, а компании из Ирана и Сингапура приехали на выставку впервые.

В выставке приняли участие активно работающие на российском рынке компании: ЗСХ, Corning, Ekinops, Intelsat, Procom, Riello Ups, Rohde & Schwarz, Sumitomo Electric

Впервые заявили о себе на выставке FI.MO.TEC (Италия), CobiNet (Германия), PPI INC (Республика Корея), SISNET Co (Республика Корея), Alborzpolymer (Иран), KDPOF (Испания), Amplus Communications (Сингапур), Gamm-Bud (Польша).

США были представлены Intelsat Corporation – крупнейшей спутниковой компанией мира. Белоруссия делегировала на выставку ключевых национальных производителей отраслевой продукции – компании «Белтелекабель» и «Союз-Кабель».

Впервые страной-партнером выставки «Связь» стал Азербайджан. Министерство транспорта, связи и высоких технологий Азербайджанской Республики представило 8 компаний на площади 150 кв. м.

Тайваньская ассоциация электрической и электронной промышленности (ТЕЕМА) в очередной раз организовала **отраслевую экспозицию предприятий Тайваня.**

Традиционно широко была представлена **национальная экспозиция Китая**, которую формирует Китайский комитет по развитию международной торговли (ССРПТ).

Важным событием на выставке стали переговоры руководителей российских предприятий, подведомственных Федеральному агентству связи (Россвязь), и предприятий КНР.

В переговорах приняли участие глава Ассоциации науки и технологий Шэньчжэня **г-жа Жан Ли**, заместитель председателя Подкомитета электронной и информационной индустрии ССРПТ **г-н Гуансён Дьян**, представители Россвязи, Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), Санкт-Петербургского



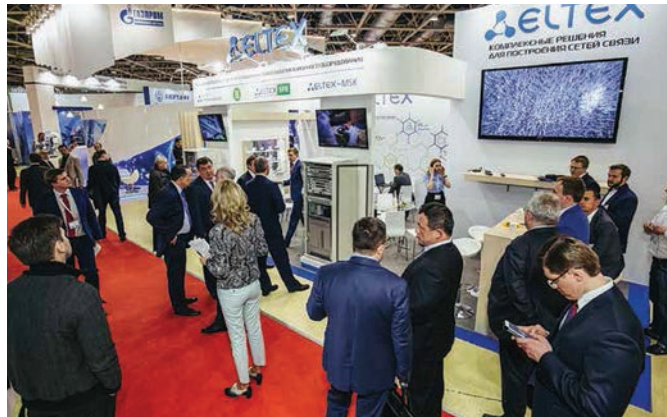
государственного университета телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, ФГУП «Космическая связь», Центрального НИИ связи, НИИ радио, Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Главного центра специальной связи, Центрального музея связи им. А. С. Попова.

Достижения российских производителей продемонстрировали **177 участников**, в числе которых – ОАО «Газпром Космические Системы», НПФ «Микран», «Натекс», Пермский телефонный завод «Телта», ЗАО «Трансвок», «Саранскабельоптика», ОАО «Супер-тел», ООО «Технологии Радиосвязи», ГК «Штиль», «Эликс-Кабель».

Впервые на выставке был представлен действующий модульный дата-центр МЦОД. Оборудование и технологии для ЦОДов продемонстрировали Green MDC, «Термокул», MASTERWORK, «Электропрофи», «Стего РУС», Janitza (Германия).

Программное обеспечение показали компании «СимбирСофт», Tottoli GSM, «Росплатформа», «ТелеСвязь», ATDI (Франция), «Неоко», ЗСХ (Кипр). Вниманию посетителей были предложены решения в финансовом и IT-секторах, нефтяной отрасли, здравоохранении, образовании; облачная платформа для управления SIM-картами; средства серверной виртуализации; программные решения для радиосвязи; программное обеспечение для диспетчерских систем цифровой радиосвязи; решения в области IP-телефонии и т.д.

На выставке работал **проект «Экспоцентр» – за выставки без контра- факта**, направленный на уменьшение числа случаев экспонирования контрафактных товаров.



ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ОЖИДАНИЕМ И ДИНАМИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА ПРИ ГРУППОВОМ ПОСТУПЛЕНИИ ЗАПРОСОВ НА ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ

Васильев Александр Протальонович,

аспирант кафедры сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, arvasil@yandex.ru

Степанов Сергей Николаевич,

д.т.н., профессор кафедры сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, stpnvsrg@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель с ожиданием и динамическим распределением канального ресурса при групповом поступлении запросов на передачу данных. Подобные принципы использования ресурса при передаче информации применяются в стандарте LTE (Long Term Evolution). В LTE он реализуется за счет диспетчеризации трафика в восходящем и нисходящем каналах. В математической модели учтены следующие особенности поступления и обслуживания запросов на передачу данных. Запросы на передачу данных поступают группами в соответствии с пуассоновской моделью. Число запросов в группе меняется от единицы до анализируемого в модели числа единиц ресурса и задается вероятностью, сумма которых равна единице. В модели имеется буфер. Объем передаваемого файла имеет экспоненциальное распределение со средним значением, выраженным в битах. В каждый момент времени для обслуживания всех имеющихся запросов на передачу данных используется весь имеющийся ресурс передачи информации. Число единиц ресурса занятых на обслуживании одного запроса зависит от общего числа запросов и распределяется в соответствии с положениями дисциплины Processor Sharing. Качество передачи файла оценивается долей потерянных запросов, средним временем передачи файла и средним числом запросов находящихся в системе на обслуживании. Перечисленные характеристики определяются через значения стационарных вероятностей числа запросов, находящихся на обслуживании. Для их оценки составлена система уравнений равновесия и разработан рекуррентный алгоритм ее решения. Среднее время передачи файла вычисляется с использованием формулы Литтла через значение среднего числа запросов, находящихся на обслуживании. Полученный алгоритм позволяет находить характеристики для любых значений входных параметров. Приведены численные результаты, иллюстрирующие зависимость характеристик от величины дисперсии разброса числа заявок в группе. Предложен алгоритм оценки требуемой пропускной способности канала, который может быть использован для оценки минимального ресурса передачи, необходимый для обслуживания известного объема трафика данных с заданным качеством, и оценки максимального объема трафика, который может быть передан имеющимся ресурсом с требуемыми показателями.

Ключевые слова: LTE; динамическое распределение; групповое поступление запросов; импульсный характер поступления данных; буфер.

Для цитирования: Васильев А. П., Степанов С. Н. Построение и анализ математической модели с ожиданием и динамическим распределением канального ресурса при групповом поступлении запросов на передачу данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 6-12.

Введение

Развитие и появление новых технологий передачи данных в сетях сотовой связи, а также разработка новых телекоммуникационных приложений приводит к необходимости более эффективного использования имеющегося канального ресурса. Стоит отметить, что канальный ресурс в сетях подвижной сотовой связи является ограниченным, поэтому для повышения скорости передачи информации необходимо разрабатывать модели с динамическим распределением ресурса. В сетях связи данные всегда буферизируются, так как допускаются задержки в передаче информации. Данный принцип используется в сетях LTE, буферизация пакетов данных осуществляется в нисходящем направлении. Для пользовательского оборудования UE (User Equipment), находящегося в режиме ожидания, буферизацию выполняет обслуживающий шлюз S-GW (Serving Gateway), рис. 1. Буферное хранение передаваемых потоков информации позволит улучшить характеристики качества обслуживания такие как, доля потерянных запросов на передачу данных, получаемая пропускная способность канала, среднее время обслуживания запроса на передачу файла. Математическая модель с динамическим распределением канального ресурса при групповом поступлении запросов на передачу данных рассматривалась в [1]. В данной работе эти результаты обобщены на случай наличия буфера.

Распределение ресурса передачи

Сформулируем предположения, необходимые для построения математической модели. Пусть C — скорость линии, выраженная в битах в секунду, r — скорость передачи информации, обеспечиваемая одной канальной единицей. Будем полагать, что значение C — делится нацело на r , и обозначим через $\nu = \frac{C}{r}$ скорость линии, выраженную в единицах канального ресурса. Этот ресурс используется потоком запросов на передачу данных со скоростью, изменяемой в соответствии с загрузкой линии. В модели

имеется ν каналов, которые обслуживают поступающий пуассоновский поток отдельных групп запросов на передачу данных интенсивности λ . Обозначим через F — средний объем передаваемого файла, выраженный в битах. Число места для ожидания ограничено емкостью буфера и равно w . Обозначим через T максимально допустимое время пребывания одного запроса на ожидании при передаче данных. Если после прошествии этого времени запрос не попал на обслуживание, то он покидает систему и считается потерянным. Будем предполагать, что величина T имеет экспоненциальное распределение с параметром σ [2].

Таким образом, в модели имеется ν каналов, которые обслуживают поступающий пуассоновский поток отдельных групп запросов на передачу данных интенсивности λ . С вероятностью f_k поступившая группа содержит k запросов на передачу файлов, $k = 1, 2, \dots, s$. Для удобства записи последующих формул будем считать, что $s = \nu + w$, тогда индекс k для f_k меняется от 1 до $\nu + w$. В силу сделанных предположений, поступившая группа запросов не бывает пустой, общее число запросов в группе не превосходит $\nu + w$, и выполняется соотношение $\sum_{k=1}^{\nu+w} f_k = 1$. Обозначим через b_m среднее число файлов, находящихся в одной группе. Значение b_m находится из выражения:

$$b_m = \sum_{k=1}^{\nu+w} f_k k. \quad (1)$$

Математическое описание модели

Обозначим через $S = ((i), i = 0, 1, \dots, \nu + w)$ пространство состояний исследуемой модели. Их изменение с течением времени описывается случайным процессом $r(t) = i(t)$, где $i(t)$ — число запросов на передачу файлов находящихся на обслуживании и ожидании в момент времени t . Графическая иллюстрация переходов $r(t)$ из состояния (i) показана на рис. 2.

Поскольку все случайные величины, используемые при построение модели имеют экспоненциальное распре-

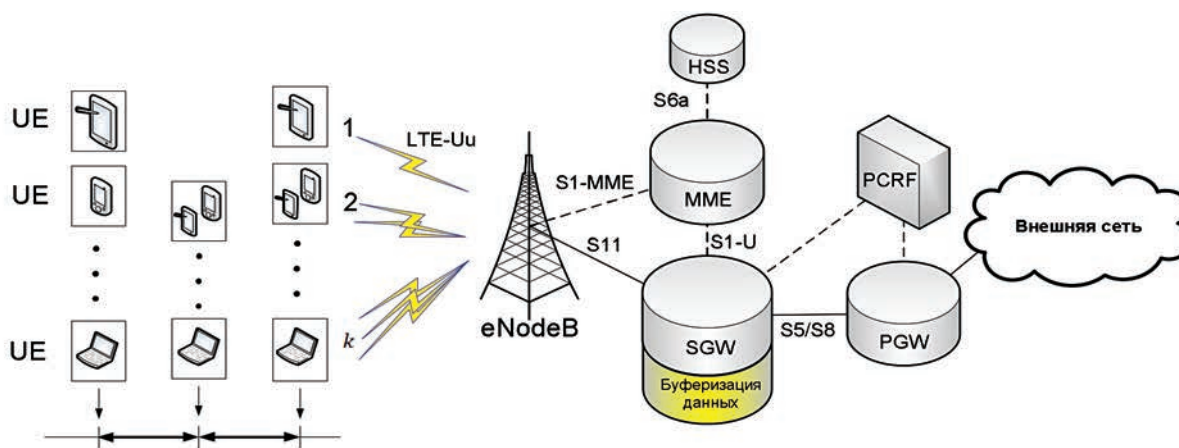


Рис. 1. Использование принципов буферизации и групповое поступление запросов в сети LTE

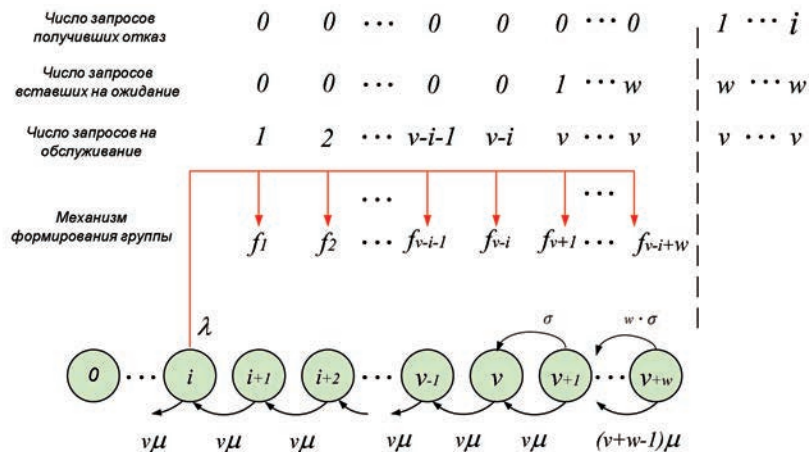


Рис. 2. Диаграмма переходов для случайного процесса $r(t)$

деление и не зависят друг от друга, то случайный процесс, описывающий функционирование модели обладает марковским свойством. Пусть $p(i)$ — стационарная вероятности состояния (i) . Она интерпретируется как доля времени пребывания системы в состоянии i запросами находящимися в состоянии обслуживания или ожидания передачи. Приведенная интерпретация позволяет определить, а затем и рассчитать основные показатели качества совместного обслуживания поступающих запросов. Поскольку число состояний конечно и из каждого можно попасть в любое другое за конечное число шагов, то для процесса $r(t)$ существует стационарный режим.

Будем предполагать, что объем передаваемого файла имеет экспоненциальное распределение со средним значением F , выраженным в битах. При использовании дисциплины PS (Processor Sharing) скорость линии делится по возможности поровну с учетом имеющейся канальной структуры. Обозначим через d -число запросов на передачу данных, находящихся на обслуживании. Пусть $x = \frac{v}{d}$ представляет из себя целую часть от деления v на d . В этом случае для обслуживания d запросов используется $v - xd$ макроканалов, каждый из которых имеет $x+1$ канальную единицу и $d(x+1)-v$ макроканалов имеющих x канальных единиц. Понятно, что все v канальных единиц заняты на обслуживание принятых d запросов на передачу файлов. Время обслуживания одного запроса с использованием одной канальной единицы имеет экспоненциальное распределение с параметром $\mu = \frac{r}{F}$. Таким образом, максимальное среднее время нахождения запроса на обслуживание равно $\frac{F}{r}$. Нетрудно проверить, что при принятой используемой процедуре распределения ресурса время до освобождения одного из i принятых запросов на передачу файлов имеет экспоненциальное распределение с параметром $v\mu$ [3].

Качество обслуживания поступающего запроса на передачу файла оценим средним временем передачи файла,

которое включает в себя время ожидания начала обслуживания. Значение этой характеристики определим с помощью формулы Литтла после вычисления среднего числа запросов, находящихся в системе.

Характеристики качества обслуживания

Доля потерянных запросов на передачу данных π_c представляет из себя отношение интенсивности потерянных запросов \wedge_b к интенсивности поступивших запросов \wedge и находится из равенства $\pi_c = \frac{\wedge_b}{\wedge}$. Интенсивность поступивших запросов \wedge определяется из соотношения $\wedge = \lambda b_m$. Найдем выражением для \wedge_b . Эту характеристику можно представить в виде $\wedge_b = \wedge_{b,1} + \wedge_{b,2}$, где $\wedge_{b,1}$ — интенсивность запросов, потерянных из-за нехватки свободных каналов и мест в буфере, а $\wedge_{b,2}$ — интенсивность потока запросов, потерянных из-за ограничения времени пребывания в буфере.

Найдем выражение для $\wedge_{b,1}$. Рассмотрим произвольное состояние i . Поступление группы, содержащей $v + w - i + 1$, $v + w - i + 2$, $v + w$ заявок, приведет к потере соответственно 1, 2, ..., i заявок. Среднее число запросов на передачу данных, потерянных в состоянии (i) , определяется как $f_{v+w-i+1} \cdot 1 + f_{v+w-i+2} \cdot 2 + \dots + f_{v+w} \cdot i$, и равно $\sum_{k=0}^{i-1} f_{v+w-k} (i-k)$.

Тогда выражение для $\wedge_{b,1}$ имеет вид:

$$\wedge_{b,1} = \lambda \sum_{i=1}^{v+w} p(i) \sum_{k=0}^{i-1} f_{v+w-k} (i-k). \quad (2)$$

Для оценки $\wedge_{b,2}$ получаем такое соотношение:

$$\wedge_{b,2} = \sigma \sum_{i=v}^{v+w} p(i) (i-v). \quad (3)$$

Итоговое выражение для \wedge_b выглядит следующим образом:

$$\wedge_b = \lambda \sum_{i=1}^{v+w} p(i) \sum_{k=0}^{i-1} f_{v+w-k} (i-k) + \sigma \sum_{i=v}^{v+w} p(i) (i-v). \quad (4)$$

Выражение для оценки π_c приобретает вид:

$$\pi_c = \frac{1}{\lambda b_m} (\lambda \sum_{i=1}^{v+w} p(i) \sum_{k=0}^{i-1} f_{v+w-k} (i-k) + \sigma \sum_{i=v}^{v+w} p(i) (i-v)). \quad (5)$$

Обозначим через $\beta = \lambda b_m F$ интенсивность предложенного графика, выраженную в битах в секунду. Потенциальная загрузка линии определяется безразмерным параметром $\rho = \frac{\beta}{C}$. Обозначим через W среднее время обработки запроса, которое включает в себя время ожидания в буфере и время на передачу файла. Обозначим через L среднее число запросов, находящихся в системе на обслуживании. Расчетное выражение для L имеет вид:

$$L = \sum_{i=0}^{v+w} p(i) i. \quad (6)$$

Среднее число запросов, находящихся на ожидании находится из равенства:

$$L_w = \sum_{i>v} p(i) (i-v). \quad (7)$$

Используя формулу Литтла и соотношение (2), находим выражение для оценки W :

$$W = \frac{L}{\lambda - \lambda_b} = \frac{L}{\lambda(1 - \pi_c)} = \frac{L}{\lambda b_m (1 - \pi_c)}. \quad (8)$$

Построим процедуру их оценки. Поскольку динамика изменения состояния числа передаваемых файлов описывается марковским случайным процессом, то введенные характеристики можно найти, если известны значения доли времени $p(i)$ пребывания модели в состоянии $s(i)$, $i = 0, 1, \dots, v + w$.

Формирование системы уравнений равновесия

Для вычисления значений $p(i)$ необходимо составить и решить систему уравнений статистического равновесия. При формировании системы уравнений равновесия необходимо просуммировать интенсивности наступления событий, которые выводят процесс $r(t)$ из произвольного состояния (i) , и приравнять к суммарной интенсивности перехода $r(t)$ в состояние (i) . Наличие интенсивностей переходов будет зависеть от числа запросов на передачу трафика данных, находящихся на обслуживании или ожидании в системе.

$$P(0) = P(1)v\mu,$$

$$P(1)(\lambda + v\mu) = P(0)\lambda f_1 + P(2)v\mu,$$

$$P(2)(\lambda + v\mu) = P(0)\lambda f_2 + P(1)\lambda f_1 + P(3)v\mu,$$

$$P(i)(\lambda + v\mu) = (P(0)f_i + P(1)f_{i-1} + \dots + P(i-1)f_1)\lambda + P(i+1)v\mu, \quad i = 1, 2, \dots, v-1, \quad (9)$$

$$P(v)(\lambda + v\mu) = (P(0)f_v + P(1)f_{v-1} + \dots + P(v-1)f_1)\lambda + P(v+1)(v\mu + \sigma),$$

$$P(v+1)(\lambda + v\mu + \sigma) = (P(0)f_{v+1} + P(1)f_v + \dots + P(v)f_1)\lambda + P(v+2)(v\mu + 2\sigma),$$

$$P(v+w-1)(\lambda + v\mu + (w-1)\sigma) = (P(0)f_{v+w-1} + P(1)f_{v+w-2} + \dots + P(v+w-2)f_1)\lambda + P(v+w)(v\mu + w\sigma),$$

$$P(v+w)(v\mu + w\sigma) = (P(0)f_{v+w} + P(1)(f_{v+w-1} + f_{v+w}) + \dots + P(v+w-1)(f_1 + f_2 + \dots + f_{v+w}))\lambda.$$

Для значений $P(i)$ выполняется условие нормировки:

$$\sum_{i=0}^{v+w} P(i) = 1.$$

Просуммируем (9) по i от 0 до $j-1$. После приведения подобных слагаемых получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \lambda \sum_{i=0}^{j-1} P(i) + v\mu \sum_{i=0}^{j-1} P(i) + \sigma \sum_{i=v}^{j-1} P(i) (i-v) I(i > v) = \\ & = \lambda \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{k=0}^{i-1} P(k) f_{i-k} + v\mu \sum_{i=0}^{j-1} P(i) + \\ & + \sigma \sum_{i=v}^j P(i) (i-v) I(i > v) \end{aligned}$$

где $I(\cdot)$ — индикаторная функция, определяемая соотношением:

$$I(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{если выполнено условие,} \\ & \text{сформулированное в скобках,} \\ 0, & \text{если это условие не выполнено.} \end{cases}$$

После приведения подобных членов получаем, рекурсивную формулу, связывающую последовательные значения $P(j)$, $j = 1, 2, \dots, v + w$:

$$P(j) = \frac{\lambda}{v\mu + (j-v) \cdot \sigma \cdot I(j > v)} \times \left(P(0) \sum_{i=j}^{v+w} f_i + P(1) \sum_{i=j-1}^{v+w} f_i + \dots + P(j-1) \sum_{i=1}^{v+w} f_i \right), \quad (10)$$

Алгоритм вычисления $P(j)$ состоит из следующих шагов. Положим значение $P(0) = 1$.

Для значения j , меняющихся последовательно от 1 до $v + w$, находим ненормированные вероятности $P(j)$, используя рекурсию

$$P(j) = \frac{\lambda}{v\mu + (j-v) \cdot \sigma \cdot I(j > v)} \times \left(P(0) \sum_{i=j}^{v+w} f_i + P(1) \sum_{i=j-1}^{v+w} f_i + \dots + P(j-1) \sum_{i=1}^{v+w} f_i \right),$$

Определяем нормировочную константу

$$N = \sum_{j=0}^{v+w} P(j).$$

Вычисляем нормированные вероятности $p(j)$ используя соотношение

$$p(j) = \frac{P(j)}{N}, j = 0, 1, \dots, v + w.$$

Таким образом, для оценки стационарных вероятностей $p(j)$ достаточно реализовать рекурсию (10). Полученный алгоритм позволяет вычислить характеристики качества обслуживания передаваемых данных для любых значений выходных параметров модели.

Рассчитанные результаты должны удовлетворять закону сохранения, связывающему интенсивности потоков заявок, поступающих и обслуженных в анализируемой системе каналов. Это соотношение можно получить из формулы Литтла или в результате преобразования системы уравнений равновесия (9). Получаем такой результат:

$$\lambda b_m = \lambda b_m \cdot \pi_A + (1 - p(0)) \cdot v \cdot \mu \quad (11)$$

Равенство (11) показывает, что интенсивность потока заявок на входе системы каналов (левая часть соотношения (11)) равна интенсивности потока заявок на выходе (первое слагаемое правой части соотношения (11) — интенсивность заблокированных заявок, второе слагаемое — интенсивность обслуженных заявок).

Численные результаты

Рассчитаем, используя выражения (1)–(11), показатели качества обслуживания поступающих запросов на передачу файлов в зависимости от значения D дисперсии числа поступающих запросов при фиксированном среднем значении $b_m = 6$. Скорость канала передачи $C = 10$ Мбит/с, скорость передачи информации, обеспечиваемая одной канальной единицей $r = 1$ Мбит/с, интенсивность поступления запросов на передачу данных $\lambda = 0,5$ групп запросов в секунду, средний объем пересылаемого файла $F = 2$ Мбит. Размер буфера примем равным $w = 5$. Параметры группового поступления запросов зададим соотношениями, представленными в табл.

Таблица

Вероятности группового поступления запросов

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	F_8	f_9	f_{10}	D
1	0	0	0	0	0,4	0,4	0	0,2	0	0	1,2
2	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	2
3	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	6
4	0,1	0,1	0,1	0	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0	7,8
5	0,1	0,2	0	0	0,1	0	0,2	0,1	0,2	0,1	9,8
6	0	0,4	0	0	0	0	0	0,4	0	0,2	11,2
7	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2	14
8	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,5	16

Полученные результаты представлены на рис. 3–9.

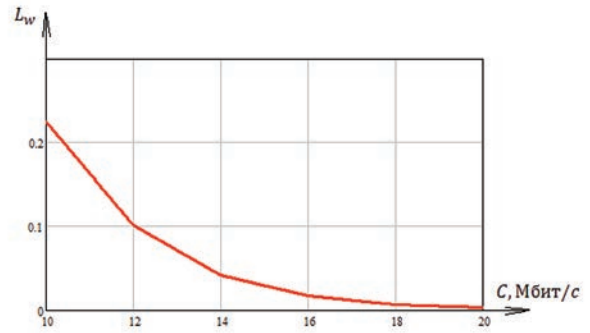


Рис. 3. Зависимость L_w от пропускной способности канала C при $D = 1,2$

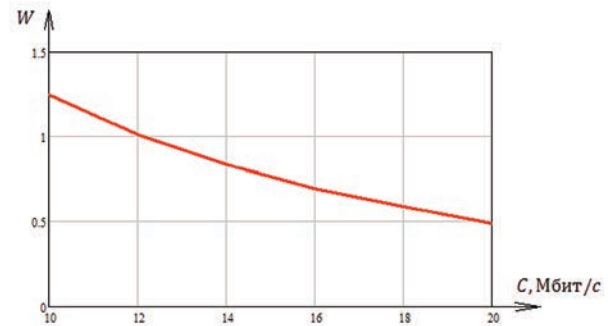


Рис. 4. Зависимость W от пропускной способности канала C при $D = 1,2$

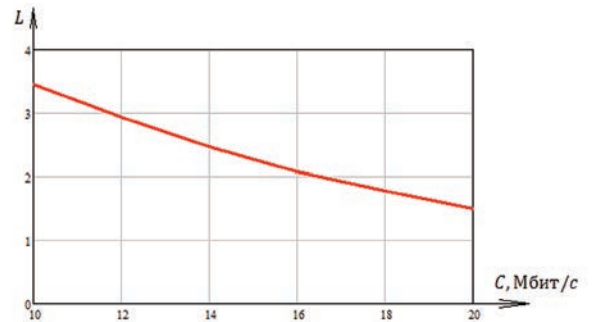


Рис. 5. Зависимость L от пропускной способности канала C при $D = 1,2$

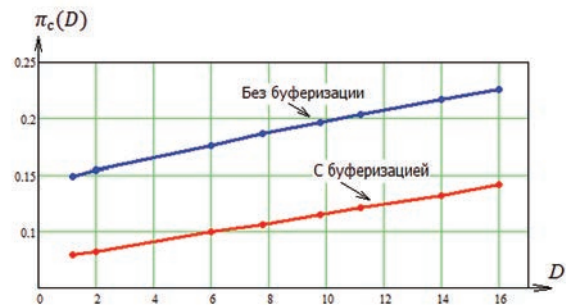


Рис. 6. Зависимость π_c от дисперсии числа поступающих запросов при фиксированном среднем значении выборки файлов

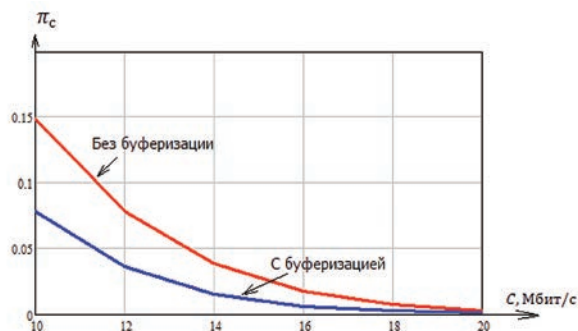


Рис. 7. Зависимость π_c от пропускной способности канала C

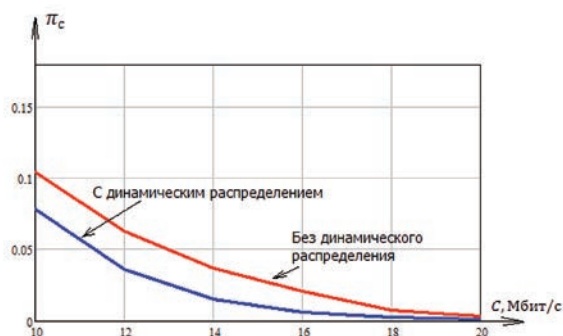


Рис. 8. Эффективность использования динамического распределения

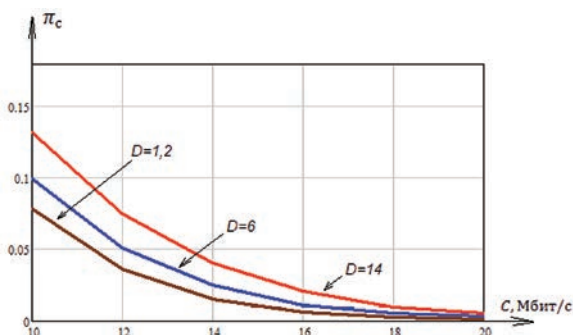


Рис. 9. Влияние дисперсии числа поступающих запросов

Полученные зависимости показывают эффективность использования буфера в моделях с динамическим распределением канального ресурса. Потери для модели с буферизацией данных вдвое меньше, рассчитанных ранее для модели без использования буфера [1–10]. В результате проведенного исследования можно выделить следующее:

Канальный ресурс эффективнее используется при динамическом распределении канального ресурса.

Дисперсия ухудшает показатели обслуживания входного потока, увеличивает потери, требует дополнительный ресурс (канальный ресурс, буфер).

При планировании, необходимо оценивать минимальный ресурс передачи, необходимый для обслуживания известного объема трафика данных с заданным качеством, и оценки мак-

симального объема трафика, который может быть передан имеющимся ресурсом с требуемыми показателями.

Заключение

В результате проведенного исследования построена математическая модель обслуживания эластичного трафика в нисходящей линии изолированной соты сети стандарта LTE с учетом группового поступления запросов и их буферизации; сформулированы определения характеристик качества обслуживания поступающих запросов на передачу файлов; построен рекурсивный алгоритм оценки значений $p(i)$; проведен численный анализ зависимости характеристик от особенностей формирования и обслуживания запросов и значений входных параметров; сформулированы рекомендации по практическому использованию полученных результатов, в частности, для оценки минимального ресурса передачи, необходимого для обслуживания известного объема трафика данных с заданным качеством, и оценки максимального объема трафика, который может быть передан имеющимся ресурсом с требуемыми показателями.

Литература

1. *Vasiliev A. P., Stepanov S. N.* The construction and analysis of mathematical models of a dynamic distribution channel resource for group requests of data transfer // T-Comm. 2016. Vol. 10. No.11. Pp. 55–59.
2. *Zhang Y. J., Letaief K. B.* Multi-user adaptive subcarrier and bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems // IEEE Transactions on Wireless Communications, Sep. 2004.
3. *Степанов С. Н.* Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М: Горячая линия — Телеком, 2015. 868 с.
4. *Bonald T., Virtamo J.* A recursive formula for multirate systems with elastic traffic // IEEE Communications Letters. 2005. Vol. 9. Pp. 753–755.
5. *Stasiak M., Glabowski M., Wisniewski A., Zwierzykowski P.* Modelling and dimensioning of mobile network: from GSM to LTE. John Wiley & Sons Ltd, 2011. 315 p.
6. *Степанов С. Н.* Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и данных. I // Автоматика и телемеханика. 2011. № 4. С. 121–132.
7. *Степанов С. Н.* Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и данных. II // Автоматика и телемеханика. 2011. № 5. С. 139–147.
8. *Степанов С. Н.* Модель обслуживания трафика сервисов реального времени и данных с динамически изменяемой скоростью передачи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 1. С. 18–33.
9. *Степанов С. Н., Пестерев А. А.* Разработка и анализ модели совместного обслуживания трафика реального времени и данных в сетях 3GPP // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 7. С. 122–125.
10. *Степанов С. Н., Романов А. М.* Моделирование особенностей обслуживания трафика реального времени от конечных групп пользователей и трафика данных с динамически изменяемой скоростью передачи на линиях доступа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 12. С. 91–94.

THE CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS WITH A DYNAMIC DISTRIBUTION CHANNEL RESOURCE FOR GROUP REQUESTS OF DATA TRANSFER AND BUFFER UTILIZATION

Aleksandr P. Vasiliev,

Moscow, Russia, apvasil@yandex.ru

Sergey N. Stepanov,

Moscow, Russia, apvasil@yandex.ru

ABSTRACT

The model of the dynamic distribution of channel resource for group requests of data transfer and buffer utilization is designed. The similar procedure is used in the standard LTE (Long Term Evolution). It is realized at the expense of traffic scheduling in uplink and downlink, the purpose of which is to equalize the quality of communication and overall system performance in LTE. The mathematical model takes into account the following features: group arrivals of requests of servicing, buffer utilization and the dependence of data transfer of link load. Markov process that describes the dynamic change of model states is constructed. The models performance measures are defined. Comparative analyses of the dependence of the main characteristics from the distribution of the requests in the group are constructed. The algorithm for estimation the required channel capacity is proposed. It can be used for estimation of the minimum transmission resource required to service a known amount of data traffic and maximum amount of traffic that can be transmitted by the available resource with the required quality.

Keywords: LTE; dynamic distribution; group arrivals; pulse mode of the data traffic; buffer.

References

1. Vasiliev A.P., Stepanov S.N. The construction and analysis of mathematical models of a dynamic distribution channel resource for group requests of data transfer. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No.11. Pp. 55-59.
2. Zhang Y.J., Letaief K.B. Multi-user adaptive subcarrier and bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Sep. 2004.
3. Stepanov S.N. *Teoriya teletrafika: kontsepsii, modeli, prilozheniya* [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 868 p. (In Russian)
4. Bonald T., Virtamo J. A recursive formula for multirate systems with elastic traffic. *IEEE Communications Letters*. 2005. Vol. 9. Pp. 753-755.
5. Stasiak M., Glabowski M., Wisniewski A., Zwierzykowski P. *Modelling and dimensioning of mobile network: from GSM to LTE*. John Wiley & Sons Ltd, 2011. 315 p.
6. Stepanov S.N. The model of joint servicing of real time traffic and data. I. *Automation and Remote Control*. 2011. No. 4. Pp.121-132. (In Russian)
7. Stepanov S.N. The model of joint servicing the real time traffic and data. II. *Automation and Remote Control*. 2011. No. 5. Pp. 139-147. (In Russian)
8. Stepanov S.N. The model of joint servicing the real time traffic and data with dynamic resource allocation. *Automation and Remote Control*. 2010. No. 1. Pp. 18-33. (In Russian)
9. Stepanov S.N., Pesterov A.A. Construction and analysis of the model of concurrent servicing real-time and data requests in 3GPP 3G systems. *T-Comm*. 2013. Vol. 7. No. 7. Pp. 122-125. (In Russian)
10. Stepanov S.N., Romanov A.M. Real-Time traffic service modeling specialities of a finite user group and data traffic with a dynamically changeable transmission speed on access lines. *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 12. Pp. 91-94. (In Russian)

Information about authors:

Vasiliev A.P., postgraduate student of department of communication networks and commutation systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics;
Stepanov S.N., PhD, professor of department of communication networks and commutation systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics.

For citation: Vasiliev A.P., Stepanov S.N. The construction and analysis of mathematical models with a dynamic distribution channel resource for group requests of data transfer and buffer utilization. *H&ES Research*. 2017. Vol.9. No. 4. Pp. 6-12. (In Russian)

22 НОЯБРЯ 2017

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

**III ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

nauka-i-asu.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

H&ES
RESEARCH

при информационной поддержке
научного журнала H&ES Research

nauka-i-asu.ru

konferencia_asu_vka@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИЗУАЛЬНОЙ СКРЫТНОСТИ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НИЖНЕГО ЭШЕЛОНА ОТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ВЕРХНЕГО ЭШЕЛОНА В УСЛОВИЯХ ГОМОГЕННОГО И ГЕТЕРОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АЭРОЗОЛЕМ

Абдулов Рауф Нусрат оглу,

к.т.н., научно-исследовательский институт Министерства оборонной промышленности
Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

Абдуллаев Новруз Алмамед оглу,

к.т.н., научно-исследовательский институт Министерства оборонной промышленности
Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

Асадов Хикмет Гамид оглу,

профессор, научно-исследовательский институт Аэрокосмической информатики,
г. Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Говоря о скрытности летательных объектов необходимо учесть функциональную инверсию таких свойств как «наблюдаемость» и «скрытность». При этом свойство наблюдаемости объектов подразумевает совместный анализ свойств как самого наблюдаемого объекта так и наблюдателя.

Показано, что скрытность летательных аппаратов можно классифицировать следующим образом: естественная скрытность, обеспечиваемая облаками, дымкой, аэрозолем и др. метеофакторами; искусственная скрытность, обеспечиваемая путем использования различных технологий (нанесение на поверхность летательного объекта светящихся материалов или модулируемых светоизлучателей).

Наиболее широко применяемым метеорологическим фактором, обеспечивающим скрытность является аэрозольные завесы, создаваемые путем генерирования аэрозольных облаков на определенной высоте атмосферы. При этом имеется в виду аэрозоль в различных его проявлениях, начиная от мелкодисперсного аэрозоля до частиц гигантских размеров, достигающих десятки микрометров. Важнейшей задачей обнаружения и идентификации различных воздушных и наземных объектов является устранение или компенсация влияния атмосферного аэрозоля, которое заключается как в искажении цветности, так и уменьшении отношения сигнал/шум. Рассмотрены вопросы обеспечения скрытности разведывательных беспилотных летательных аппаратов нижнего эшелона от летательных средств верхнего эшелона в условиях однородного и не однородного загрязнения атмосферы аэрозолем. Сформулирована и решена задача обеспечения визуальной скрытности беспилотных летательных аппаратов низкого эшелона от летательного аппарата верхнего эшелона в указанных условиях. Получены условия обеспечения визуальной скрытности беспилотных летательных аппаратов низкого эшелона от летательных аппаратов верхнего эшелона при однородном и неоднородном загрязнении атмосферы аэрозолем.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; атмосфера; визуальная скрытность; аэрозоль; изображение; математическая модель.

Для цитирования: *Абдулов Р.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г.* Обеспечение визуальной скрытности разведывательных беспилотных летательных аппаратов нижнего эшелона от летательных средств верхнего эшелона в условиях гомогенного и гетерогенного загрязнения атмосферы аэрозолем // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 14-21.

Необходимо отметить, что скрытность летательных аппаратов можно классифицировать следующим образом:

1. Естественная скрытность, обеспечиваемая облаками, дымкой, аэрозолями и др. метеофакторами.

2. Искусственная скрытность, обеспечиваемая путем использования различных технологий (нанесение на поверхность летательного объекта светящихся материалов или модулируемых светоизлучателей). Впервые искусственная скрытность была реализована в отношении бомбардировщика «Avenger» (США) и истребителя МИГ-21 (СССР) [1].

Вместе с тем, говоря о скрытности летательных объектов необходимо учесть функциональную инверсию таких свойств как «наблюдаемость» и «скрытность».

При этом свойство наблюдаемости объектов подразумевает совместный анализ свойств, как самого наблюдаемого объекта, так и наблюдателя. С учетом вышеуказанного вкратце рассмотрим следующие факторы, так или иначе влияющие на скрытность летательных объектов:

- естественные, метеорологические факторы;
- факторы и средства искусственной скрытности;
- возможности наблюдателя в устранении мешающих факторов.

Наиболее реальным применяемым метеорологическим фактором, обеспечивающим скрытность, является аэрозольные завесы, создаваемые путем мгновенного генерирования аэрозольных облаков на определенной высоте атмосферы [2].

В технике обеспечения скрытности различных объектов широко используется такое понятие как «инфракрасная сигнатура» [3]. Согласно [4], для уменьшения видимости самолетов используют определенные шаблонные штрих рисунки с изменяемой пространственной частотой. При этом видимость самолета зависит от размера, формы, расстояния, цвета, атмосферных условий и т.д. Как отмечается в работе [5], для построения системы уменьшения визуальной сигнатуры беспилотных летательных аппаратов широко используются оптические адаптивные материалы. К таким материалам относятся электролюминесцентные листы управляемые напряжением 150 В и частотой до 6 кГц.

Согласно работе [6], использование оптических адаптивных электролюминесцентных материалов в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) позволяет уменьшить визуальное поперечное сечение дронов от 4200 см² до 1,8 см² при высоте полета 100 м. Как отмечается в работах [7–8], одним из основных факторов, воздействующих на инфракрасную сигнатуру летательных аппаратов является атмосфера, практически поглощающая ИК радиацию на полосах длин волн 3–5 мкм и 8–14 мкм.

Что касается возможностей наблюдателя в устранении таких мешающих факторов, как атмосферный аэрозоль, то в работе [9] предложено использовать шумоподавляющий фильтр, а в работе [10] предложено достичь максимальной видимости по трассе прохождения оптических лучей. В работе [11] используется комбинирование «темного» канала и локального усиления контраста для удаления искажения цветности. Были предложены и другие методы

[12–14], основанные на фильтрации сигнала и использовании сигнала, поступающего с «темного» канала. Как отмечается в работе [12], совместное решение таких проблем, как зашумление сигнала, неравномерное свечение объекта и учет сигнала «темного канала» позволяет улучшить качество получаемых изображений в реальных условиях функционирования изображающих систем. Согласно работе [13], чем яснее исходное бортовое изображение, тем слабее сигнал «темного канала» и для неискаженного дымкой изображения сигнал темного канала равен нулю. Как показано в работе [14], согласно многим алгоритмам техники машинного зрения входным изображением камеры является излучение с исследуемой сцены. Согласно работе [14], в большинстве изображениях наземных объектов так называемые «темные» пиксели часто имеют очень низкую интенсивность по крайней мере по одному цвету (R , G или B). Под воздействием атмосферной дымки интенсивности этих пикселей в основном поддерживаются за счет свечения воздуха. Такое предположение позволяет на практике получить улучшенные по качеству изображения.

В работе [15], анализируется работа изображающей системы, установленной на БПЛА. В этой работе предложен способ исключения шумовой компоненты адаптивным образом, в зависимости от длины волны.

Распределение радиационных потоков в ходе работы бортовой изображающей системы показана на рис. 1.

Математическая модель формирования изображения с помощью БПЛА имеет следующий вид:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_1(\lambda) \cdot T(\lambda) + \Phi_A(\lambda) \cdot (1 - T(\lambda)) \quad (1)$$

где: $\Phi(\lambda)$ — поток оптического излучения на входе сенсора БПЛА;

$$\Phi_1(\lambda) = \Phi_{sun}(\lambda) + \Phi_{sky}(\lambda) \quad (2)$$

где: $\Phi_1(\lambda)$ — поток оптического излучения, исходящего от объекта; $\Phi_A(\lambda)$ — поток излучения атмосферы; $T(\lambda)$ — пропускание атмосферы; $\Phi_{sun}(\lambda)$ — поток излучения Солнца; $\Phi_{sky}(\lambda)$ — поток излучения неба.

В уравнении (1) $\Phi_1(\lambda) \cdot T(\lambda)$ представляет компоненту, подвергнувшуюся прямому ослаблению; $\Phi_A(\lambda) \cdot (1 - T(\lambda))$ — представляет собой компоненту, выражающую свечение воздуха, т.е. результат рассеяния света аэрозолями в атмосфере.

Таким образом, в классическом случае проблема устранения влияния аэрозоля заключается в восстановлении $\Phi_1(\lambda)$, используя данные об $\Phi(\lambda)$, $T(\lambda)$ и $\Phi_A(\lambda)$ [15].

Согласно [14], для гомогенной атмосферы

$$T(\lambda) = e^{-\beta \cdot d} \quad (3)$$

где: β — коэффициент рассеяния; d — расстояние до изучаемой сцены.

Целью настоящей статьи является исследование возможности обеспечения скрытности беспилотных летательных средств нижнего эшелона от средств визуального наблюдения летательных средств верхнего эшелона. Рассматривается сценарий, когда эти летательные средства принадлежат конфликтующим сторонам и верхний летательный аппарат одной стороны не должен наблюдать за

нижним летательным аппаратом другой стороны. Предполагается, что летательный аппарат нижнего эшелона осуществляет разведку, а летательный аппарат другой стороны осуществляет охрану своей территории.

Схематическое представление визуального контроля деятельности БПЛА 2 с помощью БПЛА 1 показано на рис. 2.

Задача исследования заключается в следующем. Для обеспечения скрытности БПЛА 2 его верхняя поверхность

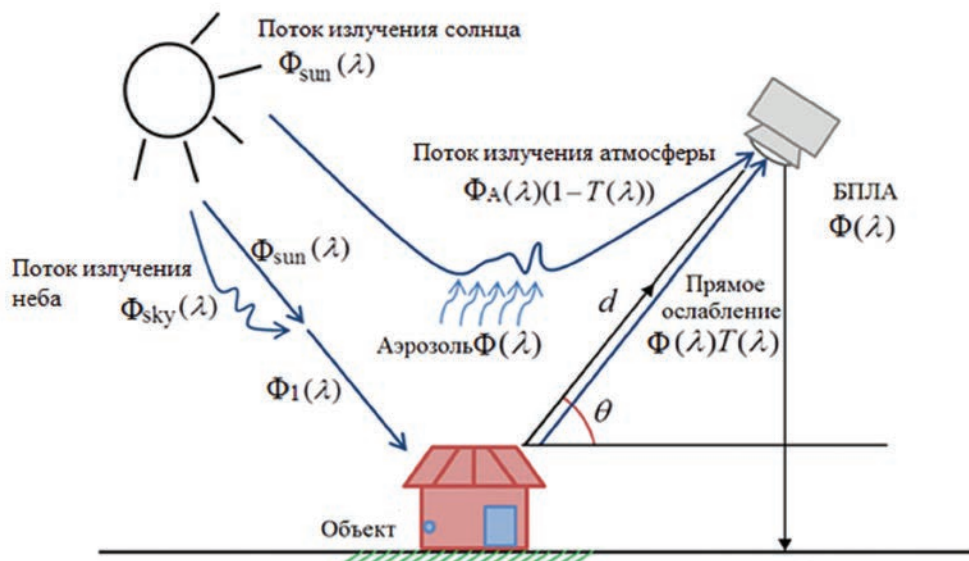


Рис. 1. Модельное представление системы формирования изображений на базе БПЛА, размещенной в загрязненной аэрозолем атмосфере. $\Phi_{sun}(\lambda)$ — поток излучения Солнца; $\Phi_{sky}(\lambda)$ — поток излучения неба, т.е. свет, рассеянный в атмосфере [15]

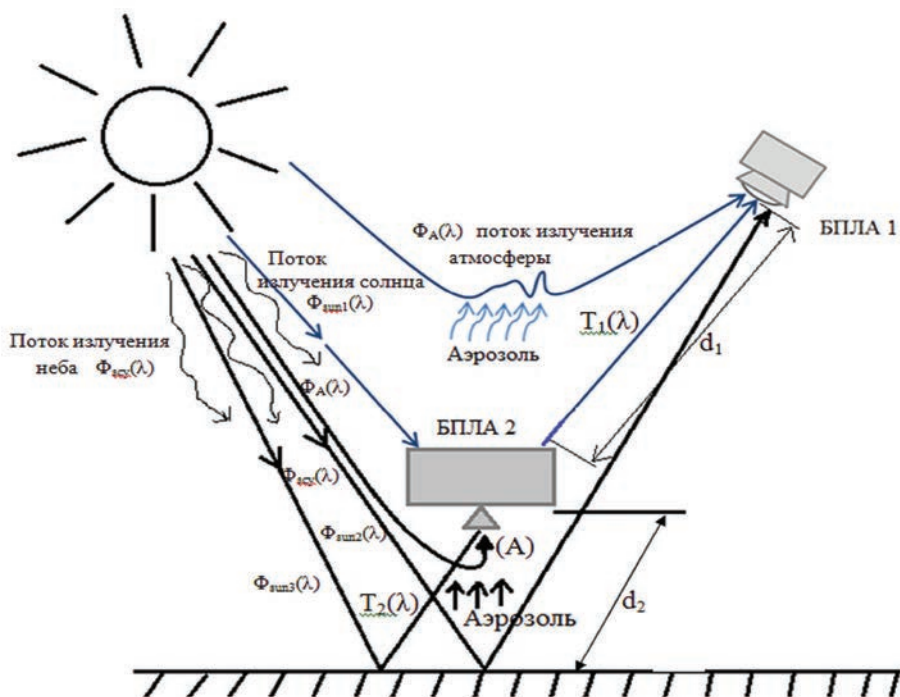


Рис. 2. Схематическое представление двухэшелонного полета БПЛА 1 и БПЛА 2, где БПЛА 1 работает в режиме поиска БПЛА 2. Принятые обозначения: $T_1(\lambda)$; $T_2(\lambda)$ — пропускание атмосферы; $\Phi_{sun1}(\lambda)$, $\Phi_{sun2}(\lambda)$, $\Phi_{sun3}(\lambda)$ — поток прямого солнечного излучения; $\Phi_{sky1}(\lambda)$, $\Phi_{sky2}(\lambda)$, $\Phi_{sky3}(\lambda)$ — поток излучения неба; $\Phi_A(\lambda)$ — поток излучения атмосферы

покрывается специальным электрохромным материалом, чтобы летательный аппарат верхнего эшелона не заметил его. Следует вычислить то излучение на верхней поверхности БПЛА 2, которое могло бы обеспечить его скрытность от БПЛА 1.

