

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Научно-технический журнал

Журнал **H&ES Research** издаётся с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированные системы 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 Паблишер». **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 Паблишер». 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 Паблишер» 2017

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; KIRPANEV 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

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Scientific and Technical Journal

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Косяк А. И., Донцов Д. В.

Математическая модель сбора информации по служебным каналам спутниковой системы связи 4

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Белов Д. А., Гертель С. Н., Кочемасов В. Н., Строганова Е. П.

Мультипактор в радиоэлектронной аппаратуре спутниковых сегментов систем связи 10

Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И.

Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга 18

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Семенец В. О., Трухин М. П.

Программные методы коррекции ошибок в процессе определения координат расположения абонента 42

Колотов Ю. О.

Инфокоммуникации как системный фактор развития финансов 48

Легков К. Е., Нестеренко О. Е.

Алгоритм формирования информационной структуры параллельных программ иерархической вычислительной системы 52

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Шарма В.

Анализ эффектов повышения контрастности гистограммы 60

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

• Вопросы развития автоматизированных систем управления • Физико-математическое обеспечение разработки новых технологий • Развитие автоматизированных систем управления технологическим процессом • Вопросы исследования космоса • Телекоммуникационные технологии и технические новинки систем подвижной связи • Перспективы развития единого инфокоммуникационного пространства • Использование радиочастотного спектра в системах подвижной связи • Антенно-фидерное оборудование • Спутниковое телевидение, системы спутниковой навигации, GLONASS, построение навигационных систем GPS • Вопросы развития геодезии и картографии • Информационная и кибербезопасность • Вопросы исследования Арктики • Волоконно-оптическое оборудование и технологии • Метрологическое обеспечение • Программное обеспечение и элементная база для сетей связи • Производители, поставщики и дистрибьюторы телекоммуникационного оборудования • Работа отечественных ассоциаций, региональных и координирующих операторов • Правовое регулирование инфокоммуникаций, законодательство в области связи • Экономика связи, конвергенция сетей, универсальные коммуникации • Выставки, форумы, конференции, семинары, интервью (оригинальные и новые проекты, итоги деятельности, проблемы отрасли и пути их решения и т.д.)

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

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

CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Kosyak A. I., Doncov D. V.

Mathematical model of the collection of information on official channels of satellite communication system 4

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Belov D. A., Gertel S. N., Kochemasov V. N., Stroganova E. P.

Multipactor in radio electronic equipment of space telecommunication systems sputnik parts 10

Budko P. A., Zhukov G. A., Vinogradenko A. M., Litvinov A. I.

Complex use of diverse communication channels for management of robotic complexes on the basis of uniform system of radio monitoring 18

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Semenets V. O., Truhin M. P.

Software error error correction methods 42

Kolotov Y. O.

Infocommunications as a system factor for finance development 48

Legkov K. E., Nesterenko O. E.

The algorithm of forming the information structure of parallel programs for hierarchical computing system 52

PUBLICATIONS IN ENGLISH

Sharma V.

Analysis of contrast enhancement effects on histogram 60

TOPICAL COLUMNS

• Automated control systems • Physical and mathematical software development of new technologies • Development of automated process control systems • Questions of space exploration • Telecommunication technology and technical innovations of mobile systems • Prospects for unified info communication space • Use of a radio-frequency range in systems of mobile communication • Antenna-feeder equipment • Satellite TV, satellite navigation system, GLONASS, GPS navigation systems construction • Issues of Geodesy and Cartography • Information and cyber security • Questions Arctic research • Fiber-optic equipment and technology • Metrological maintenance • Software and electronic components for communication networks • Manufacturers, suppliers and distributors of telecommunications equipment • National associations, regional and coordinating operators • Legal regulation of Infocomm, legislation in the communication field • Economy of communications, networks convergence, universal communication • Exhibitions, forums, conferences, seminars, interview (original and new projects, results of activity, a problem of branch and a way of their decision, etc.)

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ПО СЛУЖЕБНЫМ КАНАЛАМ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Косяк Александр Иванович,

к.т.н., старший научный сотрудник управления
автоматизированных систем управления и связи
Межрегионального общественного учреждения
«Институт инженерной физики»,
г. Серпухов, Россия, alex_kos_82@mail.ru

Донцов Дмитрий Вячеславович,

младший научный сотрудник управления
автоматизированных систем управления и связи
Межрегионального общественного учреждения
«Институт инженерной физики»,
г. Серпухов, Россия, dontsov_81@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Показано, что спутниковые системы связи относятся к системам связи с централизованным управлением, в которых управление самой системой связи и каналным ресурсом осуществляется центром управления спутниковой системой связи. Показано, что в системе связи с данной архитектурой весь каналный ресурс делится на рабочий, по которому осуществляется информационный обмен между абонентами, и служебный, предназначенный для передачи служебных пакетов (запросов на установление связи) от абонентов (земных станций) в адрес центра управления спутниковой системой связи. Показано, что информационный обмен по служебным каналам связи является непрерывным, и проводится в режиме случайного множественного доступа типа слотированная ALOHA (S-ALOHA). Рассмотрен вариант дополнительного использования данного служебного канала в целях сбора некоторой целевой (телеметрической) информации от станций спутниковой связи на фоне выполнения служебным каналом своих целевых задач - передачи служебных пакетов от земных станций на установление связи между абонентами. Описана математическая модель процесса сбора такой целевой телеметрической информации в режиме случайного множественного доступа на фоне передачи служебных пакетов от остальных земных станций. Показано, что построенная модель позволит получить вероятностно-временные характеристики исследуемого процесса. Показано, что показателем своевременности, полученным на основе построенной модели, является среднее время и дисперсия времени сбора целевой телеметрической информации от совокупности опрашиваемых земных станций. Показано, что ввиду особенностей характера протекания процесса построение математической модели проводится на основе аппарата поглощающих конечных марковских цепей. Представлен граф переходов процесса сбора информации для частного случая значения целевой нагрузки на канал служебный канал и числа опрашиваемых объектов. Приведены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать число состояний графа. Описаны типы возможных переходов между состояниями процесса сбора информации и вероятности этих переходов. Показано, что вероятностные и временные характеристики на основе построенной модели находятся посредством построения фундаментальной и дисперсионной матриц. Приводятся правила синтеза матрицы переходных вероятностей, инвариантные к системным параметрам данной системы спутниковой связи.

Ключевые слова: спутниковая система связи; случайный множественный доступ; сбор телеметрической информации; вероятностно – временные характеристики; поглощающие конечные марковские цепи.

Для цитирования: Косяк А. И., Донцов Д. В. Математическая модель сбора информации по служебным каналам спутниковой системы связи // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 4-9.

Основным назначением систем спутниковой связи (ССС) является обеспечение связью зон вне покрытия наземными сетями GSM, предоставление связной среды для системы координатно-временного обеспечения и связь со стационарными и мобильными абонентами, находящимися в труднодоступных регионах. Спутниковые системы связи относятся к системам связи с централизованным управлением [1, 5], в которых управление самой системой связи и каналным ресурсом осуществляется центром управления спутниковой системой связи (ЦУСС). Работа ССС осуществляется в режиме предоставления каналов по требованию (ПКТ). Режим ПКТ характеризуется тем, что закрепление спутниковых каналов за абонентами осуществляется только на время сеанса связи. По окончании сеанса спутниковый канал освобождается и используется для связи между другими абонентами сети, что обеспечивает существенную экономию каналного ресурса по сравнению с закрепленными каналами (обычно в 2–4 раза).

Структура ССС, работающей в режиме ПКТ представлена на рис. 1.

Как видно из рисунка, ССС с ПКТ предполагает наличие в своей структуре следующих элементов:

- центра управления спутниковой системой (ЦУСС), располагаемого на центральной земной станции (ЦЗС);
- абонентской аппаратуры управления спутниковыми каналами связи (АУСКС), располагаемой на периферийных земных станциях (ПЗС);
- бортовой ретрансляционный комплекс (БРТК), установленный на искусственном спутнике земли (ИСЗ).

Весь каналный ресурс ССС работающей в режиме ПКТ представляет собой определенное число симплексных каналов связи и делится на две части:

- служебные каналы связи, по которым осуществляется взаимодействие между ЦУСС и ПЗС;

- рабочие каналы связи — по которым осуществляется информационный обмен между ПЗС (абонентами ССС). Служебный каналный ресурс, в свою очередь, делится на две части:

- каналы управления,
- запросно-вызывные каналы связи (ЗВК).

По каналам управления осуществляется передача команд от ЦУСС в адрес всех остальных элементов ССС.

По ЗВК осуществляется отправка запросов от ПЗС (абонента) в адрес ЦУСС на установление соединения с другими ПЗС (абонентами). Работа ЗВК осуществляется в режиме случайного множественного доступа (СМД) типа S-ALOHA [2]. Отличие режима работы ЗВК от стандартных режимов СМД состоит в наличии эффекта захвата, состоящего в выделении одного из пакетов в случае столкновения передаваемых пакетов [4].

Порядок работы ССС в режиме установления соединения по инициативе абонентов (ПЗС) следующий:

- ПЗС-1 по ЗВК в режиме СМД отправляет запросы на установление соединения с требуемым абонентом ПЗС-2;
- ЦУСС по каналам управления отсылает запрос и получает ответ о состоянии ПЗС-2;
- в случае свободного статуса ПЗС-2 ЦУСС выделяет требуемый каналный ресурс для непрерывной связи между абонентами и уведомляет об этом ПЗС по каналам управления.

Одним из пунктов перечня предоставляемых услуг ССС является передача телеметрической информации контролируемых объектов в центры мониторинга. Особенно эта услуга актуальна, когда необходимо собирать информацию с объектов, располагающихся в труднодоступных районах, не входящих в зону покрытия наземных GSM-сетей. В качестве центра мониторинга может выступать ЦУСС, а может и произвольный абонент ССС.

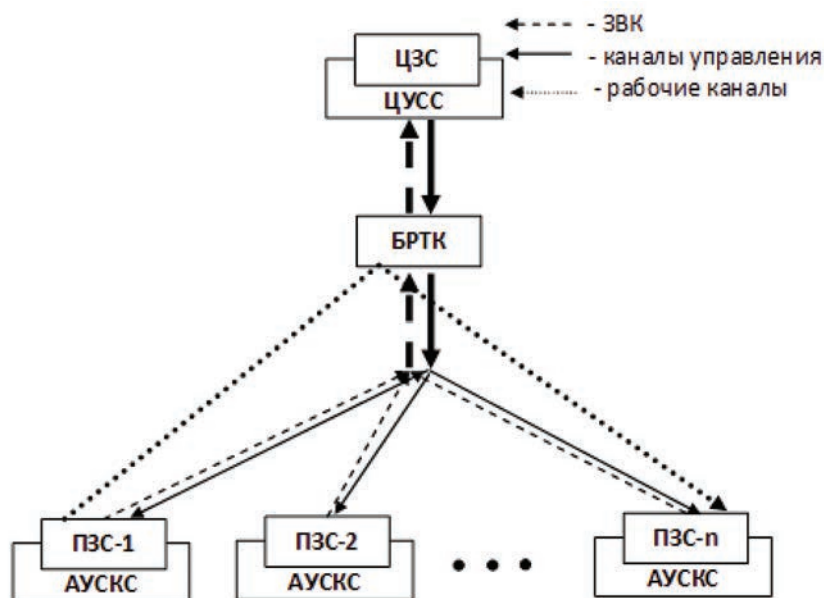


Рис. 1. Структура спутниковой системы связи

Стандартным подходом передачи телеметрической информации является организация передачи по рабочим каналам связи, подразумевающая под собой либо проведение всех необходимых приведенных выше процедур на установление соединения между абонентами для передачи пакета информации, что влечет за собой дополнительную нагрузку как на служебные так и рабочие каналы связи, либо выделение и закрепление за данной услугой некоторого набора рабочих каналов связи.

Организация сбора информации по рабочим каналам связи влечет за собой снижение коэффициента готовности ССС на предоставление рабочего канального ресурса для связи между абонентами.

В целях уменьшения нагрузки на рабочие каналы связи предлагается организовать сбор информации по служебным каналам связи, а конкретно по запросно-вызывному каналу связи. Ввиду режима работы ЗВК сбор необходимо организовать так же в режиме СМД. В качестве центра сбора информации примем ЦУСС.

При организации сбора информации по служебному каналу связи возникают следующие противоречия: с одной стороны большое значение периода опроса ведет к «устареванию» информации о состоянии контролируемых объектов, а при решении некоторых задач наличие оперативной телеметрической информации является критическим, с другой стороны уменьшение периода опроса увеличивает нагрузку на служебные каналы, что влечет к увеличению длительности опроса и увеличению задержки в передаче служебных пакетов от ПЗС, что в свою очередь ведет к снижению коэффициента готовности ЗВК на выполнение своих целевых задач (передачи запросных сообщений на установление связи).

В целях разрешения данного противоречия необходимо решить следующие подзадачи:

- установить требуемый период опроса контролируемых объектов;
- установить максимально допустимую нагрузку контролируемых объектов на один канал ЗВК.

Решение данных подзадач возможно только посредством построения математической модели сбора информации.

Для описания процесса сбора информации введем следующие определения:

пакет состояния — пакет телеметрической информации, передаваемый от объектов контроля;

пакет ЗВК — служебный пакет от ПЗС, передаваемый по запросно-вызывному каналу на организацию канала связи с запрашиваемым абонентом;

первичная передача — первичная передача пакета (состояния или ЗВК) в канале ЗВК (данная ситуация возникает когда пакет (сообщение) был сгенерирован и впервые был передан в канал ЗВК);

повторная передача — вторая и последующая передача пакета (состояния или ЗВК) в канале ЗВК (данная ситуация возникает в случае если пакет был сгенерирован и при первой передаче в канале ЗВК не был передан (до ЦУСС));

Сам процесс сбора будет обладать следующими особенностями:

- в процессе сбора телеметрической информации будут участвовать объекты двух типов — объекты, передающие пакеты ЗВК и объекты, передающие пакеты состояний;
- за один шаг процесса доведен может быть только один пакет — либо пакет ЗВК, либо пакет состояния.

Процесс сбора телеметрической информации в режиме СМД на фоне нагрузки ЗВК пакетов является конечной Марковской цепью (КМЦ) [3] ввиду следующих обстоятельств:

- смена состояний процесса происходит через равные промежутки времени, в силу временного разделения каналов;
- вероятность нахождения случайного процесса в заданном состоянии в момент времени t зависит только от его нахождения в состоянии в момент времени $(t - 1)$;
- матрица переходных вероятностей со временем не меняется.

В связи с этим для полного определения данного случайного процесса необходимы:

- вектор начальных вероятностей,
- матрица переходных вероятностей.

Вектор начальных вероятностей можно определить посредством финальных вероятностей случайного процесса функционирования ЗВК до начала сбора информации, являющегося эргодической цепью.

Для определения матрицы переходных вероятностей процесса сбора информации рассмотрим все множество его возможных состояний S и переходы между ними в очередном временном сегменте.

КМЦ сбора информации представляет собой цепь с поглощающим состоянием. Состояние данного стохастического процесса характеризуется тремя индексами:

$$S_{d_1 d_2 d_3} (d_1 = \overline{0, N}; d_2 = \overline{0, N-i}; d_3 = \overline{0, M}) \quad (1)$$

где d_1 — число объектов, передавших пакет состояния;

d_2 — число объектов, находящихся в режиме повторной передачи пакета состояния;

d_3 — число объектов, находящихся в режиме повторной передачи пакета ЗВК;

N — число объектов, участвующих в процессе передачи пакета состояния;

M — число объектов, передающих пакеты ЗВК.

Граф и основные виды переходов процесса сбора информации для частного случая ($M = 2, N = 2$) представлен на рис. 2.

Число состояний процесса сбора информации рассчитывается исходя из выражения, представленного ниже

$$Q = \left(\frac{(N+1)^2 + (N+1)}{2} \right) (M+1) \quad (2)$$

Каждое из состояний на графе переходов пронумеровано в соответствии с отображением, необходимым для составления матрицы переходных вероятностей:

$$S_{d_1 d_2 d_3} \xrightarrow{F} S_r (B5. \{d_1, d_2, d_3\} \xrightarrow{F} r) \quad (3)$$