В случае наблюдения БПЛА 1 нижнего летательного аппарата сигнал, формируемый на выходе сенсора БПЛА 1 в соответствии с (1) определим как

$$\Phi_{1p}(\lambda) = T_1(\lambda) \cdot \Phi_x(\lambda) + (1 - T_1) \Phi_A(\lambda) \quad (4)$$

где: $T_1(\lambda)$ — пропускание атмосферы на трассе длиной d_1 ; $\Phi_x(\lambda)$ — поток излучения поступающего с верхней поверхности БПЛА 2; $\Phi_A(\lambda)$ — поток излучения атмосферы.

В идеальном случае, в случае отсутствия БПЛА 2 сигнал на выходе БПЛА 1 можно было бы вычислить по формуле

$$\Phi_{1.сф}(\lambda) = (T_1(\lambda) + T_2(\lambda)) \cdot \Phi_1(\lambda) + (1 - (T_1(\lambda) + T_2(\lambda))) \cdot \Phi_A(\lambda) \quad (5)$$

где: $\Phi_1(\lambda)$ — поток излучения наземного объекта; $T_2(\lambda)$ — пропускание атмосферы на трассе длиной d_2 .

В целях скрытности БПЛА 2 $\Phi_x(\lambda)$ следует сформировать таким образом, чтобы удовлетворилось условие

$$\Phi_{1p}(\lambda) = \Phi_{1.ид}(\lambda) \quad (6)$$

С учетом выражений (4) — (6) получаем

$$\Phi_x(\lambda) = \Phi_1(\lambda) \left(1 + \frac{T_2(\lambda)}{T_1(\lambda)} \right) - \Phi_A(\lambda) \left(\frac{T_2(\lambda)}{T_1(\lambda)} \right) \quad (7)$$

Для исключения явной зависимости $\Phi_x(\lambda)$ от показателя $\Phi_A(\lambda)$, запишем уравнение, аналогичное выражению (1) для БПЛА 2.

$$\Phi_2(\lambda) = \Phi_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda) + (1 - T_2(\lambda)) \Phi_A(\lambda) \quad (8)$$

Из выражения (8) находим

$$\Phi_A(\lambda) = \frac{\Phi_2(\lambda) - T_2(\lambda) \cdot \Phi_1(\lambda)}{1 - T_2(\lambda)} \quad (9)$$

С учетом выражений (7) и (9) получим

$$\Phi_x(\lambda) = \Phi_1(\lambda) \left(1 + \frac{T_2(\lambda)}{T_1(\lambda)} \right) - \left(\frac{\Phi_2(\lambda) - T_2(\lambda) \cdot \Phi_1(\lambda)}{1 - T_2(\lambda)} \right) \cdot \frac{T_2(\lambda)}{T_1(\lambda)} \quad (10)$$

Таким образом, для обеспечения скрытности БПЛА 2 излучение с верхней поверхности БПЛА 2 должно быть сформировано с учетом выражения (7).

Как видно из выражения (10) при $T_2(\lambda) = 0$, т.е. при отсутствии БПЛА 2 получим $\Phi_x(\lambda) = \Phi_1(\lambda)$.

С учетом выражений (3) и (10) окончательно получаем

$$\Phi_x(\lambda) = \Phi_1(\lambda) \left[1 + e^{-\beta(d_2 - d_1)} \right] - \left[\frac{\Phi_2(\lambda) - \Phi_1(\lambda) \cdot e^{-\beta d_2}}{1 - e^{-\beta d_2}} \right] \cdot e^{\beta(d_2 - d_1)} \quad (11)$$

Согласно выражению (11) при формировании излучения $\Phi_x(\lambda)$ с верхней поверхности БПЛА 2 с целью его скрытности от БПЛА 1 должны быть учтены такие показатели как $\Phi_1(\lambda)$, β , d_2 , d_1 , $\Phi_2(\lambda)$.

Следовательно, для обеспечения скрытности БПЛА нижнего эшелона от БПЛА верхнего эшелона на верхней поверхности БПЛА нижнего эшелона должно быть сформировано излучение с учетом величин четырех групп факторов:

1. Геометрические факторы: d_2 и d_1 ;
2. Поток излучения Солнца $\Phi_1(\lambda)$;
3. Сигнальный показатель ($\Phi_2(\lambda)$ — выходной сигнал на выходе сенсора БПЛА 2);
4. Атмосферный показатель (β — коэффициент рассеяния аэрозоля и дымки).

При этом, БПЛА 2 должен быть обеспечен координатами БПЛА 2 для вычисления координат участка поверхности Земли, определяемого пересечением зон «БПЛА 1 — БПЛА 2» и поверхности Земли. Сенсоры, установленные на БПЛА 2 в этом случае должны быть нацелены на этот участок при формировании сигнала g_2 . Выполнение вышеуказанных условий может обеспечить скрытное функционирование БПЛА 2 в условиях обнаружения внешнего визуального контроля.

Отметим, что основным недостаток вышеизложенного метода обеспечения визуальной скрытности заключается в невозможности достижения желаемого эффекта при наличии двух и более летательных аппаратов, синхронно осуществляющих поиск БПЛА нижнего эшелона. В случае возможности обнаружения такого контроля БПЛА 2 должен синтезировать на выходе своего сенсора среднестатистический сигнал, т.е. БПЛА должен находиться над максимальной гомогенной зоной земной поверхности.

Рассмотрим вышеизложенную задачу обеспечения скрытности БПЛА 2 от БПЛА 1 для случая неомогенной атмосферы (рис. 3).

Задача исследования заключается в следующем. Для обеспечения скрытности БПЛА 2 его верхняя поверхность покрывается специальным электрохромным материалом, чтобы летательный аппарат верхнего эшелона не заметил его. Следует вычислить то излучение на верхней поверхности БПЛА 2, которое могло бы обеспечить его скрытность от БПЛА 1.

В случае наблюдения верхним БПЛА 1 нижнего летательного аппарата сигнал формируемый на выходе сенсора БПЛА 1 в соответствии с (1) определим как

$$g_{1p} = T_1 \cdot I_x + (1 - T_1) A \quad (12)$$

где: $T_1 = e^{-\sigma_1(\lambda)d_1}$

где: T_1 — пропускание атмосферы на трассе длиной d_1 ; I_x — интенсивность радиации поступающей с верхней поверхности БПЛА 2; A — излучение воздуха.

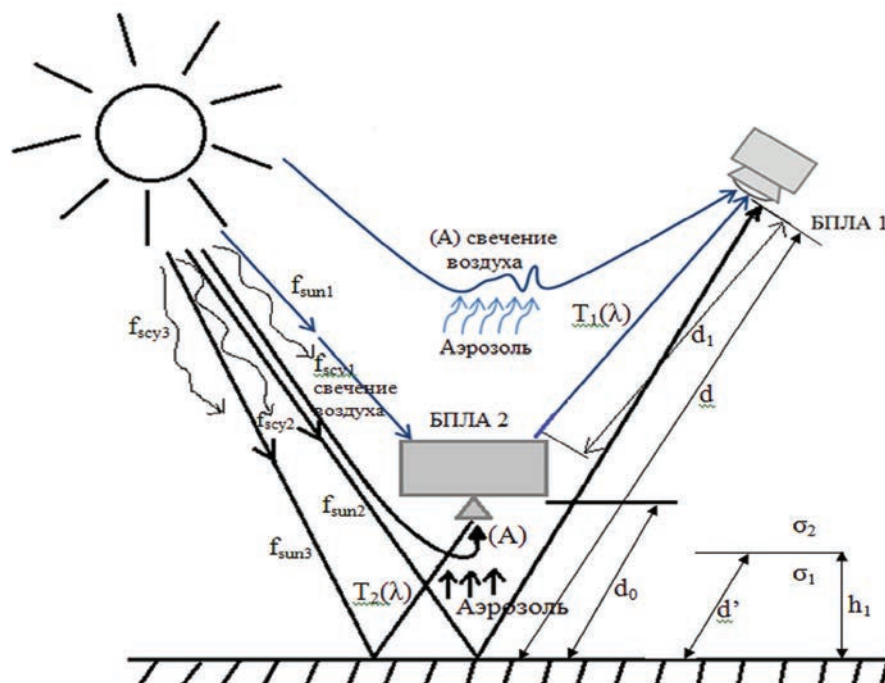


Рис. 3. Схематическое представление двухэшелонного полета БПЛА 1 и БПЛА 2, где БПЛА 1 работает в режиме поиска БПЛА 2. Принятые обозначения: $T_1(\lambda)$; $T_2(\lambda)$ — пропускание атмосферы; f_{sun1} , f_{sun2} , f_{sun3} — прямой солнечный свет; f_{sey1} , f_{sey2} , f_{sey3} — рассеянный солнечный свет; A — свечение воздуха из-за рассеяния света аэрозолем и дымкой; σ_1 — коэффициент рассеяния в зоне аэрозольной завесы; σ_2 — коэффициент рассеяния вне зоны аэрозольной завесы

В идеальном случае, в случае отсутствия БПЛА 2 сигнал на выходе БПЛА 1 можно было бы вычислить по формуле

$$g_{1.84} = I_1 \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d' - \sigma_2(\lambda)(d-d')} \times A [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d}] \quad (13)$$

где: I_1 — излучение с объекта, находящегося на поверхности Земли; d — расстояние хода лучей между БПЛА1 и земным объектом; d' — расстояние хода луча в зоне с коэффициентом рассеяния σ_1 .

В целях скрытности БПЛА 2 I_x следует сформировать таким образом, чтобы удовлетворилось условие

$$g_{1.p} = g_{1.ид} \quad (14)$$

С учетом выражений (12) — (14) получаем

$$I_x = (I_1 \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d' - \sigma_2(\lambda)(d-d')} + A [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d}] - (1 - e^{-\sigma_2(\lambda)d'}) A) / e^{-\sigma_2(\lambda)d_1} \quad (15)$$

где: d_1 — расстояние между двумя БПЛА.

Для исключения явной зависимости I_x от показателя A , запишем уравнение, аналогичное выражению (1) для БПЛА 2.

$$g_2 = I_1 \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(d_0-d_1)} + A(\lambda) [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d_0}] \quad (16)$$

где: d_0 — расстояние между БПЛА 2 и наземным объектом.

Из выражения (16) находим

$$A = \frac{g_2 - I_1 \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(d_0-d_1)}}{1 - e^{-\sigma_2(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d_0}} \quad (17)$$

С учетом выражений (15) и (17) получим

$$I_x = \frac{I_1 \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(d_0-d_1)}}{e^{-\sigma_2(\lambda)d_1}} + \left[\frac{g_2 - I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(d_0-d_1)}}{1 - e^{-\sigma_2(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d_0}} \right] \times \left[\frac{-e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)d} - e^{-\sigma_2(\lambda)d_1}}{e^{-\sigma_2(\lambda)d_1}} \right] \quad (18)$$

Таким образом, для обеспечения скрытности БПЛА 2 излучение с верхней поверхности БПЛА 2 должно быть сформировано с учетом выражения (18).

Как видно из выражения (18) при формировании излучения I_x с верхней поверхности БПЛА 2 с целью его скрытности от БПЛА 1 следует учесть такие показатели как I_1 , σ_1 , d' , σ_2 , d , d_0 .

Следовательно, для обеспечения скрытности БПЛА нижнего эшелона от БПЛА верхнего эталона на верхней поверхности БПЛА нижнего эшелона должно быть сформировано излучение с учетом величин четырех групп факторов:

1. Геометрические факторы: d , d_0 , d' ;

2. Показатели излучения Солнца (I_1);
3. Сигнальный показатель (g_2 — выходной сигнал на выходе сенсора БПЛА 2);
4. Атмосферный показатель (σ — коэффициент рассеяния аэрозоля и дымки).

При этом, БПЛА 2 должен быть обеспечен координатами БПЛА 1 для вычисления координат участка поверхности Земли, определяемого пересечением зон «БПЛА 1 — БПЛА 2» и поверхности Земли. Сенсоры, установленные на БПЛА 2 в этом случае должны быть нацелены на этот участок при формировании сигнала g_2 . Выполнение вышеуказанных условий может обеспечить скрытное функционирование БПЛА 2 в условиях обнаружения внешнего визуального контроля.

Отметим, что основной недостаток вышеизложенного метода обеспечения визуальной скрытности заключается в невозможности достижения желаемого эффекта при наличии двух и более летательных аппаратов, синхронно осуществляющих поиск БПЛА нижнего эшелона. В этом случае БПЛА 2 должен синтезировать среднестатистическое фоновое излучение и БПЛА 2 должен находиться над максимально гомогенной зоной земной поверхности.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Сформулирована общая задача обеспечения визуальной скрытности БПЛА низкого эшелона от летательного аппарата верхнего эшелона при наличии аэрозольной завесы над разведываемыми наземными объектами.
2. Получены условия обеспечения визуальной скрытности БПЛА низкого эшелона от летательных аппаратов верхнего эшелона при наличии аэрозольной завесы над наземными объектами.
3. Сформулирована общая задача обеспечения визуальной скрытности БПЛА низкого эшелона от летательного аппарата верхнего эшелона.
4. Получены условия обеспечения визуальной скрытности БПЛА низкого эшелона от летательных аппаратов верхнего эшелона.

Литература

1. *Barrett R., Melkert J.* UAV visual signature suppression via adaptive materials. SPIE Paper No. 5762–15. Presented at the Society of Photo — Optical Instrumentation Engineers Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California 6–10 March 2005.
2. *Romana Rao J. V.* Introduction to camouflage and deception. Defence Research & Development organisation Ministry

of defence. New Delhi — 110011, 1999. URL: http://drdo.gov.in/drdo/pub/monographs/Introduction/camouflage_new.pdf

3. *Macheret J., Teichman J., Kraid R.* Conceptual Design of Low Signature High — Endurance Hybrid — Electric UAV. Report date November 2011, IDA Document NS D-4496 Log: H11–001789. Institute for Defense Analyses, 4850 Mark Center Drive, Alexandria, VA 22311–1882.

4. *Watson A., Ramires C. V., Salud E.* Predicting visibility of Aircraft. Plos.one, May 2009. Vol. 4. Issue 5. Pp. 1–16. URL: www.plosone.org

5. *Barret R.* Hypermanoeuvrability and visual cloaking: new adaptive aerostructures Technologies for UAVs. The Aeronautical Journal. June 2010. Paper No.3369.

6. *Barret R., Melkert J.* UAV visual signature suppression via adaptive materials. Downloaded from SPIE Digital Library on 21 May 2010 tp 131.180.130.114. URL: <http://spiedl.org/terms>

7. *Rao G. A., Mahulikar S. P.* Effect of Atmospheric Transmission and Radiance on Aircraft Infrared Signatures. Journal of Aircraft. Vol.42. No. July-August 2005. Pp. 1040–1054.

8. *Абдулов П. Н., Абдуллаев Н. А., Асадов Х. Г.* Математическая модель обнаружения нагретых скоростных мало-размерных объектов в ИК диапазоне. Специальная техника. 2017. № 2. С. 7–11.

9. *Xie B., Guo F., Cai Z.* Universal strategy for surveillance video defogging. Opt. Eng. 2012. No. 51. Pp. 1–7.

10. *Gao R., Fan X., Zhang J., Luo Z.* Haze filtering with aerial perspective. In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Orland, FL, USA, 30 September 2012. Pp. 989–992.

11. *Kil T., Lee S., Cho N.* A dehazing algorithm using dark channel prior and contrast enhancement. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver, BC, Canada, 26–31 May 2013. Pp. 2484–2487.

12. *Singh Y., Goyal E. R.* Haze removal in color images using hybrid dark channel prior and bilateral filter. URL: <http://www.ijritcc.org/download/1420774457.pdf>

13. *Pan J., Sun D., Pfister H., Yang M. H.* Blind image deblurring using dark channel prior. URL: <https://veg.seas.harvard.edu/publications/blind-image-deblurring-using-dark-channel-prior>

14. *He K., Sun J., Tang X.* Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. December 2011. Vol. 33. No. 12.

15. *Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J.* Wave-length — Adaptive dehazing using histogram merging — based classification for UAV images. Sensors 2015. No. 15. Pp. 6633–6651; doi:10.3390/s150306633.

QUESTIONS ON PROVIDING FOR VISUAL RETICENCE OF RECONNAISSANCE UAV OF LOWER ECHELON FROM FLYING OBJECTS OF HIGHER ECHELON

Abdulov Rauf Nusrat oglu,

Baku, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

Abdullayev Novruz Alammad oglu,

Baku, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

Asadov Hikmet Hamid oglu,

Baku, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

ABSTRACT

While speaking about reticence of flying object the functional inversion of such notions as visibility and reticence should be taken into account. At the same time the visibility of the objects does mean joint analysis of properties of both the observed object and observer itself. It is stated that the reticence of flying objects can be classified as follows:

natural reticence supported by clouds, haze, aerosols and other meteorological factors;

artificial reticence, supported by various technologies: using illuminating cover on surface of flying objects or utilization of illuminated light emitters.

Most widely used meteorological factor, providing for reticence is aerosol clouds formed by generation of aerosol particles at some height of atmosphere. It does mean utilization of broad scale of aerosol particles - from nanoparticles up to gigantic particles by size of tens micrometers. The most significant task of detection and identification of various flying and ground objects is removal or compensation of effect of atmospheric aerosol, that is distortion of colors and decrease of signal/noise ratio. In the paper the questions on reticence of reconnaissance drones of lower echelon from the flying objects of higher echelon in conditions of homogenous and heterogeneous pollution of atmosphere by aerosol are considered. The task on providing for visual reticence of UAV of lower echelon from flying objects of higher echelon is formulated and solved. The conditions of realization of visual reticence of UAV of lower echelon from flying objects of higher echelon are derived.

Keywords: UAV; atmosphere; visual reticence; aerosol; image; mathematical model.

References

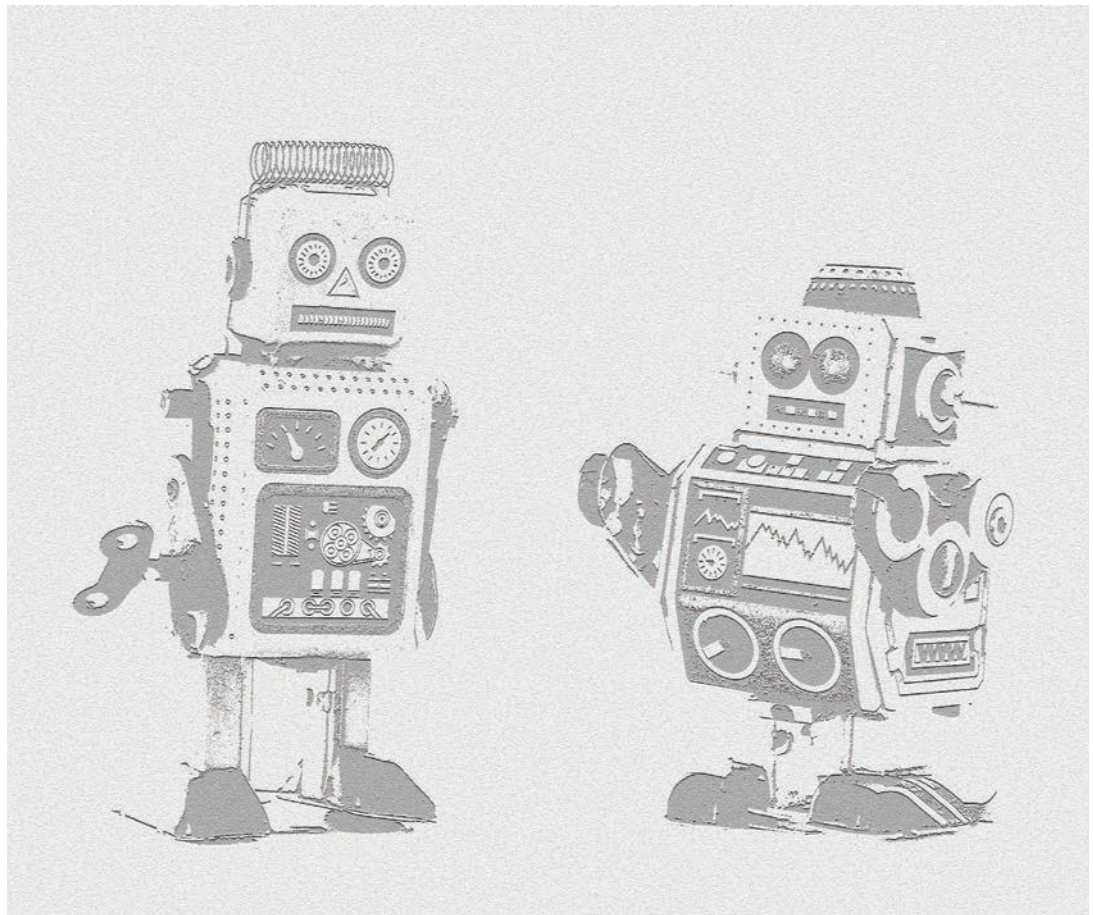
1. Barrett R., Melkert J. UAV visual signature suppression via adaptive materials. SPIE Paper No. 5762-15. Presented at the Society of Photo - Optical Instrumentation Engineers Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California 6-10 March 2005.
2. Romana Rao J.V. Introduction to camouflage and deception. Defence Research & Development organisation Ministry of defence. New Delhi - 110 011, 1999. URL: http://drdo.gov.in/drdo/pub/monographs/Introduction/camouflage_new.pdf (date of access 13.07.2017)
3. Macheret J., Teichman J., Kraid R. Conceptual Design of Low Signature High - Endurance Hybrid-Electric UAV. Report date November 2011, IDA Document NS D-4496 Log:H11-001789. Institute for Defense Analyses, 4850 Mark Center Drive, Alexandria, VA 22311-1882.
4. Watson A., Ramires C.V., Salud E. Predicting visibility of Aircraft. *Plos. One*. 2009. Vol. 4. Issue 5. Pp. 1-16. URL: www.plosone.org.
5. Barret R. Hypermanoeuvrability and visual cloaking: new adaptive aerostructures Technologies for UAVs. *The Aeronautical Journal*. June 2010. Paper No. 3369.
6. Barret R., Melkert J. UAV visual signature suppression via adaptive materials. Downloaded from SPIE Digital Library on 21 May 2010 tp 131.180.130.114. URL: <http://spiedl.org/terms> (date of access 13.07.2017)
7. Rao G.A., Mahulikar S.P. Effect of Atmospheric Transmission and Radiance on Aircraft Infrared Signatures. *Journal of Aircraft*. Vol. 42. Pp. 1040-1054.
8. Abdulov R.N., Abdullaev N.A., Asadov Kh.G. Matematicheskaya model' obnaruzheniya nagretykh skorostnykh malorazmernykh ob"ektov v IK diapazone. [Mathematical model of the heated high-speed detection of small objects in the infrared range]. *Spetsial'naya tekhnika* [Специальная техника]. 2017. No. 2. Pp. 7-11. (In Russian)

9. Xie B., Guo F., Cai Z. Universal strategy for surveillance video defogging. *Opt. Eng.* 2012. No. 51. Pp. 1-7.
10. Gao R., Fan X., Zhang J., Luo Z. Haze filtering with aerial perspective. In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Orland, FL, USA, 30 September 2012. Pp. 989-992.
11. Kil T., Lee S., Cho N. A dehazing algorithm using dark channel prior and contrast enhancement. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver, BC, Canada, 26-31 May 2013. Pp. 2484-2487.
12. Singh Y., Goyal E. R. Haze removal in color images using hybrid dark channel prior and bilateral filter. URL: <http://www.ijritcc.org/download/1420774457.pdf> (date of access 02.07.2017)
13. Pan J., Sun D., Pfister H., Yang M.H. Blind image deblurring using dark channel prior. URL: <https://vcg.seas.harvard.edu/publications/blind-image-deblurring-using-dark-channel-prior> (date of access 02.07.2017)
14. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence.* 2011. Vol. 33. No. 12.
15. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wavelength - Adaptive dehazing using histogram merging-based classification for UAV images. *Sensors.* 2015. No. 15. Pp. 6633-6651. Doi:10.3390/s150306633.

Information about authors:

Abdulov R. N., PhD, Research Institute of Defence Industry of Azerbaijan Republic;
Abdullayev N. A., PhD, Research Institute of Defence Industry of Azerbaijan Republic;
Asadov H. H., professor, Research Institute of Aerospace Informatics.

For citation: Abdulov R. N., Abdullayev N. A., Asadov H. H. Questions on providing for visual reconnaissance UAV of lower echelon from flying objects of higher echelon. *H&ES Research.* 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 14-21. (In Russian)



ТЕПЛОВИЗУАЛЬНЫЙ МЕТОД ВЫСОТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ДРОНОВ С ЭЛЕКТРОННО-ЦВЕТОВЫМ КАМУФЛИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ

Пашаев Намик Мухтар оглы,

к.т.н., директор научно-исследовательского
института аэрокосмической информатики,
г. Баку, Азербайджан, pnm@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Обнаружение и наблюдение за беспилотными летательными аппаратами может быть осуществлено с помощью средств инфракрасного слежения, акустического прислушивания и радарного сопровождения, а также визуально. Вместе с тем, цветное камуфлирование дронов может значительно снизить эффективность визуального метода их обнаружения и в этом случае целесообразно применить другой более доступный метод – метод теплового обнаружения. Следует отметить, что большое разнообразие инфракрасных сигнатур существующих дронов приводит к нечеткости получаемой из этих устройств информации, к тому же велика вероятность обнаружения различных высокотемпературных выбросов газов и шлейфов. Вышеуказанное диктует необходимость применения термовизуального метода обнаружения дронов, где совместно используется визуальный и термальный метод обнаружения. Технически этот метод реализуется путем построения бортовых двухдиапазонных оптических систем обнаружения, включающих видимый и инфракрасный диапазоны. Рассмотрены вопросы оценки эффективности термовизуального метода обнаружения дронов с электронно-цветовым камуфлированием нижней поверхности. Предложен метод термовизуального обнаружения дронов снабженных электронным цветовым камуфляжем. В статье также анализируется эффективность термовизуального высотного бортового обнаружения низколетящих дронов, снабженных электрически управляемым цветоизменяющим покрытием. Определено рациональное условие эффективной работы системы термовизуального обнаружения дронов. Определены методы повышения эффективности цветового камуфляжа беспилотных летательных аппаратов. Получено выражение, определяющее условие максимальной эффективности цветового камуфляжа дрона. Показано, что в дронах с высокой инфракрасной сигнатурой электронный цветовой камуфляж может дать более высокий положительный эффект. Оценена эффективность метода термовизуального обнаружения дронов с электронным цветовым камуфляжем.

Ключевые слова: дроны; термовизуальное обнаружение; сигнатура; электрохромное свойство; камуфляж.

Для цитирования: Пашаев Н. М. Тепловизуальный метод высотного обнаружения низколетящих дронов с электронно-цветовым камуфлированием поверхности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 22-28.

Хорошо известно, что одним из способов камуфлирования дронов является изменение их цветовой окраски путем нанесения на поверхность деталей дрона специального покрытия, изменяющего свою цветовую окраску под воздействием управляющего сигнала. В качестве таких покрытий в настоящее время используются электрохромные [1–8] и фосфорные материалы [9–15]. Что касается подсистемы управления цветом свечения дрона, то она может быть адаптивной или программно управляемой. В случае адаптивного управления подсистема управления содержит измерители цвета излучения фона, сигнал с которых снимается, обрабатывается и на основе результатов обработки формируется соответствующий управляющий сигнал, подаваемый на цветоформирующее покрытие. В случае программного управления цветом свечения создается специальная программа управления цветом, с учетом времени и траектории полета.

Бортовое обнаружение и наблюдение за низколетящими беспилотными летательными аппаратами может быть осуществлено визуально или с помощью средств инфракрасного (ИК) слежения, акустического прослушивания и радарного сопровождения. Вместе с тем цветное камуфлирование дронов может значительно снизить эффективность визуального метода их обнаружения и в этом случае целесообразно применить другой наиболее доступный метод — метод теплового обнаружения. Следует отметить, что большое разнообразие ИК сигнатур существующих дронов приводит к нечетности получаемой из этих устройств информации, к тому же велика вероятность обнаружения различных высокотемпературных выбросов газов и шлейфов. Вышеуказанное диктует необходимость применения термовизуального метода обнаружения дронов, где совместно используется визуальный и термальный метод обнаружения. Технически этот метод реализуется

путем построения двухдиапазонных оптических систем обнаружения, включающих видимый и ИК диапазоны. Оптическая схема термовизуального двухдиапазонного обнаружителя дронов показана на рис. 1.

Следует отметить, что задача обнаружения низколетящих разведывательных дронов с высотных бортовых устройств может быть решена путем последовательного решения следующих задач:

1. Формирование качественного изображения объекта;
2. Идентификация объекта на полученном изображении.

Для получения качественных изображений низколетящих дронов с помощью бортовых сканирующих спектрорадиометров высокого разрешения необходимо учесть воздействие всех мешающих факторов, приводящих к снижению качества полученных снимков в разных спектральных диапазонах.

Последовательность вспомогательных операций для реализации предлагаемого двухдиапазонного термовизуального метода обнаружения низколетящих дронов заключается в следующем:

1. Формирование изображения низколетящего дрона в видимом диапазоне.
2. Формирование изображения низколетящего дрона в инфракрасном диапазоне.
3. Идентификация дрона путем вычисления сигнатур дрона в двух диапазонах.
4. Вычисления вероятностных характеристик идентификации с учетом камуфлирования дронов.

Прежде всего несколько подробно рассмотрим вопросы формирования изображения дронов в плане учета внешних мешающих факторов.

Следует отметить, что изображения низколетящих объектов, получаемых с помощью сканирующих спектрорадиометров установленных на высотных летательных аппара-

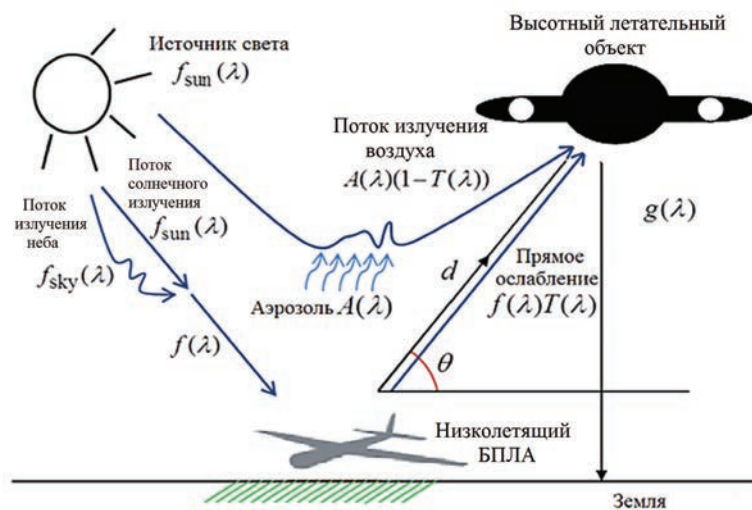


Рис. 1. Оптическая система бортового двухдиапазонного обнаружителя дронов. Цифрами указаны: 1 — фотоприемник видимого и ИК диапазона; 2 — револьверный механизм со встроенными фильтрами ИК и видимого диапазона; 3 — линза; 4 — дрон; 5 — фоновое излучение

тах подвержены воздействию прежде всего атмосферных факторов. Атмосферный аэрозоль, начиная от мелкодисперсного аэрозоля до аэрозольных частиц гигантских размеров, достигающих десятки микрометров является одним из основных атмосферных факторов. Основным условием получения качественных высотных снимков низколетящих объектов является компенсация влияния атмосферного аэрозоля. При этом следует учесть, что влияние атмосферного аэрозоля сводится как к искажению цветности, так и уменьшению отношения сигнал/шум в видеоканале. Для устранения влияния аэрозоля, предпринимаются различные технические меры. Так, для частичного устранения искажений цветности в работе [1] используется шумоподавляющий фильтр, а в работе [2] в качестве критерия компенсации влияния аэрозоля предложено достижение максимальной видимости по трассе прохождения оптических лучей. Согласно [3] использование комбинирования «темного» канала и локального усиления контраста может привести к искажению цветности. Известны и другие методы [1,5–6], базирующиеся на фильтрации основного сигнала и совместной обработке этого сигнала с сигналом, поступающим с «темного» канала. Согласно работе [1], снижение уровня зашумленности сигнала, а также учет неравномерного свечения объекта и сигнала «темного канала» приводит к улучшению качества бортовых изображений, получаемых в реальных условиях функционирования изображающих систем. В общем случае, чем качественнее исходное бортовое изображение, тем слабее сигнал «темного канала» [5]. Согласно технике машинного зрения входным изображением высотной камеры является излучение с исследуемой сцены [6]. В изображениях наземных объектов так называемые «темные» пиксели часто имеют очень низкую интенсивность по крайней мере по одному цвету (R, G или B). Интенсивности этих пикселей в основном поддерживаются за счет свечения воздуха [6]. Это предположение позволяет на практике улучшить качество бортовых изображений.

Принцип работы изображающей системы, установленной на высотном летательном аппарате проанализируем на основе схемы распределения потоков оптического излучения, изложенной в [7].

На рис. 2 показано распределение радиационных потоков при функционировании бортовой изображающей системы.

Математическая модель оптического потока формирования спектрального изображения с помощью сканирующего спектрометра, установленного на высотном носителе, находящейся в гомогенно загрязненной аэрозолем атмосфере имеет следующий вид:

$$g(\lambda) = f(\lambda) \cdot T(\lambda) + A(\lambda) \cdot (1 - T(\lambda)) \quad (1)$$

где: $g(\lambda)$ — поток излучения попиксельного формирования зашумленного изображения.

$$f(\lambda) = f_{sun}(\lambda) + f_{sky}(\lambda) \quad (2)$$

где: $f(\lambda)$ — поток излучения от низколетящего БПЛА; $A(\lambda)$ — поток излучения атмосферы; $T(\lambda)$ — пропускание атмосферы.

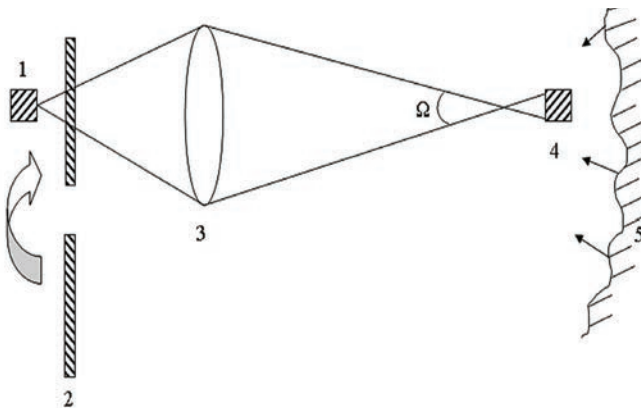


Рис. 2. Радиационная модель представления высотной системы формирования изображений низколетящего БПЛА, размещенного в гомогенно-загрязненной аэрозолем атмосфере: $f_{sun}(\lambda)$ — свечение Солнца; $f_{sky}(\lambda)$ — свечение неба, т.е. свет, рассеянный в атмосфере [7]

В уравнении (1) $f(\lambda) \cdot T(\lambda)$ — компонента общего потока входного излучения радиометра, подвергнувшаяся прямому ослаблению; $A(\lambda) \cdot (1 - T(\lambda))$ — компонента, отображающая оптическое излучение воздуха, т.е. результат рассеяния света аэрозолем в атмосфере.

Таким образом, в классическом случае проблема устранения влияния аэрозоля заключается в восстановлении $f(\lambda)$ используя данные об $g(\lambda)$, $T(\lambda)$ и $A(\lambda)$ [7]. При попиксельном вычислении $f(\lambda)$ следует учесть, что согласно [6], для гомогенной атмосферы

$$T(\lambda) = e^{-\sigma \cdot d} \quad (3)$$

где: σ — коэффициент рассеяния; d — расстояние до объекта.

Далее анализируется эффективность термовизуального метода обнаружения дронов, снабженных электрически управляемым цветоизменяющим покрытием. Проанализируем сигналы, формируемые в такой системе.

В качестве источников фонового сигнала в системе наблюдения выступают наземный фон и эффект аэрозольного рассеяния. Сигнал формируемый фотоприемником бортового обнаружителя может быть вычислен по следующей формуле

$$I_s = \frac{\pi D^2}{4R^2} \cdot T_{opt} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) \cdot f(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

где: T_{opt} — пропускание оптической системы;

$T(\lambda)$ — пропускание атмосферы;

D — диаметр линзы;

R — расстояние до цели;

$f(\lambda)$ — спектральное излучение цели;

λ_1, λ_2 — пределы.

Шумовой сигнал, формируемый на фотоприемнике может быть вычислен по следующей формуле [3]

$$I_B = \frac{\omega^2 \pi D^2}{4} \cdot T_{opt} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - T(\lambda)) \cdot U_b(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

где: ω — мгновенный угол обзора пикселя;

U_B — спектральное фоновое излучение. При этом собственным излучением Земли и переизлучением пренебрегаем.

Вероятность обнаружения цели определим как

$$P_{\text{det}} = \frac{I_S}{I_S + I_B} \quad (6)$$

Согласно (6) при нулевых шумах считаем, что объект обнаруживается с вероятностью единицы.

Отметим, что формулы (4)–(6) универсальны по существу и могут быть применены как ИК, так и видимому диапазону. В этом случае для ИК и видимого диапазона имеем

$$P_{\text{det.ir.1}} = \frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + I_{B.ir}} \quad (7)$$

$$P_{\text{det.vis.1}} = \frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} + I_{B.vis}} \quad (8)$$

где индекс 1 обозначает отсутствие системы цветного камуфляжа.

Очевидно, что применение электронно управляемой подсистемы изменения цветного излучения приводит к снижению $I_{s.vis}$ до величины $I_{s.vis} - \Delta I_{s.vis}$, так как полезный сигнал, снимаемый с камуфлированного дрона должно снижаться. Вместе с тем, установка дополнительных узлов, а также дополнительного источника электроэнергии приведет к увеличению ИК сигнатуры дрона, т.е. $I_{s.ir}$ увеличится до значения $I_{s.ir} + \Delta I_{s.ir}$. В этом случае вероятности $I_{\text{det.ir}}$ и $I_{\text{det.vis}}$ могут быть определены как

$$P_{\text{det.ir.2}} = \frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} + \frac{\Delta I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} \quad (9)$$

$$P_{\text{det.vis.2}} = \frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} - \frac{\Delta I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} \quad (10)$$

С учетом (7) и (9) положительный прирост вероятности обнаружения в видимом диапазоне вычислим как

$$\Delta P_{\text{det.ir}} = \frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} + \frac{\Delta I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} - \frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + I_{B.ir}} \quad (11)$$

С учетом (8) и (10) отрицательный прирост вероятности обнаружения в видимом диапазоне вычислим как

$$\Delta P_{\text{det.vis}} = \frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} + I_{B.vis}} - \frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} + \frac{\Delta I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} \quad (12)$$

Примем, что в методе термовизуального обнаружения дронов критерием оценки является произведение двух вероятностей:

1. Вероятности обнаружения в ИК диапазоне $I_{\text{det.ir}}$
 2. Вероятности обнаружения в видимом диапазоне $I_{\text{det.ir}}$
- Следовательно,

$$P_{\text{det.1}} = P_{\text{det.ir.1}} \cdot P_{\text{det.vis.1}} \quad (13)$$

$$P_{\text{det.2}} = P_{\text{det.ir.2}} \cdot P_{\text{det.vis.2}} \quad (14)$$

Представим $I_{\text{det.ir.2}}$ и $I_{\text{det.vis.2}}$ в следующем виде

$$P_{\text{det.ir.1}} = P_{\text{det.ir.1}} + \Delta P_{\text{det.ir.1}} \quad (15)$$

$$P_{\text{det.vis.1}} = P_{\text{det.vis.1}} + \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (16)$$

С учетом (14), (15), (16) получим

$$P_{\text{det.2}} = P_{\text{det.ir.1}} \cdot P_{\text{det.vis.1}} - P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} + P_{\text{det.vis.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.ir.1}} - \Delta P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (17)$$

Общее приращение вероятности двухдиапазонного обнаружения $\Delta P_{t,b}$ вычислим как

$$\Delta P_{t,b} = P_{\text{det.2}} - P_{\text{det.1}} = -P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} + P_{\text{det.vis.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.ir.1}} - \Delta P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (18)$$

Очевидно, что при термовизуальном методе обнаружения дронов цветовой камуфляж можно считать эффективным в том случае, если $\Delta P_{t,b}$ является отрицательной величиной. В этом случае, условие эффективности цветного камуфляжа имеет следующий вид

$$P_{\text{det.vis.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.ir.1}} < \Delta P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} + \Delta P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (19)$$

Из (19) имеем

$$P_{\text{det.vis.1}} < P_{\text{det.ir.1}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{det.vis.1}}}{\Delta P_{\text{det.ir.1}}} + \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (20)$$

Выражение (20) запишем как

$$P_{\text{det.vis.2}} < P_{\text{det.ir.1}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{det.vis.1}}}{\Delta P_{\text{det.ir.1}}} \quad (21)$$

Из выражения (21) окончательно получим условие эффективности цветного камуфляжа

$$P_{\text{det.vis.2}} \cdot \Delta P_{\text{det.ir.1}} < \Delta P_{\text{det.ir.1}} \cdot \Delta P_{\text{det.vis.1}} \quad (22)$$

Графическая интерпретация условия (22) дана на рис. 3.

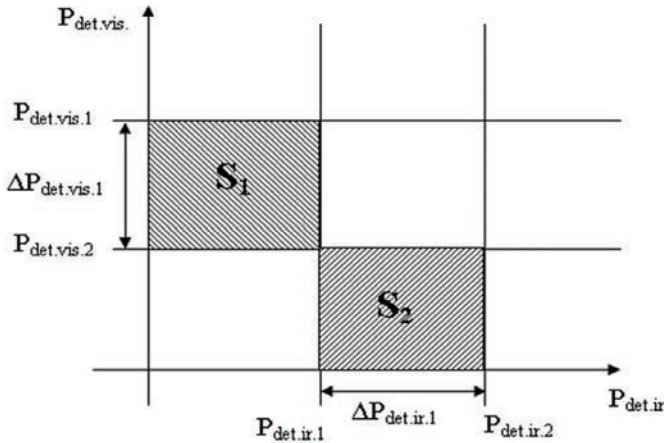


Рис. 3. Графическая интерпретация условия (22). Принятые обозначения: S_1 — площадь квадрата, численно равная правой стороне условия (22); S_2 — площадь квадрата, количественно равная левой стороне условия (22)

С учетом выражений (7), (10), (11) и (12) полученное условие эффективности цветowego камуфляжа дронов представим в виде

$$\left(\frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} + \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} + \frac{\Delta I_{S.vis}}{I_{S.vis} + \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} \right) \times \left(\frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} + \frac{\Delta I_{S.ir}}{I_{S.ir} + \Delta I_{S.ir} + I_{B.ir}} - \frac{I_{S.ir}}{I_{S.ir} + I_{B.ir}} \right) < \left(\frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} + I_{B.vis}} - \frac{I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} + \frac{\Delta I_{S.vis}}{I_{S.vis} - \Delta I_{S.vis} + I_{B.vis}} \right) \times \frac{I_{S.ir}}{(I_{S.ir} + I_{B.ir})} \quad (23)$$

Как видно из диаграммы, показанной на рис. 3, повышение эффективности цветowego камуфляжа может быть осуществлено следующими методами:

1. Увеличение $I_{det.ir.1}$.
2. Снижение $I_{det.vis.2}$.
3. Снижение $I_{det.ir.2}$.

При этом предпочтительным методом повышения эффективности цветowego камуфляжа оказывается увеличение $I_{det.ir.1}$, так как в этом случае уменьшается S_2 и увеличивается S_1 .

Физически, это означает, что в дронах с высокой величиной ИК сигнатуры цветовой камуфляж может обеспечить более высокую эффективность обнаружения.

Что касается эффективности самого метода термовизуального обнаружения дронов, то условие их эффективности можно сформулировать как

$$\Delta P_{t.b.} \rightarrow \max \quad (24)$$

С учетом (18) и (24) получим

$$-P_{det.ir.1} \cdot \Delta P_{det.vis.1} + P_{det.vis.1} \cdot \Delta P_{det.ir.1} - \Delta P_{det.ir.1} \cdot \Delta P_{det.vis.1} \rightarrow \max \quad (25)$$

Примем следующее соотношение

$$\Delta P_{det.vis.1} = k \cdot \Delta P_{det.ir.1} = k \cdot \Delta P \quad (26)$$

С учетом (25) и (26) условие (24) принимает следующий вид:

$$-P_{det.ir.1} \cdot k \cdot \Delta P + P_{det.vis.1} \cdot \Delta P - k \cdot \Delta P^2 \rightarrow \max \quad (27)$$

Исследуем выражение (27) на максимум методом производных. Имеем:

$$\frac{dP_{t.b.}}{d\Delta P} = -P_{det.ir.1} \cdot k + P_{det.vis.1} - 2k \cdot \Delta P = 0 \quad (28)$$

Из выражения (28) находим

$$\Delta P = \frac{P_{det.vis.1} - P_{det.ir.1} \cdot k}{2k} \quad (29)$$

Для выяснения типа экстремума проверка по второй производной дает

$$\frac{d^2 P_{t.b.}}{d\Delta P^2} = -2k \quad (30)$$

Следовательно, при соблюдении условия (29) метод термовизуального контроля обеспечивает максимальную эффективность работы.

Отсюда можно сделать вывод о том, что рациональным условием эффективной работы системы термовизуального обнаружения является соблюдение условия (29). В то же время выражение (29) можно принять в качестве условия минимальной эффективности цветowego камуфляжа дрона.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Предложен метод термовизуального обнаружения дронов снабженных электронным цветowym камуфляжем.
2. Получено условие эффективности осуществления электронного цветowego камуфлирования дронов.
3. Показано, что в дронах с высокой ИК сигнатурой электронный цветовой камуфляж может дать наибольший эффект.
4. Оценена эффективность метода термовизуального обнаружения дронов с электронным цветowym камуфляжем.

Литература

1. Heikenfeld J., Steckl A.J. Rare-Earth-deped GaN Switchable Color Electroluminescent Devices // IEEE Transactions on Electron Devices. 2002. Vol. 49. No. 9. Pp. 1545–1550.
2. Shi W., Arabadjis G., Bishop B., Hill P., Plasse R., Yoder J. Detecting, Tracking and identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence. URL: <http://www.intechopen.com>
3. Barrett R., Melkert J. UAV visual signature suppression via adaptive materials. SPIE Paper No. 5762–15. Presented at the Society of Photo — Optical Instrumentation Engineers An-

nual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California 6–10 March 2005.

4. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wave-length — Adaptive dehazing using histogram merging — based classification for UAV images // *Sensors*. 2015. No. 15. Pp. 6633–6651. Doi:10.3390/s150306633.

5. Abidin T., Zhang Q., Wang K.-L., Liaw D.-J. Recent advances in electrochromic polymers // *Polymer*. 2014. No. 55. Pp. 5293–5304.