по следующему выражению

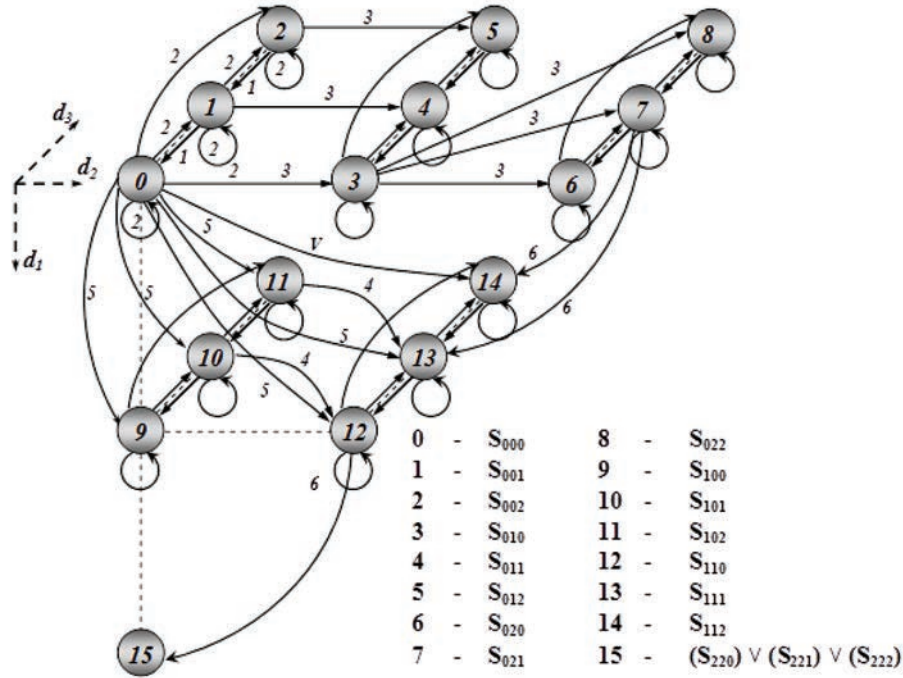


Рис. 2. Пространство состояний и возможные переходы процесса сбора информации

$$r = F(d_1, d_2, d_3) = \begin{cases} d_3, \text{ при } d_1 = 0 \text{ и } d_2 = 0 \\ d_2 M + d_3, \text{ при } d_1 = 0 \\ (d_2 + \sum_{i=0}^{d_1-1} (N+1-i))(M+1) + d_3, \\ \text{при } d_1 > 0 \text{ и } d_2 > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Для удобства описания графа переходных состояний и процесса сбора информации введем следующие обозначения:

$e = d_1(t - 1)$, $k = d_1(t)$ — число объектов, от которых получен пакет состояния соответственно в прошлый и текущий момент времени;

$n = d_2(t - 1)$, $m = d_2(t)$ — число объектов, находящихся в режиме повторной передачи пакета состояния в прошлый и текущий момент времени;

$z = d_2(t - 1)$, $x = d_2(t)$ — число объектов, находящихся в режиме повторной передачи пакета ЗВК в прошлый и текущий момент времени;

r_1, r_2 — порядковые номера состояний;

p_c — вероятность первичной передачи пакета состояния;

p_0 — вероятность первичной генерации пакета ЗВК;

p_r — вероятность повторной передачи пакета состояния и пакета ЗВК в случае попадания пакетов в конфликт;

$P_3(n)$ — вероятность захвата одного пакета из n -одновременно передаваемых.

Описание возможных типов переходов и их вероятностей, исходя из основных теорем теории вероятности [6], составляющих матрицу переходных вероятностей (МПВ) представлено ниже.

1 тип

$m = n$, $k = e$, $x = z - 1 - l$ — доведен пакет ЗВК.

$$P(r_1, r_2) = (1 - p_c)^{(N-n)} \sum_{i=0}^n C_n^i p_c^i (1 - p_c)^{(n-i)} (1 - p_0)^{(M-z)} \times \sum_{j=1}^z C_z^j p_r^j (1 - p_r)^{(z-j)} (j / (i + j)) P_7(i + j) \quad (5)$$

2 тип

$m = n$, $k = e$, $x \geq z$ — число объектов, находящихся в режиме передачи пакетов ЗВК увеличилось или осталось прежним.

$$P(r_1, r_2) = (1 - p_c)^{(N-n)} \sum_{i=0}^n C_n^i p_c^i (1 - p_c)^{(n-i)} \times [C_{M-z}^{x-z} p_0^{(x-z)} (1 - p_0)^{(M-x)} \times \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1 - p_r)^{(z-j)} (1 - P_7(j + i + x - z)) + C_{M-z}^{x-z+1} p_0^{(x-z+1)} (1 - p_0)^{(M-x-1)} \times \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1 - p_r)^{(z-j)} (\frac{x-z+1+j}{x-z+1+i+j}) \times P_7(j + x - z + 1 + i)] \quad (6)$$

3 тип

$m > n$, $k = e$, $x \geq z$ — число объектов, находящихся в режиме передачи пакетов ЗВК увеличилось или осталось прежним, увеличилось число объектов, повторно передающих пакеты состояния увеличилось

$$\begin{aligned}
P(r_1, r_2) &= C_{N-n}^{m-n} p_c^{(m-n)} (1-p_c)^{(N-m)} \sum_{i=0}^n C_n^i p_c^i (1-p_c)^{(n-i)} \times \\
&[C_{M-z}^{x-z} p_0^{(x-z)} (1-p_0)^{(M-x)} \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1-p_r)^{(z-j)} \times \\
&\times (1-P_7(m-n+j+i+x-z)) + \\
&+ C_{M-z}^{x-z+1} p_0^{(x-z+1)} (1-p_0)^{(M-x-1)} \times \\
&\times \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1-p_r)^{(z-j)} \left(\frac{x-z+1+j}{m-n+x-z+1+i+j} \right) \times \\
&\times P_7(m-n+j+x-z+1+i)]
\end{aligned} \quad (7)$$

4 тип

$m > n$, $k = e$, $x = z-1$ — число объектов, повторно передающих пакеты состояния увеличилось, доведен пакет ЗВК.

$$\begin{aligned}
P(r_1, r_2) &= C_{N-n}^{m-n} p_c^{(m-n)} (1-p_c)^{(N-m)} \times \\
&\times \sum_{i=0}^n C_n^i p_c^i (1-p_c)^{(n-i)} (1-p_0)^{(M-x)} \times \\
&\times \sum_{j=1}^z C_z^j p_r^j (1-p_r)^{(z-j)} \left(\frac{j}{m-n+i+j} \right) \times P_7(m-n+i+j)
\end{aligned} \quad (8)$$

5 тип

$m > n$, $k = e+1$, $x > z$ — доведен пакет состояния, число объектов, передающих пакеты состояния может увеличиться или остаться прежним.

$$\begin{aligned}
P(r_1, r_2) &= C_{N-n}^{m-n+1} p_c^{(m-n+1)} (1-p_c)^{(N-m-1)} \times \\
&\times \sum_{i=0}^n C_n^i p_c^i (1-p_c)^{(n-i)} C_{M-z}^{x-z} p_0^{(x-z)} (1-p_0)^{(M-x)} \times \\
&\times \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1-p_r)^{(z-j)} \left(\frac{m-n+1+i}{m-n+1+i+x-z+j} \right) \times \\
&\times P_7(m-n+j+i+x-z+1)
\end{aligned} \quad (9)$$

6 тип

$m = n-1$, $k = e+1$, $x > z$ — доведен пакет состояния, число объектов, генерирующих пакеты состояния увеличилось, число объектов, генерирующих пакеты ЗВК увеличилось или осталось прежним.

$$\begin{aligned}
P(r_1, r_2) &= (1-p_c)^{(N-n)} \sum_{i=1}^n C_n^i p_c^i (1-p_c)^{(n-i)} \times \\
&\times C_{M-z}^{x-z} p_0^{(x-z)} (1-p_0)^{(M-x)} \times \sum_{j=0}^z C_z^j p_r^j (1-p_r)^{(z-j)} \times \\
&\times \left(\frac{i}{i+x-z+j} \right) P_7(i+x-z+j)
\end{aligned} \quad (10)$$

Время-вероятностные характеристики для рассматриваемого процесса определяются на основе выражения, представленного ниже

$$\pi(t) = \pi(0) \times P \quad (11)$$

где P — матрица переходных вероятностей рассматриваемого процесса;

$\pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{Q-1}\}$ — вектор вероятностей состояний;
 $\pi(0)$ — вектор вероятностей состояний цепи в начальный момент времени;

$\pi(t)$ — вектор вероятностей состояний в момент времени t .

Для расчета среднего и дисперсии времени сбора информации необходимо перейти от МПВ к фундаментальной матрице поглощающей цепи Маркова. Для этого представим МПВ в каноническом виде []

$$P = \begin{vmatrix} \Theta & \Lambda \\ O & I \end{vmatrix} \quad (12)$$

где Θ — матрица размерности $(Q-1) \times (Q-1)$, элементы которой суть переходные вероятности из невозвратных состояний в невозвратные;

Λ — матрица размерности $(Q-1) \times 1$ переходных вероятностей из невозвратных состояний в поглощающее;

O — нулевая матрица размерности $1 \times (Q-1)$;

I — единичная матрица размерности 1×1 .

Фундаментальная матрица поглощающей цепи Маркова будет выглядеть следующим образом [3]

$$T = \|\tau_{ij}\| = (I - \Theta)^{-1} \quad (13)$$

где τ_{ij} — среднее время нахождения процесса до поглощения в состоянии j при выходе из состояния i .

Тогда, среднее время сбора информации будет определяться следующим выражением:

$$\bar{\tau} = \pi(0) \times T \xi \quad (14)$$

где ξ — вектор столбец, все компоненты которого равны 1, а дисперсия среднего времени сбора информации.

Дисперсия среднего времени сбора будет рассчитываться следующим образом.

$$D_{\bar{\tau}} = \pi(0)(2T - I)\bar{T} - (\pi(0)\bar{T})^2, \quad \bar{T} = T\xi \quad (15)$$

Описанные выше подходы к составлению математической модели процесса сбора телеметрической информации и полученные аналитические выражения для расчета время-вероятностных характеристик будут являться основой для решения указанных выше подзадач и разработки протокола функционирования ССС в режиме сбора информации по служебным каналам ЗВК.

Литература

1. Аболищ А.И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность. М.: ИТИС, 2004. 426 с.

2. Бунин С., Войтер А. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. К.: Техника, 1989. 223 с.

3. Кемени Дж. Дж., Снелл Дж.Л. Конечные цепи маркова. М.: Наука, 1970. 272 с.

4. Ковальков Д.А. Модель захвата сигнала в канале случайного множественного доступа // Проблемы обеспечения эффективности и устойчивости функционирования

сложных технических систем: сб. тр. XXI Межведомственной научно-технической конференции, Серпухов, 01–30 июня 2002. Серпухов: Серпуховской военный институт ракетных войск., 2002. Ч. 2. С. 57-60.

5. Невдяев Л. М., Смирнов А. А. Персональная спутниковая связь. М.: Эко-Трендз, 1983. 214с.

6. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1967. 498 с.

MATHEMATICAL MODEL OF THE COLLECTION OF INFORMATION ON OFFICIAL CHANNELS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM

Aleksandr I. Kosyak,

Serpukhon, Moscow region, Russia, alex_kos_82@mail.ru

Dmitrij V. Doncov,

Serpukhon, Moscow region, Russia, dontsov_81@mail.ru

ABSTRACT

It has been shown that satellite communication systems are communication systems with centralized control in which control most communications system and channel resources is carried satellite communication system control center. It is shown that in a communication system with the architecture entire channel resource is divided into work, by which the information exchange between users, and a service for transmitting the service pack (in connection establishment request) of the subscribers (earth stations) to the satellite control center system communication. It was shown that the exchange of information on official channels of communication is continuous and is carried out in a mode of random multiple access type slotted ALOHA (S-ALOHA). A variant of the additional use of the service channel in order to collect a certain target (telemetry) data from the satellite station on the background of the performance of official channel of its targets - the overhead packets from ground stations to establish communication between subscribers. The mathematical model of the process of collecting a target of telemetry data in the mode of a random multiple access on the background of the transmission service packages from other earth stations. It is shown that this model will provide probability-time characteristics of the test process. It is shown that the timeliness, obtained on the basis of the constructed model is the average time and the variance collection target time telemetry data from a plurality of respondents earth stations. It is shown that in view of the peculiarities of the nature of the process to build a mathematical model is based on the unit absorbing finite Markov chains. Presented transition graph data collection process for the special case of value of the target load per channel service channel and the number of polled objects. Analytical relations, allowing to calculate the number of the state graph. It describes the types of possible transitions between states of the information gathering process and the probability of these transitions. It is shown that the probability and time characteristics based on the model are constructed by building the fundamental matrix and the dispersion. We give synthesis rule matrix of transition probabilities, are invariant to the system parameters of the satellite communication system.

Keywords: The satellite communication system; Random Multiple Access; collecting telemetry data; likelihood - time characteristics; absorbing finite Markov chains.

References

1. Abolic A. I. *Sistemy sputnikovoj svyazi. Osnovy strukturno-parametricheskoy teorii i jeffektivnost'* [Satellite communication systems. Fundamentals of structural-parametric theory and efficiency]. Moscow, ITIS, 2004. 426 p. (in Russia)
2. Bunin S., Vojter A. *Vychislitel'nye seti s paketnoj radiosvyaz'ju* [Computer networks with packet radio]. Kiev, Tjehnika, 1989. 223p.
3. Kemeny J. G., Snell J. L. *Finite Markov chains*. New York : Springer-Verlag, 1976. 224 p.
4. Koval'kov D. A. [Model signal acquisition channel random multiple access]. [Problems of ensuring the effectiveness and sustainability of complex technical systems.]. Serpuhov: Serpuhovskiy voennyi institute raketnykh voysk, 2002. Vol. 2. Pp. 57-60. (in Russia)
5. Nevdjaev L. M., Smirnov A. A. *Personal'naja sputnikovaja svjaz'* [Personal satellite communications]. Moscow, Jeko-Trendz, 1983. 214 p. (in Russia)
6. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*. Vol. 1. Wiley, 1968. 528 p.

Information about authors:

Kosyak A. I., PhD, Senior Researcher, Municipal public institution «Institute of Engineering Physics»; Doncov D. V., Junior Researcher, Municipal public institution «Institute of Engineering Physics».

For citation: Kosyak A. I., Doncov D. V. Mathematical model of the collection of information on official channels of satellite communication system. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 4-9. (In Russian)

МУЛЬТИПАКТОР В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ СПУТНИКОВЫХ СЕГМЕНТОВ СИСТЕМ СВЯЗИ

Белов Даниил Анатольевич,

к.т.н., заместитель начальника отдела Акционерного общества
«Российские космические системы», г. Москва, Россия, 1242rniikp@mail.ru

Гертель Сергей Николаевич,

д.т.н., начальник отдела Акционерного общества
«Российские космические системы»,
г.Москва, Россия, 1242rniikp@mail.ru

Кочемасов Виктор Неофидович,

к.т.н., заведующий лабораторией Московского технического
университета связи и информатики, г. Москва, Россия, info@radiocomp.ru

Строганова Елена Петровна,

д.т.н., профессор Московского технического университет
связи и информатики, г. Москва, Россия, elenastroganova@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен эффект мультипактора – разряда резонансного типа, возникающего в условиях пониженного давления и при высоких мощностях в бортовой аппаратуре космического назначения. Мультипактор приводит к нарушению нормальной работы радиоэлектронной аппаратуры, искажениям или прерываниям радиосигнала, а также зачастую является причиной критического отказа аппаратуры вплоть до полной потери функций бортовой системы. Увеличение степени интеграции аппаратуры, переход к новым материалам, расширение частотного диапазона, и, особенно, увеличение мощности передаваемого спутниковой системой сигнала на фоне борьбы за снижение габаритно-массовых характеристик приводит к возрастанию влияния эффекта мультипактора на качество функционирования и надежность бортовой аппаратуры.

Показано, что возникновение мультипактора характерно для высокочастотных резонаторов, вакуумных усилительных приборов, микрополосковых линий и коаксиальных элементов. При этом появление мультипактора приводит к нагреву компонентов, деградации СВЧ мощности, резкому увеличению шумов в выходном сигнале, появлению отражений в компонентах или ухудшению их свойств и выгоранию. Все это может привести как к ухудшению качества функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры, так и к отказу работы системы.

Проанализированы физические механизмы возникновения мультипактора в зависимости от среды возникновения (одноповерхностный и двуповерхностный мультипактор на металле и диэлектрике). Проведен анализ и приведены примеры возникновения мультипактора в полосковых и коаксиальных компонентах спутниковой радиоэлектронной аппаратуры, даны рекомендации по выбору компонентов, способных держать высокую СВЧ мощность без появления мультипактора.

Проведен обзор существующих расчетных методов моделирования мультипактора. Приведены результаты натурального моделирования мультипактора в бортовом передатчике, рекомендован и проверен экспериментально дополнительный запас по уровню мощности на эффект мультипактора.

Сделан вывод о настоятельной необходимости исследований и тестирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры перед запуском в эксплуатацию по эффекту мультипактора.

Ключевые слова: мультипактор; бортовая радиоэлектронная аппаратура; микрополосковые и коаксиальные компоненты; космические системы связи; надежность.

Для цитирования: Белов Д. А., Гертель С. Н., Кочемасов В. Н., Строганова Е. П. Мультипактор в радиоэлектронной аппаратуре спутниковых сегментов систем связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 10-16.

Предпосылки возникновения мультипактора в бортовой аппаратуре космического назначения

Бортовая радиоэлектронная аппаратура (РЭА) является неотъемлемой частью всех космических систем, таких как спутниковые системы связи и радиовещания, системы дистанционного зондирования Земли, системы военного применения. Спрос на спутниковые услуги устойчиво высок, а эксплуатационные требования к бортовым системам ужесточаются.