6. Zhang Y.M., Wang X., Zhang W., Li W., Fang X., Yang B., Li M., Zhang X.-A. A single — molecule multicolor electrochromic device generated through medium engineering. *Light: Science & Applications* (2015) 4, e249; doi:10.1038/Isa.2015.22.

7. Higuchi M. Electrochromic Organic — Metallic Hybrid Polymers: Fundamentals and Device Applications // *Polymer Journal*. 2009. No. 41. Pp. 511–520. Doi:10.1295/polymj.PJ2009053.

8. Yagmur I., Ak M., Bayrakceken A. Fabricating multi-colored electrochromic devices using conducting copolymers. *Smart Mater. Struct.* 22(2013), 115022 (9 pp).

9. Ji L., Dai Y., Yan Sh., Lv X., Su Ch., Xu L., Lv Y., Ouyang M., Chen Z., Zhang Ch. A fast electrochromic polymer based on TEMPO substituted polytriphenylamine. *Scientific Report* 6:30068|DOI:10.1038/srep30068

10. Mecerreyes D., Marcilla R., Ochoteco E., Grande H., Pomposo J.A., Vergaz R., Pena J.M.S. A simplified all — polymer flexible electrochromic device // *Electrochimica Acta*. 2004. No. 49. Pp. 3555–3559.

11. Yashiro T., Okada Y., Nijoh Y., Hirano Sh., Sagisaka T., Gotoh D., Inoue M., Kim S., Tsuji K., Takahashi H., Fujimura K. Flexible Electrochromic Display. ISSN — L 1883–2490/20/1300. 2013 ITE and SID.

12. Yen H.-J., Chen C.-J., Liou G.-Sh. Flexible Multi-Colored Electrochromic and Volatile Polymer Memory Derived from Starburst Triarylamine-Based Electroactive Polymide. URL: <http://homepage.ntu.edu.tw/~gsliou/FPML/Paper?2013/Adv.%20Funct.%20Mater.%202013,%2023,%205307%e2%80%935316.pdf>

13. Runnerstrom E.L., Llordes A., Lounis S.D., Mil-liron D.J. Nanostructured Electrochromic Smart Windows: Traditional Materials and NIR — selective Plasmonic Nanocrystals // *Chem. Commun.* 2014. No. 50. Pp. 10555–10572.

14. Azens A., Granqvist C. Electrochromic Smart Windows: Energy Efficiency and Device Aspects // *J. Solid State Electrochem.* 2003. No. 7. Pp. 64–68.

15. Thakur V.K., Ding G., Ma J., Lee P.S., Lu X. Hybrid Materials and Polymer Electrolytes for Electrochromic Device Applications. *Adv. Mater.* 2012. No. 24. Pp. 4070.

ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF THERMO-VISUAL METHOD FOR DETECTION OF DRONES PROVIDED WITH ELECTROCHROM CAMOUFLAGE ON SURFACE

Pashayev Namik Mukhtar oglu,

Baku, Azerbaijan, pnm@mail.ru

ABSTRACT

Detection and control of unmanned vehicles can be carried out by help of instruments of infrared or radar tracking, acoustic hearing and visually. At the same time the color type camouflage of drones can significantly decrease the effectiveness of visual method of their detection. In this case the other more acceptable method – method of thermodetection should be applied. It should be noted that the great variety of infrared signatures of existing drones lead to non – accuracy of information receipt from these devices, besides the non-zero probability of detection of plume of emitted high temperature gases does exists. The above said requires utilization of thermo – visual method for detection of drones combining joint utilization of visual and thermal methods of detection. Technically this method should be realized using two – band on board optical systems of detection containing visible and infrared bands. The questions on assessment of effectiveness of thermo visual method for detection of drones with electrochrom camouflage of down surface are considered. The method of thermo – visual detection of drones provided with electron color camouflage. In the article the effectiveness of thermo visual method for high-height on-board detection of low height flying drones provided with electrically controlled electrochrom cover is also analyzed. The rationality condition

for effectiveness of operation of systems of thermo-visual detection of drones is determined. The methods for increase of effectiveness of color camouflage of unmanned aerial vehicles are determined. The formula determining the condition of maximum effectiveness of drones color camouflage is given. It is shown that in drones with high infrared signature the electronic color camouflage may give more positive effect. The effectiveness of method of thermo – visual detection of drones with electronic control of color camouflage is estimated.

Key words: drones; thermo – visual detection; signature; electrochrom property; camouflage.

References

1. Heikenfeld J. Steckl A.J. Rare-Earth-deped GaN Switchable Color Electroluminescent Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2002. Vol. 49. No. 9. Pp. 1545-1550.
2. Shi W., Arabadjis G., Bishop B., Hill P., Plasse R., Yoder J. Detecting, Tracking and identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence. URL: <http://www.intechopen.com>
3. Barrett R., Melkert J. UAV visual signature suppression via adaptive materials. SPIE Paper No. 5762-15. Presented at the Society of Photo – Optical Instrumentation Engineers Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California 6-10 March 2005.
4. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wavelength – Adaptive dehazing using histogram merging – based classification for UAV images. *Sensors*. 2015. No. 15. Pp. 6633-6651. Doi:10.3390/s150306633.
5. Abidin T., Zhang Q., Wang K.-L., Liaw D.-J. Recent advances in electrochromic polymers. *Polymer*. 2014. No. 55. Pp. 5293-5304.
6. Zhang Y.M., Wang X., Zhang W., Li W., Fang X., Yang B., Li M., Zhang X.-A. A single – molecule multicolor electrochromic device generated through medium engineering. *Light: Science & Applications* (2015) 4, e249; doi:10.1038/lsa.2015.22.
7. Higuchi M. Electrochromic Organic – Metallic Hybrid Polymers: Fundamentals and Device Applications. *Polymer Journal*. 2009. No. 41. Pp. 511-520. Doi:10.1295/polymj.PJ2009053.
8. Yagmur I., Ak M., Bayrakceken A. Fabricating multicolored electrochromic devices using conducting copolymers. *Smart Mater. Struct.* 22(2013), 115022 (9pp).
9. Ji L., Dai Y., Yan Sh., Lv X., Su Ch., Xu L., Lv Y., Ouyang M., Chen Z., Zhang Ch. A fast electrochromic polymer based on TEMPO substituted polytriphenylamine. *Scientific Repost*[6:30068|DOI:10.1038/srep30068.
10. Mecerreyes D., Marcilla R., Ochoteco E., Grande H., Pomposo J.A., Vergaz R., Pena J.M.S. A simplified all – polymer flexible electrochromic device. *Electrochimica Acta*. 2004. No. 49. Pp. 3555-3559.
11. Yashiro T., Okada Y., Najih Y., Hirano Sh., Sagisaka T., Gotoh D., Inoue M., Kim S., Tsuji K., Takahashi H., Fujimura K., Flexible Electrochromic Display. ISSN – L 1883-2490/20/1300. 2013 ITE and SID.
12. Yen H.-J., Chen C.-J., Liou G.-Sh. Flexible Multi – Colored Electrochromic and Volatile Polymer Memory Derived from Starburst Triarylamine-Based Electroactive Polumide. URL: <http://homepage.ntu.edu.tw/~gslou/FPML/Paper?2013/Adv.%20Funct.%20Mater.%202013,%2023,%205307%e2%80%9335316.pdf>
13. Runnerstrom E.L., Llordes A., Lounis S.D., Milliron D.J. Nanostructured Electrochromic Smart Windows: Traditional Materials and NIR – selective Plasmonic Nanocrystals. *Chem. Commun.* 2014. No. 50. Pp.10555-10572.
14. Azens a., Granqvist C. Electrochromic Smart Windows: Energy Efficiency and Device Aspects. *J. Solid State Electrochem.* 2003. No. 7. Pp.64-68.
- 15.Thakur V.K., Ding G., Ma J., Lee P.S., Lu X. Hybrid Materials and Polymer Electrolytes for Electrochromic Device Applications. *Adv. Mater.* 2012. No. 24. Pp. 4070.

Information about author:

Pashayev N.M., PhD, director of research Institute of aerospace informatics of National aerospace agency.

For citation: Pashayev N.M. Assessment of effectiveness of thermo-visual method for detection of drones provided with electrochrom camouflage on surface. *H&ES Research*. 2017. Vol.9. No. 4. Pp. 22-28. (In Russian)

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛИКВИДАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Тарасов Анатолий Геннадьевич,

к.т.н., докторант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия, Atol-77@mail.ru

Минаков Евгений Петрович,

д.т.н., профессор, профессор кафедры управления организационно-техническими системами космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия, ep.minakov12345@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Космические средства относятся к высоконадежным техническим устройствам. Но значительная сложность протекающих при подготовке ракет космического назначения к пуску и проведению пуска процессов, большая энергоемкость этих процессов, высокая цена ошибок эксплуатирующего персонала, неточностей эксплуатационной документации, дефектов космических средств, неверно принятых решений дают основание сделать вывод о том, что эксплуатация космических средств – это деятельность, связанная с высоким уровнем риска. Одним из наиболее опасных является этап пуска ракет космического назначения, в ходе которого возможны взрыв, пожар, проливы компонентов ракетного топлива, в результате которых наносится ущерб эксплуатирующему персоналу и окружающей среде. Помимо того в ходе полета ракет космического назначения возможен ее взрыв, падение и нанесение ущерба населению, промышленным объектам, окружающей среде. В настоящее время задачи ликвидации последствий аварий, катастроф и других происшествий в процессе запусков космических аппаратов возложены на аварийно-спасательную группу, формируемую на каждый пуск ракет космического назначения. Основными задачами аварийно-спасательной группы являются оценка технического состояния аварийных агрегатов и систем; выполнение аварийно-спасательных работ; определение концентрации паров компонентов ракетных топлив и нейтрализации их проливов; тушение очагов пожаров; эвакуация вооружения и техники; расчистка входов, выходов сооружений, открытие дверей, люков, разборка завалов, расчистка дорог, вывод техники; откачка воды и промстоков из сооружений и помещений; эвакуация пострадавших из зоны аварии, оказание первой медицинской помощи; выполнение отдельных видов ремонтно-восстановительных работ. Перечисленные задачи аварийно-спасательной группы в целях повышения безопасности спасателей необходимо выполнять с применением существующих и перспективных робототехнических систем. Одной из проблем, требующих решения, является минимизация ущерба в случае возникновения экстремальных ситуаций, для решения которой требуется заблаговременное планирование мероприятий по ликвидации экстремальных ситуаций с применением таких робототехнических систем, разработка методов планирования применения которых является актуальной для настоящее время задач. Аварии и катастрофы, имевшие место при эксплуатации космических средств, являются убедительным свидетельством необходимости проведения исследований, направленных на разработку методов планирования применения робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций.

Ключевые слова: робототехническая система; экстремальная ситуация; опасный фактор; зона обеспечения; ключевая зона применения.

Для цитирования: Тарасов А.Г., Минаков Е.П. Метод планирования применения робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций в процессе подготовки и пуска ракет космического назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 29-40.

Введение

Для формирования структуры робототехнического комплекса (РТК) ликвидации экстремальных ситуаций (ЭС) с целью безопасного и своевременного выполнения задач ПП РКН необходимо определить способы взаимодействия локомобионных и манипуляционных подсистем РТС в процессе их применения. Применение РТК предполагает два этапа: развертывание на рубеже атаки и непосредственно ликвидация ЭС. При зонном подходе к применению РТК [1] выделяют пространственно-временные области первого типа, по которым решаются задачи обнаружения опасных факторов (ОФ) ЭС (информационного обеспечения применения РТС) и пространственно-временные области второго типа, в которых должно быть осуществлено требуемое воздействие РТС по носителю ОФ ЭС [2]. Требуемые показатели оперативности и вероятности ликвидации ЭС могут быть достигнуты путем различных комбинаций распределения РТС по ключевым зонам применения (КЗП). В статье представлен метод планирования применения РТС по КЗП, который по критериям пригодности потенциальной результативности и оперативности ликвидации ОФ ЭС позволяет определить способ применения РТК, удовлетворяющего заданным требованиям по результативности и оперативности.

Задача планирования применения РТС ликвидации ЭС и метод ее решения

Задача планирования применения робототехнических систем (РТС) ликвидации ЭС решается как задача развертывания РТС в зоне обеспечения (ЗО) и задача целераспределения РТС по узлам КЗП. На **первом этапе** решается задача оптимального с точки зрения энергозатрат развертывания РТС в ЗО с учетом габаритных размеров РТС на основе графовой модели.

Решение задачи определения способа развертывания РТС в зоне обеспечения основано на применении модифицированной методики планирования траектории движения РТС, в основу которой положены представление траектории движения в виде ориентированного ациклического графа; алгоритм нахождения K кратчайших путей между двумя заданными вершинами в ориентированном ациклическом графе; алгоритм назначения весов вершинам указанного графа с учетом габаритных размеров и требований к минимизации энергопотребления РТС [3]. Исходными данными для ее реализации являются:

- картографические данные;
- данные полученные с беспилотных летательных аппаратов;
- данные, полученные РТС ликвидации ЭС;
- число $N_{\text{РТС}}$ и массогабаритные показатели (ширина $l_{\text{Ш РТС } i}$ и высота $l_{\text{В РТС } i}$ ($i = 1, \dots, N_{\text{РТС}}$)) планируемых к применению РТС ликвидации ЭС.

Алгоритм формирования способа развертывания РТС в зоне обеспечения включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Формирование на основе исходных данных графа $G(A, B)$ тактических траекторий движения. При этом

вершинам графа $A = \{a_i\}$, $i = 1, \dots, K$, ставятся в соответствие места изменения траектории движения РТС и в виде координат $\{x_i, y_i\}$ задаются их географические местоположения, а ребрам B — участки пути движения между соответствующими узлами (при наличии такого пути) и их конфигурация. Отклонение тактической траектории от глобальной связано с наличием завалов и трудно проходимых участков. В качестве параметров конфигурации участков пути движения РТС выступают:

- длина $l_{\text{У}}$ участка;
- минимальная ширина $l_{\text{Ш}}$ «коридора», необходимого для движения РТС на данном участке;
- минимальная высота $l_{\text{В}}$ «коридора», необходимого для движения РТС на данном участке.

Шаг 2. Выбор для проведения дальнейших расчетов $K = N_{\text{РТС}}$ в предположении, что для выполнения работ по ликвидации ЭС (расчистки завала, тушения пожара, поиска пораженного и т.п.) планируемые к применению РТС будут направляться одновременно.

Шаг 3. Нахождение K кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G(A, B)$. В качестве начальной вершины выбирается место «запуска» РТС, в качестве конечной — участок предстоящих работ, а в качестве весов ребер — $l = l_{\text{У}}$.

Шаг 4. Преобразование графа $G(A, B)$ в $G'(A, B)$, содержащий только K кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на предыдущем шаге.

Шаг 5. Нахождение K кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G'(A, B)$. При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{\text{Ш}} > \max(l_{\text{Ш РТС } i}); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 6. Если $K < N_{\text{РТС}}$, то $K = K + 1$ и переход шагу 2; в противном случае — переход к следующему шагу.

Шаг 7. Преобразование графа $G'(A, B)$ в $G''(A, B)$, содержащий только K кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на шаге 5.

Шаг 8. Нахождение K'' кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G''(A, B)$. При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{\text{В}} > \max(l_{\text{В РТС } i}); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 9. Если $K'' < N_{\text{РТС}}$, то $K = K + 1$ и переход шагу 2; в противном случае — переход к следующему шагу.

Шаг 10. Если число кратчайших путей $K'' > N_{\text{РТС}}$, то выбор в качестве тактической траектории движения планируемых к применению РТС первых $K'' = N_{\text{РТС}}$ путей.

Блок схема алгоритма формирования способа развертывания РТС в зоне обеспечения представлена на рис. 1.

Результатом реализации предложенного алгоритма являются тактические траектории движения (рис. 2), оп-

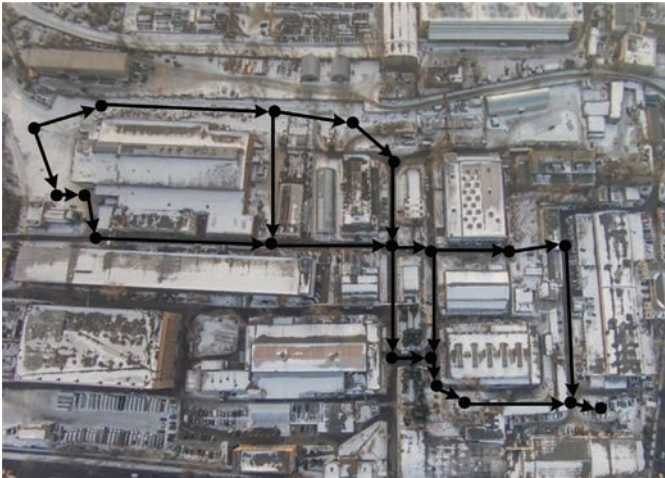


Рис. 1. Планирование тактической траектории движения РТС ликвидации ЭС

тимальные с точки зрения прохождения по ним минимального расстояния планируемому к применению РТС. Полученные решения учитывают их габаритные размеры (существенно влияющие на процесс перемещения) и требования к минимизации энергопотребления РТС. Их число K' зависит от разновидности РТС, привлекаемых для ликвидации ЭС, и требует обоснования в каждом конкретном случае. В случае отсутствия $K' = N_{\text{РТС}}$ кратчайших путей (уже на шаге 3 алгоритма) меняется стратегия применения РТС — они движутся по меньшему числу путей «друг за другом». При полном отсутствии тактической траектории движения требуется изменение исходных данных.

На **втором этапе** оценивается потенциальная возможность РТК по воздействию на ОФ ЭС. В случае, если достоверно известны уровни ОФ ЭС по всем КЗП и ресурсы РТС позволяют полностью устранить источники ЭС в КЗП, то целесообразно использовать параллельное групповое применение до полного устранения ОФ ЭС. Если ресурса РТС недостаточно до полного устранения источника ЭС в КЗП, но достаточно для понижения до порогового уровня целесообразно использовать параллельное или последовательно-параллельное групповое применение до порогового уровня ОФ ЭС [4], значения которых для различных ОФ представлены в табл. 1. Если ресурса РТС недостаточно для понижения ОФ ЭС до порогового уровня целесообразно использовать последовательное групповое применение до полного

расходования ресурса РТС в КЗП с наибольшим уровнем ОФ ЭС. По результатам оценивания потенциальной возможности РТК по воздействию на ОФ ЭС принимается решение об уровне ликвидации ОФ — до полной ликвидации или до порогового уровня ОФ в каждой КЗП.

На **третьем этапе** решается задача назначения группы РТС по узлам КЗП. Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения проблемы распределения целей (задач, функций) между группой агентов, является Венгерский алгоритм [5], который позволяет распределить агентов по целевым функциям таким образом, чтобы минимизировать затраты на их выполнение.

Кроме того, для решения задачи целераспределения нередко используются подходы с применением метода релаксаций Лагранжа [6], линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков [7], динамического программирования [8], нечетких моделей [9], нейронных сетей [10], генетических алгоритмов [11], муравьиных алгоритмов [12].

Также в области распределения целей находят применение алгоритмы на основе рыночной экономики [13], согласно которым роботы предлагают собственные цены за подходящие для них цели. Однако в этом случае оптимальное целераспределение не гарантируется. Кроме того, желаемые целевые позиции должны быть известны заранее для вычисления цены каждым участником аукциона.

Другим возможным решением задачи распределения целей является использование потенциальных полей для притяжения роботов к свободным целевым позициям [14]. Достоинствами данного подхода являются его децентрализованность и способность одновременно решать задачи целераспределения и синтеза структуры строя. Недостаток этого подхода проявляется в тех случаях, когда сенсорная и коммуникационная подсистемы роботов не позволяют идентифицировать уже занятую целевую позицию на достаточном удалении, что приводит к их избыточным перемещениям.

В более сложном случае для достижения одной цели могут потребоваться несколько роботов. Цели, выбранные недостаточным количеством роботов, называются необеспеченными. В этом случае в [15] предлагается использовать алгоритм коллективного улучшения плана. Данный алгоритм требует априорной информации о числе роботов, необходимых для обеспечения каждой цели.

Таким образом, на данном этапе формируются способы взаимодействия локомотивной (ЛП) и манипуляцион-

Таблица 1

Пороговые значения ОФ ЭС

Состав АСФ	Ключевая зона применения (аварийная зона)				
	радиационная	химическая	термическая	разрушений	затоплений
Человек в защитной одежде	8–80 Р/ч	Ниже ПДК	До 12,5 кВт/м ²	0,2–0,3 кг/см ²	$V_{\text{вп}} = 2–2,5$ м/с
РТК (РТС)	>80 Р/ч	Выше ПДК	свыше 12,5 кВт/м ² $T_{\text{гс}} > 200^{\circ}\text{C}$	>0,3 кг/см ²	$V_{\text{вп}} > 2,5$ м/с

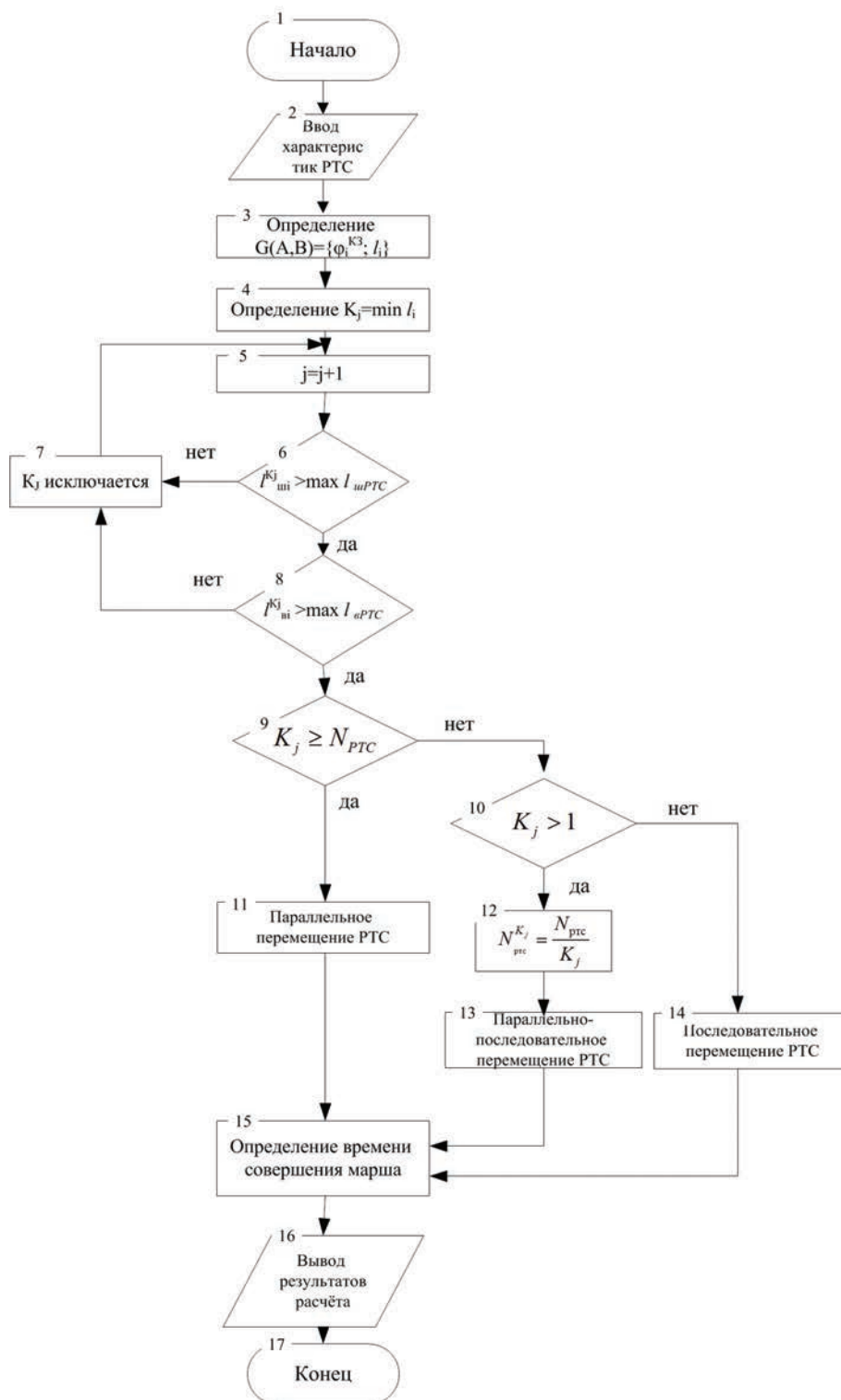


Рис. 2. Схема алгоритма определения способа развертывания РТС в зоне обеспечения

ной подсистем (МП) РТС по КЗП. Для каждого способа применения РТС определяются время ликвидации ОФ ЭС и расход ресурсов ЛП и МП. По расходу ресурсов ЛП и МП определяется количество КЗП, в которых решена задача по ликвидации ОФ ЭС.

На **четвертом этапе** по критерию пригодности потенциальной результативности $J_{NB} = U_{\text{прц}} = \Delta W_0 - \Delta W_{\text{РТС}} \geq 0$ и критерию оптимальности времени ликвидации ОФ ЭС РТК $J_{\text{ТВ}} = \min\{\Delta t_M\}$ определяется рациональное распределение РТС по узлам КЗП с априорно выявленными уровнями ОФ ЭС.

Способы применения и целераспределение РТС при планировании ликвидации ЭС

Целераспределение РТС по КЗП ЭС проводилось при следующих исходных данных:

область ЭС аппроксимирована 18 КЗП со следующими значениями ОФ в условных единицах: КЗП1,5,13,17=12; КЗП2,4,14,16=16; КЗП3,8,10,15=18; КЗП6=10; КЗП9=20; КЗП12,18=8; КЗП7,11=14;

гомогенная структура включает 10 РТС со следующими характеристиками: ресурс МП $W_{\text{РТС}}=26$ усл.ед.; ресурс ЛП $L_{\text{РТС}}=800$ усл.ед.; средняя скорость передвижения $V_{\text{РТС}}=60$ м/мин; производительность МП $\lambda_{\text{РТС}}=5$ ед/мин;

гетерогенная структура включает:

4 РТС с характеристиками: ресурс МП $W_{\text{РТС}}=40$ усл.ед.; ресурс ЛП $L_{\text{РТС}}=800$ усл.ед.; средняя скорость передвижения $V_{\text{РТС}}=160$ м/мин; производительность МП $\lambda_{\text{РТС}}=4$ ед/мин;

4 РТС с характеристиками: ресурс МП $W_{\text{РТС}}=20$ усл.ед.; ресурс ЛП $L_{\text{РТС}}=900$ усл.ед.; средняя скорость передвижения $V_{\text{РТС}}=250$ м/мин; производительность МП $\lambda_{\text{РТС}}=2$ ед/мин;

2 РТС с характеристиками: ресурс МП $W_{\text{РТС}}=10$ усл.ед.; ресурс ЛП $L_{\text{РТС}}=1100$ усл.ед.; средняя скорость передвижения $V_{\text{РТС}}=330$ м/мин; производительность МП $\lambda_{\text{РТС}}=2$ ед/мин.

Оценивание потенциальной возможности РТК по воздействию на ОФ ЭС показало, что ресурсы МП РТС позволяют полностью ликвидировать ОФ ЭС по КЗП. Потенциальная результативность гомогенной структуры определяется следующим выражением

$$W_{\text{РТК}} = 10 * W_{\text{РТС}} = 10 * 26 = 260 \text{ усл. ед.}$$

Потенциальная результативность гетерогенной структуры определяется следующим выражением

$$W_{\text{РТК}} = 4 * W_{\text{РТС1}} + 4 * W_{\text{РТС2}} + 2 * W_{\text{РТС3}} =$$

$$= 4 * 40 + 4 * 20 + 2 * 10 = 260 \text{ усл. ед.}$$

Потенциальная опасность факторов ЭС определяется следующим выражением

$$W_0 = \sum_{i=1}^{10} W_{0i} = 258.$$

По результатам оценивания потенциальной возможности РТК по воздействию на ОФ ЭС следует вывод, что ресурсы РТС позволяют полностью устранить ОФ ЭС в КЗП, в связи с чем за основу принимается рассредоточенное применение РТС по узлам КЗП. В зависимости от типа ЭС РТС могут применяться либо от граничных КЗП (пожары, наводнения, завалы) либо в любых узлах КЗП (проливы КРТ, радиоактивное или химическое заражение). Таким образом сформировано множество способов применения, включающее в себя рассредоточенное применение гетерогенного РТК в любых узлах КЗП (способ 1), рассредоточенное применение гомогенного РТК в любых узлах КЗП (способ 2), рассредоточенное применение гетерогенного РТК от граничных КЗП (способ 3), рассредоточенное применение гомогенного РТК от граничных КЗП (способ 4).

Назначение гетерогенных РТС по узлам КЗП с применением Венгерского алгоритма для способа 1 по этапам представлено на рис. 3.

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также времена передвижения и ликвидации ОФ ЭС по КЗП на различных этапах применения представлены в табл. 2.

Назначение гомогенных РТС по узлам КЗП с применением Венгерского алгоритма для способа 2 по этапам представлено на рис. 4.

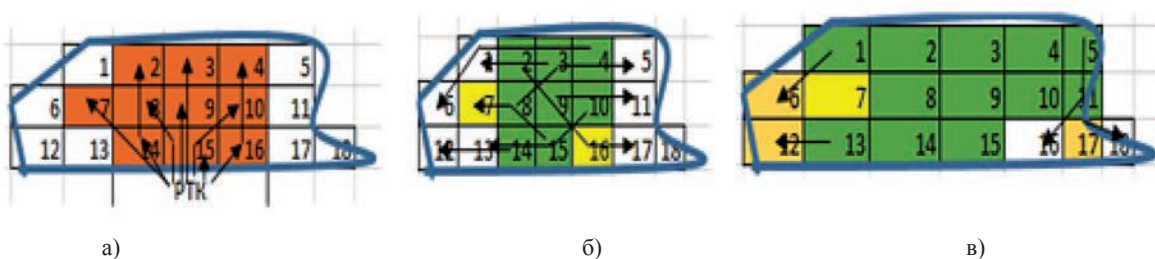


Рис. 3. Назначение РТС по узлам КЗП для рассредоточенного применения гетерогенного РТК в любых узлах КЗП

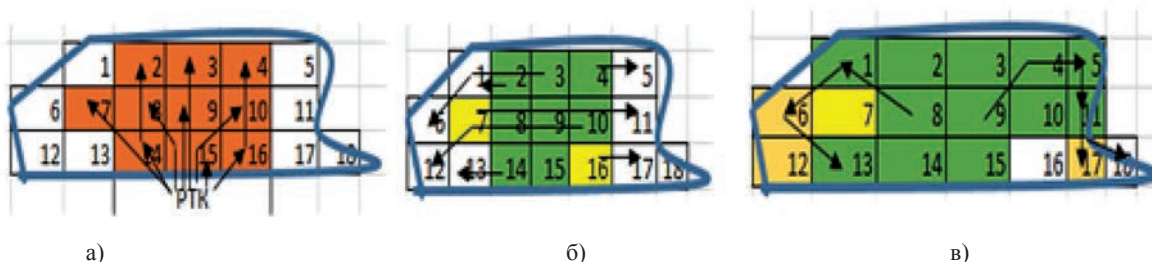


Рис. 4. Назначение РТС по узлам КЗП для рассредоточенного применения гомогенного РТК в любых узлах КЗП

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также времена передвижения и ликвидации ОФ ЭС по КЗП на различных этапах применения представлены в табл. 3.

Назначение гетерогенных РТС по узлам КЗП для способа 3 по этапам представлено на рис. 5.

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также времена передвижения и ликвидации ОФ ЭС по КЗП на различных этапах применения представлены в табл. 4.

Назначение гомогенных РТС по узлам КЗП для способа 4 по этапам представлено на рис. 6.

Таблица 2

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС способом 1

РТС	$W_{РТС, \text{ед}}$	$L_{РТС, \text{М}}$	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$
1	40	800	20	20	5	200	600	2	7	14	6	3,5	200	400	2	5,5	6	0	1,5	141	259	1	2,5
2	40	800	18	22	4,5	300	500	2	6,5	12	10	3	200	300	2	5,5	6	4	1,5	141	159	1	2,5
3	40	800	18	22	4,5	241	559	2	6,5	12	10	3	341	217	3	5	8	2	2	241	0	2	4
4	40	800	18	22	4,5	241	559	2	6,5	12	10	3	341	217	3	6	4	6	1	100	117	1	2
5	20	900	18	2	9	100	800	1	10	2	0	1	241	559	1	6	0	0	0	0	559	1	2
6	20	900	16	4	8	341	559	2	10	4	0	2	383	176	2	2	0	0	0	0	176	2	4
7	20	900	16	4	8	341	559	2	10	4	0	2	441	117	2	4	0	0	0	0	117	2	4
8	20	900	16	4	8	141	759	1	9	4	0	2	200	559	1	4	0	0	0	0	559	1	3
9	10	1100	10	0	5	141	959	1	6	0	0	0	0	959	0	3	0	0	0	0	959	0	0
10	10	1100	10	0	5	283	817	1	6	0	0	0	0	817	0	0	0	0	0	0	817	0	0
	260	9000	160			2331			10	64			2349			0	24	12		624			6

Таблица 3

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС способом 2

РТС	$W_{РТС, \text{ед}}$	$L_{РТС, \text{М}}$	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{\text{передв}}$	$t_{\text{общ}}$
1	26	800	20	6	10	200	600	4	14	0	6	0	0	600	0	0	6	0	3	141	259	1	2,5
2	26	800	18	8	9	300	500	5	14	8	0	4	341	159	6	10	0	0	0	141	159	1	2,5
3	26	800	18	8	9	241	559	5	14	0	8	0	0	559	0	0	6	2	3	241	0	2	4
4	26	800	18	8	9	241	559	5	14	8	0	4	441	117	8	12	0	0	0	100	117	1	2
5	26	800	18	8	9	100	700	2	11	8	0	4	241	459	5	9	0	0	0	0	559	1	2
6	26	800	16	10	8	341	459	6	14	10	0	5	100	359	2	7	0	0	0	0	176	2	4
7	26	800	16	10	8	341	459	6	14	10	0	5	100	359	2	7	0	0	0	0	117	2	4
8	26	800	16	10	8	141	659	3	11	10	0	5	100	559	2	7	0	0	0	0	559	1	3
9	26	800	16	10	8	141	659	3	11	10	0	0	100	559	2	2	0	0	0	0	959	0	0
10	26	800	14	12	7	283	517	5	12	12	0	0	400	117	7	7	0	0	0	0	817	0	0
	260	8000	170			2331			14	76			1824			12	12	2		624			6

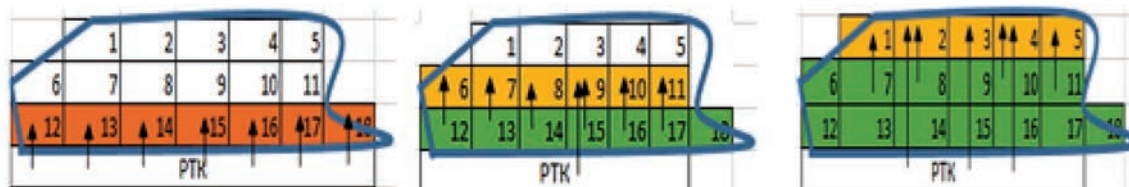


Рис. 5. Назначение РТС по узлам КЗП для рассредоточенного применения гетерогенного РТК от граничных узлов КЗП

Таблица 4

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС способом 3

РТС	$W_{РТС}, \text{ед}$	$L_{РТС}, \text{М}$	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$
1	40	800	12	28	3	100	700	1	4	14	14	3,5	100	600	1	4,5	12	2	3	100	500	1	4
2	40	800	16	24	4	100	700	1	5	18	6	4,5	100	600	1	5,5	6	0	1,5	100	500	1	2,5
3	40	800	16	24	4	100	700	1	5	18	6	4,5	100	600	1	5,5	6	0	1,5	100	500	1	2,5
4	40	800	12	28	3	100	700	1	4	14	14	3,5	100	600	1	4,5	12	2	3	100	500	1	4
5	20	900	18	2	9	100	800	1	10	2	0	1	100	700	1	2	0	0	0	700	0	0	0
6	20	900	8	12	4	100	800	1	5	10	2	5	100	700	1	6	0	2	0	700	0	0	0
7	20	900	0	20	0	0	900	0	0	20	0	10	200	700	1	11	0	0	0	700	0	0	0
8	20	900	0	20	0	0	900	0	0	0	20	0	0	900	0	0	18	2	9	300	600	2	11
9	10	1100	8	2	4	100	1000	1	5	0	2	0	0	1100	0	0	0	2	0	300	800	1	1
10	10	1100	0	10	0	0	1100	0	0	0	10	0	0	1100	0	0	10	0	5	300	800	1	6
	260	9000	90			700			10	96			800			11	64	10		1300			11

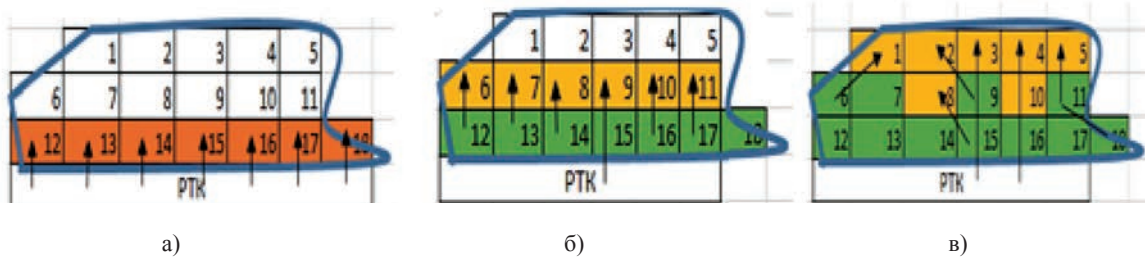


Рис. 6. Назначение РТС по узлам КЗП для рассредоточенного применения гомогенного РТК от граничных узлов КЗП

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также времена передвижения и ликвидации ОФ ЭС по КЗП на различных этапах применения представлены в табл. 5.

Для данного способа применения возникает четвертый этап назначения гомогенных РТС по узлам КЗП, который представлен на рис. 7.

Таблица 5

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС способом 4

РТС	$W_{РТС}, \text{ед}$	$L_{РТС}, \text{М}$	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТС}$	$t_{ликв}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТС}$	$t_{перев}$	$t_{общ}$
1	26	800	12	14	6	100	700	2	8	14	0	7	100	600	2	9	0	0	0	600	0	0	0
2	26	800	16	10	8	100	700	2	10	10	0	5	100	600	2	7	0	0	0	600	0	0	0
3	26	800	16	10	8	100	700	2	10	10	0	5	100	600	2	7	0	0	0	600	0	0	0
4	26	800	12	14	6	100	700	2	8	14	0	7	100	600	2	9	0	0	0	600	0	0	0
5	26	800	18	8	9	100	700	2	11	0	8	0	0	700	0	0	8	0	4	141	559	3	7
6	26	800	8	18	4	100	700	2	6	10	8	5	100	600	2	7	8	0	4	141	459	3	7
7	26	800	8	18	4	100	700	2	6	0	18	0	0	700	0	0	12	6	6	241	459	5	11
8	26	800	0	26	0	0	800	0	0	20	6	10	200	600	4	14	6	0	3	141	459	3	6
9	26	800	0	26	0	0	800	0	0	0	26	0	0	800	0	0	18	8	9	300	500	5	14
10	26	800	0	26	0	0	800	0	0	0	26	0	0	800	0	0	16	10	8	300	500	5	13
	260	8000	90			700			11	78			700			14	68	24		1264	5336		14

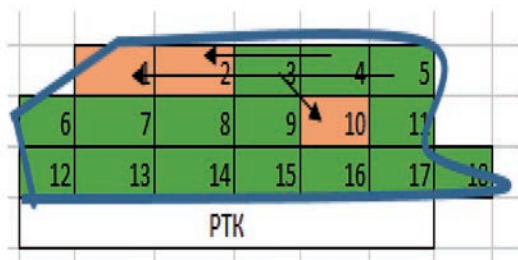


Рис. 7. Назначение РТК по узлам КЗП для рассредоточенного применения гомогенного РТК от граничных узлов КЗП четвертого этапа применения

Расход ресурсов ЛП и МП РТК для четвертого этапа ликвидации ОФ ЭС, а также остаточный ресурс ЛП и МП РТК после четвертого этапа применения представлены в табл. 6.

Расход ресурса МП РТК по этапам для рассмотренных способов применения представлен на рис. 8.

Расход ресурса ЛП РТК по этапам для рассмотренных способов применения представлен на рис. 9.

Времена ликвидации ОФ ЭС по этапам для рассмотренных способов применения представлены на рис. 10.

Общий расход ресурса МП РТК для рассмотренных способов применения представлен на рис. 11.

Общий расход ресурса ЛП РТК для рассмотренных способов применения представлен на рис. 12.

Таблица 6

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТК, а также время применения для четвертого этапа ликвидации ОФ ЭС способом 4

РТК	$W_{РТК, \text{ед}}$	$L_{РТК}, \text{м}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	ΔW_{ij}	$\Delta W_{РТК}$	$t_{\text{ликв}}$	ΔL_{oj}	$\Delta L_{РТК}$	$t_{\text{перелв}}$	$t_{\text{общ1}}$
			4	10	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0							
1	0	600																			0	0	0	0	600	0	0
2	0	600																			0	0	0	0	600	0	0
3	0	600																			0	0	0	0	600	0	0
4	0	600																			0	0	0	0	600	0	0
5	0	559																			0	0	0	0	559	0	0
6	0	459																			0	0	0	0	459	0	0
7	6	459	1																		4	2	2	400	59	7	9
8	0	459																			0	0	0	0	459	0	0
9	8	500									1										8	0	4	141	359	3	7
10	10	500		1																	10	0	5	200	300	4	9
	24	5336	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	2		741	4595		9

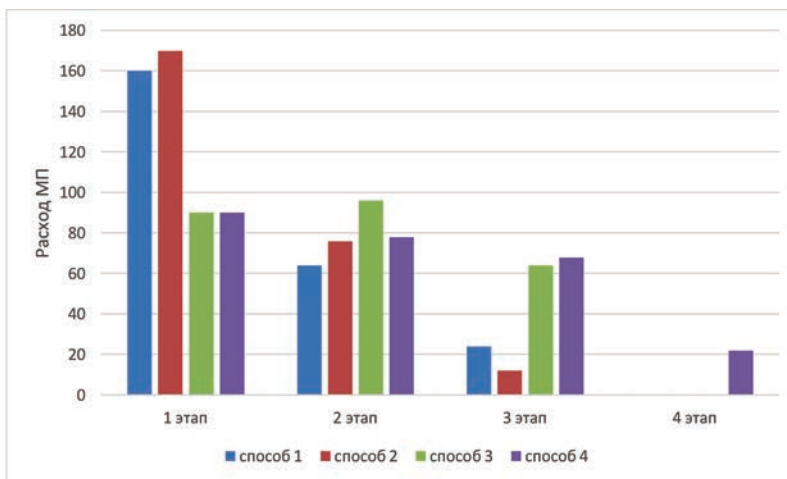


Рис. 8. Расход ресурса МП РТК по этапам применения

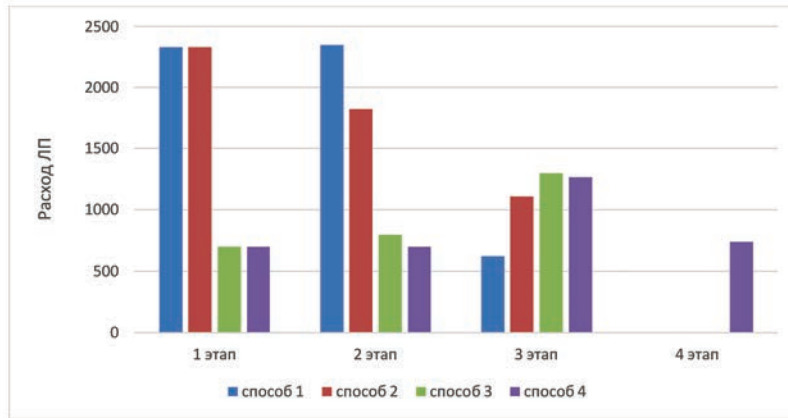


Рис. 9. Расход ресурса ЛП РТС по этапам применения

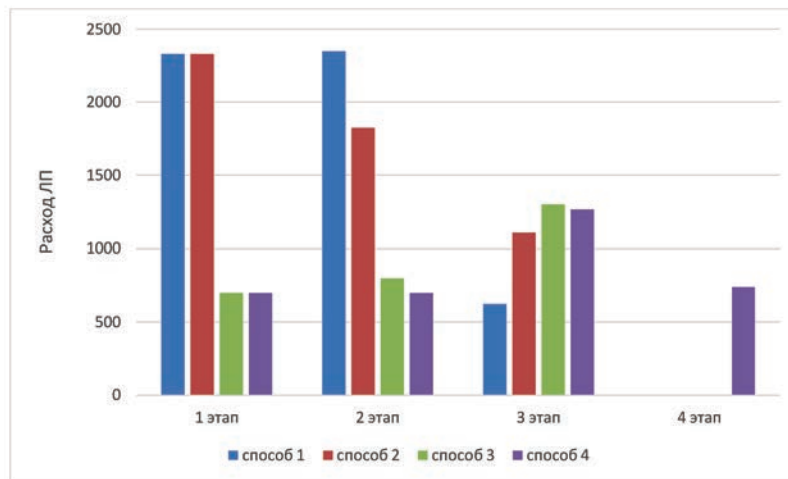


Рис. 10. Времена ликвидации ОФ ЭС по этапам применения

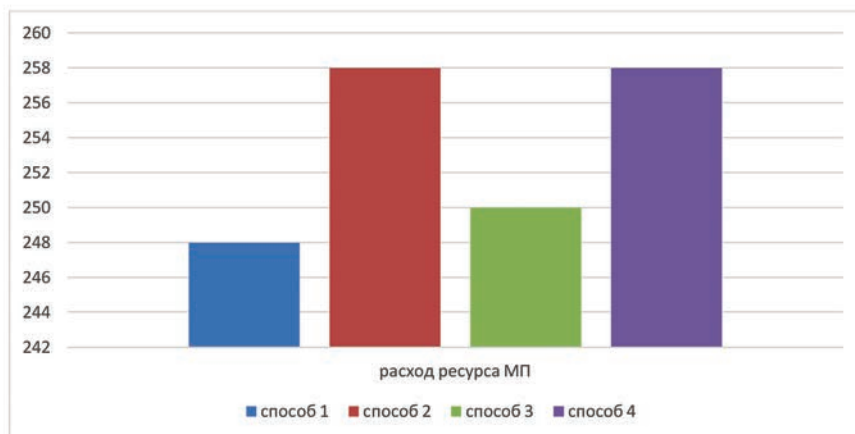


Рис. 11. Общий расход ресурса МП РТС

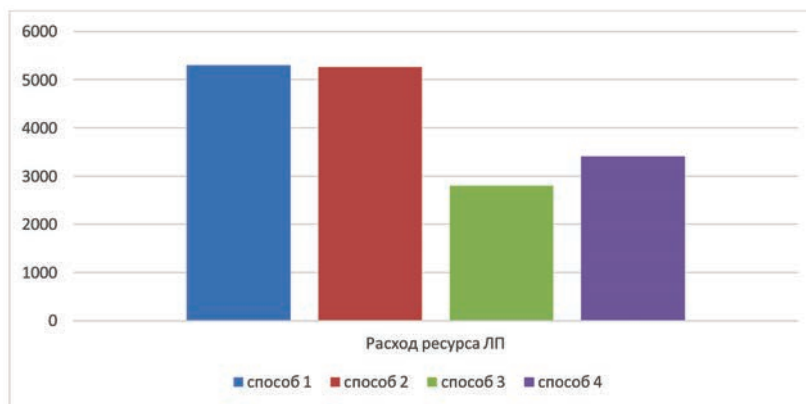


Рис. 12. Общий расход ресурса ЛП РТС

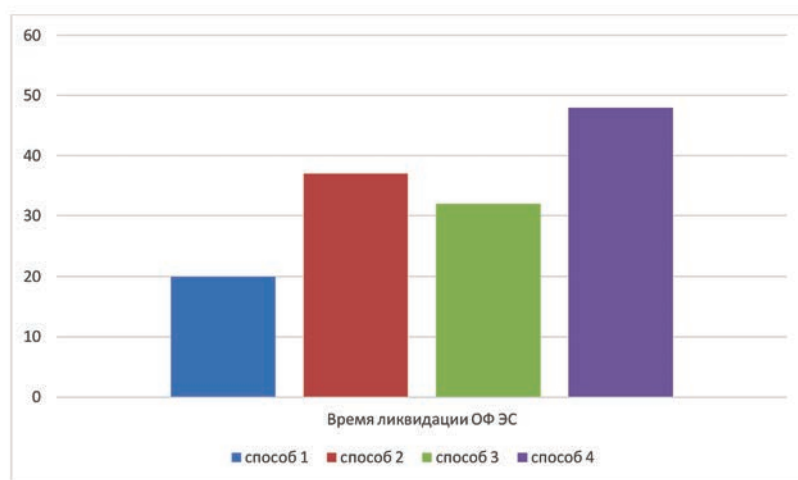


Рис. 13. Время ликвидации ОФ ЭС

Время ликвидации ОФ ЭС для рассмотренных способов применения представлены на рис. 13.