На сегодняшний день основными инновационными тенденциями развития спутниковой РЭА можно считать увеличение степени интеграции функций в одном конструктиве, переход к новым материалам, расширение частотного диапазона. Особо стоит выделить тенденцию увеличения мощности передаваемого спутниковой системой сигнала на фоне борьбы за снижение габаритно-массовых характеристик бортовой РЭА.

Именно в таких условиях пристальное внимание уделяется фактору негативного влияния на надежность и качество функционирования бортовой РЭА — эффекту мультипактора (multipactor) [1–3]. Мультипактор — это резонансный тип разряда, который может произойти в условиях вакуума в радиочастотных усилительных вакуумных приборах, волноводах, СВЧ компонентах. Такой разряд приводит к нагреву компонентов, уменьшению выходной мощности, увеличению шумов, а также к пробое.

Мультипактор приводит к нарушению нормальной работы РЭА, искажениям или прерываниям радиосигнала, а также зачастую является причиной критического отказа аппаратуры вплоть до полной потери функций бортовой системы.

Механизмы возникновения эффекта мультипактора

Эффект мультипактора возникает при таком значении напряженности поля переменного тока, которого достаточно для поддержания на постоянном уровне количества свободных электронов путем вторичной электронной эмиссии. Воздействие электронов на поверхность может, в зависимости от угла и энергии, привести к эмиссии вторичных электронов, которые могут быть ускорены радиочастотным электромагнитным полем, и затем, в свою очередь, воздействовать на поверхность. Если число электронов, их энергия и время воздействия будут достаточны для того, чтобы поддерживать умножение количества электронов, эмиссия может возрастать экспоненциально.

Механизм мультипактора различен в зависимости от среды возникновения. Различают два типа мультипактора: двухповерхностный и одноповерхностный.

Двухповерхностный мультипактор. Эффект происходит на зазоре между металлическими электродами. При этом, как правило, вектор напряженности радиочастотного электромагнитного поля перпендикулярен к поверхности.

В условиях вакуума расстояние пролета свободного электрона больше расстояния между электродами. Это позволяет свободным электронам воздействовать на поверхность электрода, вызывая вторичную электронную эмиссию. Синхронизация между вторичной электронной

эмиссией и частотой изменения полярности электрического поля ускоряет электроны по направлению к электроду-источнику (рис. 1). В подходящих условиях количество электронов будет увеличиваться экспоненциально до точки насыщения, когда их плотность будет достаточной, чтобы блокировать электрическое поле. Накопление такого заряда электронов может вызвать пробой в виде мультипакторного разряда [1–3].

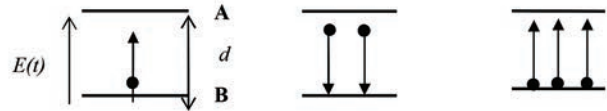


Рис. 1. Накопление заряда при мультипакторе между двумя поверхностями А и В под воздействием электромагнитного поля напряженностью $E(t)$

Таким образом, есть два главных условия появления мультипактора: синхронизм движения вторичных электронов с переменным электромагнитным полем и достаточная для поддержания вторичной электронной эмиссии энергия удара электронов о поверхность электрода. Для поддержания синхронизма время пролета свободного электрона между двумя электродами должно быть равно целому нечетному числу N ($N = 1, 3, 5, \dots$) полупериодов электромагнитного поля с частотой f . При этом коэффициент взаимодействия вторичной электронной эмиссии с поверхностью должен быть больше единицы.

Рассмотрим возникновение синхронизма между двумя поверхностями А и В под воздействием поля с вектором напряженности $E(t)$ (рис. 1). В какой-то момент времени напряжение на одном из электродов А двухэлектродной системы становится отрицательным, и свободный электрон, находящийся у этого электрода, ускоряется по направлению к электроду В. Электрон достигнет максимальной скорости через половину периода, когда электрод В начнет становиться отрицательным. Если в этот момент произойдет взаимодействие между электроном и электродом В, которое приведет к появлению новых электронов, то они начнут ускоряться в сторону электрода А. При многократном повторении этого явления можно говорить о возникновении эффекта мультипактора.

Полагая, что все электроны эмитируются с электрода с одинаковыми начальными скоростями v_{e0} в момент времени t_a , значение напряженности E радиочастотного электрического поля, достаточного для возникновения мультипакторного разряда, имеет вид [3]:

$$E = \frac{m_e}{e} \cdot \frac{\omega(\omega d - N\pi v_{e0})}{N\pi \sin \alpha - 2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

где m_e — масса электрона, e — заряд электрона, d — расстояние между двумя поверхностями, $\omega = 2\pi f$ и $\omega t = N\pi + \alpha$, $\alpha = \omega \cdot t_a$.

Одноповерхностный мультипактор. Одноповерхностный мультипактор на диэлектрической поверхности может возникать при любом угле наклона радиочастотного элек-

тромагнитного поля к поверхности диэлектрика. Объемный заряд, возникающий за счет вторичной эмиссии, удерживается в тонком приповерхностном слое диэлектрика за счет воздействия на диэлектрик внешнего постоянного электрического или магнитного поля [4]. Возвращающее статическое электрическое поле, нормальное к поверхности эмиссии, само возникает в процессе вторичной электронной эмиссии на диэлектрической поверхности, так как при этом на поверхности диэлектрика накапливается положительный заряд. Статическое параллельное поверхности эмиссии постоянное магнитное поле искривляет траекторию эмитированных электронов, заставляя их возвращаться к поверхности. Еще одной причиной возвращения электронов может являться пространственная неоднородность СВЧ электрического поля и действие на электроны поперечной силы.

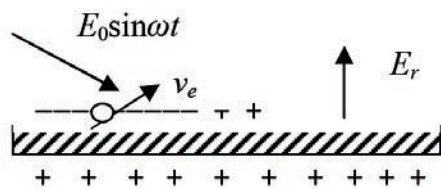


Рис. 2. Поверхность диэлектрика и векторы напряженности воздействующего на него радиочастотного электрического поля $E_0 \sin \omega t$ и результирующего возвращающего поля E_r

На рис. 2 показаны векторы напряженности воздействующего на поверхность диэлектрика радиочастотного электрического поля $E_0 \sin \omega t$ и результирующего возвращающего поля E_r . При вторичной электронной эмиссии E_r является суперпозицией электрического поля положительного объемного заряда в диэлектрике и поля объемного заряда эмитированных электронов. Мультипактор на диэлектрике возникает для различных диэлектрических материалов при определенном коэффициенте размножения электронов $\delta(p, \theta)$ [3] как функции энергии p и угла падения электрона на поверхность θ :

$$\delta(p, \theta) = \delta_m(\theta) \left(\frac{p}{p_m(\theta)} \exp\left(1 - \frac{p}{p_m(\theta)}\right) \right)^k, \quad (2)$$

где $\delta_m(\theta)$ — максимальное значение δ при заданном угле падения θ (отсчитывается от нормали к поверхности), $p_m(\theta)$ — энергия, соответствующая максимальному значению δ при заданном θ , $k = 0,62$ при $p < p_m(\theta)$, $k = 0,25$ при $p > p_m(\theta)$ (k — эмпирический коэффициент).

Одноповерхностный мультипактор также может возникать на металлической поверхности при пересечении радиочастотного электрического поля статическим магнитным полем и при одновременном воздействии радиочастотного электромагнитного поля, постоянного магнитного поля и постоянного электрического поля, обусловленного пространственным зарядом движущихся к коллектору электронов в электровакуумных приборах [5].

Мультипактор в полосковых и коаксиальных компонентах спутниковой РЭА

В микрополосковых компонентах мультипактор возникает, как правило, между двумя поверхностями. Между ними формируется облако электронов, колеблющееся согласно описанному выше алгоритму. При достижении критической плотности электронов возникает разряд. Разряд нагревает поверхность электрода, блокируя электрическое поле, и приводит к разрушению комплектующих и микрополосковой линии, вплоть до ее полного испарения [6]. Выгорание дорожек вследствие мультипакторного разряда в твердотельном усилителе мощности, приводящее к отказу устройства, показано на рис. 3.

В случае многомодового мультипактора (N -модового), несколько облаков электронов ($2N-1$) будут колебаться между поверхностями в устойчивом режиме. Для таких компонентов мультипактор проявляется при средней мощности радиочастотного поля [1], так как при более высоких энергиях эффект невозможен по причине слишком сильного разгона электрона. При столкновении он проникает слишком глубоко во второй электрод, что не позволяет обеспечить вторичную электронную эмиссию с коэффициентом выше 1.