Заключение

По полученным результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- рассредоточенное применение гетерогенных и гомогенных РТС в узлах КЗП обеспечивает лучшие показатели по времени ликвидации ЭС;
- гомогенная структура РТК имеет преимущество перед гетерогенной по расходу МП РТС, что обеспечивает полноту ликвидации ОФ ЭС;
- рассредоточенное применение гетерогенных и гомогенных РТС от граничных узлов КЗП минимизирует расход ЛП, который может повысить вероятность ликвидации ОФ при изменении прогнозируемых условий развития ЭС.

Литература

1. Тарасов А.Г., Минаков Е.П. Робототехнические комплексы автоматизированных систем управления под-

готовкой и пуском ракет космического назначения и показатели эффективности их применения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 19–24.

2. Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Онов В.А. Обоснование необходимых условий и вариантов применения робототехнических систем и комплексов ликвидации экстремальных ситуаций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2016. № 3 (39). С. 17–25.

3. Богданов С.П., Басов О.О., Иванов А.А. Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров // Труды СПИИРАН. 2014. № 2(33). С. 27–44.

4. Тодосейчук С.П., Самойлов К.И., Климачева Н.Г. Научно-методические основы создания и применения робототехнических средств для решения задач МЧС России. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. 192 с.

5. Письменная В.А., Якутин А.В. Решение задачи целераспределения с использованием венгерского алгоритма // Успехи современной радиоэлектроники, 2016. № 2. С. 32–36.

6. *Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X.* A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. 2011. Vol. 1. Pp. 1–10.
7. *Gainanov D.N., Rasskazova V.A.* An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs // Bulletin SUSU. 2016. Vol. 9. No. 3. Pp. 17–30.
8. *Sikanen T.* Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming. Independent research projects in applied mathematics. 2008. 32 p.
9. *Mukhedkar R., Naik S.* Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model. Intern // J. of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013. Vol. 2. No. 6. Pp. 279–289.
10. *Yang Xin-quan.* The Algorithms Optimizaition of Artificial Neural Network Based on Particle Swarm // The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2014. Vol. 8. Pp. 519–524.
11. *Lu Y., Miao W., Li M.* The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm // J. of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 48. No. 2. Pp. 809–816.
12. *Liu B., Qin Z., Wang R., Gao Y-B., Shao L-P.* A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment // Information Technology Journal. 2009. Vol. 8. No. 2. Pp. 156–164.
13. *Kohlbrecher S., Stryk O. Von, Meyer J., Klingauf U.* A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation // Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE International Symposium on. 2011. Pp. 155–160.
14. *Zavlanos M., Pappas G.* Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information // Proc. of the American Control Conference. USA, New-York City, 2007. Pp. 1173–1178.
15. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физико-математическая литература (Физматлит), 2009. 278 с.

A METHOD FOR SCHEDULING USE OF ROBOTIC SYSTEMS THE ELIMINATION OF EXTREME SITUATIONS IN THE PROCESS OF PREPARING AND LAUNCHING SPACE ROCKETS

Anatoly G. Tarasov,

St. Petersburg, Russia, Atol-77@mail.ru

Evgeny P. Minakov,

St. Petersburg, Russia, ep.minakov12345@mail.ru

ABSTRACT

Space vehicles belong to the highly reliable technical devices. But much of the difficulty occurring when preparing space rockets for launch and launch processes, high energy intensity of these processes, the high price of the mistakes of the operating personnel, the operational documentation inaccuracies, space vehicles defects, wrong decisions taken give reason to conclude that exploitation of space vehicles is an activity associated with a high level of risk. One of the most dangerous stage is the start of a space rocket, during which the possibility of explosion, fire, spills of rocket fuel components, which causes damage to the operating personnel and the environment. In addition, during the flight of the space rocket possible explosion, falling and damage to the population, industrial objects, the environment. Currently, the problem of elimination of accidents consequences, disasters and other incidents in the process of launches of space vehicles assigned to rescue a group formed on each start-up of space rockets. The main tasks of the rescue group are the assessment of the technical condition of the alarm units and systems; performing rescue operations; determination of vapors concentration of rocket fuels components and neutralize their Straits; the quenching of fires; the evacuation of weapons and equipment; clearing the inputs, outputs, structures, open doors, hatches, demolition debris, clearing roads, the output of machinery; pumping water and industrial wastewater from buildings and facilities; evacuation of victims from the area of the accident, provide first aid; perform certain types of repair work. These tasks rescue groups in order to improve the safety of the rescuers must be performed with the use of existing and future

robotic systems. One of the problems to be addressed is to minimize the damage in case of extreme situations, which requires advance planning of measures on liquidation of extreme situations with the use of such robotic systems, the development of planning methods which is relevant for the present task. Accidents and disasters that occurred during the exploitation of space vehicles are a clear indication of the need for research aimed at developing methods of planning the use of robotic systems the elimination of extreme situations.

Keywords: the robotic system; extreme situation; hazard; area security; a key application area.

References

1. Tarasov A.G., Minakov E.P. Robotic systems of automated control systems preparation and launching of a space rocket and indicators of efficiency of their application. *Industrial automation and controllers*. 2015. No. 6. Pp. 19-24. (In Russian).
2. Minakov E.P., Tarasov A.G., Onov V.A. Rationale for the necessary conditions and applications of robotic systems and complexes elimination of extreme situations. *Problemy upravleniya riskami v tehnosfere* [Issues of Risk Management in the Technosphere]. 2016. No. 3 (39). Pp. 17-25. (In Russian)
3. Bogdanov S.P., Basov O.O., Ivanov A.A. Primenenie metodov teorii grafov dlja proektirovaniya sredstv izmerenija taktil'nyh parametrov [Application of methods of graph theory for design of tactile measuring parameters]. *Proceedings of SPIIRAS*. 2014. No. 2(33). Pp. 27-44. (In Russian)
4. Todosijchuk S.P., Samoilo K.I., Klimacheva N.G. Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya ro-bototekhnicheskikh sredstv dlja resheniya zadach MChS Rossii [Scientific-methodical bases of creation and application of robotic means for the decision of tasks of EMERCOM of Russia]. Moscow: FGU VNII GOCHS (FC), 2011. 192 p. (In Russian)
5. Pismennaja V. A., Jacutin A.V. Solution to the problem of target distribution using the Hungarian algorithm. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [Successes of modern Radioelectronics]. 2016. No. 2. Pp. 32-36. (In Russian)
6. Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. 2011. Vol. 1. Pp. 1-10.
7. Gainanov D.N., Rasskazova V.A. An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs. *Bulletin SUSU*. 2016. Vol. 9. No. 3. Pp.17-30.
8. Sikanen T. *Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming. Independent research projects in applied mathematics*. 2008. 32 p.
9. Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model. *Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2013. Vol. 2. No. 6. Pp. 279-289.
10. Yang Xin-quan. The Algorithms Optimizaition of Artificial Neural Network Based on Particle Swarm. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*. 2014. Vol. 8. Pp. 519-524.
11. Lu Y., Miao W., Li M. The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm. *J. of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013. Vol. 48. No. 2. Pp. 809-816.
12. Liu B., Qin Z., Wang R., Gao Y-B., Shao L-P. A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment. *Information Technology Journal*. 2009. Vol. 8. No. 2. Pp. 156-164.
13. Kohlbrecher S., Stryk O. von, Meyer J., Klingauf U. A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation. *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE International Symposium on*. 2011. Pp. 155-160.
14. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information. Proc. of the American Control Conference. USA, New-York City, 2007. Pp. 1173-1178.
15. Kalyayev I. A., Gaiduk A.R., Kapustian S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow: Fiziko-matematicheskaya literatura (Fizmatlit), 2009. 278 p. (In Russian)

Information about authors:

Tarasov A. G., PhD, doctoral candidate, Military Space Academy;
Minakov E. P., PhD, professor in department of organizational-technical systems for space purposes, Military Space Academy.

For citation: Tarasov A. G., Minakov E. P. A method for scheduling use of robotic systems the elimination of extreme situations in the process of preparing and launching space rockets. *H&ES Research*. 2017. Vol.9. No. 4. Pp. 29-40. (In Russian)



III ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИТ-ФОРУМ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ «Smart Oil & Gas: Цифровая трансформация нефтегазовой индустрии»

14–15 сентября 2017

Историческое здание Управления
городских телеграфов

Санкт-Петербург, Почтамтская ул., д.15

ОРГАНИЗАТОРЫ:

ИТСК



**COMNEWS
CONFERENCES**

Генеральный партнер:



При участии:



Основные темы форума:

- Место нефтегазовой отрасли в государственной программе «Цифровая экономика»
- Международная и федеральная стандартизация технологий Интернета вещей
- Адаптация подходов «Индустрии 4.0» к потребностям нефтегазовой промышленности и российской специфике
- Первые практические результаты работы Государственного банка цифровой геологической информации (ГБЦГИ), сбора и верификации данных для его работы
- ИТ как инструмент обеспечения непрерывности деятельности компании
- Сети 5G и новые телекоммуникационные технологии для повышения эффективности нефтегазовой отрасли
- Экономика цифрового месторождения
- Использование когнитивных технологий в нефтегазовой отрасли
- Big Data и предиктивная аналитика при обслуживании бурового, насосного и производственного оборудования
- Применение технологий виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности в производственных процессах
- Практика внедрения систем усовершенствованного управления технологическими процессами (Advance Process Control)
- Цифровой завод 2.0: управление экономическими параметрами производства и новые требования к безопасности информационных систем
- Использование системы управления бизнес-процессами (Business Process Management) и ее адаптация к требованиям цифровой эпохи (облака, социальное взаимодействие, поддержка мобильных устройств)
- Управление данными и цифровые корпоративные функции
- ИТ-системы на базе технологии low-code
- Real-Time Enterprise: постановка задач с уровня бизнеса, а не технологий
- Перспективы систем искусственного интеллекта в нефтегазовом комплексе: сферы применения и ответственность за принятые решения
- Применение принципа «открытых инноваций» и запуск «цифровых студий» в ВИНК

<http://www.it-vink.ru>

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ С ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Смагин Владимир Александрович,

д.т.н., профессор кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, va_smagin@mail.ru

Лавров Роман Олегович,

к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, 9432923@mail.ru

Богданец Александр Владимирович,

начальник метрологической службы Западного военного округа Вооруженных Сил Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия, BAV_nms@gmail.com

Ширямов Олег Анатольевич,

адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, shiryamov_oa@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен один из показателей качества, связанный с временной избыточностью, позволяющей системе выполнять задание в случае ее нарушения и возобновления работы при наличии избыточного времени. Предлагается распространить показатель надёжности для систем с временной избыточностью на информационно-измерительные системы. Рассмотрены случаи возобновления выполнения работы информационно-измерительной системы после отказа при мгновенном исправлении измерительного канала системы, а также со случайной задержкой. Приведены выражения для расчетов двух первых центральных моментов случайной величины избыточного времени системы с временной избыточностью. Предложен способ нахождения вероятности выполнения задания системой при произвольных не экспоненциальных плотностях вероятностей времени безотказности и восстановления. Приведена зависимость вероятности выполнения работы системой с резервом времени от ее готовности.

Рассмотрены два способа накопления и потери определенного количества информации информационно-измерительной системой при выполнении ей задания. В интегральное уравнение для определения вероятности выполнения задания системой и её решение вводятся параметры накопления информации при работе и потери информации при восстановлении системы. Показано, как в этом уравнении учитывать информационные параметры, связанные с накоплением и потерей количества информации в процессе работы системы. Приведён простой пример расчёта вероятности выполнения задания информационно-измерительной системой с временной избыточностью при условии, что за периоды активной работы она накапливает измерительную информацию, а за периоды восстановления ее теряет. Рекомендуется использовать полученные результаты в сетевых информационно-измерительных системах для достижения оптимальных решений.

Ключевые слова: временная избыточность; интегральное уравнение; вероятность выполнения задания; накопление и потеря информации; информационная работа и рентабельность; оптимальные задачи для сетевых информационных систем.

Для цитирования: Смагин В. А., Лавров Р. О., Богданец А. В., Ширямов О. А. Расчёт показателя вероятности выполнения измерительной задачи информационно-измерительной системой с временной избыточностью // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 42-47.

Введение

Современные информационно-измерительные системы строятся на основе вычислительной техники. В отличие от систем прошлого века, которые характеризовались высоким уровнем энергетической и низким уровнем информационной насыщенности, системы настоящего века отличаются низким уровнем энергетической и высоким уровнем информационной насыщенности. Информационная интенсивность процессов управления присуща также социальным системам и их компонентам. Бурно развиваются новые информационные технологии, наблюдается значительный прогресс в области информатизации общества [1].

Высокая эффективность процессов управления в современных измерительных системах обуславливается, прежде всего, использованием высокопроизводительной вычислительной техники. Сегодня практически нет такой сферы человеческой деятельности, где бы ни использовались вычислительные средства, в том числе и в измерительной технике. В XX веке главное внимание науки сосредотачивалось на разработке автоматизированных информационно-измерительных систем, моделей их анализа и синтеза, устойчивости, надёжности и помехозащищённости, информационной теории измерений. В XXI преобладающий интерес в ней уже относится к информационной кибернетике, автоматическим системам, анализу и синтезу информационных систем и сетей искусственного интеллекта [2].

Научные методы анализа и синтеза качества измерительных систем, основные критерии и показатели, разработанные в прошлом веке, явились основой для дальнейшего их совершенствования и построения новых методов [3]. В настоящее время они всё более приобретают выражённую информационную направленность. Так, например, теория эффективности [4] и квалиметрия [5] начинают принимать с позиции их результативности более информационную окраску. И эта тенденция будет возрастать.

Рассмотрим частный вопрос информационно-измерительной системы, связанный с показателем временной избыточности, предложенный в теории надёжности [6]. На примере этого показателя покажем насколько важно при его расчёте вводить, измерять и учитывать информационную составляющую.

Показатели надёжности системы при наличии временной избыточности

В монографии [6] рассмотрена следующая задача. Информационно-измерительная система должна непрерывно работать в течение времени τ . Отказ в указанном промежутке времени приводит к полному обесцениванию результатов её работы, проделанной до момента отказа τ .

Предполагается, что время, отведённое на выполнение работы системой, больше минимально необходимого времени τ . При возникновении отказа в течение времени τ измерительный канал системы мгновенно заменяется исправным, и работа начинает выполняться сначала. Этот процесс продолжается до тех пор, пока работа длительностью τ единиц времени не будет выполнена в течение до-

полнительного времени t , отведённого для её выполнения. На основании теоремы о полной вероятности имеем

$$P(\tau, t) = P(\tau, 0) + \int_0^{\tau} a(\xi)P(\tau, t - \xi)d\xi \quad (1)$$

где $a(\xi)$ — плотность вероятности времени до отказа системы, $P(\tau, 0)$ — вероятность выполнения работы системой при условии, что избыточное время t равно нулю.

Решение уравнения (1) в изображении Лапласа [7] имеет вид

$$P^*(\tau, s) = \frac{P(\tau, 0)}{s(1 - \int_0^{\tau} a(\xi)e^{-s\xi}d\xi)} \quad (2)$$

Если возобновление выполнения работы после отказа системой происходит со случайной задержкой, то есть с учётом немгновенного возобновления, то решение уравнения (1) принимает вид

$$P^*(\tau, s) = \frac{P(\tau, 0)}{s(1 - g^*(s) \int_0^{\tau} a(\xi)e^{-s\xi}d\xi)} \quad (3)$$

в котором $g^*(s)$ — изображение Лапласа плотности вероятности времени восстановления работоспособности системы после её отказа. Выражение (3) для произвольных распределений было получено доктором физико-математических наук профессором Х. Л. Смолицким [8].

Укажем на непосредственное использование выражения (3) в практических расчётах. Часто необходимо знать два первых центральных момента случайной величины избыточного времени. После дифференцирования выражения (3) по переменной S , последующего приравнивания результата к нулю и элементарных преобразований будем иметь

$$\bar{t} = \frac{\bar{t}_B + \int_0^{\tau} P(\xi, 0)d\xi}{P(\tau, 0)} - \bar{t}_B - \tau, \quad (4)$$

где \bar{t}_B — средняя величина избыточного времени.

Величина дисперсии избыточного времени будет равна

$$D_t = \frac{\alpha_{2B} \int_0^{\tau} a(\xi)d\xi + 2\bar{t}_B \int_0^{\tau} \xi a(\xi)d\xi + \int_0^{\tau} \xi^2 a(\xi)d\xi}{P(\tau, 0)} + \frac{[\bar{t}_B \int_0^{\tau} a(\xi)d\xi + \int_0^{\tau} \xi a(\xi)d\xi]^2}{P^2(\tau, 0)} \quad (5)$$

В выражении (5) величина α_{2B} — второй начальный момент случайного времени восстановления.

Более сложным является нахождения вероятности выполнения задания системой при заданных величинах τ , t и произвольных не экспоненциальных плотностях вероятности

стей времени безотказности и восстановления. В общем случае от изображений (2) и (3) следует переходить к искомым вероятностям численными методами обращения преобразования Лапласа. Использование таблиц обратного преобразования даже в простейших случаях фактически бесполезно.

Для практических расчётов, когда величина вероятности $P(\tau, t)$ достаточно близка к единице, удовлетворительный ответ по точности вычисления может дать формула, полученная на основе приближённого обращения преобразования Лапласа по формулам Алфрея или Хаара. Эти формулы следуют из формулы Уайдера [9] — формулы приближённого обращения изображения Лапласа на основе свойства фильтрации преобразования с помощью дельта-функции Дирака [10].

Пользуясь, например, аппроксимационной формулой Алфрея,

$$f(t) \approx sf^*(s) \Big|_{s=\frac{1}{t}}, \quad (6)$$

из формулы (3) получим выражение

$$P(\tau, t) = \frac{P(\tau, 0)}{(1 - g^*(\frac{1}{t})) \int_0^{\tau} a(\xi) e^{-\frac{1}{t}\xi} d\xi}, \quad (7)$$

которое является оценкой сверху вероятности выполнения задания системой. Поэтому в дальнейшем полученную оценку необходимо скорректировать.

Если восстановление после отказа системы является мгновенным, то в формуле (3) следует принять $f^*(s)=1$. В этом случае выражения (4), (5) и (7) упрощаются.

Важным свойством временной избыточности, широко используемым в современных автоматизированных комплексах, является то, что её введение приводит к увеличению их готовности. Действительно, согласно методике, предложенной профессором Н.М. Седякиным [11], вероятность выполнения задания ремонтируемой системой с резервом времени определяется по формуле

$$P(\tau, t) = \frac{T(\tau+t)}{T(\tau+t) + \Theta(\tau+T)} + \frac{\Theta(\tau+t)}{T(\tau+t) + \Theta(\tau+t)} \int_0^{\tau} f(U) dU, \quad (8)$$

где T , Θ — длительности импульсов работоспособности и паузы, причём длительность импульса работоспособности укорочена на величину $\tau + t$;

$f(U)$ — плотность распределения времени от момента поступления команды в систему до начала следующего импульса работоспособности;

t — среднее избыточное время, потребное для решения задачи длительностью τ при наличии сбоев или отказов в системе, определяемое по формуле (4).

Выражение (8) может быть представлено в виде

$$P(\tau, t) \approx \begin{cases} K_T, & 0 < t < \tau, \\ 1 - (1 - K_T) e^{-\frac{t-\tau}{t_s}}, & t \geq \tau \end{cases}. \quad (9)$$

Зависимость (9) показана на рис. 1.

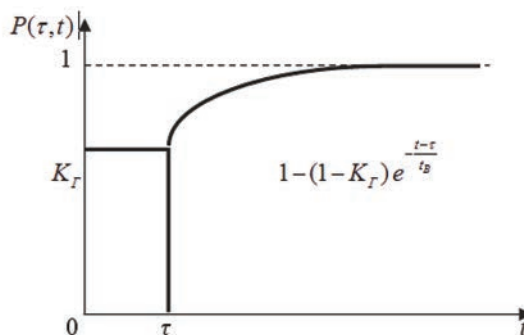


Рис. 1. Вероятность выполнения работы системой с резервом времени

Информационная производительность и количество работы

При выполнении поставленного задания система с временной избыточностью может накапливать или терять определённое количество информации [12]. Можно различать два способа накопления ею количества информации. При первом способе поступающая информация только накапливается в системе. При втором способе информация накапливается по мере поступления в систему и теряется в процессе восстановления системы.

Рассмотрим первый способ. Предполагаем, что в систему поступает с постоянной скоростью некоторое количество измерительной информации (байтов, файлов и др.). Тогда за случайное время работы системы во время одного цикла принимается случайное количество информации. Плотность вероятности этого количества информации определяется так

$$w(t) = \frac{1}{I} a\left(\frac{t}{I}\right). \quad (10)$$

В преобразовании Лапласа (10) принимает вид

$$w^*(s) = a^*(Is).$$

Тогда формула (2) с учётом выражения (10) представится в виде

$$R^*(\tau, s) = \frac{R(\tau, 0)}{s(1 - \int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) e^{-s\xi} d\xi)},$$

где $R^*(\tau, s)$ — изображение Лапласа количества информационной работы, выполненной системой с временной избыточностью t . Величина $R(\tau, 0) = P(\frac{\tau}{I})$.

Второй способ отличается от первого тем, что в течение времени восстановления системы измерительная информация теряется с некоторой постоянной скоростью. Плотность вероятности количества потерянной информации определяется так

$$r(t) = \frac{1}{J} f\left(\frac{1}{J}\right), \quad (11)$$

где J — скорость потерь и информации.

В преобразовании Лапласа (11) принимает вид

$$v^*(t) = r^*(Js),$$

а формула (3) записывается так

$$R^*(\tau, s) = \frac{P(\frac{\tau}{I}, 0)}{(1 - g^*(Js)) \int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) e^{-s\xi} d\xi} \quad (12)$$

Начальные моменты вероятности (2) или (15) определяются по формулам дифференцирования преобразования Лапласа. Для сокращения объёма статьи они не приводятся.

Пример

Требуется рассчитать вероятность выполнения измерительной задачи информационно-измерительной системой с временной избыточностью при условии, что за периоды активной работы она накапливает измерительную информацию, а за периоды восстановления (простоя) информацию теряет.

Решение: Применяя формулу Алфрея (6) к выражению (12), получаем

$$R(\tau, t) = \frac{P(\frac{\tau}{I}, 0)}{(1 - g^*\left(\frac{J}{t}\right) \int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) e^{-\frac{\xi}{t}} d\xi)}$$

Примем следующие исходные данные:

$$m = 10 h., \sigma = 3 h., a(t) = dnorm(t, m, \sigma), \mu = 5 h^{-1}.,$$

$$g^*(s) = \frac{\mu^2}{(s + \mu)^2}, \tau = 10 h., I = 1,5 \frac{h.}{@},$$

$$J = 0,3 \frac{h.}{@}, P(\tau, t) = \int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) d\xi$$

Окончательно получаем расчётное выражение:

$$R(\tau, t) = \frac{\int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) d\xi}{\left(1 - \frac{\mu^2 t^2}{(J + \mu t)^2} \int_0^{\tau} \frac{1}{I} a\left(\frac{\xi}{I}\right) e^{-\frac{\xi}{t}} d\xi\right)} \quad (13)$$

На рис. 2 представлена кривая вероятности (13). Кроме того, на рисунке показана пунктиром кривая вероятности $P(t)$ для случая, когда информационные параметры не учитываются, то есть $I = 0, J = 0$.

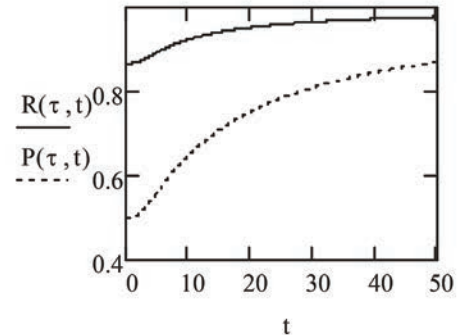


Рис. 2. Кривая вероятности $R(\tau, t)$ и $P(t)$

Следует отметить, что с увеличением параметра I кривая $R(t)$ поднимается вверх, а с увеличением параметра J опускается вниз, что соответствует в первом случае увеличению, а во втором случае снижению количества накапливаемой информации.

Это и означает, что количество информации с увеличением параметра I имеет тенденцию роста, а с увеличением параметра J — тенденцию снижения.

Однако, чтобы определить полное количество накопленной информации в непрерывном процессе с увеличением времени t , необходимо воспользоваться более трудоёмким и точным механизмом её подсчёта. В силу громоздкости он здесь не приводится, а только делается ссылка на источник [13], в котором на примере дублированной восстанавливаемой системы с накоплением и потерей информации он рассмотрен детально. Там же приводится и методика оценивания рентабельности информационной системы.

Практическое применение предложенной модели

В данной статье нами рассмотрена только сама модель расчёта информационной характеристики с временной избыточностью. Наибольший интерес прикладного характера может найти в её применении в сетевых, многоузловых системах, связанных с измерением, накоплением, хранением и преобразованием информации. Для оценивания и обеспечения уровня эффективности функционирования таких систем необходимо решать прямую задачу оптимизации — достигать максимальной вероятности действия системы при оптимальном распределении временного резерва между компонентами системы. Или решать обратную задачу — обеспечение требуемого уровня эффективности функционирования системы при минимальных затратах общей временной избыточности, используемой в системе.

Заключение

Сформировано мнение о том, что в период интенсивного информационного развития общества и науки необходимо уделять достаточно большое внимание количественным

методам оценивания влияния информации на процессы научного исследования. Важные показатели качества функционирования современных систем управления должны включать в свой состав компонент информации. Для этой цели необходимо корректировать существующие показатели или разрабатывать новые.

В качестве рекомендаций предлагается научно решать оптимизационные задачи для сложных сетевых структур с временной избыточностью. Прямая задача — достижение максимума целевой функции при ограничении на временной ресурс системы. Обратная задача — определение минимального временного ресурса системы при условии достижения требуемого целевого показателя системы. При оценивании эффективности работы системы в необходимом случае определять именно её информационную эффективность.

Литература

1. *Винер Н.* Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине: пер. с англ. И. В. Соловьева. 2-е изд. М.: Наука, 1983. 344 с.
2. *Moffat J.* Command and Control in the Information Age: Representing its Impact. London: The Stationery Office, 2002. 200 p.
3. *Власов В. О.* Современное состояние и перспективы развития технологии автоматизированного управления и связи // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2007. № 621. С. 163–167.
4. *Петухов Г. Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1. Методология, методы, модели. МО СССР, 1989. 660 с.
5. *Субетто А. И.* Эффективность как мера качества систем и процессов. МО СССР, 1985. 46 с.
6. *Смагин В. А.* Немарковские задачи теории надёжности. МО СССР, 1982. 269 с.
7. *Бейтмен Г., Эрдейи А.* Таблицы интегральных преобразований. Том 1: пер. с англ. / под ред. М. Я. Виленкина. М.: Наука. 1968. 344 с.
8. *Смолицкий Х. Л.* К вопросу об оптимальном резервировании аппаратуры // Известия АН СССР. 1959. № 4. С. 7–11.
9. *Гусеница Я. Н., Новиков А. Н.* Принцип баланса «комплексных вероятностей» при моделировании нестационарных систем обслуживания, представленных циклическим графом состояний // Информация и космос. 2016. № 3. С. 71–74.
10. *Thomas L. Cost.* Approximate Laplace Transform Inversions in Viscoelastic Stress Analysis // AIAA journal. 1964. Vol. 2. No. 4. Pp 57–62.
11. *Седякин Н. М.* Введение в теорию надёжности и обслуживания технических систем. Ленинград, 1965. 172 с.
12. *Тарасенко Ф. П.* Введение в курс теории информации. Томск: Издательство томского университета, 1963. 240 с.
13. *Парамонов И. Ю., Смагин В. А., Харин В. Н.* Оценка эффективности функционирования простейшей восстанавливаемой системы с риском // Приборостроение. 2014. № 4. С. 32–37.

CALCULATION OF THE INDICATOR OF PROBABILITY OF PERFORMANCE OF THE MEASURING PROBLEM BY INFORMATION-MEASURING SYSTEM WITH TIME REDUNDANCY

Vladimir A. Smagin,

St-Petersburg, Russia, va_smagin@mail.ru

Roman O. Lavrov,

St-Petersburg, Russia, 9432923@mail.ru

Alexander V. Bogdanetc,

St-Petersburg, Russia, BAV_nms@gmail.com

Oleg A. Shiryamov

St-Petersburg, Russia, shiryamov_oa@mail.ru

ABSTRACT

The article considers one of the quality indicators associated with the temporary redundancy, which allows the system to perform the task in the event of its violation and the resumption of work in the presence of excessive time. It is proposed to extend the reliability index for systems with temporary redundancy to information-measuring systems. The cases of the resumption of the work of the information-measuring system after failure with the instantaneous correction of the measuring channel of the system, as well as with a random delay are considered. Expressions are given for the calculation of the first two central moments of the random value of the excess time of the system with time redundancy. A method is proposed for finding the probability that a job will be performed

by the system for arbitrary non-exponential density probabilities of fail-safe time and recovery. The dependence of the probability of the work performed by the system with the time reserve from its readiness is given.

Two ways of accumulating and losing a certain amount of information by an information measuring system are considered when carrying out a task. In the integral equation for determining the probability of the task execution by the system and its solution, the parameters of information accumulation during operation and information loss during system restoration are introduced. It is shown how in this equation to take into account the information parameters associated with the accumulation and loss of the amount of information in the process of the system. A simple example is given of calculating the probability that a task will be performed by an information and measuring system with temporary redundancy, provided that during periods of active work it accumulates measurement information, and loses it during the recovery periods.

It is recommended to use the results obtained in network information and measurement systems to achieve optimal solutions.

Keywords: time redundancy; the integrated equation; probability of performance of the task; accumulation and information loss; information work and profitability; optimum problems for network information systems.

References

1. Wiener N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2nd ed. New York – London: The M.I.T. Press and John Wiley & Sons, Inc., 1961. 212 p.
2. Moffat J. *Command and Control in the Information Age: Representing its Impact*. London: The Stationery Office, 2002. 200 p.
3. Vlasov V.O. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya tehnologii avtomatizirovannogo upravlenija i svjazi [Current state and prospects of development of technology of automated management and communication]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo* [Proc. of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky]. 2007. No. 621. Pp. 163-167. (In Russian).
4. Petuhov G.B. *Osnovy teorii jeffektivnosti celenapravlennyh processov. Chast' 1. Metodologija, metody, modeli* [Bases of the theory of efficacy of purposeful processes. A part 1. Methodology, methods, models]. The Ministry of Defence USSR, 1989. 660 p. (In Russian)
5. Subetto A.I. *Jefferktivnost' kak mera kachestva sistem i processov* [Efficacy as a measure of quality of systems and processes]. The Ministry of Defence USSR, 1985. 46 p. (In Russian)
6. Smagin V.A. *Nemarkovskie zadachi teorii nadjozhnosti* [Nemarkovsky problems of the theory of reliability]. The Ministry of Defence USSR, 1982. 269 p. (In Russian)
7. Bateman H., Erdelyi A. *Tables of integral transforms*. Volume I. New York: Mcgraw-Hill Book Company, 1954. 356 p.
8. Smolitsky H.L. On the issue of optimal equipment reservation. *Izvestija AN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 1959. No 4. Pp. 7-11. (In Russian)
9. Gusenitsa Y.N., Novikov A.N. The principle of "complex probabilities" balance, applied to simulation of nonstationary service systems represented by the cyclic graph of states. *Informacija i kosmos* [Information and space]. 2016. No 3. Pp. 71-74. (In Russian)
10. Thomas L. Cost. Approximate Laplace Transform Inversions in Viscoelastic Stress Analysis. *AIAA journal*, 1964. Vol. 2. No. 4. Pp 57-62.
11. Sedjakin N.M. *Vvedenie v teoriju nadjozhnosti i obsluzhivaniya tehniceskijh sistem* [Introduction in the theory of reliability and service of technical systems]. Leningrad, 1965. 172 p. (In Russian)
12. Tarasenko F.P. *Vvedenie v kurs teorii informacii* [Introduction in a course of the theory of the information]. Tomsk: Publishing house of Tomsk university, 1963. 240 p. (In Russian)
13. Paramonov I. Ju. Smagin V.A., Harin V.N. Ocenivanie jefferktivnosti funkcionirovanija prostejshej vosstanavlivaemoj sistemy s riskom [Estimation of efficacy of functioning of the elementary reduced system with risk]. *Priborostroenie* [Instrument making]. 2014. No. 4. Pp. 32-37. (In Russian)

Information about authors:

Smagin V.A., PhD, Full Professor, Professor of the Military Space Academy.
 Lavrov R.O., PhD, head of Department of the Military Space Academy;
 Bogdanetc A.V., the chief of metrological service of district;
 Shiryamov O.A., post-graduate student of the Military Space Academy.

For citation: Smagin V.A., Lavrov R.O., Bogdanetc A.V., Shiryamov O.A. Calculation of the indicator of probability of performance of the measuring problem by information-measuring system with time redundancy. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 42-47. (In Russian)

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ АНТЕННЫ ПЕРВОГО ТИПА, ПРЕОДОЛЕВАЮЩИЕ ПРЕДЕЛ ЧУ-ХАРРИНГТОНА-ФАНО

Белянский Владимир Борисович,

к.ф.-м.н., доцент Московского технического
университета связи и информатики,
г. Москва, Россия, belyanskyv@gmail.com

Пронина Евгения Дмитриевна,

аспирант Московского технического
университета связи и информатики,
г. Москва, Россия, Москва,
jane19912007@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Предложены широкодиапазонные антенны с распределенным τ согласованием, габариты которых могут быть меньше габаритов антенн, обладающих минимально возможной добротностью по Чу-Харрингтону и согласованных по Фано. Такие антенны могут быть выполнены на основе логопериодических или квазилогопериодических антенн с использованием предложенных здесь частотнозависимых изоляторов 1-ого и 2-ого типов. При использовании в антенне частотнозависимых изоляторов 1-ого типа такую антенну предлагается называть антенной 1-ого типа. Антеннами 2-ого типа предложено называть антенны с использованием частотнозависимых изоляторов 2-ого типа. Частотнозависимые изоляторы 1-ого типа являются полосовыми изоляторами, а частотнозависимые изоляторы 2-ого типа – изоляторами, прозрачными на низких частотах. Применение частотнозависимых изоляторов устраняет «расплывание» эффекта отсечки тока при уменьшении размеров логопериодической антенны. В антеннах 1-го типа на любой частоте в пределах рабочего диапазона частот резонансным является только один вибратор и качество его согласования с распределительным фидером определяется только выбором величины сосредоточенного согласующего элемента и степенью близости геометрического параметра к единице, что гарантированно обеспечивает, в принципе, реализацию сколь угодно малой антенны со сколь угодно широкой полосой частот. В антеннах 2-го типа активная область может включать в себя несколько взаимосвязанных излучающих элементов, что может повысить степень компактности устройства, но при этом существенно усложняется настройка антенной системы и ее устойчивость. Так как задачей публикации является иллюстрация возможности создания сверхминиатюрных широкодиапазонных антенн, то на данной этапе рассматриваются характеристики наиболее характерных антенн с такими свойствами – антенн 1-го типа.

Приводятся частотные характеристики частотнозависимых изоляторов, эквивалентная схема логопериодической антенны с частотнозависимым изолятором и зависимости геометрических параметров антенны от нормированной длины плеча логопериодической антенны.

Ключевые слова: логопериодическая антенна (ЛПА); сверхминиатюрная ЛПА; широкодиапазонная сверхминиатюрная ЛПА; идеализированные частотнозависимые изоляторы (ЧЗИ); геометрические параметры ЛПА; предел Чу-Харрингтона при согласовании по Фано.

Для цитирования: Белянский В.Б., Пронина Е.Д. Широкодиапазонные антенны первого типа, преодолевающие предел Чу-Харрингтона-Фано // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 48-53.

Антенные системы являются неотъемлемой и существенной частью любой радиолинии. Поэтому задача минимизации габаритов антенных систем и расширения их частотного диапазона — одна из актуальных задач на сегодня. Проблема миниатюризации является весьма важной, например, при разработке цифрового радиовещания ДВ диапазона [1, 7–8], беспилотных летательных аппаратов, при разработке антенн конечных терминалов систем подвижной связи [10–11], при разработке замаскированных систем различного типа и т.п. Однако, в соответствии с фундаментальным пределом Чу-Харрингтона [3] и возможностями согласования этих антенн (предел Чу-Харрингтона-Фано [5–6]), способы улучшения приведенных выше параметров антенн являются строго лимитированными. Первой публикацией по сверхминиатюрным антеннам можно считать работу [9]. Оценке возможностей преодоления предела Чу-Харрингтона посвящен ряд работ [12–17], однако из этих работ следует, что либо преодолеть предел Чу-Харрингтона невозможно, либо преодоление предела возможно при использовании метаматериалов [15–16]. Показано [4,6], что предел Чу-Харрингтона-Фано, в принципе, можно преодолеть, используя антенны с распределенным согласованием. Такого типа антенны могут быть выполнены на основе логопериодических антенн (ЛПА) [1], габариты которых уменьшаются с компенсацией реактивной составляющей системы сосредоточенными элементами-дресселями или конденсаторами. Но при уменьшении габаритов этих антенн неизбежно возникает эффект «расплывания» отсечки тока. Этот недостаток предлагается устранить использованием частотнозависимых изоляторов (ЧЗИ). Для вибраторных логопериодических антенн такими изоляторами могут быть реактивные двухполосники полосового типа (которые

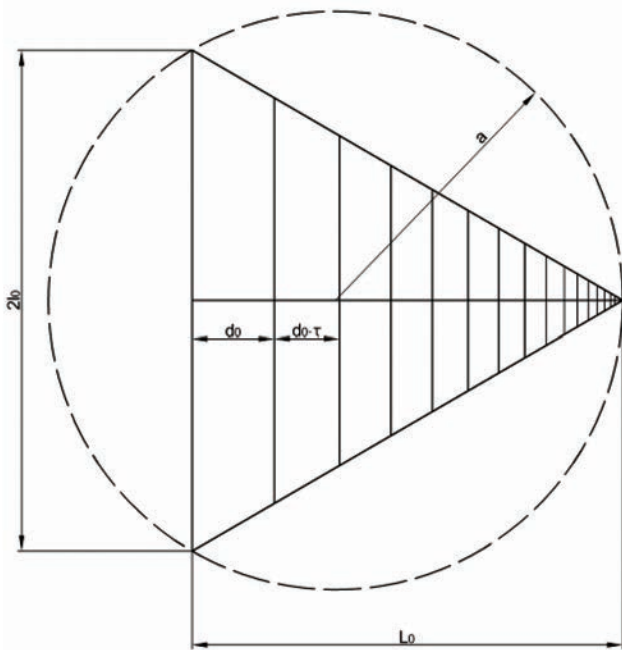


Рис. 1. Геометрия логопериодической антенны

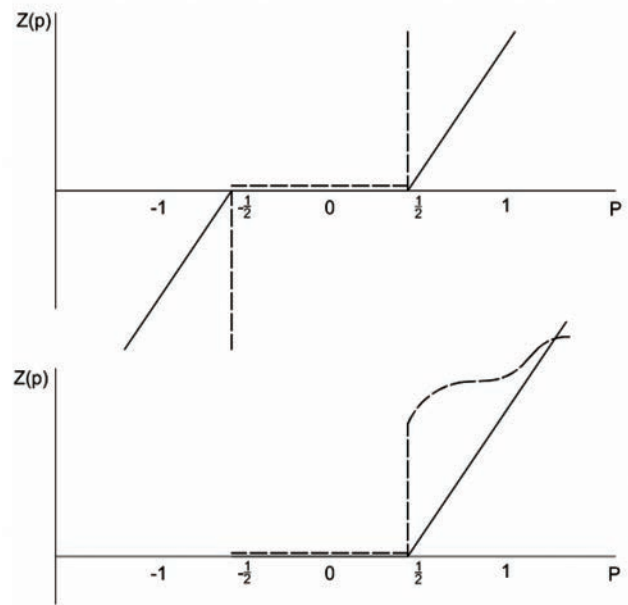


Рис. 2. Частотные характеристики частотнозависимых изоляторов (ЧЗИ) 1-го и 2-го типов

назовем частотнозависимыми изоляторами превого типа — ЧЗИ 1-го типа) или изоляторы, прозрачные на частотах, ниже некоторой граничной частоты (ЧЗИ 2-го типа). При использовании в антенне ЧЗИ только 1-го типа предлагается такую антенну называть антенной 1-го типа. Антеннами 2-го типа предлагается называть антенны с использованием ЧЗИ 2-го типа. В данной работе исследуются сверхминиатюрные антенны 1-го типа на основе вибраторных ЛПА. Геометрия такой антенны иллюстрируется рис. 1.

Геометрические параметры антенны τ и σ [1] выбраны таким образом, чтобы огибающая полотна представляла собой равносторонний треугольник, вписанный в окружность радиуса a . Как радиус a , так и длина плеча l_0 и расстояние между вибраторами d_0 используются в нормированном виде, т.е. под a , l_0 и d_0 понимаются величины, нормированные к длине волны нижней частоты рабочего диапазона. Последовательно с каждым вибратором включены ЧЗИ 1-го типа.

На рис. 2 приведены частотные зависимости импеданса идеализированных и идеальных ЧЗИ 1-го и 2-го типов (идеализированных — сплошные кривые, идеальные — пунктирные кривые).

Для ЧЗИ 1-го типа

$$Z_{\text{чзи1}} = \begin{cases} k(p + \frac{1}{2}) & \text{при } p < -\frac{1}{2}, \\ 0 & \text{при } -\frac{1}{2} \leq p \leq \frac{1}{2}, \\ k(p - \frac{1}{2}) & \text{при } p > \frac{1}{2}, \end{cases}$$

где P — нормированная частота, а для ЧЗИ 2-го типа

$$Z_{\text{чзи2}} = \begin{cases} 0 & \text{при } p \leq \frac{1}{2}, \\ k(p - \frac{1}{2}) & \text{при } p > \frac{1}{2}. \end{cases}$$

Приведенные характеристики удовлетворяют критерию реализации реактивных двухполосников. Полагается, что крутизна склона характеристик ЧЗИ $\frac{\partial Z}{\partial p} = k \gg 1$ достаточно велика, чтобы в работе участвовали резонатор, резонансная частота которого близка к частоте излучения f , и два ближайших вибратора (см. эквивалентную схему на рис. 3). Длину распределительного фидера L_{ϕ} целесообразно выбрать равной четверти длины волны резонансной частоты основного вибратора, а волновое сопротивление, равное волновому сопротивлению четвертьволновому трансформатору

$$W_{\phi} = \sqrt{R_A R_{\Sigma 0}}.$$

Если в антенне используется идеальный ЧЗИ, то КСВ на входе антенны легко рассчитать. Оно равно КСВ резонансного контура с известной добротностью Q . Рассчитаем значение КСВ, число вибраторов N и добротность Q в зависимости от заданного коэффициента перекрытия χ и заданной величины длины плеча l_0 . Расчеты выполнены по стандартным формулам для симметричного вибратора [2]. При расчете полагалось, что геометрические параметры антенны $\Delta\tau$ ($\Delta\tau = 1 - \tau$) связаны с добротностью одиночного вибратора соотношением $\Delta\tau = \frac{1}{Q}$. Значение $\Delta\tau$ как

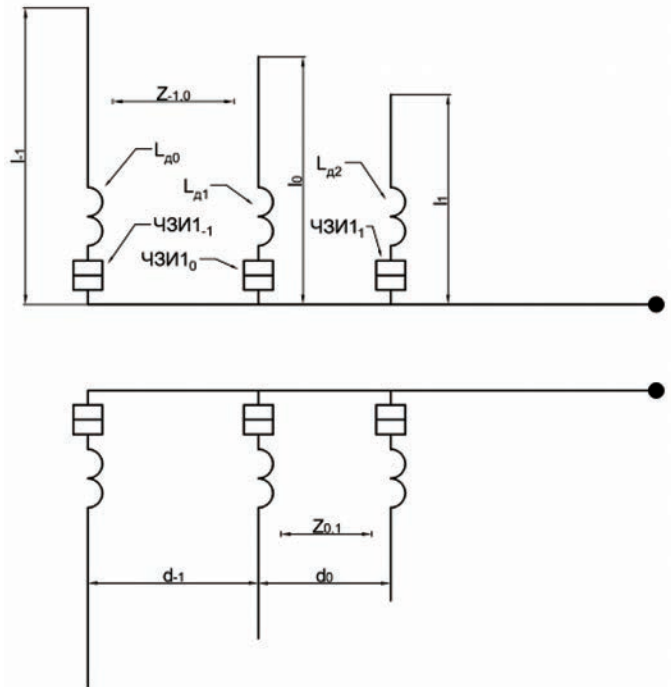


Рис. 3. Эквивалентная схема ЛПА в области резонансной частоты $P=0$

функция от $l_0 \Delta\tau = f(l_0)$ и $N(\chi, l_0)$ приведены на рис. 4 и 5. На рис. 5 N_{10} — число вибраторов при $\chi = 10$.

Величина N связана с коэффициентом перекрытия χ и геометрическим параметром τ соотношением $N = \frac{\ln \chi}{\ln \tau}$.

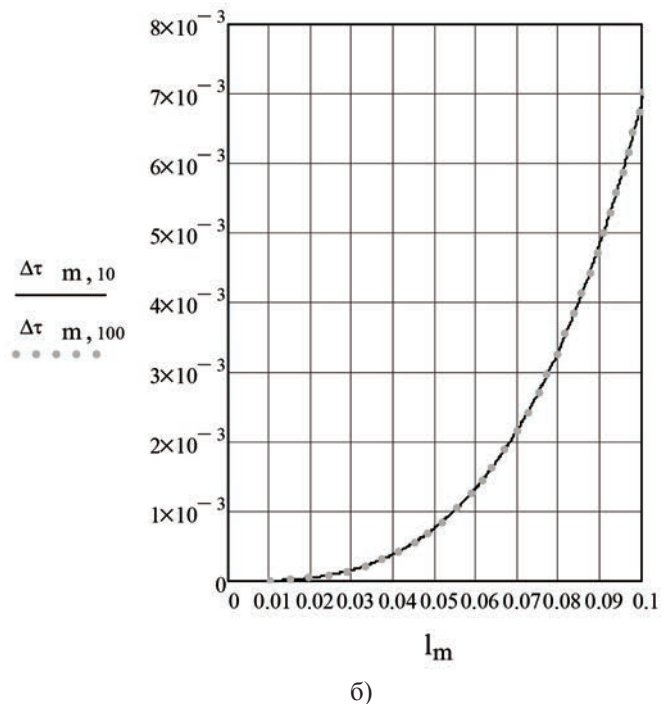
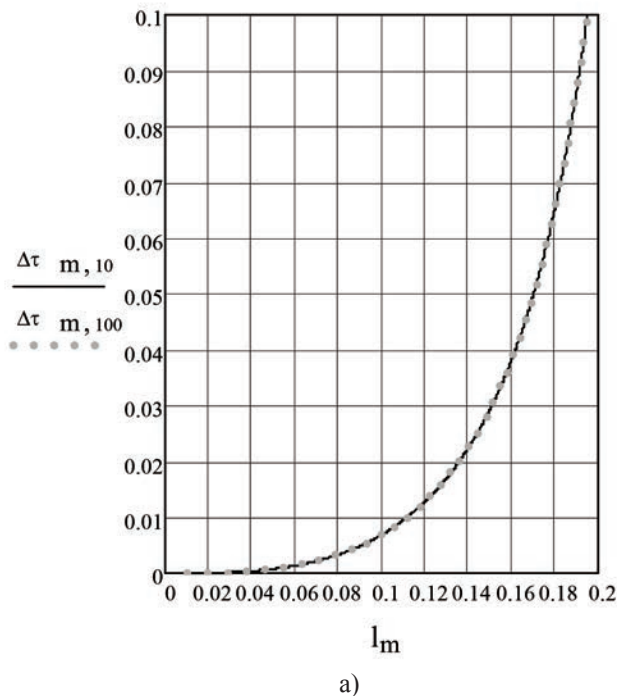


Рис. 4(а,б). Зависимость геометрических параметров $\Delta\tau$ от нормированной длины плеча ЛПА l_0

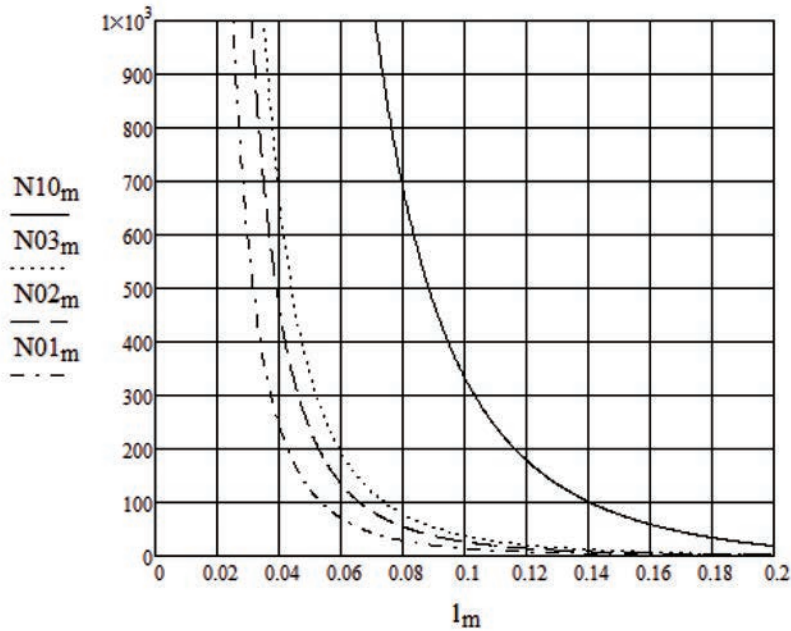


Рис. 5. Число вибраторов N ЛПА в зависимости от χ и l_0

При $\chi \rightarrow 1$ и $\tau \rightarrow 1$ $N \approx \frac{\chi - 1}{\Delta\tau}$. Из этих рисунков в частности следует, что при использовании идеальных ЧЗИ предел Чу-Харрингтона для антенн, работающих в полубезграничной полосе частот, преодолевается при $l_0 < 0,08$. Зависимость модуля коэффициента отражения антенны при идеальных изоляторах для случая $1 - \tau = \frac{1}{Q}$ приведены на рис. 6. Очевидно, что при понижении значения $\Delta\tau \rightarrow 0$.

Влияние токов крайних вибраторов в первом приближении легко определить, учитывая входные сопротивления вибраторов с длинами плеч l_{-1} и l_1 (см рис. 3). Очевидно, что модули этих сопротивлений бесконечно велики при $k \rightarrow \infty$. В общем случае, можно записать [2] для рассматриваемой ЛПА $U_{-1} \cong \tilde{U}_{0,-1} + I_{-1}Z_{d,-1}$, $U_0 \cong \tilde{U}_{0,0} + I_0Z_{d,0}$, $U_1 \cong \tilde{U}_{0,1} + I_1Z_{d,1}$, где $\tilde{U}_{0,-1} = \sum_{p=-1}^{\infty} Z_{-1,p}I_p$, $\tilde{U}_{0,0} = \sum_{p=-1}^{\infty} Z_{0,p}I_p$, $\tilde{U}_{0,1} = \sum_{p=-1}^{\infty} Z_{1,p}I_p$ и $Z_{d,-1}$, $Z_{d,0}$, $Z_{d,1}$ - сопротивления ЧЗИ последовательно соединенных с укорачивающим дросселем для вибраторов с номерами $-1, 0, 1$. При $d_0 \ll 1$ взаимные сопротивления вибраторов в области существенных токов близки к собственному сопротивлению резонансного вибратора, а напряжение на зажимах вибраторов с номерами $-1, 0, 1$ близки друг к другу. Отсюда следует, что $Z_i = Z_0 \frac{Z_{di}}{Z_{d0}}$. Считая, что $Z_{-1} \gg Z_0$ и $Z_1 \gg Z_0$, легко оценить КСВ антенны с неидеальными изоляторами. Результаты расчетов КСВ при неидеальных ЧЗИ для антенн 1-го и 2-го типов более подробно будут приведены в последующих публикациях. Очевидно, что если в антенне ис-

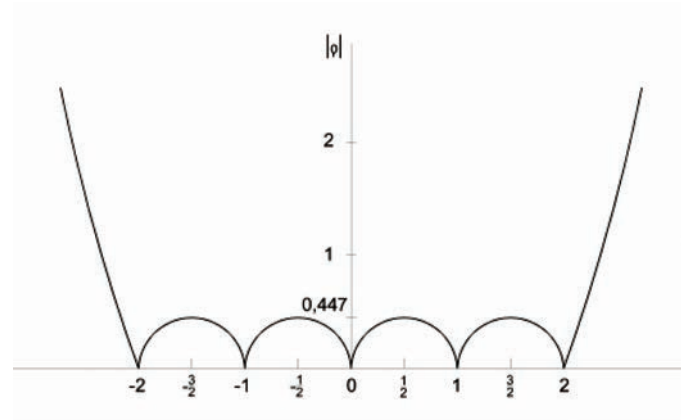


Рис. 6. Частотная зависимость КСВ ЛПА 1-го типа с идеальными ЧЗИ

пользуется неидеальные ЧЗИ, значение КСВ ухудшается, однако, как показали расчеты, это ухудшение не является существенным при $k > 3$.

Литература

1. Сверхширокополосные антенны: Сборник / под ред. Л. С. Бененсона. М.: Мир, 1964.
2. Ерохин Г. А., Чернышев О. В., Козырев Н. Д., Кочержевский В. Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. М.: Горячая линия — Телеком, 2004.
3. Chu L. J. Physical limitations of omni-directional antennas // Journal of Applied Physics. 1948. No. 19.
4. Белянский В. Б., Пименов Ю. В. Электродинамические и технологические особенности сверхминиатюрных антенн //

Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научно-технического и инженерно-технического состава. Кн.1. М.: МТУСИ, 2004.

5. *Белянский В.Б., Кочержевский В.Г., Худяков К.Н.* О критерии миниатюризации антенн // Труды Московского Технического Университета Связи и Информатики. 2008. Т. 2.

6. *Белянский В.Б.* Возможно ли преодолеть предел Чу-Харрингтона? // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2013. № 8. С. 24–27.

7. *Белянский В.Б., Прошин А.Б., Худяков К.Н.* Антенны ДВ, СВ и КВ диапазонов цифрового звукового вещания уменьшенных габаритов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 8. С. 28–29.

8. *Белянский В.Б., Пронина Е.Д.* Малогабаритные передающие антенны длинноволнового диапазона цифрового стандарта радиовещания. // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики Материалы VIII-ой Международной молодежной научно-практической конференции. 2015. С. 226–229.

9. *Wheeler N. A.* Fundamental limitations of small fntenas // Proceeding of the IRE. Dec.1947. Pp 1479–1488.

10. *Аникин К.В., Белянский В.Б.* Компактная рамочная антенна разнесенного приема // Антенны. 2012. № 1(176). С 9–16.

11. *Аникин К.В., Белянский В.Б.* Компактная рамочная антенна разнесенного приема. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 1. С. 20–22.

12. *Grimes D. H., Grimes C. A.* // Microwave Opt. Tech/ Lett. 2001. Vol. 28. No. 2. Pp. 172–177.

13. *Беличенко В.П.* Фундаментальные пределы теории антенн // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 55. № 8/2. С. 57–59.

14. *Слюсар В.* 60 лет теории электрически малых антенн // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2006. № 7. С. 10–19.

15. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая Миля. 2010. Вып. 3–4.

16. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НТБ. 2009. № 7. С. 70–79.

WIDE-TYPE BROADCASTING ANTENNAS OVERCOMING CHU-HARRINGTON-FANO

Vladimir B. Belyansky,

Moscow, Russia, belyanskyv@gmail.com

Evgenia D. Pronina,

Moscow, Russia, jane19912007@yandex.ru

ABSTRACT

In MTUCI, wide-range antennas with distributed mismatch are proposed, the dimensions of which can be smaller than the dimensions of the antennas possessing the lowest possible Q-Harrington quality and Fano-compatible. Such antennas can be made on the basis of log-periodic or quasi-periodic antennas (LPA) using the frequency-dependent insulators (FDI) of the 1st and 2nd types proposed here. When using antenna type 1 type antenna, it is proposed to call such an antenna an antenna of the 1st type. Antennas of the 2nd type are suggested to be called antennas using the second type of FDI. The first type of frequency protection is band-pass frequency-dependent insulators, and the second type of protection is insulators transparent at low frequencies. The application of the FDI eliminates the "spreading" of the current cutoff effect when the size of the log-periodic antenna decreases. In antennas of the first type at any frequency within the operating frequency range, only one vibrator is resonant and the quality of its matching with the distributive feeder is determined only by the choice of the value of the lumped matching element and the degree of proximity of the geometric parameter τ to unity, which in principle guarantees the realization. An arbitrarily small antenna with an arbitrarily wide band of frequencies. In antennas of the second type, the active region may include several interconnected blowing elements, which can increase the compactness of the device, but at the same time, the adjustment of the antenna system and its

stability becomes much more complicated. Since the publication purpose is to illustrate the possibility of creating ultra-miniature wide-band antennas, at this stage the characteristics of the most characteristic antennas with such properties as type 1 antennas are considered. The frequency characteristics of the FDI, the equivalent LPA scheme with FDI and the dependence of the geometric parameters of the antenna on the normalized length of the LPA arm are given. Also, the dependence of the SWR of the 1st type LPA on the ideal FDI given, and the SWR dependence on the steepness of the slopes of idealized FDI is estimated.

Keywords: logoperiodic antenna (LPA); subminiature LP; wide-range subminiature LPA; idealized frequency-dependent isolators (FDI); geometric parameters of the LPA; the Chu-Harrington limit with Fano agreement.

References

1. Benenson L.S. (Ed.). *Sverkhshirokopolosnye anteny: Sbornik* [Ultra-wideband antennas. Collection]. Moscow: Mir, 1964.
2. Erokhin G.A., Chernyshev O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevsky V.G. *Antenno-fidernye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln* [Antenna-feeder devices and propagation of radio waves]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004.
3. Chu L.J. Physical limitations of omni-directional antennas. *Journal of Applied Physics*. 1948. No. 19.
4. Belyansky V.B., Pimenov E.V. Elektricheskie i tekhnologicheskie osobennosti sverkhminiaturnykh antenn [Electrodynamic and technological features of the subminiature antennas]. *Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo, nauchno-tekhnicheskogo i inzhenerno-tekhnicheskogo sostava* [Abstracts of reports of the scientific and technical conference of the teaching and scientific, technical and engineering staff]. Book 1. Moscow: MTUCI, 2004.
5. Belyanskiy V.B., Kocherzhevsky V.G., Khudyakov K.N. O kriterii miniaturizatsii antenn. [On the criterion of miniaturization of antennas]. *Trudy Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the Moscow Technical University of Communication and Informatics]. 2008. Vol. 2.
6. Belyanskiy V.B. Is it possible to overcome the Chu-Harrington limit? *T-Comm*. 2013. No. 8. Pp. 24-27.
7. Belyanskiy V.B., Proshin A.B., Khudyakov K.N. Antennas LW, MW and HW bands of digital audio broadcasting of reduced dimensions. *T-Comm*. 2013. No. 8. Pp. 28-29.
8. Belyanskiy V.B., Pronina E.D. Malogabaritnye peredayushchie anteny dlinnovolnovogo diapazona tsifrovogo standarta radioveshchaniya [Small-size transmitting antennas of the long-wave range of the digital broadcasting standard]. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki. Materialy VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the North Caucasian Branch of the Moscow Technical University of Communication and Informatics Materials of the VIII International Youth Scientific and Practical Conference]. 2015. Pp. 226-229.
9. Wheeler N.A. Fundamental limitations of small antennas. *Proceeding of the IRE*. Dec.1947. Pp. 1479-1488.
10. Anikin K.V., Belyansky V.B. A compact loop antenna of diversity reception. *Antennas*. 2012. No. 1 (176). C. 9-16.
11. Anikin K.V., Belyansky V.B. A compact loop antenna of diversity reception. *T-Comm*. 2012. Vol. 6. No. 1. Pp. 20-22.
12. Grimes D.H., Grimes C.A. *Microwave Opt. Tech / Lett*. 2001. Vol. 28. No. 2. Pp. 172-177.
13. Belichenko V.P. Fundamental limits of the theory of antennas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika* [News of higher educational institutions. Physics]. 2011. Vol. 55. No. 8/2. Pp. 57-59.
14. Slyusar V. 60 years of the theory of electrically small antennas. *Electronics. The science. Technology. Business*. 2006. No. 7. Pp. 10-19.
15. Slyusar V. Metamaterials in antenna technology: basic principles and results. *Pervaya milya* [The first Mile]. 2010. Issue 3-4.
16. Slyusar V. Metamaterials in antenna technology: history and basic principles. *Elektronika: NTB* [Electronics: NTB]. 2009. No. 7. Pp. 70-79.

Information about authors:

Belyansky V.B., PhD, assistant professor, Moscow technical university of communications and Informatics;

Pronina E.D., postgraduate student of Moscow technical university of communications and Informatics.

For citation: Belyansky V.B., Pronina E.D. Wide-type broadcasting antennas overcoming Chu-Harrington-Fano. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 48-53. (In Russian)

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕТИ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Чертова Ольга Георгиевна,

аспирант Московского технического университета связи
и информатики, г. Москва, Россия, Olya-932007@yandex.ru

Новак Константин Викторович,

старший инженер-испытатель Главного научно-
исследовательского центра робототехники
Министерства обороны Российской Федерации,
г. Москва, Россия, konstantin-novak@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены вопросы состояния и совершенствования способов связи с морскими робототехническими комплексами. Дан краткий обзор существующих способов связи, рассмотрены их характерные особенности и основные проблемные вопросы, предложены направления исследований, направленные на создание перспективных информационных сетей, объединяющих группы морских робототехнических комплексов. В настоящее время управление морским робототехническим комплексом осуществляется по каналу связи (телеуправление) или автономно по программе, заложенной в память бортовой электронно-вычислительной машины, но такие способы связи нарушают скрытность применения морских робототехнических комплексов, а также накладывает существенные ограничения по положению судна-носителя относительно района нахождения комплекса в течение всего периода выполнения подводных работ. Во избежание этих недостатков можно использовать альтернативные способы передачи информации в подводной среде: каналы связи в диапазоне крайне низких частот, акустические каналы связи, оптические (лазерные) каналы связи и каналы связи на основе эффекта поверхностного распространения волны. Радиолинии в диапазоне крайне низких частот увеличат глубину связи, однако внедрение подобной аппаратуры сопряжено с существенными финансовыми издержками. Акустические волны достигают хорошего проникновения и распространения во всех упругих средах, в том числе при их колебаниях из-за изменений давления, недостатком является эффект их затухания с увеличением дистанций передачи. Лазерные линии связи обладают рядом новых качеств, к наиболее существенному из которых относится возможность обеспечения связи во всех районах Мирового океана, но их использование возможно только в сине-зелёной части видимой области электромагнитного излучения. Использование канала связи в приповерхностном и придонном слоях атмосферы способствует организации скрытной связи, но требует регулярный мониторинг состояния атмосферы, характеристики которой и определяют возможность организации и дальность канала связи. Таким образом, выбор конкретного способа организации связи с морскими робототехническими комплексами зависит от внешних условий, задач и характеристик выбранной сети связи.

Ключевые слова: морские робототехнические комплексы; необитаемые подводные аппараты; связь; гидролокатор; групповое управление.

Для цитирования: Чертова О.Г., Новак К.В. Возможные способы организации связи при построении сети морских робототехнических комплексов // Научное издание «Технологии в космических исследованиях Земли». 2017. Т. 9. № 4. С. 54-61.

Введение

За сравнительно небольшой период времени морские робототехнические комплексы (МРТК) прошли путь от первых простейших образцов до многофункциональных комплексов, способных выполнять достаточно сложные океанографические и прикладные работы в водной толще и вблизи дна.

Последние два-три десятилетия характеризуются активными исследованиями в области создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), используемых для решения широкого круга научных и прикладных задач по исследованию и освоению мирового океана. Подобные МРТК продемонстрировали свою эффективность при выполнении глубоководных обзорно-поисковых и обследовательских работ, морской геолого-разведки, освещения подводной обстановки и мониторинга водной среды [1–3].

В условиях обширности водных бассейнов Мирового океана, интенсивного развития МРТК, а также востребованности разработки систем освещения подводной обстановки (поиска, дальнего обнаружения и слежения за подводными лодками) актуальной становится концепция применения морских многоагентных (групповых) робототехнических систем, поставляющих информацию о вражеских территориях и акваториях, а также выступающих в качестве боевых платформ.

При групповом использовании роботов резко увеличивается радиус действия за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне, расширяется набор выполняемых функций (в случае установки на отдельных роботах группы устройств различных типов), а также достигается более

высокая вероятность решения поставленной задачи за счет перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них [4]. Таким образом, применение морских многоагентных робототехнических систем позволит оперативно и эффективно выполнять боевые и обеспечивающие задачи с меньшими затратами ресурсов при существенно большем охвате акватории.

В качестве примера исследований, проводимых в данной области, можно привести современные проекты Министерства обороны США, ориентированные на создание систем МРТК, объединенных в единую информационную сеть [5]:

- программа внедрения на флотах ВМС системы освещения подводной обстановки в прибрежных водах («Persistent Littoral Undersea Surveillance (PLUS) System»), в рамках которой запланировано создание основных элементов оперативно развертываемой многопозиционной системы обнаружения подводных лодок (ПЛ);

- комплексная программа работ DASH (Distributed Agile Submarine Hunting), проводимая под эгидой агентства DARPA и предусматривающая разработку технологической концепции и базовых технических средств, предназначенных для организации оперативно развертываемой зональной системы освещения подводной обстановки (поиска, дальнего обнаружения и слежения за ПЛ) в прибрежных районах;

- концепция развития военно-морских сил США с применением сетевых технологий «ForceNet», предусматривающая применение МРТК, объединенных в единую информационную сеть и обеспечивающих автоматизированную систему боевого управления флота точными данными об оперативной обстановке в реальном масштабе времени (рис. 1) [6];

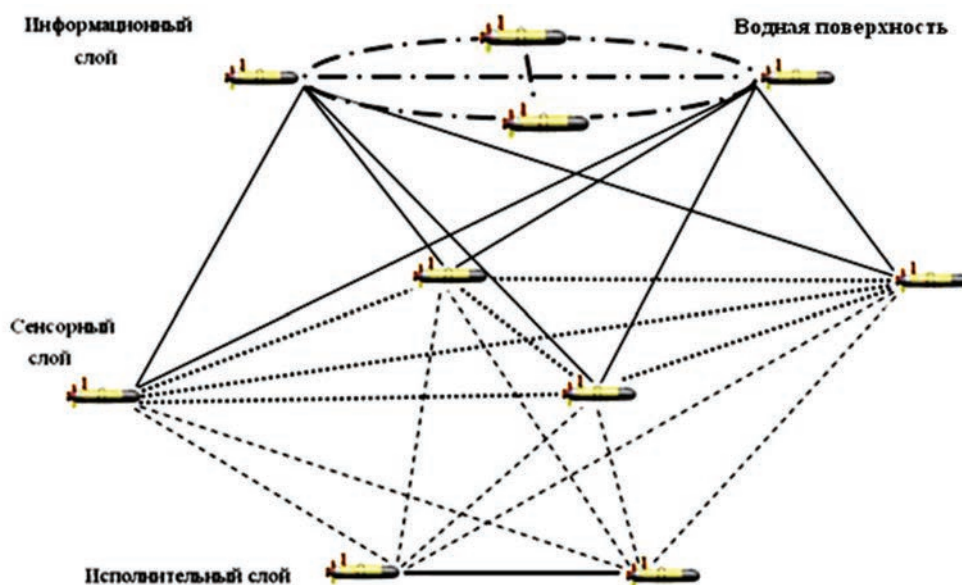


Рис. 1. Схема из концепции US NAVY «ForceNet», иллюстрирующая организацию обмена информацией между группой МРТК

– программа «Arctic Roadmap» (2014–2030 гг.), предусматривающая развертывание в арктических морях мультиагентной системы сбора разведывательной и обеспечивающей (метеорологической, гидрологической, океанографической, геологической) информации с помощью донных станций, дрейфующих буев, МРТК, ледовых обсерваторий и т. д. (рис. 2).

При реализации единой информационной сети МРТК на передний план выходят проблемы, связанные с обеспечением устойчивой, помехозащищенной связи между подводными аппаратами.

Традиционные способы организации связи с МРТК

В настоящее время управление МРТК осуществляется по каналу связи (телеуправление) или автономно по программе, заложенной в память бортовой ЭВМ, как правило, с использованием инерциальной навигационной системы и доплеровского лага (возможно применение системы периодического уточнения (при подвсплытии) местоположения по данным космических радионавигационных систем). Применение аппаратов с надводных кораблей обеспечивается специальными модулями в габаритах морских транспортных контейнеров. Кроме аппаратов, элементов спускоподъемных устройств, вспомогательного оборудования и сменного комплекта аккумуляторных батарей в модулях часто располагается автоматизированное рабочее место оператора.

Для связи с МРТК в надводном позиционном положении, в основном, используется радиосвязь или спутниковая связь (во многих зарубежных коммерческих разработках, например, применяется абонентская аппаратура системы спутниковой связи «Iridium» [7]).

Вместе с тем, подобный подход не вполне применим к обеспечению устойчивой двусторонней связи между пунктом управления (оператором) и МРТК в подводном положении. Это связано с тем, электромагнитные волны с частотами, используемыми в традиционных каналах связи и управления, сильно ослабляются при прохождении через толстый слой проводящего материала, которым является морская вода.

Аналогично, при передаче информации на погруженные подводные лодки, когда, в основном, используется радиосвязь в сверхдлинноволновом (десятки килогерц) и сверхнизкочастотном (сотни герц) диапазонах волн, применяемые низкочастотные системы не обеспечивают требуемого времени и помехоустойчивости связи с объектами, находящимися на больших дальностях и глубинах погружения, несмотря на то, что уровень их развития приближается к предельно достижимым возможностям.

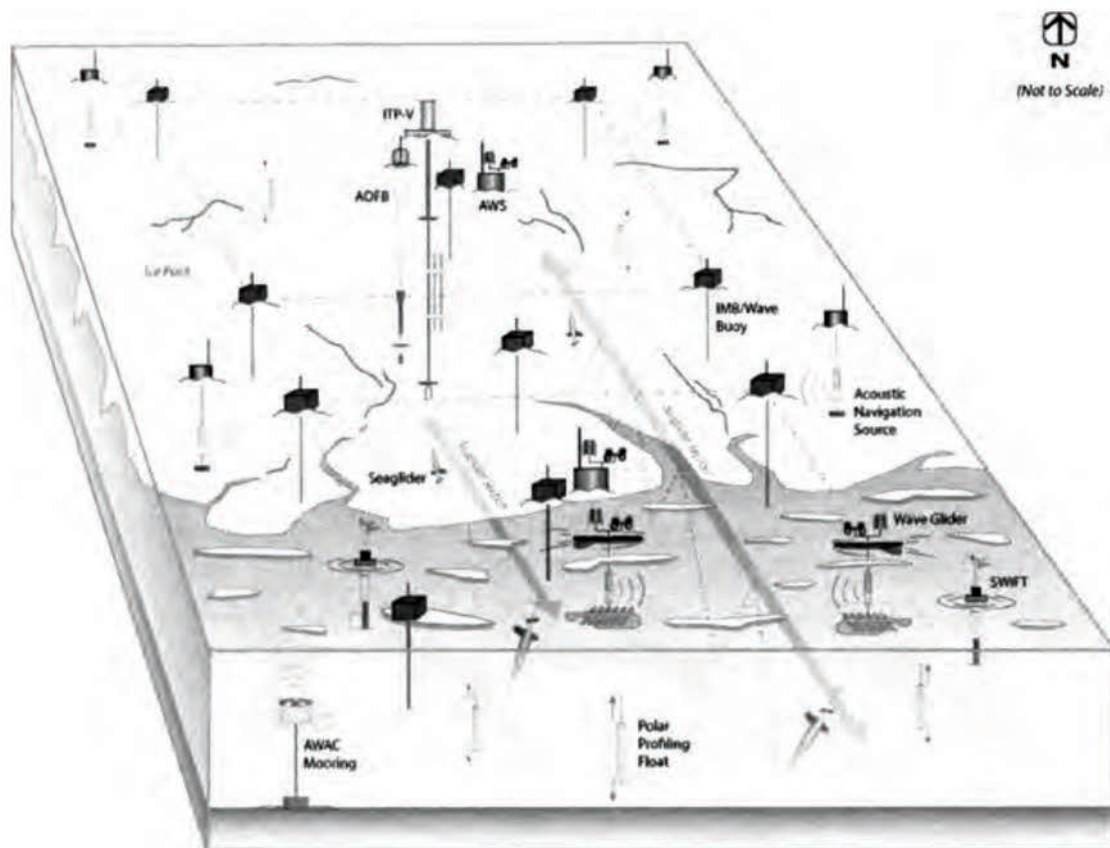


Рис. 2. Схема из программного документа US NAVY «Arctic Roadmap», иллюстрирующая структуру мультиагентной системы сбора информации

Препятствия для адекватной работы систем связи, связанные с рядом причин, среди которых искажения на границе воды и воздуха, нестабильная динамика морской поверхности, особенности передачи информации в водной среде, и т.д. Традиционные способы решения вышеуказанных проблем включают (рис. 3):

- всплытие (подвсплытие) и выход на связь с поверхности;
- выпуск на поверхность радиобуев,
- выдвижение антенн связи;
- использование ретрансляторов;
- использование кабелей связи и управления.

В качестве примера использования ретрансляторов можно привести применение отечественных самолетов Ту-142МР, созданных для связи с погруженными подводными атомными ракетноносцами. Ту-142МР оборудован выпускной антенной сверхдлинных радиоволн, максимальная длина которой составляет 8600 метров, и комплексом радиостанций под управлением БЦВМ «Орбита-20» [8].

Наиболее распространенным способом связи с подводными МРТК остается проводной способ связи, реализованный в комплексах с ТНПА (рис. 4) [9].

Вместе с тем, применение традиционных способов при организации связи нарушает скрытность применения МРТК, а также накладывает существенные ограничения по

положению судна-носителя относительно района нахождения МРТК в течение всего периода выполнения подводных работ (дистанция до судна-носителя должна обеспечивать поддержание непрерывной связи с подводным аппаратом и слежение за его положением).

Например, применение проводной связи в информационных сетях МРТК представляется достаточно громоздким и целесообразно только для донных станций. При использовании проводного способа связи существенным недостатком является ограниченная длина кабеля, что ограничивает дальность действия «связанных» МРТК. Такое применение МРТК вызывает рост сопротивления воды движению аппарата, а также возникающей опасностью повреждения кабеля винтами судна-носителя. Помимо длины кабеля, одним из проблемных вопросов проводного способа связи в подводной среде является часто наблюдаемый поверхностный эффект (скин-эффект) — эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате скин-эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое, что, очевидно, не может не влиять на качество сигналов связи и управления.



Рис. 3. Способы организации связи с подводными аппаратами (слева направо: всплытие, выпуск радиобуев, выдвижение антенн)



Рис. 4. ТНПА «Фалкон» (слева) и ТНПА «Гном» (справа) с кабелем связи и управления

Альтернативные способы организации связи с МРТК: Каналы связи в диапазоне крайне низких частот

Необходимо отметить исследования по созданию каналов связи в диапазоне крайне низких частот (КНЧ), сейсмических и гидроакустических волн, оптического (лазерного) излучения, а также на основе эффекта поверхностной волны [10–14].

Радиолинии в диапазоне КНЧ увеличат глубину связи, вместе с тем внедрение подобной аппаратуры сопряжено с существенными финансовыми издержками. В связи с этим, в настоящее время проводятся только поисковые исследования по изучению каналов распространения КНЧ-полей, измерению уровня помех, проблем передачи и обработки информации [15].

Акустические каналы связи

Акустические волны достигают хорошего проникновения и распространения во всех упругих средах, в том числе при их колебаниях из-за изменений давления. Эффективность применения акустического преобразования увеличивается в геометрической прогрессии с увеличением глубины (давления), что приводит к увеличению дальности связи при прочих равных параметрах, однако с увеличением дальности связи падает помехоустойчивость. Таким образом, сейсмические и гидроакустические волны обеспечивают связь без ограничения глубины погружения объекта, однако, из-за малой скорости распространения этих волн реальная дальность связи ограничена расстояниями не более нескольких тысяч километров при допустимом времени распространения сигнала.

Способность акустических волн распространяться на большие расстояния позволяет применять дистанционное зондирование в водной среде. Большинство устройств, применяемых для измерения глубин, используют звуковые волны и называются гидролокаторами илисонарами.

Подобная аппаратура применима для организации гидроакустических линий связи в целях детектирования дискретных коротких звуковых сигналов. Естественным недостатком использования акустических волн является эффект их затухания с увеличением дистанций передачи.

На высоких (более 10 кГц) частотах спад уровня звукового поля с дистанцией в морской среде практически полностью объясняется геометрическим расхождением и поглощением звука в среде. На низких же частотах помимо поглощения существенную роль играет рассеяние звука на неоднородностях среды.

Коэффициент затухания определяется по отклонению экспериментально полученного закона спада от цилиндрического. На частотах 1–5 кГц для определения коэффициента затухания достаточно 100–150 километровой трассы распространения. На частотах ниже 0,5–1,0 кГц требуется трасса 500–1000 км и более [16].

Исходя из обширного материала по исследованию затухания звука в морской среде, можно привести упрощенную формулу зависимости коэффициента затухания гидроакустического сигнала от его частоты в виде [17]:

$$\beta = 0.036\sqrt{f^3}, \quad (1)$$

где β — коэффициент затухания, дБ/км, f — частота, кГц, в диапазоне рабочих частот большинства гидроакустических систем 0,016–100 кГц.

Данное соотношение указывает на нелинейный характер зависимости поглощения акустической энергии и невозможность использования напрямую линейных моделей формирования частотно — зависимого отклика среды.

Результаты расчетов зависимости затухания сигнала в пресной воде от частоты сигнала по формуле (1) для частот от 0,016 до 100 кГц представлены на рис. 5.

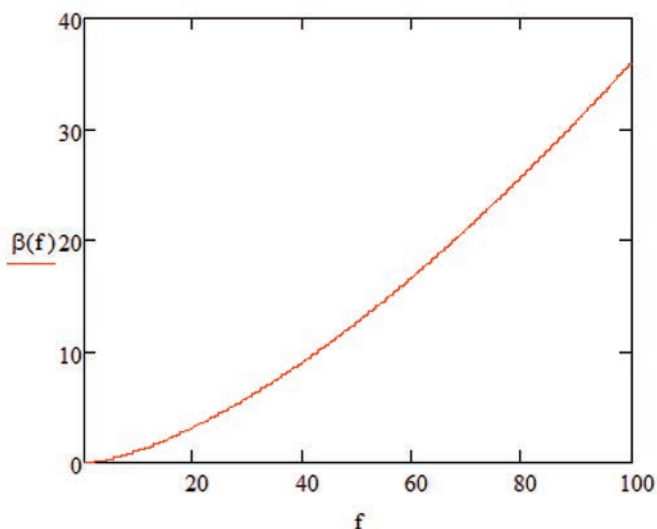


Рис. 5. График зависимости затухания сигнала в пресной воде от частоты сигнала

Обмен информацией между МРТК, объединенных в гидроакустическую информационно-навигационную сеть, целесообразно организовывать с использованием пакетного принципа коммутации сообщений, аналогичного применяемому в сотовых сетях связи с подвижными объектами для цифровой передачи информации.

Применение пакетного принципа коммутации обеспечивает подводным объектам доступ к существующим информационным системам сетям независимо от местоположения подводного объекта с возможностью двустороннего обмена информацией между подводными объектами, включая и подвижные, с сухопутными и подводными объектами.

Следует также отметить особенности надводно-подводных гидроакустических линий связи, где следует учитывать погрешности, возникающие в сигнале при прохождении границы водной и воздушной среды. Скорость распространения звука под водой около 1500 м/с, скорость распространения электромагнитного сигнала в воздушном пространстве около 300000 м/с. Разность скоростей вызывает существенные задержки в получении информации в подводном пространстве (по сравнению со скоростью получения информации в надводном положении). Кроме того,

одним из основных видов помех для гидроакустического канала связи являются собственные шумы моря (океана).

Выполненные к настоящему времени экспериментальные исследования подтверждают потенциальные перспективы гидроакустических линий связи. В настоящее время имеется практическая возможность получения достаточно высоких характеристик подобных линий связи на коротких трассах [15].

Оптические (лазерные) линии связи

Другим выходом при организации связи между МРТК в подводной среде может являться использование оптического (лазерного) излучения.

Начиная с 70-х годов в нашей стране проводится комплекс поисковых исследований по созданию лазерных линий связи. В ходе этих работ показана принципиальная возможность передачи сообщений с использованием так называемого «окна прозрачности» морской воды в синезелёной части видимой области электромагнитного излучения. Исследования показали, что лазерные линии связи обладают рядом новых качеств, к наиболее существенному из которых относится возможность обеспечения связи во всех районах Мирового океана [15]. Такие способы связи способны осуществлять передачу информации под водой со скоростью до 50 Мбит/с.

Каналы связи на основе эффекта поверхностного распространения волны

Результаты теоретических и экспериментальных работ [13, 14] показывают, что для обеспечения организации скрытной связи в приводном (приповерхностном) слое атмосферы целесообразно использовать радиосигналы в см-, дм- и метровом диапазонах длин волн. Известно, что при излучении электромагнитных волн сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов вблизи поверхности Земли (моря) в ряде случаев наблюдается явление горизонтного распространения радиоволн. Данные эффекты неоднократно регистрировались как в России [13-14, 18-19], так и за рубежом.

Процесс образования канала связи над поверхностью моря, является сложным и нестационарным. На характеристики приводного канала влияют такие факторы как рефракция в сложной неоднородной среде, метеорологические условия, состояние подстилающей поверхности. В частности, на длину канала связи влияние оказывают метеоусловия на всем протяжении канала. Такие волноводы не очень чувствительны к частоте электромагнитных волн и способны обеспечивать распространение сигналов с частотами выше 100 МГц на расстояния, намного превосходящие пределы радиогоризонта. Проведенные расчеты показали, что при определенных метеоусловиях (неизменяющихся на протяжении всего канала) дальность связи может достигать до 500 км.

Для устойчивого функционирования канала связи в приповерхностном и приводном слоях атмосферы необходимо проводить регулярный мониторинг состояния атмосферы, характеристики которой и определяют воз-

можность организации и дальность канала связи. На всей трассе оценка состояния атмосферы и параметры волноводных каналов могут прогнозироваться на основании статистических данных, имеющихся в наличии и полученных в наблюдениях за состоянием атмосферы в районах, близких по климатическим характеристикам к району в котором организуется канал связи. К настоящему времени имеется достаточно широкий набор статистических данных состояния атмосферы и разработанные способы статистической обработки, чтобы сделать прогноз характеристик волноводного канала. Однако, эти данные требуют постоянного обновления, иначе ошибки прогноза с течением времени значительно возрастают. Данное обстоятельство еще раз подтверждает необходимость использования технологий когнитивного радио для построения перспективной скрытной системы связи на большие расстояния.

Другим важным явлением для построения систем связи такого рода является возникновение «поверхностной электромагнитной волны» (ПЭВ). ПЭВ экспоненциально затухает при удалении по обе стороны от волноведущей поверхности, это свойство волны является отличительным признаком для ее идентификации в качестве поверхностной. Как показано в данном отчете, существует решение задачи распространения монохроматических ПЭВ над импедансной плоскостью, которая имитирует нижнее полупространство в виде электролита с малыми потерями (морская вода в низкочастотном диапазоне длин волн). Величина затухания распространяющейся ПЭВ на границе «воздух-морская вода» имеет такие же значения, как и плоской ЭМВ. Короткие ПЭВ практически не распространяются в морской воде. Результаты расчетов показывают, что при частоте 50 Гц электромагнитная волна проникает в морскую воду на сотни метров, а на радиочастотах ~500 МГц глубина проникновения измеряется единицами метров. Данное обстоятельство может быть использовано для организации скрытной связи, как с надводными, так и подводными объектами.

Выводы

Таким образом, в настоящее время существует достаточно обширный выбор возможных способов связи с МРТК, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Анализ достигнутого уровня и тенденций развития элементной базы и научно-технического задела альтернативных способов подводной и надводной связи позволяет прогнозировать высокие характеристики гидроакустических линий связи и линий связи в приповерхностном волноводе.

Представляется, что наиболее эффективным будет использование в информационных сетях, объединяющих группы МРТК, совмещения способов связи, включающих радио и спутниковую связь с помощью гидроакустических буев, пакетную передачу информации по гидроакустическим каналам связи, связь на КНЧ-волнах, приповерхностных волноводах и др. Это позволит реализовать резервирование каналов связи, необходимое в условиях динамически изменяющейся обстановки при выполнении МРТК функциональных задач в водном пространстве.

Литература

1. Кузьмицкий А. М., Гизитдинова М. Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ. Современные технологии и перспективы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4. № 3.
2. Киселев Л. В., Медведев А. В. Модели динамики и адаптивного управления движением АНПА различных проектов и конфигураций // *Материалы восьмой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»*, Таганрог 2013. С. 56–62.
3. Аналитическое исследование: мировой робототехники. Национальная ассоциация участников рынка робототехники. Январь 2016 г. 157 с.
4. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.
5. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения. СПб: ЦНИИ РТК, 2016. 48 с.
6. Красильников Р. В. Методы борьбы с необитаемыми аппаратами — асимметричный ответ на угрозы XXI века. СПб, 2013. 340 с.
7. Датев И. О. Развитие инфо-телекоммуникационных систем арктических территорий // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2014. № 5(24). С. 41–63.
8. URL: <http://www.vlf.it/zevs/zevs.htm>, URL: <http://commi.narod.ru>, URL: <http://tesla.stumblers.net>, <http://www.radioscanner.ru>, URL: <http://aobauer.home.xs4all.nl/Goliath.pdf> (дата обращения 21.05.2017)
9. Статья Подводный аппарат ГНОМ. Российские Разработки. 03.03.2017 URL: <http://www.robogeek.ru>
10. Бондарева Ж. Ю., Кравчук Д. А. Применение широкополосных сигналов в гидроакустических системах связи в мультиагентной системе мониторинга морского шельфа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. С. 256–258.
11. Лебедев А. В. Спасательные службы России: история создания и развития // *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*. 2013. Т. 3. № 2(5). С. 71–90.
12. Кожемякин И. В., Блинков А. П., Рождественский К. В., Рыжов В. А., Мелентьев В. Д., Занин В. Ю. Перспективные платформы морской робототехнической системы и некоторые варианты их применения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. С. 59–66.
13. Лобкова Л. М. Распространение радиоволн над морской поверхностью. М.: Радио и связь, 1991. 256 с.
14. Лобкова Л. М., Надобенко А. И., Мишарева Н. И. Пространственно-временные характеристики частотно-разнесенных радиоволн сантиметрового диапазона при распространении над морем // *Известия вузов. Серия. Радиофизика*. 1985. Т. 28. № 12. С. 1505–1509.
15. Директоров Н. Ф., Сергеев В. В. О научных проблемах связи с подводными лодками. URL: flot.com/science/rv5/html?print=Y (дата обращения 25.05.2017)
16. Вадов Р. А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде // *Акустический журнал*. 2000. Т. 46. № 5. С. 624–631.
17. Черепанцев А. С. Численная модель затухания акустических волн в море // *Известия ТРТУ, Юбилейный выпуск «НЕЛАКС-2003»*. 2003. С. 107–111.
18. Михайлов Н. Ф., Рыжков А. В., Щукин Г. Г. Радиометеорологические исследования над морем. Л.: Гидрометеоиздат, 1990.
19. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 363 с.

POSSIBLE WAYS OF ORGANIZATION A COMMUNICANION IN THE CONSTRUCTION NETWORKS OF MARINE ROBOTIC COMPLEXES

Olga G. Chertova,

Moscow, Russia, olya-932007@yandex.ru;

Konstantin V. Novak,

Moscow, Russia, konstantin-novak@yandex.ru

ABSTRACT

In the work examined states issues and improvements of communication methods with marine robotic complexes. Provides an overview of the existing methods of communication, also considered their specific features and main problem issues, proposed research directions to create perspective information networks that unite groups of marine robotic complexes. Currently, the marine robotic complex (MRC) is controlled via a telecommunications channel (telecontrol) or autonomously according to the program, which is stored in the memory of the on-board computer, but such methods of communication violate the secrecy of the application of the MRC, and also imposes significant restrictions on the position of the carrier vessel relatively the area of location the MRC during the entire period of underwater work. To avoid these drawbacks can be used an alternative methods of transmitting information in an underwater environment: communication channels in the extremely low frequency range (ELF), acoustic communication channels, optical (laser) communication channels and communication channels based on the effect of surface wave propagation. Radio links in the range of ELF will increase the depth of communication networks, but the introduction of such equipment is associated with sig-

nificant financial costs. Acoustic waves achieve good penetration and propagation in all elastic media, including their fluctuations due to pressure changes, the disadvantage is the effect of their attenuation with increasing distances of transmission. The laser communication lines have a number of new qualities, the most significant is the possibility of providing communication in all regions of the World Ocean, but their use is possible only in blue-green parts of the visible spectrum of electromagnetic radiation. The use of communication channel in the near-surface and driving layers of the atmosphere facilitates the organization of a covert connection, but requires regular monitoring of the state of the atmosphere, because the characteristics determine the possibility of organization networks and the range of the communication channel. Thus, the choice of a specific method of organization of communication with the MRC depends on the external conditions, tasks and characteristics of the chosen communication network.

Keywords: marine robotic complexes; uninhabited underwater vehicles; communications; sonar; group control.

References

1. Kuzmitsky A.M., Gizitdinova M.R. Mobile underwater robots in Navy problem solving. *Modern technology and prospects. Fundamental and applied hydrophysics*. 2011. Vol. 4. No. 3. pp. 15–24. (In Russian)
2. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Models of dynamics and adaptive motion control of ANPA of various projects and configurations. *Materialy vosmoy nauchno-prakticheskoy konferencii, Perspektivnie sistemy i zadachi upravleniya* [Materials of the eighth scientific-practical conference, Perspective systems and management tasks], Taganrog, 2013, Pp. 56–62. (In Russian)
3. *Analiticheskoe issledovanie: mirovoi robototekhniki. Natsional'naya assotsiatsiya uchastnikov rynka robototekhniki* [Analytical study: world robotics. National Association of Market Participants in Robotics]. Moscow, 2016. 157 p. (In Russian)
4. Kalyaev I.A, Gayduk A.R and Kapustyan S.G. (2009) *Modeli i algoritmi kolektivnogo upravleniya v gruppah robotov* [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009. (In Russian)
5. *Morskie robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya* [Marine robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: Central Research Institute of RTC, 2016. 48 p. (In Russian)
6. Krasilnikov R.V. *Metodi borbi s neobitaemimi apparatami – assimetrichnij otvet na ugtozi XXI veka* [Methods of combating uninhabited vehicles-an asymmetric response to threats of the 21st century]. St. Petersburg, 2013. 340 p. (In Russian)
7. Datyev I.O. Development of infocommunication systems of the Arctic territories *Trudi Kolskogo nauchnogo centra RAS* [Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014. Vol 5. No 24. Pp. 41–63. (In Russian)
8. URL: <http://www.vlf.it/zevs/zevs.htm>, URL: <http://commi.narod.ru>, URL: <http://tesla.stumblers.net>, <http://www.radioscanner.ru>, URL: <http://aobauer.home.xs4all.nl/Goliath.pdf>. (Accessed 21.05.2017)
9. Article Underwater GNOM. Russian Developments. (03.03.2017). URL: <http://www.robogeek.ru>. (Accessed 23.05.2017) (In Russian)
10. Bondareva Zh. Yu., Kravchuk D.A. Application of broadband signals in hydroacoustic communication systems in the multi-agent monitoring system of the marine shelf. *Izvestia ZHFY. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFU. Technical science]. 2013. Pp. 256–258. (In Russian)
11. Lebedev A.V. Rescue services of Russia: the history of creation and development *Strategii grazhdanskoj zaschiti: problemi i issledovania* [Civil protection strategy: problems and research]. 2013. Vol. 3. No. 2(5). 2013. Pp. 71–90. (In Russian)
12. Kozhemyakin I.V., Blinkov A.P., Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Melentiev V.D., Zanin V.Yu. (2016) Perspective platforms of the marine robotic system and some variants of their application. *Izvestia ZHFY. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFU. Technical science]. 2016. Pp. 59–66. (In Russian)
13. Lobkova L.M. *Rasprostranenie radiovoln nad morskoy poverhnostiy* [Propagation of radio waves over the sea surface]. Moscow: Radio and Communication, 1991. 256 p. (In Russian)
14. Lobkova L.M., Nadobenko A.I., Mishareva N.I. Spatio-temporal characteristics of frequency-separated radio waves of the centimeter range during propagation over the sea. *Izvestia vuzov. Radiopfizika* [Universities news. Radiophysics]. 1985. Vol. 28. No. 12. Pp. 1505–1509. (In Russian)
15. Directors N.F., Sergeev V.V. About scientific problems of communication with submarines, available at: flot.com/science/rv5/html?Print=Y (Accessed 25.05.2017) (In Russian)
16. Vadov R.A. (2000) Absorption and attenuation of low-frequency sound in the marine environment. *Akusticheskij zhurnal* [Acoustical Journal]. 2000. Vol. 46. No. 5. Pp. 624–631. (In Russian)
17. Cherepantsev A.S. Numerical model of attenuation of acoustic waves in the sea. *Izvestia TRTU. Zhubilejnyj vipusk NELAKS-2003* [Izvestiya TRTU. Jubilee issue of "NELAKS-2003"]. 2003. Pp. 107–111. (In Russian)
18. Mikhailov N.F., Ryzhkov A.V. and Shchukin G.G. *Radiometeorologicheskie issledovania nad morem* [Radiometeorological research over the sea]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. (In Russian)
19. Bin B.R., Dutton E.J. *Radiometrologi* [Radio meteorology], Leningrad: Gidrometeoizdat. 1971. 363 p. (In Russian)

Information about authors:

Chertova O.G., graduate student of Moscow Technical University of Communication and Informatics;
Novak K.V., main test-engineer, Main research and testing center of robotics of the Ministry of defense.