В коаксиальных компонентах, таких как соединители, кабели и др., мультипактор возникает при мощности, близкой к максимальной для конкретного компонента. Мультипакторный разряд в коаксиальных компонентах приводит к ограничению мощности и возрастанию шумов, а также может испарить часть диэлектрического материала и создать частицы ионизированного газа. Если коаксиальный компонент недостаточно вентилируется, такой газ может вызвать ионный разряд и полное выгорание компонента [3]. Поэтому особенно важно учесть при разработке соединителя необходимость достаточной вентиляции, так как ионный разряд может произойти и при достаточно низкой мощности.

Изучение физики мультипактора ограничено сложностью геометрии, а также рядом других влияющих факто-

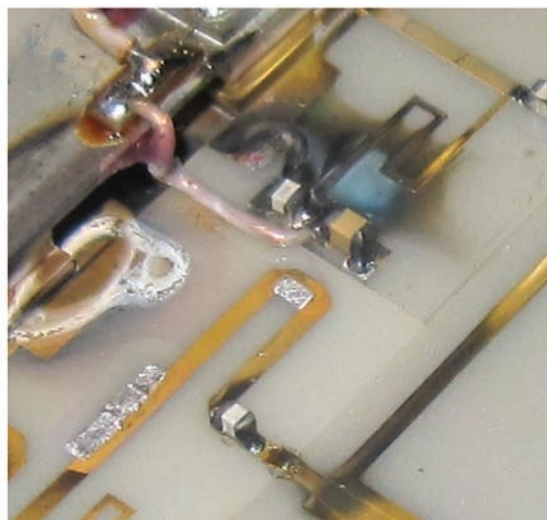


Рис. 3. Последствия мультипакторного разряда в твердотельном усилителе мощности с полосковой структурой

ров. Так, при исследовании мультипактора, как правило, не учитывается магнитное поле. Однако, в соответствии с законом Ампера-Максвелла, электрическое поле создаёт циркулирующее магнитное поле. Эмитируемые электроны в электрическом и магнитном поле смещаются от осевого направления под воздействием силы Лоренца. В гигагерцовом диапазоне частот в некоторый момент времени осевой сдвиг становится сравним с расстоянием между электродами, так что выполняется условие (1). С другой стороны, коаксиальные компоненты имеют в своем составе диэлектрик, на котором велика вероятность возникновения одноповерхностного мультипактора вследствие снижения скорости и возвращения к диэлектрической поверхности электронов, не успевших достигнуть проводника, под воздействием пондеромоторной силы.

Таким образом, в коаксиальных линиях присутствует два типа мультипактора: двухповерхностный между внешним и внутренним проводниками и одноповерхностный на диэлектрике [7–9].

Для предотвращения мультипактора соединители для коаксиальных линий, работающие в условиях вакуума при высоких напряжениях, должны иметь минимальные зазоры, предпочтительно с перекрытием диэлектриков в плоскости соединения. При этом нужно учитывать, что слишком глубокое перекрытие диэлектриков приводит к снижению качества соединения и ухудшению электрических параметров соединителя.

Для использования в космосе соединителя типа SMA рекомендуется применять соединители с меньшим зазором (стандартно 0,99 мм). Наилучшим образом в условиях вакуума для передачи средних и высоких мощностей себя зарекомендовал коаксиальный соединитель типа TNC (рис. 4). В таком соединителе выделяют три основные области А, В, С, где может произойти мультипактор. В области А возникновение мультипактора наиболее вероятно. В областях В, С возникновение мультипактора маловероятно, так как в соединителе типа TNC сформировано TEM поле, не имеющее осевой составляющей, ускоряющей электроны, что исключает возникновение одноповерхностного мультипактора.

Еще один фактор, способствующий возникновению мультипактора в соединителях — наличие полостей и пустот в диэлектриках. Высокое напряжение между поверхностями в таких пустотах может привести к развитию мультипактора. Несмотря на стремление производителей минимизировать количество полостей в материалах, полностью исключить их возникновение практически невозможно. Для того, чтобы избежать возникновения мультипактора, пустоты заполняются герметиком. Однако, цельные диэлектрики и герметики обладают худшими температурными характеристиками по сравнению с диэлектриками с пустотами, что приводит к уменьшению мощности, на которую может быть рассчитан компонент [8]. Для улучшения тепловых характеристик и, как следствие, увеличения проводимой мощности предлагаются специальные структуры диэлектриков с высверленными отверстиями, в которых риск возникновения мультипактора уменьшается благодаря тому,

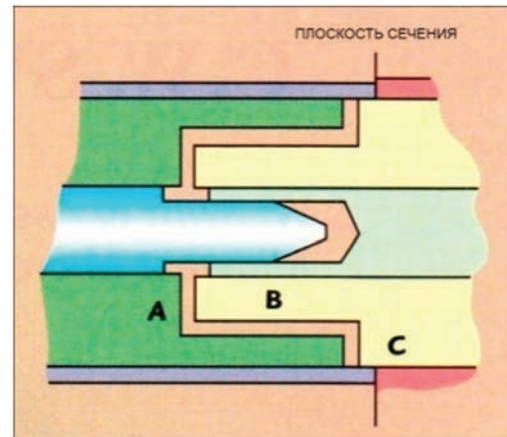


Рис. 4. Схема соединителя TNC

что диэлектрические пустоты располагаются ближе к внешнему проводнику, где поле мало, [9]. Однако такая структура может содержать заусенцы, дефекты материала или другие недостатки, негативно отражающиеся на характеристиках компонента, особенно на СВЧ.

Таким образом, подбор компонентов РЭА, способных держать высокую СВЧ мощность без появления мультипактора — значимый вопрос при разработке бортовой аппаратуры космического применения. При выборе компонентов, стойких к возникновению мультипактора, стоит учитывать ряд факторов, как, например, тип диэлектрика, наличие полостей в нем, конфигурация сочленения, ширина зазора между сопряженными диэлектриками и другие.

Методология оценки РЭА по эффекту мультипактора

Оценка РЭА по критерию вероятности возникновения мультипактора возможна двумя методами: расчетом или натурными испытаниями.

При расчете риска возникновения мультипактора в некоторой системе надо корректно задать ее геометрию, свойства материалов и учесть ряд других существенных параметров. При этом для моделирования конкретных реальных конструкций требуется достаточно точное воспроизведение трехмерной системы со сложной конфигурацией электромагнитного поля. Следует отметить, что, несмотря на интенсивное изучение эффекта мультипактора, имеющиеся на текущий момент представления о его свойствах не могут считаться полными даже для простых моделей, что существенно осложняет расчет и негативно отражается на точности результата.

Европейское Космическое Агенство (ESA) запустило программу «*Multipactor Calculator*» для исследования эффекта мультипактора в компонентах РЭА космического применения [10]. Зоны мультипактора обычно изображаются в виде диаграмм, отображающих критические уровни мощности (или напряжения) от расстояния между поверхностями и частоты. Калькулятор ESA анализирует мультипактор между двумя параллельными поверхностями (пример на

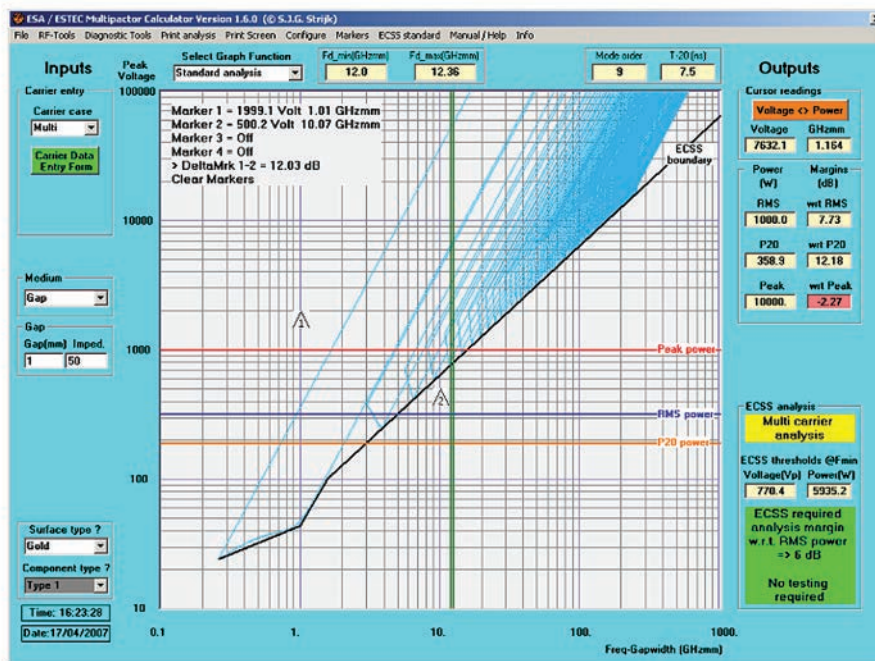


Рис. 5. Пример расчета областей мультипактора на калькуляторе ESA

рис. 5), а также на стандартных коаксиальных интерфейсах. Особое внимание следует уделить запасу по мультипактору. ESA при моделировании рекомендует мультипакторный запас в 8–12 дБ. Особое внимание рекомендуется уделить при проектировании линий связи без резервирования.