For citation: Chertova O.G., Novak K.V. Possible ways of organization a communication in the construction networks of marine robotic complexes. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 54–61. (In Russian)

МЕТОДИКА ФУНКЦИОНАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ КЛАСТЕРАХ МИКРОСПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Басыров Александр Геннадьевич,

д.т.н., профессор, начальник кафедры информационно-вычислительных систем и сетей Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, alexanderbas@mail.ru

Широбоков Владислав Владимирович,

адъюнкт кафедры информационно-вычислительных систем и сетей Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, 17126vlad@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Тенденцией современных космических технологий является создание и применение многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли на базе микроспутников. Перспективным направлением развития микроспутников, помимо дальнейшей микроминиатюризации, является построение из отдельных микроспутников орбитальных структур – кластеров. Эффективность применения кластеров микроспутников в значительной степени зависит от эффективности и качества планирования работы отдельных микроспутников для выполнения целевой задачи кластера. При автономном планировании появляется возможность использовать более точные данные о координатах и состоянии ресурсов микроспутников, а также на борту может планироваться дополнительное зондирование земной поверхности в проактивном режиме, в случае отбраковки полученных данных по результатам бортовой обработки. Перенос решение ряда задач на борт приводит к необходимости увеличения производительности бортовой вычислительной системы и совершенствования подходов к построению и организации функционирования кластера. В работе рассмотрена проблема организации функционально-распределенной обработки информации в перспективных кластерах микроспутников, которая представляет собой объективное противоречие между потребностями высокопроизводительной бортовой обработки информации и граничными возможностями, связанными с производительностью современных бортовых вычислительных систем, запасом энергоресурса бортовой системы электроснабжения и массогабаритными характеристиками микроспутника. Предложена методика организации автономной функционально-распределенной обработки информации в кластерах, обеспечивающая увеличение количества отснятых участков земной поверхности. При обработке данных учитываются ограничения на ресурсоемкость и оперативность выдачи информации. Методика обеспечивает автономное формирование планов работы целевой аппаратуры на основе текущих параметров кластера и требований к результатам ее функционирования с учетом минимизации ресурсоемкости информационных процессов.

Ключевые слова: кластер; микроспутники; распределенная вычислительная структура; функционально-распределенная обработка; бортовая вычислительная система.

Для цитирования: Басыров А. Г., Широбоков В. В. Методика функционально-распределенной обработки информации в перспективных кластерах микроспутников дистанционного зондирования Земли // Научно-технические аспекты космических исследований Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 62-70.

Введение

С каждым годом растет спрос на данные полученные от космических средств дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Например, в 2014 году на орбиты вокруг Земли запущено рекордное число космических аппаратов (КА) с аппаратурой съемки Земли: 26 спутников по действующим гражданским программам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также ряд КА по военным программам. В основном данные ДЗЗ представлены изображениями подстилающей поверхности, зарегистрированными в оптическом диапазоне спектра электромагнитного излучения.

Тенденция современных космических технологий ДЗЗ является создание и применение многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) ДЗЗ на базе микроспутников (МС), способных превзойти по эффективности существующие орбитальные группировки из традиционных КА при сравнимой стоимости (рис. 1). Перспективным направлением развития МС, помимо дальнейшей миниатюризации, является построение из отдельных КА орбитальных структур (кластеров): «созвездий» и «роев». Объединение МС в кластеры позволяет существенно расширить функциональные возможности МС [1].

В США, начиная с 2006 года ведется целый ряд НИ-ОКР, посвященных использованию МС, в том числе:

- программа COSMIC (Concepts and Operations for Space and Missile Defense Integration Capabilities) создания космических систем на базе МС (реализуется с 2006 года);
- концепция оперативного доступа в космос ORS (Operationally Responsive Space) с целью непосредственной поддержки боевых действий (реализуется с 2007 года);
- программа непосредственного использования космических систем SeeMe (Space Enabled Effects for Military Engagements) (начата в конце 2012 года);
- государственная программа Tacsat (Tactical satellite) США по созданию быстро разворачиваемых группировок малых КА (начата в конце 2004 года);
- программа System F6 (Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free- Flying Spacecraft united by Information eXchange) для проектирования, создания и демонстрации возможностей фрагментированного КА [2];

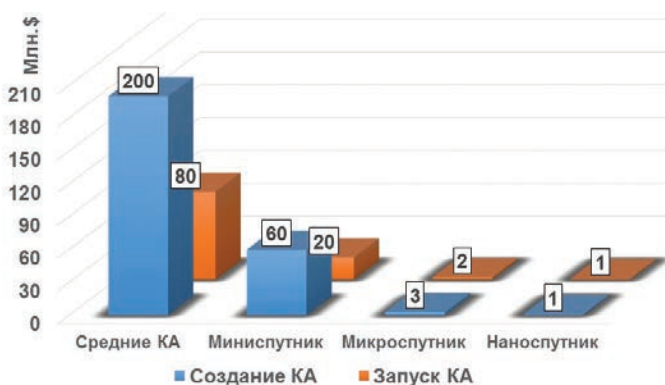


Рис. 1. Зависимость затрат на создание и запуск микроспутника от их массы

– программа ALASA (Airborne Launch Assist Space Access), в рамках которой создается платформа воздушного базирования для быстрого и экономичного выведения на орбиту космических аппаратов массой до 50–100 кг (начата в конце 2012 года).

Под кластером следует понимать совокупность однотипных МС или МС различного целевого назначения, совместно решающих общую задачу и воспринимаемых потребителем как единое целое («виртуальный» космический аппарат). Кластеры МС имеют ряд отличий от других орбитальных группировок. Во-первых, в существующих ОГ полноразмерных КА и МС отсутствует непосредственная связь между КА или же эта связь опосредована наземным комплексом управления или специальным комплексом. Во-вторых, баллистическое построение кластера предполагает нахождение всех его МС в относительной близости друг от друга, допускающей информационный обмен между ними.

Объединение МС в кластеры позволяет существенно расширить функциональные возможности МС. Например, в 2007 году конгресс США образовал новый офис для управления программой «Оперативно реагирующий космос» (Operationally Responsive Space). Основной целью этой программы является обеспечение и координация космических исследований в интересах Министерства обороны США. В рамках программы ORS-5 в 2017 году планируется запуск группировки малых космических аппаратов (МКА), которая будет обеспечивать решение таких задач, как круглосуточный мониторинг сбор информации и распознавание целей, радиолокационные наблюдения, обнаружение пуска ракет и обеспечение связи. Одним из основных направлений исследований в этой программе является разработка решений в области автономного планирования и управления орбитальной группировкой МКА.

Эффективность применения кластера МС ДЗЗ в значительной степени зависит от эффективности и качества планирования мониторинга земной поверхности. При автономном планировании появляется возможность использовать более точные данные о координатах и состоянии ресурсов КА, а также на борту КА могут планироваться дополнительные участки для зондирования земной поверхности в проактивном режиме, в случае отбраковки полученных данных по результатам бортовой обработки. Автономное планирование в настоящее время активно применяется на практике, хотя, в основном, в экспериментальном режиме [3]. Примером подобной системы является система планирования EDSN (англ. Edison Demonstration of Smallsat Networks) разрабатываемая NASA как демонстратор для проверки концепции «роя наноспутников», который выполняет скоординированную деятельность. Этот проект планирует использовать группировку из восьми наноспутников, каждый весом около 2 кг. В запланированном сценарии мониторинга отдельные наноспутников должны поочередно выполнять роль лидера, в функции которого, дополнительно к задачам наблюдения, входит сбор данных с остальных семи спутников и передача всего массива данных в наземный пункт. Предполагаемая продолжитель-

ность программы EDSN, в процессе которой планируется исследование возможностей концепции информационного взаимодействия спутников — это первые 60 дней существования группировки, пока расстояния между спутниками сохраняются достаточно малыми (не более 120 км). К сожалению, первая попытка проверить систему на практике оказалась неудачной, так как спутники были потеряны при выводе на орбиту. Другим примером использования возможностей автономного планирования является комбинированная система планирования VAMOS (Verification of Autonomous Mission Planning Onboard a Spacecraft), которая разработана в Германском центре космических операций (GSOC — German Space Operations Center). Эта система используется для планирования запущенных в 2015 году спутников Biros (Berlin Infra-red Optical System), на которых установлены системы двуспектральных инфракрасных сенсоров и трехканальных оптических камер. На спутниках также установлены экспериментальные модемы, которые используются для обеспечения дополнительной связи с наземными пунктами управления с использованием спутниковой системы связи OrbComm. На борту спутника выполняется обработка снимков, которая позволяет определять облачность, а также выявлять некоторые типы объектов и событий, например, мосты и наводнения.

Перенос значительной части функций планирования работы кластера МС и управления группировкой МС с НКУ на бортовые и использование глобальных показателей качества планирования позволяет обеспечить вычислительно эффективное автономное распределенное планирование задач и реакцию на непредвиденные события для коррекции планов в реальном времени. Перенос решение ряда задач на борт КА приводит к необходимости увеличения производительности бортовой вычислительной системы (БВС) КА и совершенствования подходов к построению и организации функционирования кластера и БВС КА. При этом возникает объективное противоречие между потребностями высокопроизводительной бортовой обработки информации и ограниченными возможностями современных бортовых вычислительных систем (БВС) КА. При этом наращиваемые ресурсы БВС вступают в противоречие с ограничениями по массе, энергозатратам, требованиям по надежности, предъявляемым к бортовой аппаратуре, а также не будут использованы в полной мере, а будут востребованы лишь на относительно коротких интервалах функционирования МС.

В настоящее время рассматривается два варианта построения кластерных группировок микроспутников. Первый вариант кластер типа «распределенный космический аппарат» — система МС на орбите, в которой целевая функция равномерно распределена между множеством однотипных космических аппаратов в кластере. Преимуществом такого подхода является возможность функционирования каждого аппарата самостоятельно вне зависимости от кластера, а также перераспределения функции отказавшего КА между другими активными КА. Очевидным недостатком является значительный вес в сегменте малых КА и, следовательно, стоимость вывода.

В настоящей статье рассмотрен второй вариант кластер типа «фрагментированный космический аппарат» — система МС на орбите, в которой каждый космический аппарат имеет свое узкое функциональное назначение. Применение этого подхода повышает адаптивность и живучесть кластера МС, а также сокращает сроки их разработки и «разделяет» технические риски — при неудачном пуске теряется не весь КА (фрагментированный), а какой-то один его функциональный модуль. Для эффективного применения кластеров МС целесообразна реализация функционально-распределенной обработки информации на основе консолидации информационно-вычислительных ресурсов, предполагающей разделение задач мониторинга земной поверхности МС и последующая обработка на некотором выделенном КА. Данный подход позволяет минимизировать требования к аппаратно-программным ресурсам МС, перенося основную информационно-вычислительную нагрузку на КА-сервер (КАС). Отсутствие мощных информационных технологий по управлению многочисленной ОГ и по обработке больших объемов распределенной информации снижает эффективность применения новых кластеров МС. Совершенствование моделей и алгоритмов организации распределенной обработки информации, появление и внедрение современных образцов КА требуют новых, более эффективных решений по организации функционально-распределенной обработки информации в перспективных кластерах МС ДЗЗ

Концепция функционально-распределенной обработки информации в перспективных орбитальных группировках микроспутников

Решение отмеченного противоречия видится на путях применения технологии функционально-распределенных информационных процессов на основе модели «клиент-сервер» [2–3]. Данный подход позволяет минимизировать требования к аппаратно-программным ресурсам клиента, перенося основную часть вычислительной нагрузки на центры обработки данных (ЦОД). При организации кластера МС в роли КА — «клиента» будут выступать МС, а в роли ЦОД — один или несколько выделенных КА — «серверов» (КАС) с БВС высокой производительности [4]. При этом существенно сокращаются требования к аппаратно-программным средствам БВС МС и повышается степень использования ресурсов КАС.

КАС на основе предварительного планирования информационных процессов в кластере МС выдает управляющие команды на включение целевой аппаратуры каждому МС и на передачу собранной ими информации. Поступающая информация от МС в качестве заявок на обработку передается на КАС и обрабатывается в соответствии с планом. Цикл автономного управления кластером показан на рис. 2. В общем случае целевая информация с борта КАС на НКУ может передаваться как через некоторые КА-ретрансляторы, так и непосредственно при пролете над зоной радиовидимости комплекса (при этом объем передаваемой информации прямо пропорционален длительности сеанса связи).



Рис. 2. Цикл автономного управления кластером МС

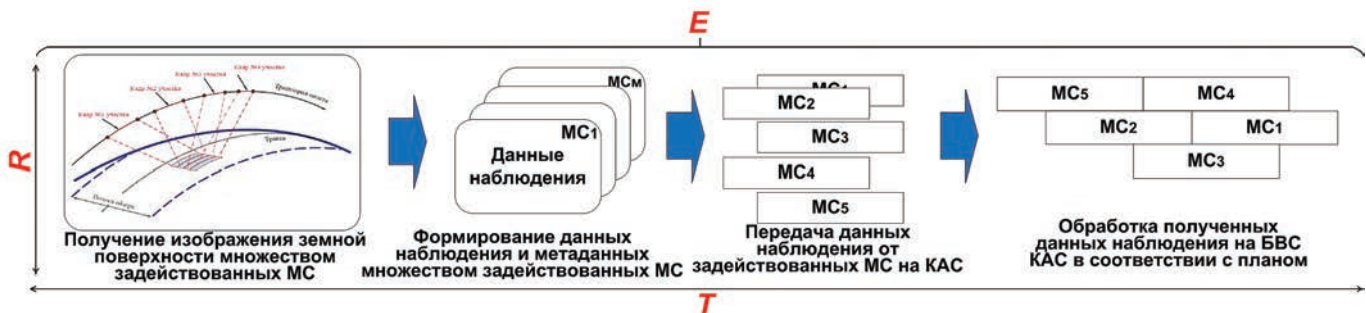


Рис. 3. Схема функционально-распределенной обработки информации в кластере МС

Этот подход обеспечивает экономию энергоресурса бортовых источников питания (БИП) и повышение вероятности безотказной работы аппаратуры за счет:

а) задействования для наблюдения и передачи собранной информации только тех МС, информация с которых может быть принята и обработана КАС за требуемое время;

б) использования в БВС КАС минимально необходимого количества вычислительных модулей для обработки информации при минимальном времени их простоя в активном состоянии.

При организации вычислений необходимо решить две основные задачи, а именно, задачу планирования обработки информации на борту КАС и задачу определения подмножества МС из кластера, задействованных в работе на данном этапе. Эти две задачи тесно взаимосвязаны, т.к. план обработки информации в БВС КАС определяет состав информации, которую возможно обработать к заданному времени с учетом ее важности. Другими словами, этот план определяет рабочую нагрузку для БВС КАС, а значит и используемые для ее формирования МС.

Планирование заключается в поиске наилучшей упорядоченности для выполняемых заданий (программ по обработке собранной МС информации), удовлетворяющей требованиям к результативности и оперативности обработки заданий (рис. 3). Определение подмножества МС из кластера, задействованных в работе, приводит к формированию и выдаче управляющих воздействий на включения целевой аппаратуры МС для начала мониторинга земной поверхности. Эти два процесса должны быть согласованы, что обеспечивает как выполнение поставленной задачи, так и рациональное использование ограниченного энергоресурса МС и КАС. Результативность обработки информации в БВС зависит от ограничений на время обработки, превышение которого над директивным временем может привести к потере собранной информации или снижению ценности обрабатываемой информации [5].

Показателями качества функционально-распределенной обработки информации являются:

R — результативность — площадь участка поверхности Земли, подлежащего наблюдению, изображение которого снято МС и обработано КАС и/или количество таких участков,

T — оперативность — время от начала мониторинга участка до выдачи результата обработки информации,

E — ресурсоемкость — затраты энергоресурса бортовых источников питания и ресурса надежности бортовой аппаратуры.

Особенностью функционирования кластера МС, является то, что режим детальной съемки отличается весьма высокими временными и энергетическими затратами на получение максимальной площади мониторинга, а также большими информационными объемами передаваемых данных с МС на КАС, в то время как режимы оперативной съемки характеризуются меньшим информационным объемом.

Постановка задачи функционально-распределенной обработки информации на основе планирования рабочей нагрузки

Кластер МС рассматривается как централизованная функционально-распределенная информационно-вычислительная сеть, состоящая из множества МС, выполняющих роль сенсоров, и КА-сервера (КАС), обрабатывающего информацию с МС. КАС выдает управляющие команды на включение целевой аппаратуры МС исходя из плана обработки заявок, которые он сможет выполнить, учитывая требуемую результативность и директивное время на выдачу результата наблюдения [6].

Задача функционально-распределенной обработки информации на основе планирования рабочей нагрузки заключается в выборе подмножества микроспутников, которые будут задействованы в мониторинге заданного участка земной поверхности, и информация с которых будет при-



Рис. 4. Схема взаимодействия КАС и МС в кластере МС

нята и обработана КАС (рис. 4) к заданному времени с учетом текущего расположения МС на орбите, из состояния, ограничений на энергоресурс бортовых источников питания МС и надежности их бортовой аппаратуры.

Дано:

1) $A = \{M, X\}$ — баллистическая структура кластера МС, где $X = \{X_j\} = \{\{\Omega_j, i_j, p_j, e_j, \omega_j, u_{0j}\}\}, j = 1, \dots, M$ — баллистические параметры орбиты каждого МС на начало периода T , M — общее количество МС в кластере.

2) $G = \{g_k\}, k = 1, \dots, K$ — множество участков, которые запланированы для мониторинга, $g_k = \langle S_k^d, T_k^d, t_k^s, t_k^e \rangle$, где S_k^d — требуемая площадь наблюдения участка, T_k^d — директивное время выдачи обработанной информации об участке $\ll \text{Eqnm0003.ers} \gg$, обусловленное зоной радиовидимости НКУ или КА-ретранслятора, t_k^s, t_k^e — моментами начала и окончания нахождения кластера МС над участком для мониторинга.

3) $T = \{T_k\}$, — интервал планирования (обусловлен длительностью освещенного участка орбиты), который разбит на подинтервалы $T_k = [t_k^s, t_k^e], k = 1, \dots, K$.

4) $\delta(T_k) = \{\delta_1(T_k), \delta_2(T_k), \dots, \delta_M(T_k)\}$ — множество параметров МС на подинтервале времени T_k , характеризующих каждый МС, вектором параметров:

$$\delta_i(T_k) = \langle x_i(t, X), y_i(t, X), d_i(t, X), e_i(T_k), \chi_i(T_k), \sigma_i(T_k) \rangle, \\ t \in T_k, i = 1, \dots, M, \text{argmax} R$$

$x_i(t, X), y_i(t, X)$ — зависимость координат подспутниковой точки — центра области наблюдения от времени для МС, $d_i(t, X)$ — зависимость расстояния между МС и КАС от времени на интервале T_k , $e_i(T_k)$ — запас энергоресурса МС к началу подинтервала T_k , $\chi_i(T_k)$ — наработка бортовой аппаратуры МС к началу подинтервала T_k , $\sigma_i(T_k)$ — состояние МС (исправность подсистем) к началу подинтервала T_k .

5) N — количество ВМ КАС.

Также известны параметры бортовой системы электропитания (СЭС) КА и график электропотребления (ГЭП) обеспечивающей аппаратуры.

Найти:

на заданном временном интервале планирования T найти множество управляющих воздействий $U^*(T)$ на множество МС такое, что

$$U^*(T) = \arg \max_{U \in U^{доп}} R(U(T)), \quad (1)$$

где

$$U(T) = \begin{bmatrix} u_{11}(T) & \dots & u_{M1}(T) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1K}(T) & \dots & u_{MK}(T) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$u_{ij}(T) \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, K$$

Ограничения:

1) на время информационных процессов: $\tau(\delta_i(T_k), U(T_k)) \leq T_k^d$,

2) на расход энергоресурса: $e_i(T_k) \cdot u_{ij}(T_k) \leq e^d, i = 1, \dots, M$;

3) на надежность бортовой аппаратуры МС:

$$P(\chi_i(T_k)) \leq p^d, i = 1, \dots, M.$$

где e^d — ограничение на потребляемый МС энергоресурс бортовых источников;

p^d — директивная вероятность безотказной работы бортовой аппаратуры.

Представленная общая постановка задачи функционально-распределенной обработки информации содержит ряд частных задач, а именно:

— расчет важности информации, которую может получить каждый МС в результате мониторинга с учетом координаты МС и требуемого района наблюдения;

— синтез плана (расписания) параллельного вычислительного процесса в БВС КАС с учетом моментов времени поступления информации от МС для обработки и ее важности;

— расчет надежности бортовой аппаратуры МС и КАС с учетом фактической наработки.

Методика организации автономной функционально-распределенной обработки информации в кластере микроспутников

Методика организации автономной функционально-распределенной обработки информации в кластера МС предназначена для формирования управляющих воздействий $U(T_k)$ на интервале T_k . Формирование общей матрицы управляющих воздействий $U(T)$ для всех запланированных участков, запланированных на интервале T , производится путем итерации методики для k запланированных участков.

Общая схема методики включает в себя следующую последовательность этапов на интервале T_k :

Шаг.1 Формирование исходных данных для модели функционально-распределенной обработки информации в кластере МС.

Входными данными являются:

- 1) $G = \{g_k\}$, $k = 1, \dots, K$ — множество участков, которые запланированы для мониторинга;
- 2) M — общее количество МС в кластере,
- 3) N — количество ВМ КАС,

Шаг 2. Получение данных о состоянии МС, координат и метаданных наблюдения всех МС.

Метаданные хранимой информации наблюдения включают:

- t_{ij}^n — идентификатор данных;
- τ_{ij}^n — длительность наблюдения;
- $\delta_i(T_k)$ — вектор параметров МС на интервале времени T_k ;
- v_{ms} — объем хранимой информации.

Шаг 2. Расчет параметров функционально-распределенной обработки информации:

Шаг 2.1. Расчет требуемого энергоресурса МС и проверка запаса энергоресурса МС к началу подинтервала T_k ;

Шаг 2.2. Расчет вероятности безотказной работы МС и проверка ограничений на надежность бортовой аппаратуры МС.

Шаг 2.3. Расчет информационной важности данных, которые могут быть получены каждым МС на основе площади пересечения области наблюдения МС с требуемой областью.

Расчет важности заявок производится на основе матрицы коэффициентов пересечения областей наблюдения МС $Z = \{z_{ip}\}$, $i, p \in M$ где элемент матрицы определяется путем нормирования площади пересечения $s_{ip}(T_k)$ согласно выражению:

$$z_{ip} = 1 - \frac{1}{s_{ip}(T_k)}. \quad (3)$$

Важности заявок рассчитывается путем суммирования значений элементов матрицы Z по столбцам:

$$w_{ij} = \sum_{p=1}^M z_{ip}. \quad (4)$$

Шаг 2.4. Расчет моментов времени поступления информации с каждого МС;

$$\bar{t}_i(T_k) = \max \left(u_{ij} \cdot \left(\sum_{t_k}^{\tau_k} \mu^z + \frac{v_{ij}(T_k)}{C(d_i(t, X))} + \mu^n \right) \right), \quad (5)$$

где μ^n — временные задержки, связанные с характеристикой аппаратуры межспутниковой передачи данных, $C(d_i(t, X))$ — пропускная способность канала связи, μ^z — задержки, с процессом чтения и записи данных ПЗУ МС.

Шаг 3. Планирование параллельной обработки информации в БВС КАС

Шаг 3.1. Расчет параметров для алгоритма планирования энергосберегающей параллельной обработки информации.

Формирование входных данных:

- 1) w_i — важность i -й задания;
- 2) t_i — время выполнения (длительность) i -й заданий;
- 3) T_k^d — директивное время завершения вычислений для k -ой цели;
- 4) m — количество заданий;
- 5) $\Delta \tau_i$ — погрешность времени поступления задания (задержка по накопленной предыдущей статистике);
- 6) N — количество процессоров;
- 7) τ_i — планируемое время поступления (раннего начала выполнения) задания.

Шаг 3.2. Синтез расписания Ψ на основе алгоритма планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач [7]. Пример составленного расписания обработки m^* задач на n^* процессоров показан на рис. 5.

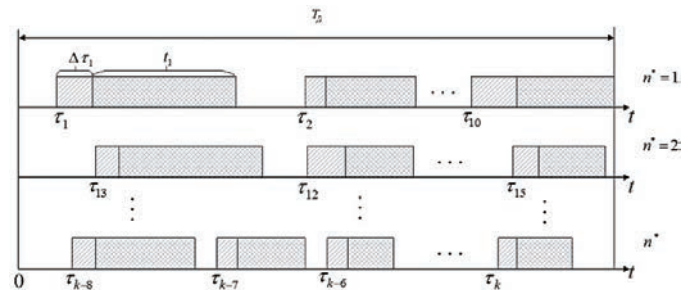


Рис. 5. Пример составленного расписания

Шаг 3.3. Получение значения двоичных коэффициентов α_{ij} и минимально необходимое значение ВМ n^* .

Шаг 3.4. Формирование матрицы управляющих воздействий $U(T_k)$ на основе двоичных коэффициентов α_{ij} .

Шаг 4. Формирование команд управления и передача их на МС.

Шаг 4.1 Находим значение $U^*(T_k)$ обеспечивающее максимальное значение результативности мониторинга кластером МС $R(\delta(T_k), U(T_k))$ по формуле 4.

Шаг 4.2. Формирование команд управления на МС $k_i(T_k)$ на основе матрицы управления $U^*(T_k)$ для работы целевой аппаратуры МС.

Если информация с i -го МС в соответствии с планом, синтезированным на шаге 3.2 подлежит обработке, то управляющая переменная $u_i(T_k)$ принимается равной единице, в противном случае — нулю.

На основании управляющей матрицы

$$U^*(T_k) = \{u_1(T_k), u_2(T_k), \dots, u_m(T_k)\}$$

формируются для работы целевой аппаратуры каждого МС команды управления $k_i(T_k) = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5)$, $\eta_j \in \{0, 1\}$, $j = 1, \dots, 4$ — поле команды — указание на соответствующее действие:

- η_1 — выполнить наблюдение,

η_2 — выполнить передачу информации из внутреннего ЗУ на КАС,

η_3 — сбросить (очистить) внутреннее ЗУ,

η_4 — передать на КАС свои координаты и состояние,

η_5 — передать на КАС метаданные хранимой информации.

Шаг 5.2. Передача команд управления $k_i(T_k)$ советующим МС.

Шаг 6. Прием целевой информации и обработка ее в соответствии с планом, полученным на шаге 3.2.

Шаг 6.1. Передача данных наблюдения полученных с целевой аппаратуры согласно команд управления $k_i(T_k)$.

Шаг 6.2. Прием информации и обработка ее согласно плана $\Psi(U^*(T))$.

Шаг 6.3. Корректировка погрешности времени поступления заданий Δt_i на основе времени поступивших заданий.

Шаг 7. Выдача результата обработки данных наблюдения от МС в директивные сроки.

Результаты имитационного моделирования автономной функционально-распределенной обработки информации в кластере микроспутников ДЗЗ

Для анализа эффективности автономной функционально-распределенной обработки информации в кластере микроспутников ДЗЗ в соответствии с предложенным подходом проведено имитационное моделирование энергосберегающей обработки данных на БВС КАС и решения задачи планирования работы целевой аппаратуры МС в кластере.

При моделировании обработки информации в соответствии с методикой случайным образом генерируется количество участков наблюдения и их параметры, время передачи информации между МС и КАС с учетом баллистического построения, а также остаточный энергоресурс БСЭ на период планирования [8].

Для заданного количества задействованных МС в кластере к генерировалось по 100 примеров входного количества участков для зондирования. На рис. 6 приведена статистика испытаний, полученных для разного количества МС в кластере с применением и без применения методики при одинаковых исходных данных.

При применении предложенной методики планировалось подмножество задействованных МС кластера в зависимости от заданных требований. Сравнение проводилось с вариантом полного использования всех МС кластера, энергетические и надежность характеристики которых удовлетворяли заданным ограничениям.

Анализ результатов имитационного моделирования функционирования кластера МС показал, что применение разработанной методики способно повысить результативность мониторинга земной поверхности кластером МС до 20% в зависимости от количества МС и их активности.

Заключение

Разработанная методика обеспечивает автономное формирование планов работы целевой аппаратуры МС и БВС КАС на основе текущих параметров кластера МС и требований к результатам ее функционирования с учетом минимизации ресурсоемкости информационных процессов, что приводит к увеличению количества снятых участков земной поверхности кластером МС.

В зависимости от входных ограничений учитывается время выполнения набора инструкций, затраты энергоресурса бортовых источников питания КА, а также директивные сроки выполнения заданий. Применение предложенной методики позволяет организовать обработку информации в кластере МС, при этом позволяя экономить энергоресурс и ресурс надежности МС.

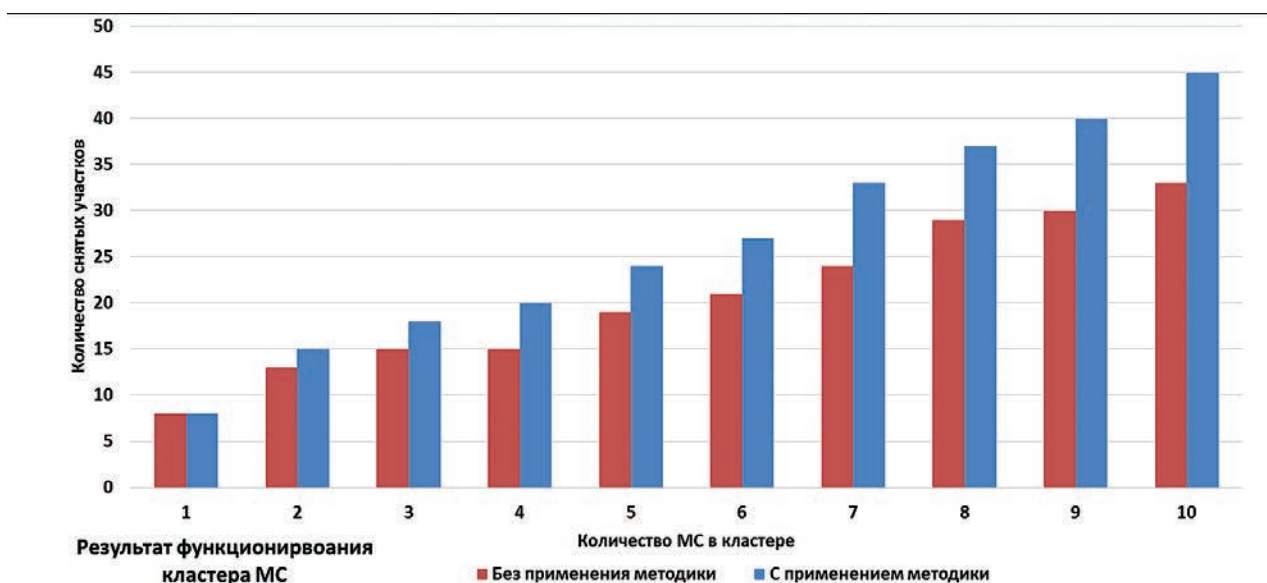


Рис. 6. Результативность функционирования кластера МС

Литература

1. Басыров А. Г., Швецов А. С., Шушаков А. О., Ширококов В. В. Модель распределенной обработки информации в условиях воздействия дестабилизирующих факторов на информационно-телекоммуникационную систему // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20968.html> (дата обращения: 30.07.2015).
2. Jesus D. Modular Space: DARPA's F6 Program. URL: <http://www.defenseindustrydaily.com/Modular-Space-DARPA-Awards-Phase-2-Systems-F6-Contract-06044.html> (дата обращения: 22.10.2014).
3. Карсаев О. В. Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий КА // Труды СПИИРАН. 2016. № 5(48). С. 151–181.
5. Басыров А. Г., Ширококов В. В. Применение технологии распределенных вычислений для обработки информации в орбитальной группировке микроспутников // Тезисы докладов Второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: Корпорация «ВНИИЭМ». 2014. С. 62–65.
5. Ширококов В. В., Шинкаренко А. Ф. Подход к организации межспутникового взаимодействия в распределенной вычислительной структуре орбитальной группировки микроспутников // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2015. № 646. С. 77–82.
6. Басыров А. Г., Ширококов В. В. Подход к распределенной обработке информации в мобильной неоднородной вычислительной сети // Сборник научных статей «Вестника Российского нового университета». Москва. 2015. № 10. С. 73–78.
7. Ширококов В. В. Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации в различных ресурсно-временных условиях применения перспективных орбитальных группировок микроспутников специального назначения // Сборник трудов XXXII Межведомственной научно-практической конференции «Развитие научно-технических аспектов методологии испытаний и эксплуатации с целью повышения эффективности применения существующих средств и систем экспериментально-испытательной базы». Мирный. 2016. С. 113–120.
8. Ширококов В. В., Гончаренко В. А., Дудкин А. С., Максимов В. А. Обоснование производительности вычислительных систем при решении группы неоднородных задач // Естественные и технические науки. 2016. № 8 (98). С. 79–81.

METHODOLOGY OF FUNCTIONALLY-DISTRIBUTED INFORMATION PROCESSING IN THE PROSPECTIVE CLUSTERS OF MICROSATURNES OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

Alexander G. Basyrov,

St. Petersburg, Russia, Alexanderbas@mail.ru

Vladislav V. Shirobov,

St. Petersburg, Russia, 17126vlad@gmail.com

ABSTRACT

The trend of modern space technologies is the creation and use of multi-satellite orbital constellations for remote sensing of the Earth based on microsattellites. A promising direction for the development of microsattellites, in addition to further microminiaturization, is the construction of separate orbital structures-clusters from individual microsattellites. The effectiveness of the use of clusters of microsattellites depends to a large extent on the efficiency and quality of scheduling the work of individual microsattellites in order to fulfill the target cluster task. In the case of autonomous planning, it becomes possible to use more accurate data on the coordinates and status of microsattellite resources, and additional ground sounding in the proactive mode may be planned on board, in the event that the received data are rejected by the results of on-board processing. Transferring the solution of a number of tasks on board leads to the need to increase the productivity of the on-board computer system and to improve approaches to constructing and organizing the functioning of the cluster. The problem of organization of functionally distributed processing of information in prospective clusters of microsattellites is considered, which is an objective contradiction between the needs of high-performance on-board information processing and limited capabilities related to the performance of modern on-board computer systems, the energy resource of the power supply system and the mass-size characteristics of the microsattellite. A technique for organizing an autonomous functionally distributed information processing in clusters is provided, which provides an increase in the number of photographed portions of the earth's surface. Data processing takes

into account limitations on resource consumption and the efficiency of information delivery. The methodology provides autonomous generation of work plans for the target equipment based on the current cluster parameters and requirements for the results of its operation, taking into account the minimization of the resource intensity of information processes.

Keywords: microsatellite cluster; distributed computing structure; functionally distributed processing; onboard computer system.

References

1. Basyrov A. G., Shvetsov A. S., Shushakov A. O., Shirobokov V. V. The model of distributed processing of information in the context of the influence of destabilizing factors on the information and telecommunication system. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. [Modern problems of science and education]. 2015. No. 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20968.html> (date of access: July 30, 2015) (In Russian)
2. Jesus D. Modular Space: DARPA's F6 Program. URL: <http://www.defenseindustrydaily.com/Modular-Space-DARPA-Awards-Phase-2-Systems-F6-Contract-06044.html> (date of access: 22.10.2014).
3. Karsaev O. V. Obzor tradicionnih i innovacionnih system planirovaniya missiy [Review of conventional and innovative satellite mission planning systems] *Trudi SPIIRAN* [Transactions of SPIIRAS]. 2016. № 5(48). Pp. 151-181. (In Russian)
4. Basyrov A. G., Shirobokov V. V. Application of distributed computing technology for information processing in the orbital grouping of microsatellites [Application of distributed computing technology for information processing in the orbital grouping of microsatellites] *Tezisy dokladov Vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Aktual'nyye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli*. [Abstracts of the Second International Scientific and Technical Conference. Actual problems of creation of space systems for remote sensing of the Earth] Moscow: OJSC Corporation VNIIEEM, 2014. Pp. 62-65. (In Russian)
5. Shirobokov V. V., Shinkarenko A. F. Podkhod k organizatsii mezhsputnikogovo vzaimodeystviya v raspredelennoy vychislitel'noy strukture orbital'noy gruppirovki mikrosputnikov [The approach to the organization of inter-satellite interaction in the distributed computing structure of the orbital grouping of microsatellites] *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo* [Proc. of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky]. 2015. No. 646. Pp. 77-82 (In Russian)
6. Basyrov A. G., Shirobokov V. V. Podkhod k raspredelennoy obrabotke informatsii v mobil'noy neodnorodnoy vychislitel'noy seti [Approach to distributed processing of information in a mobile heterogeneous computer network] *Sbornik nauchnykh statey Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta* [Collection of scientific articles of the Bulletin of the Russian New University], Moscow. 2015. No. 10. Pp.73-78. (In Russian)
7. Shirobokov V. V. Algoritm planirovaniya energosberegayushchey parallel'noy obrabotki informatsii v razlichnykh resursno-vremennykh usloviyakh primeneniya perspektivnykh orbital'nykh gruppirovok mikrosputnikov spetsial'nogo naznacheniya [Algorithm for planning energy-saving parallel processing of information in different resource-time conditions for the application of perspective orbital groupings of microsatellites of special purpose] *Sbornik trudov XXXII Mezhdomstvennoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Razvitiye nauchno-tehnicheskikh aspektov metodologii ispytaniy i ekspluatatsii s tsel'yu povysheniya effektivnosti primeneniya sushchestvuyushchikh sredstv i sistem eksperimental'no-ispytel'noy bazy* [Proceedings of the XXXII Interdepartmental Scientific and Practical Conference Development of scientific and technical aspects of testing and operation methodology with the aim of increasing the efficiency of the use of existing tools and systems of experimental- Test base]. Mirny. 2016. Pp. 113-120. (In Russian)
8. Shirobokov V. V., Goncharenko V. A., Dudkin A. S., Maksimov V. A. Obosnovaniye proizvoditel'nosti vychislitel'nykh sistem pri reshenii gruppy neodnorodnykh zadach [Justification of the performance of computing systems in solving a group of heterogeneous problems]. *Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki* [Natural and Technical Sciences] Moscow. 2016. No. 8 (98). Pp. 79-81. (In Russian)

Information about authors:

Basyrov A. G., PhD, Full Professor, Head of the Department of Information-Computing Systems and Networks of the Military Space Academy;

Shirobokov V. V., Postgraduate at the Department of Information-Computing Systems and Networks of the Military Space Academy;

For citation: Basyrov A. G., Shirobokov V. V. Methodology of functionally-distributed information-processing in the prospective clusters of microsatures of remote sensing of the Earth. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 62-70. (In Russian)

Церемония награждения победителей IX конкурса

Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли

14 сентября 2017 г.

Центральный музей связи имени А. С. Попова
Санкт-Петербург, Почтамтский пер., д. 4

COMNEWS приглашает ИТ-компании заявить о реализованных проектах в рамках IX Всероссийского конкурса «Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли»

Конкурс «**Лучшие 10 ИТ-проектов**», учрежденный ГК COMNEWS в 2009 году, ежегодно отмечает заказчиков и исполнителей самых значимых проектов в области ИТ, вносящих инновации как в работу отдельных ведомств, госструктур, коммерческих заказчиков так и в экономику страны в целом. Конкурс неоднократно поддерживался Министерством связи и массовых коммуникаций РФ, а также региональными министерствами и ведомствами.

В 2017 году Организаторы конкурса фокусируют внимание широкой общественности на лучших инновационных проектах по разработке технологий для нефтегазовой отрасли.

Независимо отбирая лучшие решения в каждой категории, и публично отмечая достижения номинантов, ежегодный конкурс «Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли» способствует повышению конкурентоспособности информационных продуктов и услуг.

Цель конкурса – поиск и поддержка развития инновационных и ИТ разработок для нефтегазовой промышленности. Участие в конкурсе позволит разработчикам, научным организациям, малым и средним предприятиям получить финансирование для реализации технологий, воспользоваться рекомендациями ведущих экспертов отрасли, найти партнеров, клиентов и создать компанию, которая может стать будущим лидером отрасли. На конкурс принимаются проекты, которые были завершены в 2016 г. (либо ключевой этап внедрения был завершен в 2016 г.).

Оргкомитет конкурса приглашает к участию проектные организации (системных интеграторов), выполнивших для той или иной нефтегазовой компании проект, а также ищущих возможности расширения сферы применения.

Заявки на конкурс принимаются **до 21 августа 2017 г.**, не позднее 15:00 часов по Московскому времени.

Торжественное награждение лауреатов конкурса – заказчиков и исполнителей ИТ-проектов, состоится в рамках **III Федерального ИТ-форума нефтегазовой отрасли России «Smart Oil & Gas: Цифровая трансформация нефтегазовой индустрии»** 14 сентября 2017 г. в Центральном музее связи имени А. С. Попова (Санкт-Петербург, Почтамтский пер., д. 4). В этом году форум посетит не менее 500 представителей нефтегазовой отрасли, включая представителей большинства крупнейших российских и зарубежных нефтегазовых компаний.

Подробнее о конкурсе на официальном сайте http://it-vink.ru/contest_ru

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОТКРЫТОГО УСТАНОВЛЕНИЯ СЕТЕВОЙ КРИПТОСВЯЗНОСТИ

Синюк Александр Демьянович,

д.т.н., доцент, доцент кафедры Военной академии связи,
г. Санкт-Петербург, Россия, entrop@rambler.ru

Остроумов Олег Александрович,

к.т.н., преподаватель кафедры Военной академии связи,
г. Санкт-Петербург, Россия, oleg-26stav@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Роль информации в современное время имеет тенденцию к увеличению, однако не вся информация является доступной. Особо важная, критичная информация подлежит защите в процессе ее передачи по телекоммуникационным системам ввиду доступности каналов связи нарушителю. Одними из эффективных способов защиты информации считаются криптографические методы, основанные на наличии криптосвязности между объектами связи обеспечиваемой использованием криптографического ключа неизвестного нарушителю. Знание ключа нарушителем исключает ведение закрытого информационного обмена между объектами связи. Это особенно заметно в условиях передачи информации шифруемой на общем ключе в сети связи, включающей много объектов связи, когда сетевой ключ наименее защищен. Задача осложняется обстоятельствами, связанными с ограниченным временем действия ключа, невозможностью или нецелесообразностью доставки нового ключа, большими затратами. Актуализируется необходимость решения задачи установления сетевой криптосвязности по открытым каналам связи.

Предлагается модель открытого установления сетевой криптосвязности, которая носит комплексный характер, определяемый сложными условиями ее построения и функционирования. Поэтому для описания исследуемого процесса разработана совокупность взаимосвязанных моделей-компонент объединенных единой целью формирования сетевого ключа: передачи сетевой информации; перехвата сетевой информации; открытого установления сетевой криптосвязности; оценки эффективности.

Анализ представленной комплексной модели показал, что она в полной мере характеризует процесс открытого формирования сетевого ключа, представляет собой дальнейшее развитие известной концепции подслушивающего канала А. Вайнера и может быть использована в качестве теоретического базиса для проведения всестороннего исследования процесса сетевого ключевого согласования по открытым каналам связи.

Ключевые слова: секретный ключ; нарушитель; открытый канал связи; открытое установление сетевой криптографической связности; широкополосный канал связи; канал перехвата; метод пересекающихся групповых ключей.

Для цитирования: Синюк А. Д., Остроумов О. А. Комплексная модель открытого установления сетевой криптосвязности // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 72-78.

Введение

В настоящее время роль информации имеет тенденцию к увеличению. Однако не вся информация является доступной. Особо важная, критичная информация подлежит защите на всех этапах ее жизненного цикла. Особенно уязвимым представляется процесс передачи конфиденциальной информации по телекоммуникационным системам ввиду доступности каналов связи нарушителю. Существует необходимость криптографического закрытия информационного обмена между выделенной группой корреспондентов (объектов связи) или всеми корреспондентами сети связи (СС). Эти методы защиты информации основаны на наличии криптографической связности, т.е. знании объектами связи (ОС) секретного ключа [1]. Последний может стать известным нарушителю, что особенно проявляется в условиях информационного обмена между ОС СС закрытого общим сетевым ключом (СК). Кроме этого, время действия ключа может завершиться. Доставка нового ключа не всегда представляется возможной, целесообразной и требует достаточно больших организационных, материальных и временных затрат [2]. Это актуализирует необходимость решения задачи открытого установления сетевой криптосвязности, которая определяет постановку задачи формирования СК по открытым каналам связи. Цель ОС состоит в том, чтобы выработать СК таким образом, чтобы нарушитель не обладал информацией (знаниями), позволяющей ему получить копию СК. Его задача заключается в получении тождественного с ОС ключа для последующего чтения шифрованных сообщений на СК. Предлагаемая модель открытого установления сетевой криптосвязности носит комплексный характер и имеет несколько направлений исследования. Поэтому для описания исследуемого процесса предлагается совокупность взаимосвязанных моделей объединенных единой целью формирования СК: передачи сетевой информации; перехвата сетевой информации; открытого установления сетевой криптосвязности; оценки эффективности. Разработанная декомпозиция комплексной модели позволит создать условия для разностороннего исследования и оценки сложного процесса открытого установления сетевой криптосвязности.

Модель передачи сетевой информации

Рассмотрим обмен информации СС как передачу сообщений по совокупности широкоэмитальных каналов (ШВК) [3–4]. Исходными данными для задания сети связи выберем число ОС в СС, которое обозначим N . В СС назначена одна главная станция (ГС), остальные являются

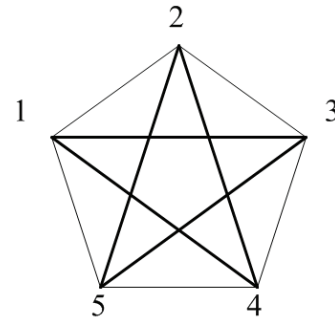


Рис. 1. Структура сети с пятью объектами связи

подчиненными. Относительно связности ОС СС предположим, что используется полностью связная структура [4]. Тогда каждый ОС имеет связность с любым другим ОС СС. Для примера пусть в СС числом ОС равно пяти (см. рис. 1).

Предположим, что в СС производится «широковещательная» передача информации [4–5]. В таких условиях задача маршрутизации не определяется ввиду того, что передачу информации любого ОС СС можно представить как передачу информации по ШВК к $N - 1$ ОС (см. рис. 2).

Сеть связи представим в виде совокупности, состоящей из N ШВК:

ШВК № 1:

$$\{X_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5; p(y_2/x_1), p(y_3/x_1), p(y_4/x_1), p(y_5/x_1)\},$$

ШВК № 2:

$$\{X_2, Y_1, Y_3, Y_4, Y_5; p(y_1/x_2), p(y_3/x_2), p(y_4/x_2), p(y_5/x_2)\},$$

ШВК № 3:

$$\{X_3, Y_1, Y_2, Y_4, Y_5; p(y_1/x_3), p(y_2/x_3), p(y_4/x_3), p(y_5/x_3)\}, \quad (1)$$

ШВК № 4:

$$\{X_4, Y_1, Y_2, Y_3, Y_5; p(y_1/x_4), p(y_2/x_4), p(y_3/x_4), p(y_5/x_4)\},$$

ШВК № 5:

$$\{X_5, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4; p(y_1/x_5), p(y_2/x_5), p(y_3/x_5), p(y_4/x_5)\},$$

где X_i — входной алфавит i -го ШВК, причем $i = 1, 2, \dots, N$; Y_j — алфавит на выходе составляющего канала связи ШВК [3] к j -му ОС, где $j = 1, 2, \dots, N$ и $i \neq j$; $p(y_j/x_i)$ — матрица переходных вероятностей [6] i -го ШВК в составляющем канале к j -му ОС, причем $x_i \in X_i, y_j \in Y_j$.