Однако, на сегодняшний день эти расчеты носят скорее оценочный характер ввиду недостаточной изученности эффекта мультипактора.

Наиболее информативная и реалистичная оценка — натурные испытания в условиях, близких к реальным. Имеющиеся ограничения при таких испытаниях — воспроизведение условий работы РЭА при большой мощности и выход компонентов из строя при возникновении мультипактора.

Испытательный комплекс, сочетающей в себе программную и аппаратную части, был разработан компанией In-Phase Technologies [11]. Аппаратная часть комплекса базируется на нескольких векторных анализаторах сигналов, высокоомных усилителях, вакуумной камере. Такой комплекс способен проверять компоненты РЭА на мультипактор в условиях, близких к реальным. Причем комплекс содержит различные модификации, разработанные для разных частот, геометрических структур, материалов и других параметров. Испытания на комплексе такого уровня существенно приближают инженеров к решению задачи разработки бортовой аппаратуры, устойчивой к эффекту мультипактора.

Натурное моделирование эффекта мультипактора в бортовых передающих устройствах

Эффект мультипактора учитывается на всех этапах проектирования при разработке бортовых устройств. Особое внимание уделяется испытаниям передающих устройств в вакууме на пробойные явления.

Характерным примером являются испытания передающего тракта Бортового Радиотехнического Ретранслятора Системы Дифференциальной Коррекции и Мониторинга (БРТР СДКМ) [6]. На выходе ретранслятора формируется сигнал частотой 1575 МГц и уровнем не менее 60 Вт. Передающая часть состоит из двух моноблоков твердотельных усилителей мощности и коаксиального переключателя по выходу, соединенных коаксиальными кабелями. Расчеты и моделирование всех узлов передающего тракта были проведены с запасом до 50% по уровню выходной мощности. В том числе и по мультипактору.

Термовакuumные испытания, при которых наиболее вероятно возникновения эффекта мультипактора, были запланированы в несколько этапов. На первом этапе испытания были автономные и включали в себя только испытания передающего устройства без сопряженных изделий. На этом этапе было сделано заключение о возможности эксплуатации устройства в условиях пониженного давления, а также выработаны рекомендации по оптимальным режимам эксплуатации. В частности, было принято решение об отказе от герметизации в пользу быстрого стравливания газа из объема усилительного моноблока, что снижало возможность возникновения эффекта Пашена, но повышало вероятность мультипакторного разряда.

Второй этап включал испытания БРТР в целом. Испытания были также проведены успешно и отказов или дефектов не выявили.

Заключительный этап включал в себя испытания в составе изделия на территории заказчика. К выходу БРТР (после переключателя) было подключено антенно-фидерное устройство (АФУ), включавшее в себя, в том числе, полосовой фильтр. На этом этапе испытаний был выявлен от-

каз. Проявился он в полной потере сигнала на выходе АФУ и нагреве усилителя мощности.

Анализ дефекта на месте показал отказ усилительного моноблока. Вскрытие на заводе-изготовителе показало испарение выходного проводника (рис. 6).

Анализ причин дефекта показал следующее. Установленный в АФУ фильтр имел недостаточно низкое КСВ по входу, что привело к отражению части мощности обратно в передающий тракт. Есть основания предполагать, что в пиковых случаях отражалось 100% мощности. Это приводило к резкому увеличению эффективной мощности в выходном тракте и, как следствие, к возникновению мультипакторного эффекта в наиболее «узком» месте — на выходном проводнике в моноблоке. Предположительно, возникал двухповерхностный мультипактор между проводником и металлическим корпусом.

После ремонта усилительного моноблока (замены выходной печатной платы, соединителя и вентиля) было решено установить после переключателя изолятор, рассчитанный на большую (до 200 Вт) мощность, а также потребовать более качественной настройки фильтра. Принятые меры позволили исключить повторения дефекта при последующих испытаниях и при летной эксплуатации.

Полезным выводом анализа дефекта стало ключевое решение формировать дополнительный запас по уровню мощности на эффект мультипактора при расчете и моделировании проектируемых устройств. Такой запас должен быть не менее 3 дБ, что соответствует полному отражению выходной мощности. Этот вывод согласуется с рекомендациями крупнейших европейских и американских производителей электронной техники.

Выводы

Мультипактор возникает в условиях пониженного давления и при высоких мощностях в бортовой аппаратуре. Возникновение мультипактора характерно для высокочастотных резонаторов, вакуумных усилительных приборов, микрополосковых линий связи и коаксиальных элементов.

Появление мультифактора приводит к деградации СВЧ мощности, резкому увеличению шумов в выходном сигнале, появлению отражений в компонентах или ухудшению их свойств и выгоранию. Все это может привести как к ухудшению качества функционирования бортовой РЭА, так и к отказу работы системы.

Для обнаружения мультипактора применяют расчетный метод моделирования и метод натурных испытаний. На сегодняшний день созданы инструменты для каждого из этих методов. Однако при этом нельзя назвать эффект мультипактора досконально изученным. Таким образом, можно сделать вывод о настоятельной необходимости исследований и тестирования бортовой РЭА перед запуском в эксплуатацию по эффекту мультипактора.

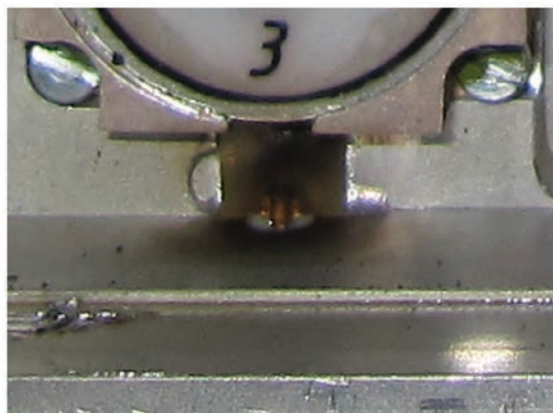


Рис. 6. Выгорание дорожки на выходе усилительного моноблока

Литература

1. *Rodney J., Vaughan M.* Multipactor // IEEE Transactions on Electron Devices. 1988. Vol. 35. No. 7. Pp. 1172–1180.
2. *Kishek R. A., Lau Y. Y., Ang L. K., Valfells A., Gilgenbach R. M.* Multipactor Discharge on Metals and Dielectric. Historical Review and Recent Theories // Physics of Plasmas. 1998. Vol. 5. No. 5. Pp. 2120–2126.
3. *Vaughan J. R. M.* Multipactor // IEEE Transactions on Electron Devices. 1995. Vol. 75. No. 6. Pp. 1218–1221.
4. *Sakamoto K., Imai T., Ikeda Y., Saigusa M., Sagawa J., Nagashima T.* Unipole Multipactoring Discharge in the LHRF Launcher // IEEE Transactions on Plasma Science. 1986. Vol. PS-14. No. 4. Pp. 548–553.
5. *Гвоздев А. К., Жарова Н. А., Зайцев Н. И., Семенов В. Е., Сорокин А. А.* Развитие мультипактора в выходном тракте мощного импульсного гироклистрона // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 10. С. 72–78.
6. *Белов Д. А.* Экспериментальные исследования в условиях пониженного давления космических твердотельных СВЧ-усилителей высокой мощности // Контроль. Диагностика. 2012. № 6. С. 63–66.
7. *Udiljak R., Anderson D., Lisak M., Semenov V. E., Puech J.* Multipactor in a coaxial transmission line. I. Analytical study // Physics of plasmas. 2007. V. 14. No. 3. P. 033508.
8. *Semenov V. E., Zharova N., Udiljak R., Anderson D., Lisak M., Puech J.* Multipactor in a Coaxial Transmission Line. II. Particle-in-cell Simulations // Physics of Plasmas. 2007. V. 14. No. 3. P. 033509.
9. *Weirback A.* Determining the CW Power Rating of Coaxial Components // High Frequency Electronics. 2008. Vol. 7. No. 7. Pp. 206–221.
10. European Space Agency. URL: <http://multipactor.esa.int> (дата обращения: 01.10.2016).
11. In-Phase Technologies. URL: <http://www.in-phasetech.com> (дата обращения: 01.10.2016).