Предположим, что для каждого ШВК выполнены следующие условия (которые покажем, например, для ШВК № 1 из (1)):

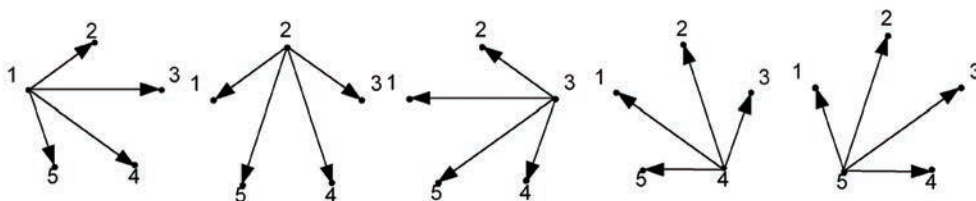


Рис. 2. Широковещательные передачи информации сети связи

а) зависимость последовательности символов на выходе ШВК от входной определяются только зависимостями соответствующего символа выходной последовательности от символа входной последовательности (см. (2)), т.е. для любых последовательностей $\bar{x}_1 \in X_1^n, \bar{y}_2 \in Y_2^n, \bar{y}_3 \in Y_3^n, \bar{y}_4 \in Y_4^n, \bar{y}_5 \in Y_5^n$:

$$\begin{aligned} p(\bar{y}_2 / \bar{x}_1) &= \prod_{i=1}^n p(y_2^{(i)} / x_1^{(i)}), \\ p(\bar{y}_3 / \bar{x}_1) &= \prod_{i=1}^n p(y_3^{(i)} / x_1^{(i)}), \\ p(\bar{y}_4 / \bar{x}_1) &= \prod_{i=1}^n p(y_4^{(i)} / x_1^{(i)}), \\ p(\bar{y}_5 / \bar{x}_1) &= \prod_{i=1}^n p(y_5^{(i)} / x_1^{(i)}) \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1^{(i)}, y_2^{(i)}, y_3^{(i)}, y_4^{(i)}, y_5^{(i)}$ — i -й элемент последовательности $\bar{y}_3, \bar{y}_4, \bar{y}_5$, соответственно; X_i^n, Y_j^n — декартова n -я степень множества (алфавита) X_i на входе i -го ШВК и множества Y_j на выходе составляющего канала к j -му ОС, соответственно.

б) составляющие каналы связи (СКС) ШВК № 1: $\{X_1, Y_2; p(y_2/x_1)\}, \{X_1, Y_3; p(y_3/x_1)\}, \{X_1, Y_4; p(y_4/x_1)\}, \{X_1, Y_5; p(y_5/x_1)\}$ описываются моделями дискретных симметричных каналов связи без памяти (ДСК) [3–4].

в) составляющие ШВК № 1 являются независимыми каналами [6], т.е. выход первого СКС зависит только от его входа и т.д. как показано в (3):

$$p(y_2, y_3, y_4, y_5 / x_1) = p(y_2/x_1) p(y_3/x_1) p(y_4/x_1) p(y_5/x_1). \quad (3)$$

г) алфавиты входа и выходов ШВК № 1 конечны и совпадают:

$$|X_1| = |X_2| = \dots = |X_N| = |Y_1| = |Y_2| = \dots = |Y_N|. \quad (4)$$

Модель перехвата сетевой информации

Будем считать, что нарушитель это несанкционированный корреспондент(ы) связи, пытающийся(ся) осуществить действия по несанкционированному доступу к формируемому СК посредством доступа к информации передаваемой по открытым каналам связи СС и (или) несанкционированное воздействие на процесс формирования СК посредством вмешательства в информационный обмен СС.

Сделано предположение, что нарушитель является пассивным [1, 7], т.е. он может только контролировать информацию, передаваемую между ОС, но не может создавать и обмениваться ею с ОС или каким-то образом изменять передаваемую сетевую информацию. Кроме этого, сделано предположение о ограниченности его ресурса. Нарушителю достоверно известно полное описание содержания процедур, их последовательности и параметров, выполняемых ОС для формирования СК. Нарушитель перехватывает всю информацию, передаваемую по СС посредством совокуп-

ности каналов перехвата (КП) нарушителя $\{X_i, Z_i; p(z_i/x_i)\}$ (см. рис. 3), где $i = 1, \dots, N$, для каждого из которых выполняются условия:

а) алфавиты всех входов и выходов ШВК и КП конечны и совпадают:

$$|X_1| = |X_2| = \dots = |X_N| = |Y_1| = |Y_2| = \dots = |Z_N| = |Z_1| = |Z_2| = \dots = |Z_N|, \quad (5)$$

где z_i — алфавит выхода i -го КП;

б) зависимость последовательности символов на выходе КП от входной последовательности i -го ШВК определяются только зависимостями соответствующего символа выходной последовательности КП от символа входной последовательности ШВК, т.е. для любых последовательностей \bar{x}_i, \bar{z}_i :

$$p(\bar{z}_i / \bar{x}_i) = \prod_{j=1}^n p(z_i^{(j)} / x_i^{(j)}), \quad (6)$$

где $x_i^{(j)}, z_i^{(j)}$ — j -й элемент последовательностей длиной n символов, соответственно, причем $\bar{x}_i \in X_i^n, \bar{z}_i \in Z_i^n$, где X_i^n, Z_i^n — декартова n -я степень алфавита X_i на входе i -го ШВК и алфавита Z_i на выходе КП вход, которого является входом i -го ШВК, соответственно.

в) каждый k -й КП не зависит от СКС k -го ШВК:

$$\begin{aligned} p(y_1, \dots, y_{k-1}, y_{k+1}, \dots, y_N, z_k / x_k) &= \\ &= p(y_1 / x_k) \times \dots \times p(y_{k-1} / x_k) p(y_{k+1} / x_k) \times \dots \times p(y_N / x_k) p(z_k / x_k). \end{aligned} \quad (7)$$

г) все КП нарушителя описываются моделями ДСК.

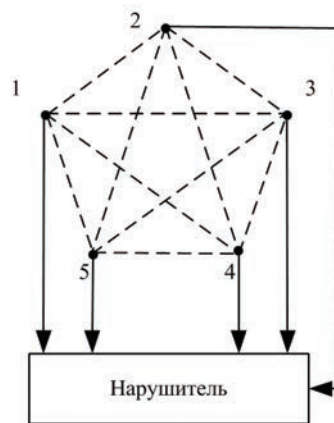


Рис. 3. Совокупность каналов перехвата нарушителя

Передачу всей информации в каждом ШВК СС нарушитель контролирует посредством использования соответствующего КП как показано на рис. 4.

Модель открытого установления сетевой криптосвязности

В результате проведенного анализа методов открытого формирования ключей разработан метод «пересекающихся групповых ключей», который заключается в последовательном выполнении временных фаз формирования СК:

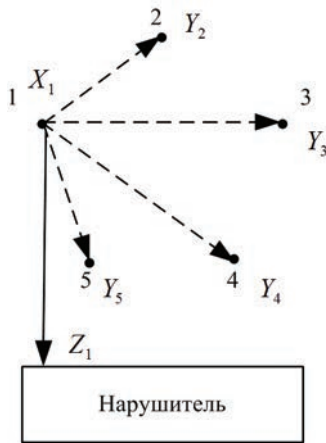


Рис. 4. Контроль передачи информации нарушителем в ШВК № 1

1. Первое деление N ОС СС на NN независимых групп.
2. Одновременное и независимое формирование групповых ключей (ГК) в NN группах ОС СС по открытым каналам связи.

3. Второе деление N ОС СС на NN новых групп, причем новые группы включают максимально возможное число ОС СС из разных NN групп, сформированных на 1-й фазе метода.

4. Одновременное формирование ГК в NN новых группах ОС СС. В результате этого каждый i -й из N корреспондентов СС получает два ГК (сформированных на 2-й и 4-й временных фазах), которые обеспечивают его криптографическую связность с ОС из двух пересекающихся групп первого и второго деления с общим членом, которым является сам i -й корреспондент (т.е. производится формирование криптосвязанных групп ОС).

5. Выбор группы ГК, ключ которой принимается за СК по заранее оговоренному между всеми ОС СС алгоритму.

6. Одновременная независимая волнообразная поэтапная передача СК от группы СК ко всем другим зависимым группам, охватывающим всех ОС СС, путем перешифрования передаваемого СК на ГК смежных криптосвязанных групп с использованием единого алгоритма линейного шифрования. Предполагается, что в едином алгоритме линейного шифрования [1, 7] используется некоторый ключ e , предназначенный для шифрования сообщений на передаче отправителем сообщений и ключ d , предназначенный для дешифрования криптограмм получателями на приеме. Ключи e и d совпадают и принадлежат пространству ключей $\{K\}$. Эта система шифрования информации симметричная, т.к. для любой допустимой пары ключей (e, d) вычислительно просто определить один ключ, зная другой. Оба ключа секретные. Сформированный СК представляется избыточной последовательностью двоичных символов. Тогда единый алгоритм линейного шифрования удовлетворяет требованию идеального шифратора, определенного К. Шенноном как теоретически невскрываемый шифратор с ключом конечной длины при атаке только с знанием криптограммы [8].

Графически метод ключевого согласования представлен на рис. 5.

Предлагается выбрать число ОС в группе для формирования ГК на 2-й и 4-й временных фазах метода. Открытое ключевое согласование для двух ОС исследовано в ряде работ [9, 10, 11]. Однако этот выбор не совсем приемлем, т.к. формирование ГК возможно только для четного числа ОС N . Кроме этого передачу зашифрованного СК не получится произвести в случае 2-х и более несогласований ГК, что связано с наличием ошибок в каналах связи. Предложено формировать ГК в группах, состоящих из трех ОС. Исследуем вопросы соотношения количества групп 3-х ОС N_3 и 2-х ОС N_2 в общем числе NN групп, причем

$$NN = N_2 + N_3. \quad (8)$$

В целях достижения большего количества маршрутов приема зашифрованного СК каждым ОС СК, предлагается деление N ОС производить, таким образом, при котором обеспечивается получение максимального N_3 и минимального N_2 в соответствии с выражениями:

$$N_3 = \begin{cases} \frac{N}{3}, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 0, \\ \frac{N-2}{3}, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 2, \\ \frac{N-4}{3}, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 1. \end{cases} \quad (9)$$

$$N_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 0, \\ 1, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 2, \\ 2, & \text{если } \text{mod}(N, 3) = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Модель оценки эффективности

Качество СК оценивается в рамках предлагаемой системы показателей качества СК:

1) Оперативность: $T_{СК}$ [с] — время формирования СК, причем

$$T_{СК} \leq T_{упр} + 2T_{ФГК}^{\max} + T_{ПСК}^{\max}, \quad (11)$$

где $T_{упр}$ — время, затрачиваемое ОС СС для формирования и передачи управляющих команд ГС и ответов подчинен-

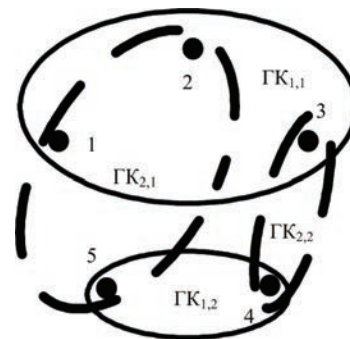


Рис. 5. Формирование СК методом «пересекающихся ГК»

ных станций; $T_{\text{ФГК}}^{\text{max}}$ — максимальное время формирования ГК на 2-й или 4-й фазе:

$$T_{\text{ФГК}}^{\text{max}} = \max \{t_{i,j}\}, \quad (12)$$

где $t_{i,j}$ — время формирования ГК в i -й группе на j -й фазе, причем $i = 1, \dots, NN, j = 2, 4, \text{ и}$

$$T_{\text{ПСК}}^{\text{max}} = t_{\text{такт}} N_{\text{такт}}^{\text{max}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{ПСК}}^{\text{max}}$ — максимальное время передачи СК; $t_{\text{такт}}$ — тактовое время (время передачи СК между двумя смежными узлами СС); $N_{\text{такт}}^{\text{max}}$ — максимальное число тактов передачи СК, причем

$$N_{\text{такт}}^{\text{max}} = \left[\frac{N-2}{2} \right]. \quad (14)$$

2) Безопасность:

2.1. n_0 [бит] — длина СК, причем

$$n_0 = \min \{n_{0i,j}\}, \quad (15)$$

где $n_{0i,j}$ — длина ГК в i -й группе на j -й фазе;

2.2. $H(K)$ [бит] — энтропия СК [3–4];

2.3. P_s — вероятность получения нарушителем ключа тождественного с СК.

3) Достоверность: $P_{\text{пер}}$ — вероятность события, при котором хотя бы один ОС СС не получил СК.

К СК необходимо предъявить ряд требований, которые находят свое отражение в предлагаемой системе требований:

1) Оперативность:

$$T_{\text{СК}} \leq T_{\text{СК}}^{\text{TP}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{СК}}^{\text{TP}}$ — максимально допустимое время установления криптосвязности между ОС СС;

2) Безопасность:

$$2.1. \quad n_0 \geq n_0^{\text{TP}}, \quad (17)$$

где n_0^{TP} — минимально допустимая длина СК;

$$2.2. \quad H(K) \geq n_0 - \chi^{\text{TP}}, \quad (18)$$

где χ^{TP} — максимально допустимое отклонение энтропии СК от энтропии «идеального» ключа;

$$2.3. \quad P_s \leq P_s^{\text{TP}}, \quad (19)$$

где P_s^{TP} — минимально допустимая вероятность получения нарушителем ключа тождественного с СК.

3) Достоверность:

$$P_{\text{пер}} \leq P_{\text{пер}}^{\text{TP}}, \quad (20)$$

где $P_{\text{пер}}^{\text{TP}}$ — минимально допустимая вероятность события, при котором хотя бы один ОС не получил СК.

Эффективность процесса формирования СК отражается в предлагаемом показателе — вероятности формирования СК отвечающего требованиям

$$P(T_{\text{СК}} \leq T_{\text{СК}}^{\text{TP}}, n_0 \geq n_0^{\text{TP}}, H(K) \geq n_0 - \chi^{\text{TP}}, P_s \leq P_s^{\text{TP}}, P_{\text{пер}} \leq P_{\text{пер}}^{\text{TP}}) \quad (21)$$

Оценка эффективности процесса формирования СК:

$$P(T_{\text{СК}} \leq T_{\text{СК}}^{\text{TP}}, n_0 \geq n_0^{\text{TP}}, H(K) \geq n_0 - \chi^{\text{TP}}, P_s \leq P_s^{\text{TP}}, P_{\text{пер}} \leq P_{\text{пер}}^{\text{TP}}) \geq P^{\text{TP}}, \quad (22)$$

где P^{TP} — минимально допустимое значение вероятности формирования СК, отвечающего требованиям (11)–(20).

Вывод

Предлагаемая комплексная модель открытого установления сетевой криптосвязности в полной мере характеризует процесс открытого формирования СК посредством задания взаимосвязанных друг с другом моделей-компонент. Известная концепция подслушивающего канала А. Вайнера и другие работы [12–15] определили условия формирования ключа только для двух ОС. Разработанная комплексная модель представляет дальнейшее развитие последней, т.к. усложняется для условий формирования ключа значительно большего количества ОС в СС. Тем самым она расширяет сферу применения классической концепции. Разработанная комплексная модель открытого установления сетевой криптосвязности может быть использована исследователями в качестве теоретического базиса для проведения всестороннего изучения, анализа и оценки процесса сетевого ключевого согласования по открытым каналам.

Литература

1. Фергюсон Н., Шнайер Б. Практическая криптография: пер. с англ. М.: Вильямс, 2005. 424 с.
2. Алферов А. П., Зубов А. Ю., Кузьмин А. С., Чермушкин А. В. Основы криптографии. 3-е изд., испр. и доп. М.: Гелиос АРВ, 2005. 480 с.
3. Колесник В. Д., Полтырев Г. Ш. Курс теории информации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 416 с.
4. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь: пер. с англ. / под ред. М. С. Пинскера и Б. С. Цыбакова. М.: Советское радио. 1974. 720 с.
5. Cover T. Broadcast Channels // IEEE Trans, on Inf. Theory. 1972. Vol. 18, № 1.
6. Фано Р. Передача информации. Статистическая теория связи. М.: Мир, 1965. 366 с.
7. Menezes A. J., Oorschot P. C., Vanstone S. A. Handbook of applied cryptography. CRC Press, N.Y., 1996. 780 p.
8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики: пер. с англ. М.: Иностранная литература, 1963. 829 с.
9. Синюк А. Д., Коржик В. И., Яковлев В. А. Протокол выработки ключа в канале с помехами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2000. № 1. С. 52–63.
10. Яковлев В. А., Коржик В. И., Бакаев М. А. Протоколы формирования ключа на основе каналов связи с шумом в условиях активного перехвата с использованием экстракторов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2006. № 1. С. 60–81.
11. Патент РФ 2180469. Способ формирования ключа шифрования/дешифрования / Синюк А. Д., Коржик В. И.,

Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Яковлев В. А. Заявл. 17.04.2000. Опубл. 10. 03. 2002. Бюл. № 7.

12. *Wuher A.* The wire — tap channel // *Bell Syst. Techn. J.* 1975. Vol. 54. No. 8. Pp. 1355–1387.

13. *Буренин А. Н., Легков К. Е.* Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления: монография. М.: Медиа-Паблицер, 2015. 348 с.

14. *Легков К. Е., Лебякин И. А.* Методика оценивания качества функционирования инфокоммуникационных систем специального назначения // *Вестник воздушно-космической обороны.* 2015. № 4 (8). С. 76–79.

15. *Буренин А. Н., Легков К. Е.* Вопросы управления структурой инфокоммуникационных сетей специального назначения // *Информация и космос.* 2015. № 3. С. 23–28.

THE COMPLEX MODEL OF OPEN NET CRYPTOCONNECTIVITY SETTING

Alexander D. Sinyuk,

Saint-Petersburg, Russia, entrop@rambler.ru

Oleg A. Ostroumov,

Saint-Petersburg, Russia, oleg-26stav@mail.ru

ABSTRACT

Very important, critical information should be protected while being transmitted at telecommunication systems as the communication channels are accessible to the offender. The cryptographic methods based on the cryptoconnectivity between communication objects, provided by the cryptographic key using which is unknown for the offender are the effective methods of the information protection. The fact that the offender knows the key excludes encrypted information exchange holding between communication objects. It is especially visible when the information is transmitted encrypted on the general key in the communication net, including a lot of communication objects when the net key is least of all protected. The task becomes complicated when the key action time is limited and it is impossible or inappropriate to give another key as well as heavy expenses. The necessity of the task solving of the net cryptoconnectivity setting at the open communication channels is relevant.

The model of the open net cryptoconnectivity setting is proposed, which has integrated nature defined by the complicated conditions its construction and functioning. That is why the aggregate of the interconnected component-models joined by the one aim of the net key forming, net information transmission, net information interception, net cryptoconnectivity open setting, effectiveness evaluation is designed for the investigating process description.

The analysis of the complex model presented showed that it characterizes the process of the open net key forming in full. It is the further development of the known concept of the eavesdropping Viner channel and it can be used as the theoretical basis for the all-round investigation of the key net coordination process at the open communication channels.

Keywords: secret key; offender; open communication channel; open net cryptographic connectivity setting; broadcast channel; interception channel; crossed group keys method.

References

1. Fergusson Nils, Shnaier Bruce *Practical cryptography*. John Wiley & Sons. 2003. 432 p.
2. Alpherov A. P., Zubov A. Yu., Kuzmin A. S., Cheremushkin A. V. *Osnovy kryptografii* [Fundamentals of cryptography]. 3rd ed. corrected and supplemented. M. Gelios APB, 2005. 480 p. (In Russian)
3. Kolesnik V. D., Poltirev G. Sh. *Kurs teorii informatsii*. [Course of information theory]. Science. M. Nauka. The main editorial of physical-and-mathematical literature. 1982. 416 p. (In Russian)
4. Gallagher, R. *Information Theory and Reliable Communications*. John Wiley & Sons. 1968. 720 p.

5. Cover T. Broadcast Channels. *IEEE Trans, on Inf. Theory*, 1972. Vol. 18. No. 1.
6. Fano R. *Peredacha informatsii. Statisticheskaya teoriya svyazi*. [Information transmission. Statistic communication theory]. M. Mir, 1965. 366 p.
7. Menezes A.J., Oorschot P.C. Vanstone S.A. *Handbook of applied cryptography*. CRC Press, N.Y., 1996. 780 p.
8. Shannon K. *Raboti po teorii informatsii i kybernetiki* [Works on information theory and cybernetics]: trans. From English. M. Foreign literature. 1963. 829 p. (In Russian)
9. Sinyuk A.D., Korzhik V.I., Yakovlev V.A. The key working out protocol in noisy channel. *Problemi informacionnoy bezopasnosti. Komp'uterine sistemi*. [Information security problems. Computer systems]. 2000. No. 1. Pp. 52-63. (In Russian)
10. Yakovlev V.A., Korzhik V.I., Bakaev M.A. The key forming protocols on the basis of noisy channels in conditions of additive interception using extractors. *Problemi informacionnoy bezopasnosti. Komp'uterine sistemi*. [Information security problems. Computer systems]. 2006. No. 1. Pp. 60-81. (In Russian)
11. Patent RF 2180469. *Sposob formirovaniya klyucha shifrovaniya/deshifrovaniya*. [The method of coding and decoding key forming]. Sinyuk A.D., Korzhik B.I., Moldovyan A.A, Moldovyan N.A., Yakovlev V.A. Declared 17.04.2000. Published. 10. 03. 2002. Bulletin No. 7. (In Russian)
12. Wyner A. The wire – tap channel. *Bell Syst. Techn. J.* 1975. Vol. 54. No. 8. Pp. 1355-1387.
13. Burenin A.N., Legkov K.E. *Sovremennye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial nogo naznacheniya. Osnovy postroeniya i upravleniya: Monografiya*. [Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control]. Moscow, Media Publisher, 2015. 348 p. (In Russian)
14. Legkov K.E., Ledyankin I.A. Special purpose infocommunication systems functioning quality estimation technique. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony*. 2015. No. 4 (8). Pp. 76-79. (In Russian)
15. Burenin A.N., Legkov K.E. Problems of special purpose infocommunication network structure management. *Informacija i kosmos* [Information and Space]. 2015. No. 3. Pp. 23-28. (In Russian)

Information about authors:

Sinyuk A.D., PhD, Docent, associate professor of the Military telecommunications academy
Ostroumov O.A., PhD, lecturer of the Military telecommunications academy

For citation: Sinyuk A.D., Ostroumov O.A. The complex model of open net cryptoconnectivity setting. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 72-78. (In Russian)



FRAMEWORK FOR ENSURING EFFECTIVE FUNCTIONING OF INFORMATION SUBSYSTEMS OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL OBJECTS IN THE CONDITIONS OF ESSENTIAL IMPACTS

Andrey N. Burenin,

Ph.D., Docent, chief specialist of JSC «Research Institute «Rubin»,
Saint-Petersburg, Russia, konferencia_asu_vka@mail.ru

Konstantin E. Legkov,

PhD, head of the Department of automated control system,
Military space academy, Saint-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

ABSTRACT

A variety of complex organizational and technical systems, including systems for special purposes, play an essential role in country's defense capability ensuring, state security and the maintenance of law and order. In order to ensure their effective functioning under various operating conditions, permanent control of organizational and technical systems is organized, which is implemented through the deployment of automated control systems, in which, to ensure the required quality of management processes, information subsystems are created that provide required information services both to officials of control organs and to automation complexes of automated control systems. As a complex system, the functioning of which is carried out with the required values of performance indicators, the information subsystems of the automated control systems should be continuously managed, especially in emergency conditions. To manage it, there are complexes of software and hardware, both from the composition of the automated control systems of the complex organizational and technical systems for special purposes, so specially organized for the information subsystems. In any case, the complexes of funds form the allocated system of control of the information subsystems of the automated control systems for special purposes, distributed on the components of the subsystem. Control system of the information subsystems is entrusted with the solution of a number of management tasks. Among this tasks the most important is the task of ensuring the effective functioning of the information subsystems, by organizing effective management, especially in the context of significant destructive influences.

The work deals with the issues of effective functioning ensuring of information subsystems as a part of automated control systems for complex organizational and technical objects, the operation of which takes place in emergency conditions characterized by the possibility of significant destructive impacts. Management methods are proposed that improve the efficiency of their operation.

Keywords: information subsystem; automated control system; effective functioning; complex organizational and technical objects; destructive impacts.

For citation: Burenin A.N., Legkov K.E., Framework for ensuring effective functioning of information subsystems of the automated control systems for complex organizational And technical objects in the conditions of essential impacts. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 79-86.

INTRODUCTION

The management of the information subsystems (IS) of the automated control systems (ACS) systems for special purposes (SPS), as a complex system, is carried out under various conditions of operation (including in emergency conditions) and involves the development of processes for organizing a complex of control actions on it and its components, as a result of which the subsystem itself (or the required component) goes into the required (planned) state [1–2].

The main tasks that need to be addressed in IS management can be reduced to five main ones: IS structure management, fault management, IS functioning management, resource management and safety management [1–2]. Among all five tasks of managing of the IS of the ACS SPS, the task of functioning managing is the most important and difficult to implement, since it is necessary to take into account many factors, characteristics and parameters of complex processes occurring in the subsystem. This task is solved on the basis that the IS of the ACS SPS is considered as multinetwork service system [2], which is characterized by the main features of queuing systems [3–4, 8–15].

FORMULATION OF THE PROBLEM OF THE FUNCTIONING MANAGEMENT OF THE IS OF THE ACS SPS

The task of functioning control is a complex task and presupposes the use of a set of methods used in certain conditions of the situation (Fig. 1). In shown in fig. 1 variants of the organization of functional control processes, each of which to some extent determines the effectiveness of the operation of the IS of the ACS SPS, only management processes, organized on the basis of the methods of the first group (Fig. 1), directly affect provision procedures of IS services, and others, belonging to the second group, affect the parameters that directly or indirectly affect the functioning of the IS.

When solving the tasks of managing the operation of the IS, the ACS SPS should have a number of management objectives $\Omega_{IP} = \{\omega_{IP1}, \dots, \omega_{IPp}\}$. The fulfillment of the goals Ω_{IP}

will ensure the effective functioning of the IS and its individual components in various conditions, including conditions of influence of a complex of natural and deliberate disturbances and interference on the IS and the control system of the IS [4].

The effectiveness of the operation of the IS of the ACS SPS can be characterized by the value of the functional $Q(t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP})$, depending on the vector of fixed, unperturbed parameters and IS characteristics of the ACS SPS \mathbf{B}_i , p (dimension and connectivity of the IS of the ACS SPS structure, the performance of the IS servers, the capacity of the virtual circuits, the functioning algorithms of the IS and the requirements maintenance in IS), a vector of disturbing external parameters Ψ_{IPsr} (the effects of electronic warfare (EW) means, the effects of natural interference and surround, failures of IS technical means, destructive effects, cyberattacks on IS hardware and software), as well as on the applied control strategies of the subsystem, expressed in the control vector \mathbf{U}_{IP} (determines control actions on the components of the IS produced by the control system of the IS of the ACS SPS).

If it is possible to organize the control of the IS of the ACS SPS that the required value of the IS $Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{fcs}(t)] \geq (\leq) Q_{TP}$ performance indicator is provided for a given time T_z with the probability not less than required, in spite of the whole spectrum of impacts on it, then the functioning of the IS of the ACS SPS should be considered as stable, and management can be considered effective.

Considering $Q(\dots)$ as a functional from the management, it can be argued that the choice of a specific vector $\mathbf{U}_{IP} = \mathbf{U}_{IP}^{fcs}(t)$ will provide a very specific value of the efficiency index of the IS functioning of the ACS SPS, i.e.

$Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{fcs}(t)] = Q_{IP}^{fcs}[\mathbf{U}_{IP}^{fcs}(t)]$. Therefore, the solution of the problem of the functioning control of the IS of the ACS SPS is reduced to the choice of one $\mathbf{U}_{IP} = \mathbf{U}_{IP}^{fcs}(t)$ that will either provide an extremum to the indicator or provide its value no more (less) than admissible, i.e. reduces to the solution of some extremal problem (1 a), or to the problem described by the quintile (1 b):

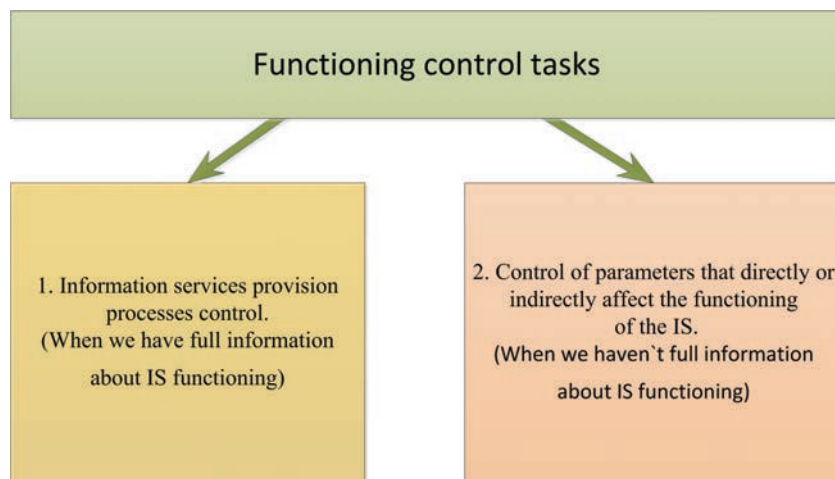


Fig. 1. A set of functioning control tasks

$$\begin{aligned} Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)] &\rightarrow \underset{\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t) \in \mathbf{U}_E}{extr} & a) \\ P\{Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{fics}(t)] \geq (\leq) Q_{TP}\} &\underset{\mathbf{U}_{IP}^{fics}(t) \in \mathbf{U}_E}{\geq} P_{Gr\Phi} & b) \quad (1) \\ R[\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)], R[\mathbf{U}_{IP}^{fics}(t)] &\leq R_{U_{IP}} \end{aligned}$$

The solution of the extremum problem (1 a) is a definite (best) control $\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)$, which is the optimal control for the functioning of the IS of the ACS SPS. The solution of the problem given in the form of quantile (1 b) is some control that ensures the value of the IS performance indicator is not worse than the required level with a given probability. In these solutions, the IS of the ACS SPS ($\mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}$) model was used and the resource allocated for management was taken into account $R_{U_{IP}}$.

This task is quite closely connected with the task of managing the resources of the IS of the ACS SPS. The organization of adaptive management of its functioning in difficult conditions of the environment, assumes that the procedures for the flexible operational distribution of real-time IMS will be implemented, ensuring the required values of the efficiency of the operation of the SPS itself, i.e. procedures will be implemented for managing the complex of IS, which is the basis of the task of resources control in the IS of the ACS SPS.

If the SPS is operating under conditions of acceptable (permissible) level of information impacts, when significant destructive changes in the IS of the ACS SPS are absent and it is possible to obtain complete reliable information about the state of the IPS, the task of managing the operation is reduced (see Fig. 1) to the problem 1 — management of the provision of information services (for example, by using of methods of quality reliefs in the control system). If the operation of the SPS occurs in emergency conditions, when there is the possibility of significant destructive changes in the IS of the ACS SPS (this fact may not allow the IS control system to obtain information about its state) other methods aimed at controlling the parameters characterizing the functioning of the subsystem.

At the same time, many parameters $\Pi_{IP} = \{p_l\}$ characterizing the functioning of the IS affect to the indicator of its effectiveness:

$$Q_{IP}(\Pi_{IP}) = f_z [Q_1(p_1), \dots, Q_l(p_l), \dots, Q_N(p_N)]. \quad (2)$$

Taking into account (2), we can formulate the following multicriterial task for such management of parameters characterizing the functioning of the IS of the ACS SPS, which will provide an extremum (or quantile) to the value of the performance indicator of the subsystem:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)}{extr} Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)] &= \underset{\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)}{extr} f_z \{Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)]\}; & a) \\ P\{f_z \{Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{fics}(t)]\} \geq (\leq) Q_{TP}\} &\underset{\mathbf{U}_{IP}^{fics}(t)}{\geq} P_{Gr\Phi}; & b) \quad (3) \\ R[\mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)], R[\mathbf{U}_{IP}^{fics}(t)] &\leq R_{U_{IP}} \end{aligned}$$

The problem (3 a) is solved by the methods of multicriteria optimization (Pareto or optimization by the integral criterion (convolution)) [5–13]:

$$Q_{IP} = Q[t, \mathbf{B}_{IP}, \Psi_{IPsr}, \mathbf{U}_{IP}^{ficsO}(t)] = \sum_{r=1}^N \chi_r Q_r. \quad (4)$$

The second task, connected with the choice of the control providing the expression (3 b), becomes relevant when the optimization statement is unsolvable. In this case the IS control of the ACS SPS is selected, which guarantees the value of the performance index not worse than the specified value with a probability not lower than the permissible value.

Thus, the solution of the problem of controlling the functioning of the IS of the ACS SSN in complicated conditions (it is difficult or impossible to obtain operational reliable information about the state of the IS) begins by identifying a number of parameters that affect the performance indicators. Then a selection is made of a group of significant ones, which are then used to formulate a management strategy.

FORMALIZATION OF THE IS FUNCTIONING PARAMETERS CONTROL

In a generalized form, the management of the parameters of the operation of the IS of the ACS SPS is based on the determination of the weights of all or the best ways of obtaining information services, including the latter as the first stage.

At the beginning of the second stage, a modernized matrix of the weights of the IS level network is compiled, the zero elements of the main diagonal of which are significant ∞ . Replacement of an element q_{ii} from zero to ∞ means that the weight of the path to the IS service provisioning node is assumed to be infinitely large, which makes it possible not to consider in the procedure the paths passing through the outgoing service provision node, thereby excluding it.

The modernized matrix of weights $Q = \|q_{ij}\|$ obtained by this method is multiplied by the dispersion matrix D_q . As a result, a matrix $\Delta_q = Q \cdot D_q$ is obtained, the elements of which are used to obtain the remote matrices (i.e., the matrices of the operation control plan when controlling the parameters), each element σ_{ij} of the matrix $\Delta_q = \|\sigma_{ij}\|$ being:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} = \min_k [&(q_{i,1} + d_{1,j}^q); (q_{i,2} + d_{2,j}^q); \dots; \\ &(q_{i,i} + d_{i,j}^q); \dots; (q_{i,N} + d_{N,j}^q)] \end{aligned} \quad (5)$$

In the expression \min_k means that the minimum can be taken from the best variant $k = 1$, in the second variant $k = 2$, etc.

Each of the members of expression (5) determines the weight from the service provision node Y_i to the node Y_j , if the first intermediate service provision node is Y_ξ for all $\xi \in \{1, \dots, N\}$ (Fig. 2).

If Y_ξ is not adjacent to V_p , then the term is equal to ∞ .

Due to the fact that $q_{ii} = \infty$, the term $(q_{ii} + d_{jj}^q)$ always has values ∞ , although the element d_{jj}^q is not necessarily equal ∞ . Thus, the number of terms in the expression that are not equal ∞ is equal to the number n of neighboring service provision nodes (Fig. 2), i.e., the number of directions originating from the service provision node Y_i .

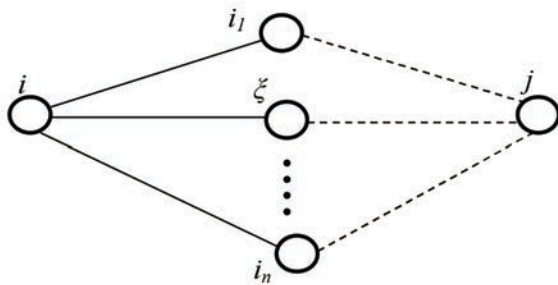


Fig. 2. Creating of the parameters control plan

The value of the minimum term of expression (5), which determines the weight of the best path from the i -th node of service provision to the j -th through ξ -th:

$$\delta_{ij}^1 = \min_1 [(q_{i,1} + d_{1,j}), \dots, (q_{i,N} + d_{N,j})] = (q_{i,\xi} + d_{\xi,j})$$

is entered as elements δ_{ij}^1 in the matrix of the first choice $\Delta^1 = \|\delta_{ij}^1\|$.

The value of the second significant term of expression (5), which determines the weight of the second most important path after the best $\delta_{ij}^2 = \min_2 [(q_{i,1} + d_{1,j}); \dots; (q_{i,N} + d_{N,j})]$ is entered as elements δ_{ij}^2 in the matrix of the first choice $\Delta^2 = \|\delta_{ij}^2\|$.

In the presence of n neighboring service provision nodes, it is obviously possible to obtain n matrices of the form: $\Delta^1, \Delta^2, \dots, \Delta^n$.

From the matrices $\Delta^1, \Delta^2, \dots, \Delta^n$ we go to the matrices of the control plans of the IPS of the ACS SPS. To do this for each Y_j we seek the minimal term of expression (5) for to $k = \xi, \xi = 1, 2, \dots, N$, for example $(q_{i,\xi} + d_{\xi,j})$. Then the element m^i of the control plane matrix for Y_i is equal to the value of the index k , i.e. the plan itself is set.

$$\Pi Y_i = \beta_{i,\xi} \begin{bmatrix} \dots A_\xi \dots \\ m_{i\xi}^k \end{bmatrix} \cdot \quad (6)$$

In the same way, the control plan matrices are generated for each IS service delivery center of the IS of the ACS SPS, indicating the order of the choice of outgoing directions for receiving the information service $\{p_{ijk}\}$.

METHODS OF PARAMETERS CONTROL

In accordance with (3) and the general scheme for parameters control outlined above, and also taking into account the fact that in emergency operation conditions it is difficult to obtain complete state information of the IS of the ACS SPS and the search should be conducted in a class of decentralized procedures, a number of methods for controlling the parameters characterizing the functioning of the IPS are proposed.

As one of the most easily implemented in practice methods for controlling parameters, the following can be proposed: the method of distributed program control (DPC) with local adaptation procedures (LAP) (the DPC LAP method). It provides for the establishment of a static (or unchanging in time) management plan for each IS service node in the form of a matrix $\Pi Y_i = \{p_{ijk}\}$, each element of which is equal to 1 if the path from the i -th IS service provision node to the k -th through the adjacent j -th is the path of the first choice (i.e., the best one), if $p_{ijk} = 2$, then by the second choice, etc. The DPC LAP method provides two levels of local adaptation, which does not require the transfer of information (Fig. 3).

The first level determines the expedient number of consecutive samples in each outgoing direction. If an unsuccessful attempt is made to obtain an appropriate quality control device along the path of the first choice, several more attempts should be made before proceeding to the selection of the next most important path. The required number of consecutive samples depends on many factors in the constituent transmission paths to the destination server.

If the average service time of the requirement is \bar{t}_o , then the average time during which this virtual direction to the destination server will be in a busy state will be \bar{t}_z . Since the process of receiving new requirements or messages is independent

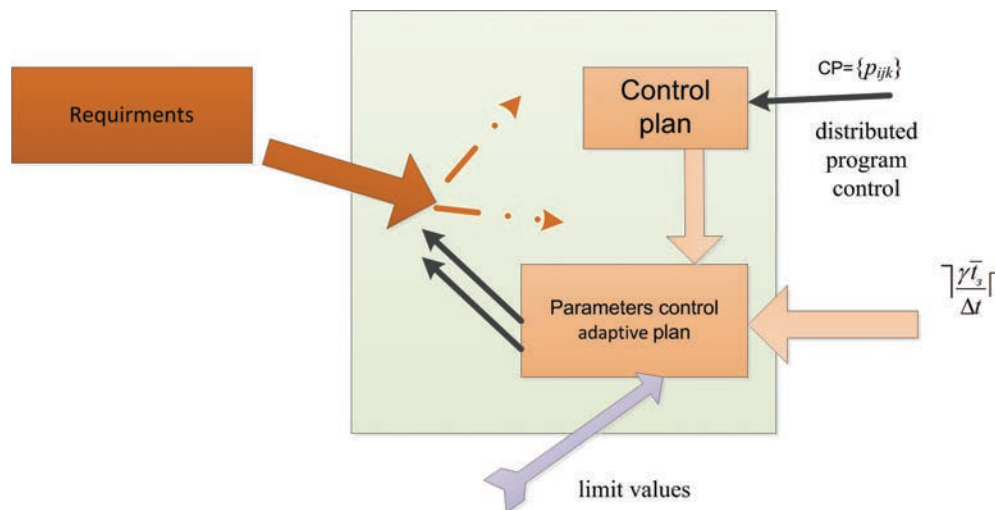


Fig. 3. Description of the method DPC LAP

of the processes of freeing the service servers, for a reasonable number of consecutive samples one can take the value $\lceil \frac{\gamma \bar{t}_z}{\Delta t} \rceil$, where Δt is the time interval between two consecutive samples with the establishment of a virtual connection to the server, γ — coefficient characterizing the difference between the path of the first (second) and second (third) choice and the allowable fraction of the average service time requirements.

The second level of adaptation is associated with the use of local information based on a periodic analysis of the load of funds (virtual branch occupancy, queue size in the server) or the current estimate of the maintenance delay time for each outgoing direction.

The choice of the path is based on a set of rules, taking into account the given parameters of the local information available on each component of the control system of the IS associated with the service provision node. At the same time, the path that is less loaded on the first section (outgoing direction) is selected, is characterized by a smaller queue or less delay in servicing.

If the paths of first, second, etc. choices are different, the choice procedure is complicated by the introduction of restrictions. For example, a service request is sent to the outgoing direction of the second (third) choice, if the outgoing direction of the first (second) choice is loaded by a certain amount (the queue has reached the limit value, the expected service delays exceed the allowed ones, etc).

As another method of controlling the parameters of the IS of the ASU SPS in emergency situations, when the efficiency of the DPC LAP method is low, a method of distributed program control with global and local adaptation procedures (DPC GLAP) can be proposed which is the integration of the DPC LAP with probability-game (statistic) control procedures. The essence of the DPC GLAP is the formation of probabilistic automata at the distributed control centers of the IS, responding to the success of passing requirements to certain service provision nodes of IS of the ACS SPS. Based on these data, the current management plan for each type of service is being formed, stopping the probability adjustment procedures and managing the services in accordance with the current management plan generated on the basis of the DPC LAP method.

In using the DPC GLAP method to form procedures and a management plan, the IS of the ASU SPS is considered as a random environment, and the management tools of the IS are represented as a collective of stochastic automata operating in this environment (playing with the environment).

The game procedures used in the management of IS parameters of ACS SPS are that in order to obtain the corresponding IS from the source node to the required service provision node, an outgoing direction is randomly selected at random. If the IS with the required quality is provided to the consumer, then this direction is encouraged, otherwise it is fined. This period of operating time statistics will be called the period of the adjustment of the DPC GLAP method. Therefore, as a gaming machine of the IS component of the IS at the j -th node of providing the services of the subsystem, a machine with a variable structure is adopted:

$$A_j = (p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{j\gamma}, \dots, p_{jk}), \quad (7)$$

where $p_{j\gamma} > 0$ — probability of occurrence of the state of the γ -th output and $\sum_{r=1}^k p_{jr} = 1$.

The change of elements $p_{j\gamma}$ occurs as follows: if the action of the γ -th type was committed and the machine A_j was fined, then

$$p_{j\gamma}^* = \frac{p_{j\gamma}^* \alpha}{1 + (\alpha - 1) p_{j\gamma}^*} \quad (8)$$

If for the same action the machine was encouraged, then

$$p_{j\gamma}^* = \frac{p_{j\gamma}^* \beta}{1 + (\beta - 1) p_{j\gamma}^*} \quad (9)$$

Where $\alpha \leq 1$ and $\beta \geq 1$ — parameters of the method; $p_{j\gamma}^*$ — an estimate of the probability of the γ -th output state from the results of servicing previous applications.

After changing the values $p_{j\gamma}^*$, all other elements $p_{j\xi}^* \forall \xi \neq \gamma$ are normalized:

$$p_{j\xi}^* = \frac{p_{j\xi}^*}{1 + (\alpha - 1) p_{j\xi}^*}; \quad (10)$$

$$p_{j\xi}^* = \frac{p_{j\xi}^*}{1 + (\beta - 1) p_{j\xi}^*}. \quad (11)$$

The implementation of game procedures in the process of controlling the parameters of the IS of the ACS SPS is as follows: on each component of the IS, the corresponding i -node is stored a stochastic matrix $A_i = \begin{bmatrix} \dots & A_{ij} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$ with the number of lines equal to the number of nodes in the subsystem and the number of columns equal to the number of outgoing nodes from the node directions. Each j -th row of the matrix, corresponding to the j -th IS node, is an automaton $A_{ij} = (p_{ij1}, p_{ij2}, \dots, p_{ij\gamma}, \dots, p_{ijk})$, and the element $p_{ij\gamma}$ is matched with the γ -th outgoing direction. The elements $p_{ij\gamma}$ change according to (10) or (11).

The main advantage of all gaming procedures in general, and when applying them for managing parameters in the IS of the ACS SPS in particular, is that when generating procedures and management plans, no transfer of any service information is required, since requirements are service information. At the same time, when creating a management plan for each new application, the results of their service are used in the previous time, and after the maintenance their plan is again adjusted.

However, despite such a remarkable property of game procedures as the lack of the necessity to transmit the service information, their exclusive application is possible only in the IS of the ACS SPS with stable slightly varying demand streams, characterized by long periods of stationarity (the intensities of which remain unchanged for a long time) and in condition of complete absence of structural changes. Only in this case, values $p_{j\gamma}$ can be used as an estimate of the probability of successfully obtaining an information services of the required quality. Otherwise, the error of the estimation bias $p_{j\gamma}$ will increase so

much that these estimates do not at all reflect the real situation in the IS of the ACS SPS. All this leads to the fact that gaming procedures have two main drawbacks: difficulties in taking into account changes in the load (the initial load fluctuations caused by the needs of users of the automated control systems of the SPS, and the fluctuations caused by the IS management procedures, which also lead to its change) and practical absence reactions to structural changes.

Even with insignificant changes in the load entering the IS of the ACS SPS from the consumers it is necessary to change the values of α and β in accordance with these changes. However, it is not possible to obtain analytical expressions for these quantities depending on the load. Usually, the values of the applied parameters α и β are chosen as a result of simulation of the IS operation on the computer. After simulation basing on a given probability of either obtaining the information service of inadequate quality or failing to obtain the information service IS with probability $P_{\text{ОТК}}$, certain probabilities p_1 and p_2 can be obtained that satisfy the condition $p_1 \leq P_{\text{ОТК}} < p_2$ by which you can define the parameters α и β :

$$\alpha = \frac{p_1}{p_2}; \beta = \frac{q_1}{q_2}, \quad (12)$$

where $q_1 = 1 - p_1$; $q_2 = 1 - p_2$.

As a rule, in IS of the ACS SPS the streams of requirements are unevenly distributed on the components of the subsystem and change in the course of the operation of SPS. In addition, the IS itself can undergo significant, including structural, changes. In these circumstances, direct monopoly use of game procedures can wholly disorient the work of the IPS of the ACS SPS. Therefore, the exclusive use of exclusively game procedures for managing IS parameters is inexpedient.

At the same time, changes in the IS of the ACS of the SPS caused by the functioning of the control system of the IS (i.e., influence on the fluctuation of the IS management processes themselves) can be taken into account in the control procedures. Since the choice of the outgoing direction is made by a probabilistic automaton, the changes in the IS (load fluctuations) caused by the operation of the control system of the IS are themselves random.

It is obvious that an automaton $A_i(t_c) = (p_{i1}(t_c), p_{i2}(t_c), \dots, p_{i3}(t_c), \dots, p_{ik}(t_c))$, functioning in a variable IS environment is characterized by the quantity:

$$P_i \left[P_{i1}(p_{i1}(t_c)), \dots, P_{i\beta}(p_{i\beta}(t_c)), \dots, P_{iN}(p_{iN}(t_c)) \right], \quad (13)$$

where $P_{i\beta}(p_{i\beta})$ — probability of a fine.

In this case, the structure of each probabilistic automaton is changed at each χ -th step by changing the parameters χ and β_χ . Then the mathematical expectation of the increment of the matrix element A_i over the choice of the χ -th action is:

$$\Delta p_{ij\beta} = -p_{ij} p_{i\beta} \left\{ P_{i\beta}(p_{i\beta}) \frac{\alpha_\beta - 1}{1 + (\alpha_\beta - 1) p_{i\beta}} + \left[1 - P_{i\beta}(p_{i\beta}) \right] \frac{\gamma_\beta - 1}{1 + (\gamma_\beta - 1) p_{i\beta}} \right\}. \quad (14)$$

Game procedures can be substantially simplified if we take $\beta_\gamma = 1$ and take into account the validity of the following expression:

$$P_{i\beta}(p_{i\beta}) \frac{(\alpha_\beta - 1) p_{i\beta}}{1 + (\alpha_\beta - 1) p_{i\beta}} = \text{const} \quad (15)$$

Then, in order to take into account the changes in the IS of the ACS of the SPS caused by the processes of subsystem control, one should choose $\beta_\gamma = 1$, and the parameter α_γ at each step is determined from the expression:

$$\alpha_\beta = 1 - \frac{1}{\lambda + p_{i\beta}}. \quad (16)$$

The second disadvantage of gaming procedures when applying them in the process of controlling the IS parameters is the virtually absent reaction to the structural changes that occurred in the subsystem, which, of course, is unacceptable when applying the procedure in difficult operating conditions.

However, the structural changes in the IS are sufficiently efficiently processed by the previously discussed method of the DPC LAP. Therefore, it is natural to combine the stated game procedures with the DPC LAP method in a single integrated method for controlling the parameters of the IS of the ACS SPS, a distributed program control method with global and local adaptation procedures (DPC GLAP), in which, along with local adaptation elements, there are global adaptation elements inherent in game procedures.

The effectiveness of the application of the developed methods is confirmed by the results of simulation modeling (improvement of the quality of service indicator in comparison with the traditional methods of organizing the work of information subsystems based on rigidly fixed procedures for planning the work of the IS (Figure 4). This simulated flows of requirements that are a uniform mixture of primitive flow, Palma flow, second-order Erlang flow, and Erlang flow of the third order, as the most typical for IS of the ACS.

CONCLUSION

The complex organizational and technical systems for special purposes that are being created today are called upon to play an essential role in ensuring the defense capability, security of the Russian Federation and maintaining law and order in it. In order to ensure the guaranteed effective operation of the SPS in various operating conditions, it is required to organize continuous management of these systems by the creation of highly organized automated control systems for SPS. In order to ensure the required level of quality management processes, information subsystems are created in the ACS SPS to provide control organs and automation systems all required information service nomenclature.

The IS itself should be continuously controlled, especially in emergency operation conditions. For this purpose, the complexes of software and hardware are distinguished, which form an allocated distributed control system of the subsystem that

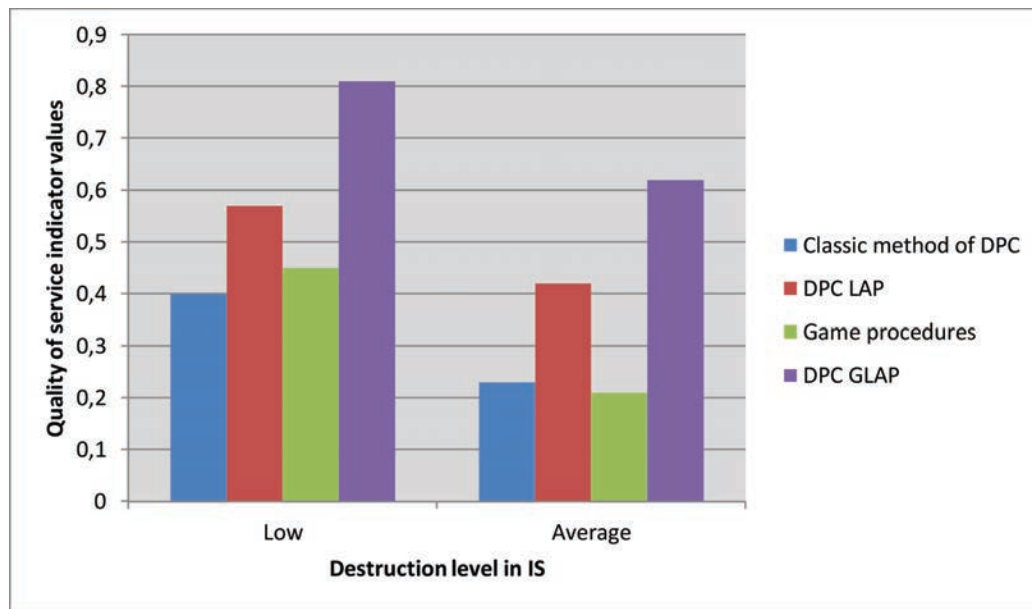


Fig. 4. Comparative evaluation of control methods for IS of the ACS SPS parameters

performs a number of control tasks, among which the most important is the task of functioning control. This task, with significant destructive changes in the IS, should include subtasks of managing the parameters characterizing its functioning.

Realization of effective control of the parameters of the IS of the ACS SPS is carried out on the basis of the proposed methods: DPC LAP and DPC GLAP.

References

1. Burenin A. N., Kurnosov V. I. *Teoreticheskie osnovy upravleniya sovremennymi telekommunikatsionnymi setyami* [Theoretical bases of management of modern telecommunication networks]. Moscow: Nauka, 2011. 464 p. (In Russian)
2. Burenin A. N., Legkov K. E. *Sovremennye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniya. Osnovy postroeniya i upravleniya: Monografiya.* [Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control]. Moscow: Media Publisher, 2015. 348 p. (In Russian)
3. Ventcel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 1974. 542 p. (In Russian)
4. Trener D. *Veroyatnost', statistika i issledovanie operatsiy* [Probability, statistics and research of operations]. Moscow: Statistika, 1976. 387 p. (In Russian)
5. Lanne A. A., Ulakhovich D. A. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya* [Multi-criteria optimization]. Leningrad: VAS, 1984. 87 p. (In Russian)
6. Ralfa G. *Analiz resheniy. Vvedenie v problemu vybora v usloviyah neopredelennosti* [Analysis of decisions. Introduction in a choice problem in the conditions of uncertainty]. Moscow: Nauka, 1977. 408 p. (in Russian)
7. Bower J. L. The role of conflict in economic decision-making groups, some empirical result. *The Quarterly Journal of Economics*. 1965. 79. No. 2. Pp. 424–444.
8. Zaharov G. P. The methods of observation of the data transmission networks. Moscow: Radio and communication, 1982. 208 p. (In Russian)
9. Satovsky B. L. Upravlenie kahestvom obsluzhivaniya v multiservisnykh setyakh obshchego pol'zovaniya [Quality of service management in multiservice networks of general use] *Vestnik svyazi* [Messenger of communication]. 1999. No. 4. (In Russian)
10. Novikov S. N. Classification of routing methods in multiservice communication networks. *Vestnik SibGUTI*. 2013. No. 1. Pp. 57–67. (In Russian)
11. Avanesov M. Y., Prisyazhnyuk S. P. *Operativnoe upravlenie potokami daniy v multiservisnykh setyakh svyazi* [Data flow operational control in multiservice communication networks]. Saint-Petersburg. Baltic State Tech. University., 2007. 81 p. (In Russian)
12. Lazarev V. G., Savvin N. G. *Seti svyazi, upravlenie, kommutatsiya* [Communication networks, control, switching]. Moscow: Svyaz'. 1973. 264 p. (In Russian)
13. Bellman I. R. E., Glicksberg I., Gross O. A. Some aspects of the mathematical theory of control processes. Santa Monika: Rand corporation, 1958. 310 p.

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОДСИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Буренин Андрей Николаевич,

д.т.н., доцент, главный специалист АО "Научно-исследовательский институт «Рубин»,
г. Санкт-Петербург, Россия, konferencia_asu_vka@mail.ru

Легков Константин Евгеньевич,

к.т.н., начальник кафедры автоматизированных систем управления
Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия, constl@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Разнообразные сложные организационно-технические системы, в том числе специального назначения играют существенную роль при обеспечении обороноспособности страны, ее безопасности и поддержании в ней правопорядка. С целью гарантированного обеспечения их эффективного функционирования в различных условиях эксплуатации, организуется постоянное управление ими, которое реализуется посредством развертывания автоматизированных систем управления, в составе которых для обеспечения требуемого качества процессов управления, создаются информационные подсистемы, обеспечивающие как должностным лицам органов управления, так и комплексам средств автоматизации автоматизированной системы управления, предоставление всей номенклатуры требуемых информационных услуг.

Как сложная система, функционирование которой осуществляется с требуемыми значениями показателей эффективности, информационная подсистема должна непрерывно управляться, особенно в чрезвычайных условиях. Для управления ею выделяются комплексы программно-технических средств, как из состава автоматизированной системы управления, так и специально организованные. В любом случае комплексы средств образуют выделенную распределенную систему управления, на которую возлагается решение ряда задач управления, среди которых наиболее важной является задача обеспечения эффективного функционирования, путем организации результативного управления, особенно в условиях деструктивных воздействий, когда важность этой задачи существенно возрастает.

В работе рассматриваются вопросы обеспечения эффективного функционирования информационных подсистем, входящих в состав автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами, эксплуатация которых протекает в чрезвычайных условиях, характеризующихся возможностью существенных деструктивных воздействий. Предложены методы управления, позволяющие повысить эффективность их функционирования.

Ключевые слова: информационная подсистема; автоматизированная система управления; эффективное функционирование; сложные организационно-технические объекты; деструктивные воздействия.

Для цитирования: Буренин А.Н., Легков К.Е. Основы обеспечения эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами в условиях воздействий // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 79-86.

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 научно-теоретический 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), приставный 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-IESResearch@yandex.ru.

1. Статья подготавливается в редакторе MS Word. Шаблон статьи можно скачать на сайте журнала 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 самоцитированных 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 разме-

щать 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.**

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.

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.

H&ES
RESEARCH

CALCULATION OF WAITING TIME DISTRIBUTION IN MULTI-CHANNEL NON-MARKOVIAN QUEUING SYSTEMS WITH "COOLING" AND "HEAT-UP"

Anatoliy D. Khomonenko,

PhD, professor, head of the Department of Information and computing systems of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, professor at the Department of mathematical and software of Military space academy of A.F. Mozhaysky, St-Petersburg, Russia, khomonenko@pgups.ru

Vladimir A. Lokhvitskiy,

PhD, doctoral candidate at the Department of mathematical and software of Military space academy of A.F. Mozhaysky, St-Petersburg, Russia, lokhv_va@mail.ru

Maad M. Khalil,

postgraduate student of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, St-Petersburg, Russia, maadalomar@gmail.com

ABSTRACT

The approach to calculation of distribution of waiting time of requests in the multi-channel non-Markov queuing systems with "cooling", "heat-up" and distributions of phase type is developed. The characteristic of methods of calculation of distribution of waiting time for non-Markov queuing systems is given. At the heart of calculation of probable characteristics of multi-channel non-Markov queuing systems with approximating distributions of phase type (the hyperexponential, the Erlang, Cox) the Takahashi-Takami's iterative method is lies. When calculating distribution of waiting time of multi-channel QS with "cooling" and "heat-up" transitions between microstates are considered. The main result is a method for calculating the waiting time distribution in a multichannel non-Markov queuing system. The method is based on the weighted convolution of the Laplace-Stieltjes transformations of the transit times of each of the components of the exponential phases of the microstates of the system. The knowledge of the Laplace-Stieltjes transformation of the waiting time distribution of the application in the queue makes it possible, by numerically differentiating this transformation at the point $s = 0$, to calculate the initial moments of the required distribution, from which to construct the approximation of the distribution function. The example of calculation of waiting time in queue for model of multi-channel QS M/M/E2/n with the Poisson input flow, exponentially distributed duration of service and with the "cooling" distributed under the generalized law of the Erlang of the 2nd order is considered. From the presented results it follows that with an increase in the average "cooling" duration, the average waiting time increases. In addition, the duration of "cooling" has a very significant effect on the average waiting time. The Kolmogorov distance for the distributions of the number of requests received by the numerical method and using the simulation model was {0.0014; 0.0013; 0.0038; 0.0024; 0.012} for a different intensity of "cooling", respectively, which indicates the correctness of the analytical model. Thus, a generalization of the classical Little's formula is achieved. The proposed approach can be useful in probabilistic modeling of nodes of distributed data processing centers, modeling and justification of the architecture of cloud computing systems with the Web interface, and evaluating the impact of costs on updating the context.

Keywords: multi-channel systems of service; "cooling"; "heat-up"; Laplace-Stieltjes conversion; distribution of waiting time; distribution of the Erlang; Little's formula.

For citation: Khomonenko A. D., Lokhvitskiy V. A., Khalil M. M. Calculation of waiting time distribution in multi-channel non-markovian queuing systems with "cooling" and "heat-up". *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 88-94.

INTRODUCTION

In the analysis of different types of QS the following types of wait time of the request in queue are used:

the *unconditional* waiting time in W queue determined by length of an interval between the moments of arrival of the request system and its arrivals on service;

the *conditional* waiting time in W_q queues, a determined is similar to W , but in case of the additional assumption that the request surely waits ($W_q \neq 0$);

the *virtual* waiting time of W_v differing from W those that counting of length of an interval of waiting is carried not from the moment of arrival of the request in queue, but from some arbitrary time point.

From line items of applied researches searching of characteristics of time W waiting of the request in queue is of the greatest interest. Characteristics of the conditional and virtual wait time are often necessary as a monitoring aid of the results received by means of new approaches.

Among the approaches used for calculation of distribution of wait time of requests in queue to multi-channel not Markov QS it is possible to select the following three methods [1]: integral method; a method on the basis of a convolution of the Laplace-Stieltjes conversions (LSC) for QS with distributions of phase type; a count method (on the basis of invariants of the relations).

1. INTEGRAL METHOD

For $M/G/n/R \leq \infty$ QS the initial moments of distributions of duration of waiting of the request in queue (stay in system) can be calculated by means of Little [2] result and his generalizations [3]. The required moments express through stationary distributions of probabilities of states on the basis of the conservation law of queue here.

We will bring correlation between stationary distribution of number of requests into queues at the time of $t=0$ of arrival of the request and the initial moments of distribution of waiting time in queue to the $GI/G/n/R \leq \infty$ system. The generalized Little's formula and her analog for $GI_2/G/n/R \leq \infty$ QS follows from it.

We will designate: z — probability that the next request is not labeled; $a(s)$ — LSC of distribution of length of an interval between adjacent requests of a recurrent flow; $a_z(s)$ — the same for interval length from arbitrary event of the entering flow to the next labeled request; $L^{-1}(\bullet)$ — operator of inverse transformation of Laplace. It is obvious that

$$a_z(s) = \sum_{k=1}^{\infty} (1-z)z^{k-1} a^k(s) = (1-z) \frac{a(s)}{1-za(s)}.$$

Respectively, $A_z(t) = L^{-1}(a_z(s)/s)$ — an interval length distribution function to the next labeled request, a $1 - A_z(t)$ — probability that any labeled request in time t won't come.

Let for the request arriving to completely busy system:

$w_c(t)$ — the conditional frequency curve of waiting time of the beginning of service (frequency curve of the conditional waiting time);

$\prod_A^-(z) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i \pi_{A_i}^-$ — generating function of distribution of number of requests in queue at the time of $t=0$ of arrival of the

new request. This function defines probability that at the time of arrival of the new request all requests in system will be not labeled.

According to the conservation law of probabilities of statuses of queue, equality shall be observed:

$$\prod_A^-(z) = \int_0^{\infty} [1 - A_z(t)] w_c(t) dt. \quad (1)$$

In case of the system $M/G/n$ we have $a(s) = \lambda/(\lambda + s)$ where λ — intensity of the Poisson entering flow. At the same time

$$1 - A_z(t) = 1 - L^{-1}(\lambda(1-z) / ([s(\lambda(1-z) + s)])) = e^{-\lambda(1-z)t},$$

And, equality (1) takes a form

$$\prod_A^-(z) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda(1-z)t} w_c(t) dt = w_c(\lambda(1-z)). \quad (2)$$

Here in the right part — LSC of the conditional distribution of wait time of the request in queue with conversion parameter $\lambda(1-z)$. On the basis of conversions (2) come to the generalized Little's formula [3]:

$$q_{[k]} = \lambda^k w_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Here: w_k — k -y the initial moment of distribution of wait time of the request in queue; $q_{[k]} = \sum_{r=k}^{\infty} r(r-1)\dots(r-k+1)\pi_{Ar}^{-1}$ — k -y the factorial moment of distribution of number of requests in queue at the time of $t=0$ of arrival of the request. In case of $k=1$ the formula (3) is called Little's formula [2].

Yu. I. Ryzhikov in [4] offered approach to calculation of time response characteristics for QS of more general $E_2/G/n$ and $H_2/G/n$ type. The solution of the 1st kind Fredholm integral equation is its cornerstone:

$$\prod_A^-(z) = \int_0^{\infty} (F_1 e^{-f t} - F_2 e^{-g t}) w_c(t) dt.$$

Here F_1, F_2, f and g — the known functions z and distribution parameters of length of an interval between adjacent requests of the 2nd order of phase type.

2. METHOD OF A CONVOLUTION OF LSC OF COMPONENT PHASE DISTRIBUTIONS

In case of numerical calculation of systems of a general type $GI/G/n$ usually not Markov distributions replace with approximations in the form of a compound of exponentially distributed phases. A method of calculation of distribution of waiting time in system $GI_q/H_k/n/R \leq \infty$ offered in [5]. At the same time distribution of lengths of intervals between requests of an input flow is one of distributions of the phase type order of q : An Erlang, the hyperexponential, Cox or PH, and distribution of duration of service is the hyperexponential order of k .

An alternative to phase-type distributions is the Delta function. In particular, in the article Smagin V.A. [6] an example of applying the complex delta function for finding the stationary value of an alternating random accumulation process with the informational income and expenditure is presented.

We will explain an approach essence on the example of the $M/M/n$ system. We will call the j -request the request which after

arrival finds in queue exactly of j of requests. Waiting time in queue of the j -request represents the amount of j of independent random variables with LSC of components $b_n(s) = n\mu/(n\mu + s)$. Therefore LSC of the conditional distribution of wait time of the j -request is

$$w_j(s) = b_n^j(s) = \left(\frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^j, j = 1, 2, \dots$$

We will designate $\pi_{A,j}^+$ probability to find in system j of requests right after arrival of the request. As $w(s) = \sum_{j=1}^{\infty} \pi_{A,j+n}^+ w_j(s)$ LSC of distribution of waiting time of requests in queue is:

$$w(s) = \sum_{j=1}^{\infty} \pi_{A,j+n}^+ \left(\frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^j. \quad (4)$$

In article [5] the solution variant which generalizes a formula (4) for finding of LSC of distribution of waiting time of the request in queue in relation to QS $GI_q/H_k/n/R \leq \infty$ is offered. Such approach yields more general results in comparison with [4] regarding validity of $q \geq 2$ value of an order of distribution of phase type of duration of intervals between requests of an input flow.

3. COUNT METHOD

It is known that the conditional (in case of zero waiting) distribution of waiting time of the request in the $GI/M/n$ system is subordinate to the exponential law. This circumstance allows consider that the type of distribution of waiting time doesn't depend on distribution of intervals between adjacent requests and number of channels and is defined only by distribution of holding time. In [1] the method of the setting of a type of distribution and a method of its use is offered.

Difference of arbitrary distribution from the normal, having the general with it two initial moments, it is accepted to determine by two dimensionless coefficients, (asymmetry and an excess) which are equal to zero for normal distributions. As difference of distributions from demonstrative is of interest (Markov), in [1] it is offered to enter coefficients of not Markov behavior of distribution on a formula

$$\kappa_k = w_k / w_1^k - k!, \quad k = 2, 3, \dots,$$

where w_k — k -y the initial moment.

With the help w_1 and a set $\{\kappa_k\}$ it is possible to define the appropriate number of the higher moments [1]:

$$w_k = w_1^k (\kappa_k + k!).$$

Value w_1 can be set by means of Little's formula and probability π_0 of immediate reception of the request on service:

$$w_1 = f_1 a_1 / (1 - \pi_0),$$

where f_1 — average length of queue.

The marked dependence of distribution only on distribution of duration of service allows to take as a basis for determination $\{\kappa_k\}$ the $M/G/1$ queuing system [3]. Actually such approach represents rather evident form of use of invariants of the relations.

4. APPROACHES TO CALCULATION OF MULTI-CHANNEL QS WITH "COOLING"

Calculation of multi-channel non-Markov multi-channel QS with "cooling" and distributions of phase type based on the iterative method of Takakhasi-Takami [7]. This method successfully used when calculating non-Markov multi-channel QS of the most general classical $GI_q/G_k/n/R \leq \infty$ type. At the same time calculation of QS with "cooling" (as well as multi-channel QS with "heat-up") is a little more difficult in comparison with classical models in case of similar assumptions of other model parameters.

QS models with "heat-up" and "cooling" have been studied in a relatively small number of publications, we will mention some of them. For example, one of the early papers [8] explores a single-channel system with "heat-up". The paper [9] investigates a multichannel QS of the MAP/PH/n type with "heat-up" and broadband service discipline. In article [10], an QS is investigated with a fixed delay before the start of the service.

In [11] the model of multi-channel $M/M/H_2/n$ QS with hyperexponential distributed duration of "cooling" is considered. The papers [12–13] consider multichannel QS with "cooling" and Erlang distribution of the second order.

We will consider multi-channel $GI_q/G_k/n/R \leq \infty$ QS with arbitrary distributions of phase type (H_k or C_k). A state of this system it is representable a tuple $\{j; r; m_1, \dots, m_k\}$, where j — total number of requests in system ($j = 0, 1, \dots$), r — the current exponential branch (phase) of arrival of the request ($r = 1, q$), m_i — number of the requests undergoing service on i -y to an exponential branch (phase), $i = 1, k$. We will designate H_j a set of possible statuses of QS in the presence in it exactly j of requests, h_j — a number of elements of this set.

We will designate $\gamma_j = [\gamma_{j,1}, \gamma_{j,2}, \dots, \gamma_{j,h_j}]$ vectors lines of probabilities of finding of QS in tier j -go microstates. We will write the vector-matrix equations of balance of transitions between the states specified on the chart.

$$\begin{aligned} \gamma_0 D_0 &= \gamma_1 B_1 + \gamma_0!_0, \\ \gamma_j D_j &= \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_j C_j + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = \overline{1, R}, \end{aligned}$$

where R — number of the shorthanded chart tiers.

Here A_p, B_p, C_j and D_j an essence of a matrix of the size $h_j \times h_{j+1}, h_j \times h_{j-1}, h_j \times h_p, h_j \times h_j$ of the conditional intensity of transitions down arrival of requests, transitions up completion of service of requests, transitions within j -go of a tier and goings from tier j -go states, respectively. For $GI_q/G_k/n/R \leq \infty$ QS elements of the listed matrixes can be created only algorithmically according to the principles [11].

For the solution of this system of equations, we will use an iterative method [4]. As result of calculation, we will receive the relations of adjacent probabilities numbers of applications in system $x_j = p_{j+1}/p_j, j = \overline{1, R}$.

After the end of iterations, using x_j values, we will realize transition to probabilities of states of system on the following algorithm: Probability of the free state (p_0) to suppose equal 1.

To calculate $p_{j+1} = p_j x_j, j = \overline{1, R}$.

To calculate the amount $S = \sum_{j=0}^R p_j$.

To normalize the received values: $p_j = p_j/S$, $j = \overline{0, R}$.

Calculation is possible also for systems without restriction of the buffer. In this case, supposed that "tail" of distribution of number of requests represents infinitely decreasing geometrical progression which denominator is equal to the relation of two last calculated probabilities.

5. FEATURES OF CALCULATION OF WAITING TIME IN QS WITH "COOLING" AND "HEAT-UP"

Calculation of time response characteristics is based on the way, the offered A. D. Khomonenko in article [5]. Unlike the multi-channel non-Markov QS considered in article [4] in systems with "cooling" (and "heat-up") it is necessary to consider expenses of time for transitions between microstates of one tier (with fixed j). We will consider technology of the accounting of these expenses when calculating distribution of waiting time of the request in QS queue with "cooling".

Waiting time of again arrived request is defined by a system microstates right after its arrival. We will enter for each tier of the chart a row vector $\pi_j = [\pi_{j,1}, \pi_{j,2}, \dots, \pi_{j,h_j}]$, $j = \overline{1, R}$, final distribution of probabilities of microstates of system right after arrival of the next request. As the input flow not Poisson, conditions of the theorem of PASTA (Poisson Arrival See Time Average) [4] aren't satisfied, and final distribution π_j doesn't match stationary distribution γ_j .

Vector components π_j represent the relative numbers of arrivals of requests with which arrival the system passed into the appropriate microstates:

$$\pi_j = \gamma_{j-1} A_{j-1} / \sum_{i=0}^R \gamma_i A_i \mathbf{1}_{i+1},$$

where $\mathbf{1}_i$ — the single column vector the $h_i \times 1$ size.

We will define $B_{n+1}(s)$ as a matrix of the conditional LSC of exponential distributions of lengths of intervals before transition of QS from the microstates $(j+n, i)$, $i = \overline{1, h_{n+1}}$ on completion of service increased by system transition probability in one of $(j+n-1, l)$, $l = \overline{1, h_{n+1}}$ microstates. The matrix has the dimension $h_{n+1} \times h_{n+1}$, its elements are calculated according to

$$b_{n+1,i,l}(s) = \frac{b_{n+1,i,l}}{\sum_{r=1}^{h_{n+1}} b_{n+1,i,r} + s}, \quad i, l = \overline{1, h_{n+1}}. \quad (5)$$

We will similarly define a matrix of $C_{n+1}(s)$ LSC of distributions of duration of transitions between QS microstates on one tier (in case of the fixed number of requests in system), caused by the phases "cooling" ("heat-up"). The matrix of $C(s)$ has dimensionality $h_{n+1} \times h_{n+1}$, its elements are calculated according to:

$$A_{n+1,i,l}(s) = \frac{A_{n+1,i,l}}{\sum_{r=1}^{h_{n+1}} A_{n+1,i,r} + s}, \quad i, l = \overline{1, h_{n+1}}. \quad (6)$$

We will call the k -request the request right after which arrival the system appears in a microstate $(k+n, i)$, $j = 1, 2, \dots, i = \overline{1, h_{n+1}}$ (in queue there is exactly k of requests). Waiting time in queue of the k -request represents the amount of durations of k of ad-

vances of queue on completion of service plus "cooling" time if the system is in the appropriate mode.

Based on the accepted designations, LSC of waiting time of the k -request:

$$W_k(s) = \pi_{k+n} B_n^k(s) \sum_{i=0}^r C_{n+1}^i(s), \quad (7)$$

where r — number of sequential phases of "cooling". We will explain a physical sense of a formula (7). Depending on in what microstate there was a system with arrival of the k -request, time of its waiting will make $i = 1, r$ of the stages "cooling" plus k of completions of service. As distribution of the amounts of random variables represents the multiplication of their LSC, the formula takes a form (7).

Then expression for LSC of distribution of waiting time of the request in queue taking into account "cooling" is:

$$W(s) = \sum_{k=1}^R \pi_{k+n} B_n^k(s) \sum_{i=0}^r C_{n+1}^i(s) = \sum_{k=1}^R \pi_{k+n} W_k(s). \quad (8)$$

Notes.

1. It is possible to show that the formula (8) is fair also for multi-channel non-Markov QS with "heat-up", with "heat-up" and "cooling".

2. The knowledge of the Laplace-Stieltjes transformation of the waiting time distribution of the application in the queue makes it possible, by numerically differentiating this transformation at the point $s = 0$, to calculate the initial moments of the required distribution, from which to construct the approximation of the distribution function.

6. AN EXAMPLE OF THE CALCULATION OF A QS M/M/E₂/n WITH "COOLING"

We will consider model of multi-channel QS M/M/E₂/n with the Poisson input flow, exponentially distributed duration of service and with the "cooling" distributed under the generalized law of the Erlang of the 2nd order. The diagram of transitions between states of this system is shown in fig. 1.

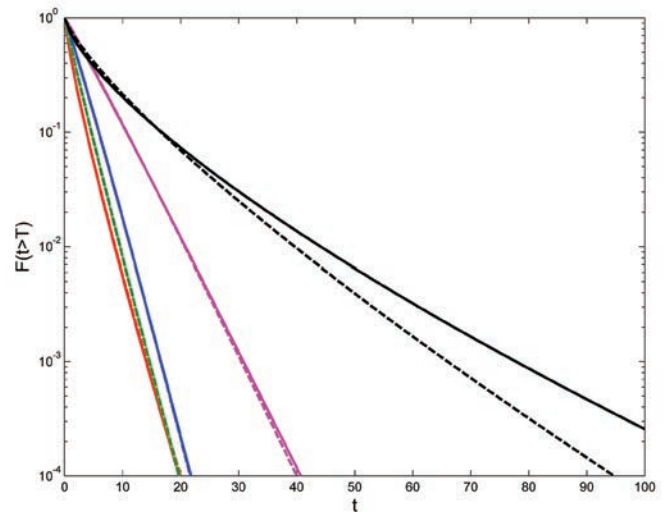


Fig. 1. Diagram for M/M/E₂/n QS with "cooling"

For M/M/E₂/n QS the matrixes of the intensity of transitions has following view:

$$A_j = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, j = \overline{0, N-1};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_j = \begin{bmatrix} \min(n, j)\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, j = \overline{2, N};$$

$$C_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_c \\ \mu_c & 0 & 0 \end{bmatrix}, j = \overline{0, N};$$

$$D_j = \begin{bmatrix} \lambda + \min(j, n)\mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + \mu_c & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + \mu_c \end{bmatrix}, j = \overline{0, N}.$$

We will calculate the waiting time for the following initial data: $\lambda = 2.5, \mu = 1, \mu_c = \{1.0; 0.5; 0.3; 0.1; 0.05\}$. Waiting time calculating results are presented in the table.

The Kolmogorov distance for the distributions of the number of applications received by the numerical method and using the simulation model was $\{0.0014; 0.0013; 0.0038; 0.0024; 0.012\}$ for a different intensity of “cooling”, respectively, which indicates the correctness of the analytical model.

We calculate the additional distribution function (ADF) of the waiting time for applications in the system. To do this, we represent it in the form of a Weibull ADF with a correction polynomial [4] and construct a plot of the approximation obtained (Fig. 2).

From the presented results it follows that with an increase in the average “cooling” duration, the average waiting time increases. In addition, the duration of “cooling” has a very significant effect on the average waiting time.

CONCLUSION

The proposed approach to calculating the LSC of the waiting time distribution of the request in the queue to the QS with

approximating distributions of the phase type generalizes the results of [1–4] to the case of multichannel non-Markov systems “cooling” and “warming up”. The proposed approach can be useful in probabilistic modeling of nodes of distributed data processing centers, modeling and justification of the architecture of cloud computing systems with the Web interface, and evaluating the impact of costs on updating the context. Examples of this application of models of multichannel non-Markov QS with «cooling» and «heating» are given in [14–17]. Further research is advisable to continue in the directions of research systems with prioritized services [18], optimal deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficiency [19].

References

1. Ryzhikov Y.I. Three methods for calculating the time characteristics of open queuing systems. *Automation and Remote Control*. 1993. 54:2. Pp. 127–133. (In Russian)
2. John D.C. Little. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operation Research*. No. 9 (3): Pp. 383–387.
3. Brumelle S. L. A generalization of $L = \lambda W$ to moments of queue length and waiting times. *Oper. Res.* 1972. Vol. 20. No. 6. Pp. 1127–1136.
4. Ryzhikov Y.I. *Teoriya ocheredej i upravlenie zapasami* [Queuing theory and inventory management]. St.-Petersburg: Piter. 2001. 384 p. (In Russian)
5. Khomonenko A. D. The distribution of the waiting time in queuing systems of the type GIq/Hk/n/R $\leq \infty$. *Automation and Remote Control*. 1990. No. 51:8. Pp. 91–98. (In Russian).
6. Smagin V.A. Complex Delta Function and its Information Application. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2014. Vol. 48. No. 1. Pp. 10–16.
7. Takahashi Y., Takami Y. A numerical method for the steady-state probabilities of a GI/G/c queueing system in a general class. *J. of the Operat. Res. Soc. of Japan*. 1976. Vol. 19. No. 2. Pp. 147–157.
8. Kreinin Ya. Single-channel queueing system with warm up. *Automation and Remote Control*. 1980. No. 41:6. Pp. 771–776.
9. Bin Sun, Dudin A.N. The MAP/PH/N multi-server queueing system with broadcasting service discipline and server heating. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013. Vol. 47. Issue 4. Pp. 173–182.

Table

Initial moments of the distribution of the waiting time for requests

μ_c	w_1		w_2		w_3	
	Numerical	Simulation	Numerical	Simulation	Numerical	Simulation
1,00	1.534E+00	1,542E+00	5,747E+00	5,824E+00	2,987E+01	3,057E+01
0,50	1.968E+00	1,974E+00	8,143E+00	8,169E+00	4,482E+01	4,489E+01
0,30	2.624E+00	2,646E+00	1,302E+01	1,314E+01	8,329E+01	8,403E+01
0,10	4.696E+00	4,758E+00	4,268E+01	4,311E+01	6,127E+02	6,169E+02
0,05	6.473E+00	6,625E+00	1,272E+02	1,144E+02	4,133E+03	3,766E+03

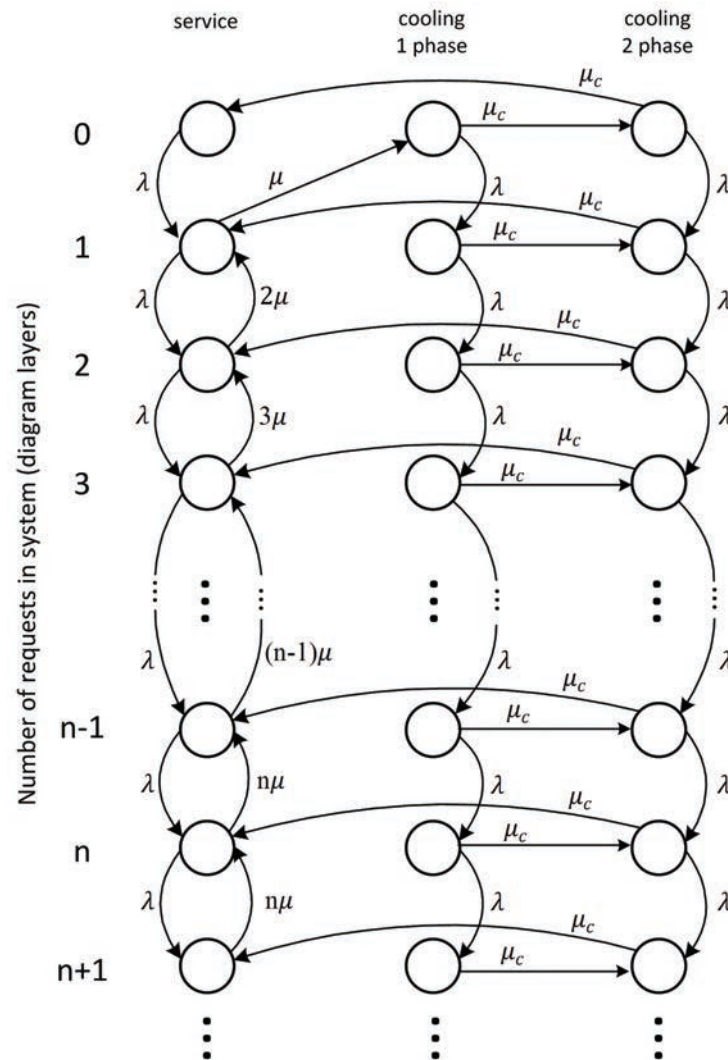


Fig. 2. ADF of the waiting time in a QS $M/M/E_2/n$ with "cooling"

10. Eremin A. S. A Queueing System with Determined Delay in Starting the Service. *Intellectual Technologies on Transport*. 2015. No. 4. Pp. 23–26.

11. Lokhvitskii V. A., Ulanov A. V. Numerical analysis of queueing systems with Hyper exponential "cooling". *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2016. No. 4(37). Pp. 36–43. (In Russian)

12. Khomonenko A. D., Gindin S. I., Khalil M. M. A cloud computing model using multi-channel queueing system with cooling. 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2016. Pp. 103–106.

13. Khalil M. M., Andruk A. A. Testing of Software for Calculating a Multichannel Queueing System with "Cooling" and E2-approximation. *Intellectual Technologies on Transport*. 2016. No. 4 (8). Pp. 22–28.

14. Khomonenko A. D., Khalil M. M., Kassymova D. T. Probabilistic Models for Evaluating the Performance of Cloud Computing Systems with Web Interface. *SPIIRAS Proceedings*. 2016. No. 6 (49). Pp. 49–65.

15. Murugesan R, Elango C., Kannan S. Resource Allocation in Cloud Computing with M/G/s Queueing System. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2014. Vol. 4. Issue 9. Pp. 443–447.

16. Kaczynski W. H. Transient Queueing Analysis. *INFORMS Journal on Computing*. 2012. Vol. 24. No. 1. Pp. 10–28.

17. Vilaplana J., Solsona F., Teixid' o I. A performance model for scalable cloud computing. Proceedings of the 13th Australasian Symposium on Parallel and Distributed Computing (AusPDC2015), Sydney, Australia, 27–30 January 2015. Pp. 51–60.

18. Muliukha V., Ilyashenko A., Zayats O., Zaborovsky V. Preemptive Queueing System with Randomized Push-Out Mechanism. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2015. Vol. 21. No. 1–3. Pp. 147–158.

19. Beloglazov A., Buyya R. Optimal Online Deterministic Algorithms and Adaptive Heuristics for Energy and Performance Efficient Dynamic Consolidation of Virtual Machines in Cloud Data Centers. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2012. Vol. 24. Pp. 1397–1420.

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ В ОЧЕРЕДИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ НЕМАРКОВСКИХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С «ОХЛАЖДЕНИЕМ» И «РАЗОГРЕВОМ»

Хомоненко Анатолий Дмитриевич,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
информационных и вычислительных систем
Петербургского государственного университета
путей сообщения Императора Александра I
профессор кафедры математического
и программного обеспечения Военно-
космической академии имени А.Ф.Можайского
г. Санкт-Петербург, Россия, khomonenko@pgups.ru

Лохвицкий Владимир Александрович,
к.т.н., докторант кафедры математического
и программного обеспечения Военно-
космической академии имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия, lokhv_va@mail.ru

Халил Маад Модер,
аспирант кафедры информационных
и вычислительных систем Петербургского
государственного университета путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург,
Россия, maadalomar@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Предлагается подход к вычислению распределения времени ожидания запросов в многоканальных немарковских системах массового обслуживания с «охлаждением», «разогревом» и распределениями фазового типа. Дана характеристика методов расчета распределения времени ожидания для немарковских систем массового обслуживания. В основе расчета вероятностных характеристик многоканальных немарковских систем массового обслуживания с аппроксимирующими распределениями фазового типа (гиперэкспоненциальное, Эрланга, Кокса) лежит итерационный метод Такахаши-Таками. При расчете распределения времени ожидания в многоканальной системе массового обслуживания с «охлаждением» и «разогревом» учитываются переходы между микросостояниями одного уровня. Основным результатом – метод расчета распределения времени ожидания в многоканальной немарковской системе массового обслуживания с «охлаждением» и/или «разогревом». Метод основан на взвешенной свертке преобразований Лапласа-Стилтьеса времен прохождения каждой из составляющих экспоненциальных фаз микросостояний системы. Знание преобразования Лапласа-Стилтьеса распределения времени ожидания заявки в очереди позволяет путем численного дифференцирования этого преобразования в точке $s=0$ рассчитать начальные моменты искомого распределения, по ним построить аппроксимацию функции распределения. Рассмотрен пример численного расчета распределения времени ожидания заявки в очереди модели многоканальной системы массового обслуживания типа $M/M/E_2/n$ – с пуассоновским входным потоком, экспоненциально распределенной продолжительностью обслуживания и с «охлаждением», распределенной по обобщенному закону Эрланга 2-го порядка. Из представленных результатов следует, что с увеличением средней продолжительности «охлаждения» среднее время ожидания увеличивается. Кроме того, длительность «охлаждения» оказывает значительное влияние на среднее время ожидания. Расстояние Колмогорова для распределений числа заявок, полученных численным методом и с помощью имитационной модели, составило {0.0014; 0.0013; 0.0038; 0.0024; 0.012} при различной интенсивности «охлаждения» соответственно, что свидетельствует о корректности аналитической модели. Таким образом, достигнуто обобщение классической формулы Литтла. Предложенный подход может быть полезен при вероятностном моделировании узлов центров распределенной обработки данных, моделировании и обосновании построения архитектуры систем облачных вычислений с Web-интерфейсом, оценке влияния затрат на актуализацию контекста.

Ключевые слова: многоканальные системы обслуживания; «охлаждение»; «разогрев»; преобразование Лапласа-Стилтьеса; распределение времени ожидания; распределение Эрланга; формула Литтла.

Для цитирования: Хомоненко А.Д., Лохвицкий В.А., Халил М.М. Расчет распределения времени ожидания в очереди многоканальных немарковских систем массового обслуживания с «охлаждением» и «разогревом» // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 88–94.

ПОЖАРЫ В ПРИБАЙКАЛЬЕ: «ПРЯМАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ» ИЗ КОСМОСА

Сибирская тайга снова горит. Как сообщает Interfax.ru, в Иркутской области по состоянию на 14 июня зафиксировано 15 пожаров на общей площади 5,792 тыс. га. По данным Regnum на 14 июня в Бурятии в активной фазе находятся 13 пожаров на общей площади 580 га.

Распространение лесных пожаров сегодня можно проследить ежедневно благодаря космической съемке. Многим специалистам в области чрезвычайных ситуаций, охраны природы, муниципального управления хорошо знаком оперативный сервис мониторинга пожаров FIRMS. Оперативная информация о пожарах на нем обновляется ежедневно, а источниками информации служат спутниковые системы, оснащенные тепловизионными сенсорами. Данные сенсоры способны фиксировать тепловые аномалии (термоточки), возникающие на поверхности нашей Земли.

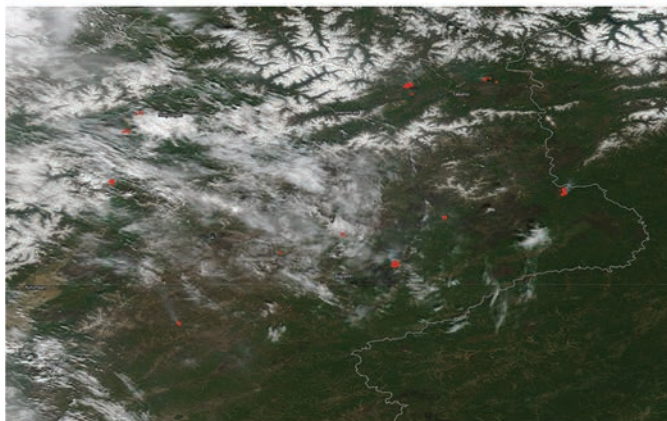
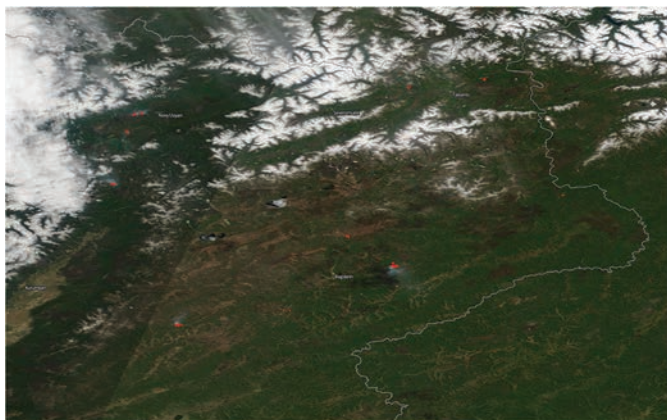
У этих систем есть один недостаток. В качестве источников информации используются снимки низкого пространственного разрешения, полученные со съемочных систем MODIS (1000 м) и VIIRS (375 м). Информация о пожарах предоставляется в виде так называемых термоточек в местах обнаружения тепловых аномалий. Однако термоточки по факту не всегда соответствуют пожарам ввиду грубого пространственного разрешения исходных снимков, некорректности результатов автоматизированного детектирования пожаров на снимках, либо ввиду того, что тепловая аномалия не является пожаром, а вызвана другими причинами.

Проверить достоверность детектирования пожаров до 2017 года было затруднительно - требовалась наземная верификация, проще говоря, подтверждение факта пожара на месте. Это сопряжено со значительными организационными и финансовыми издержками: требуется организованный выезд бригад МЧС, Авиалесоохраны и других структур на местность, чтобы подтвердить или опровергнуть факт тревоги. В этом году компания Planet представила на рынке оперативный сервис космического мониторинга, основанный на использовании снимков высокого разрешения - 3 м. При этом сохраняется высокая частота обновления информации: более 150 спутников, входящих в группировку Planet, ведут «прямую трансляцию» из космоса и обеспечивают ежедневное обновление снимков в любой точке мира.

У этих систем есть один недостаток. В качестве источников информации используются снимки низкого пространственного разрешения, полученные со съемочных систем MODIS (1000 м) и VIIRS (375 м). Информация о пожарах предоставляется в виде так называемых термоточек в местах обнаружения тепловых аномалий. Однако термоточки по факту не всегда соответствуют пожарам ввиду грубого пространственного разрешения исходных снимков, некорректности результатов автоматизированного детектирования пожаров на снимках, либо ввиду того, что тепловая аномалия не является пожаром, а вызвана другими причинами.

Проверить достоверность детектирования пожаров до 2017 года было затруднительно - требовалась наземная верификация, проще говоря, подтверждение факта

пожара на месте. Это сопряжено со значительными организационными и финансовыми издержками: требуется организованный выезд бригад МЧС, Авиалесоохраны и других структур на местность, чтобы подтвердить или опровергнуть факт тревоги. В этом году компания Planet представила на рынке оперативный сервис космического



Развитие лесных пожаров в Республике Бурятия в с 9 по 14 июня 2017 года. Красным цветом обозначены термоточки пожаров. Отчетливо прослеживается дым. Выгоревшие участки леса - в темно-коричневых тонах (анимационный GIF-файл)

мониторинга, основанный на использовании снимков высокого разрешения – 3 м. При этом сохраняется высокая частота обновления информации: более 150 спутников, входящих в группировку Planet, ведут «прямую трансля-

цию» из космоса и обеспечивают ежедневное обновление снимков в любой точке мира.

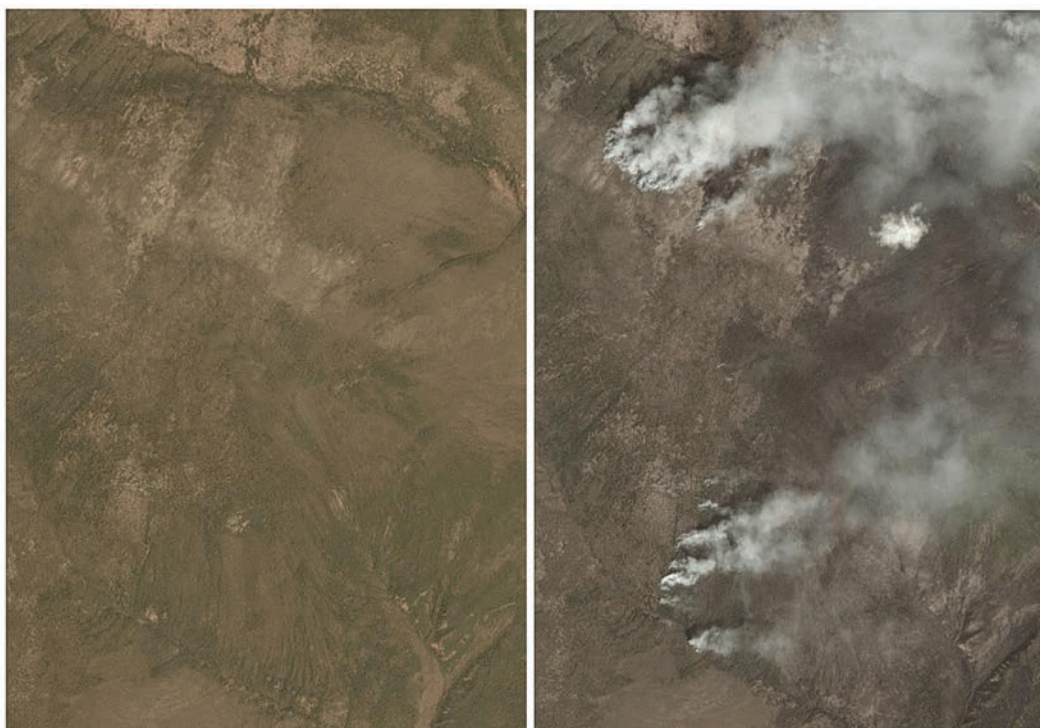
Ниже приводятся иллюстрации сохраняющейся пожароопасной ситуации в Прибайкалье по снимкам Planet.



Снимок Planet, 11 июня

Снимок Planet, 12 июня. Выгоревшая область отчетливо дешифрируется

Палы травы к северу от Ангарска на правом берегу Ангары



Снимок Planet, 12 июня. Ещё всё спокойно.

Снимок Planet, 14 июня. Тайга горит

Лесные пожары к северо-западу от с. Багдарин (Бурятия)