MULTIPACTOR IN RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACE TELECOMMUNICATION SYSTEMS SPUTNIK PARTS

Daniil A. Belov,
Moscow, Russia, 1242rniikp@mail.ru

Sergey N. Gertel,
Moscow, Russia, 1242rniikp@mail.ru

Victor N. Kochemasov,
Moscow, Russia, info@radiocomp.ru

Elena P. Stroganova,
Moscow, Russia, elenastroganova@gmail.com

ABSTRACT

We analyze the multipactor effect – resonance type discharge in low pressure and high power conditions in satellites radio electronic equipment of space telecommunication systems.

The multipactor effect occurs in high frequency resonators, vacuum amplifiers, microstrip lines and coaxial elements. Increasing the degree of integration of the apparatus, the using of the new materials, expansion of the frequency, and, especially, increasing of transmitted power in the satellite radio system with reducing dimensions and mass characteristics leads to increasing multipactor effect influence on the quality and reliability of the functioning of on-board equipment. The existence of multipactor it results in microwave power reducing, a sharp noise increasing in output signal waveguides, return losses in radio frequency components increasing or their characteristics degradation and even component's burnout.

Physics mechanism of multipactor is studied depending on environment of the effect appearance (single-surface multipactor and two-surface multipactor on metals and on dielectrics). The analyze is fulfilled and is given the examples of multipactor occurrence in micro transmission lines and coaxial components of sputnik radio electronic equipment. The recommendations by the choice of the components that can be used in microwave high power conditions without of multipactor.

Existing calculation methods of multipactor simulation are reviewed. The article presents the results of the full-scale simulation multipactor on-board transmitter and recommendations experimentally tested additional effect multipactor reserve power.

The conclusion is that there is the urgent need for research and testing on-board radio frequency electronics for space applications before launching into operation by multipactor effect.

Keywords: Multipactor; radio electronic satellite equipment; micro transmission lines and coaxial components; space telecommunication systems; надежность.

References

1. Rodney J., Vaughan M. Multipactor. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1988. Vol. 35. No. 7. Pp. 1172–1180.
2. Kishek R. A., Lau Y. Y., Ang L. K., Valfells A., Gilgenbach R. M. Multipactor Discharge on Metals and Dielectric. Historical Review and Recent Theories. *Physics of Plasmas*. 1998. Vol. 5. No. 5. Pp. 2120–2126.
3. Vaughan J. R. M. Multipactor. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1995. Vol. 75. No. 6. Pp. 1218–1221.
4. Sakamoto K., Imai T., Ikeda Y., Saigusa M., Sagawa J., Nagashima T. Unipole Multipactoring Discharge in the LHRF Launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1986. Vol. PS-14. No. 4. Pp. 548–553.
5. Gvozdev A. K., Zharova N. A., Zaisev N. I., Semenov V. E., Sorokin A. A. Multipactor incrising in output circuits of high power impulse giroklystron. *Technical Physics Journal*. 2012. Vol. 82. No. 10. Pp. 72–78.
6. Belov D.A. Experimental researches in low pressure conditions of space solid microwave high power amplifiers. *Monitoring. Diagnostics*. 2012. No. 6. Pp. 63–66.
7. Udiljak R., Anderson D., Lisak M., Semenov V.E., Puech J. Multipactor in a coaxial transmission line. I. Analytical study. *Physics of plasmas*. 2007. Vol. 14. No. 3. P. 033508.
8. Semenov V. E., Zharova N., Udiljak R., Anderson D., Lisak M., Puech J. Multipactor in a Coaxial Transmission Line II. *Particle-in-cell Simulations. Physics of Plasmas*. 2007. Vol. 14. No. 3. P. 033509.
9. Weirback A. Determining the CW Power Rating of Coaxial Components. *High Frequency Electronics*. 2008. Vol. 7. No. 7. Pp. 206–221.
10. European Space Agency. URL: <http://multipactor.esa.int> (date of access 01.10.2016).
11. In-Phase Technologies. URL: <http://www.in-phasetech.com> (date of access 01.10.2016).

Information about authors:

Belov D. A. , assistant of department Head of the Joint-Stock Company «Russian Space Systems»;
Gertel S. N. , Head of department of the Joint-Stock Company «Russian Space Systems»;
Kochemasov V. N. , PhD, Head of laboratory of Moscow Technical University of Communication and Informatics;
Stroganova E. P. , PhD, professor of Moscow Technical University of Communication and Informatics.

For citation: Belov D. A., Gertel S. N., Kochemasov V. N., Stroganova E. P. Multipactor in radio electronic equipment of space telecommunication systems sputnik parts. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 10–16. (In Russian)

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



МЕЖДУНАРОДНЫЙ
**XI НАВИГАЦИОННЫЙ
ФОРУМ**

www.glonass-forum.ru

9-я международная
выставка

НАВИТЕХ

www.navitech-expo.ru

25–28 апреля 2017

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
МОСКВА



Реклама 12+

При поддержке



Под патронатом



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Организатор форума



Оператор форума



Стратегический партнер форума



Организатор выставки



КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОРОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ НА БАЗЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОМОНИТОРИНГА

Будко Павел Александрович,
д.т.н., профессор, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
г. Санкт-Петербург, Россия, budko62@mail.ru

Винограденко Алексей Михайлович,
к.т.н., доцент, доцент Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
г. Санкт-Петербург, Россия, vino_grad-82@mail.ru

Жуков Геннадий Анатольевич,
к.т.н., доцент, ученый секретарь
ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
intelteh@inteltech.ru

Литвинов Александр Игоревич,
к.т.н., заместитель начальника отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
г. Санкт-Петербург, Россия, litvinovaleks@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы комплексного использования разнородных радиоканалов управления робототехническими комплексами морского базирования с использованием единой системы радиомониторинга, построенной на принципах функционирования когнитивных радиосистем. Представлен замысел построения единой системы радиомониторинга, как в интересах абонентов радиосетей и радионаправлений ведомства, так и непосредственно в интересах базовых пунктов управления группировками робототехнических комплексов, использующих радиолинии сверхдлинноволновой, декаметровой, ультракоротковолновой и космической связи. Дан анализ применимости радиоканалов различных диапазонов волн при управлении робототехническим комплексом, как в надводном, так и в погруженном положении. При этом наряду с радиоканалами рассмотрено применение оптической, параметрической, гидроакустической и электромагнитной связи. Оценены возможности смешанных группировок робототехнических комплексов, действующих в разных средах (космос, воздух, вода) по повышению эффективности выполнения заданной миссии. Рассмотрены возможные методы информационного взаимодействия между подводными аппаратами и дана оценка максимальной дальности при обмене данными между глубокопогруженными объектами по гидроакустическому каналу. Выявлены возникающие трудности в обосновании вариантов построения распределенных систем управления смешанными группами робототехнических комплексов, заключающиеся в невозможности обеспечения необходимой устойчивости каналов управления и взаимодействия в группе на границах физических сред, а также малыми дальностями в обеспечении гидроакустической связи. Дана сравнительная характеристика основных типов модемов гидроакустической связи отечественных и зарубежных производителей. Сформулированы предложения по дальнейшему увеличению дальности гидроакустической связи за счет снижения скорости передачи и применения гидроакустических модемов «параллельного типа». Приведены расчеты рационального числа робототехнических комплексов, действующих в группе. Сделан вывод о том, что существенное повышение эффективности действий смешанной робототехнической группировки достигается наряду с комплексным использованием разнородных каналов управления применением методов, основанных на современных технологиях программируемого радио с элементами когнитивных радиосистем, искусственного интеллекта и нейробионики при обработке принимаемой информации в ходе интенсивного информационного взаимодействия на основе общих баз данных распределенных систем.

Ключевые слова: робототехнический комплекс; канал космической связи; декаметровая радиолиния; гидроакустическая связь; эффект Доплера.

Для цитирования: Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И. Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 18–41.

Введение

Активное развитие в настоящее время новых информационных технологий и концепции создания базовых элементов искусственного интеллекта, а также значительный технологический прогресс в области создания сверхпрочных материалов и малогабаритных энергоемких источников электропитания позволяют уже сегодня создавать робототехнические комплексы (РТК) широкого спектра применения. При этом задачи, возлагаемые на РТК, с каждым годом все более расширяются, проникая во все сферы интересов человечества, и усложняются, что зачастую требует группового применения роботов в различных физических средах (в космосе, в воздухе, на суше, на воде и под водой).

Опираясь на принципы сетецентрического управления сегодня многие ведущие страны мира активно ведут разработки смешанных робототехнических группировок, взаимодействующих в едином информационно-управляющем пространстве (поле) [1], в рамках решения тактических боевых и разведывательных задач. Также все чаще на РТК возлагаются миссии в Арктике, Антарктике и других труднодоступных районах мирового океана и космоса. Такие РТК в целом можно отнести к классу глобально перемещающихся объектов (ГПО), находящихся на большом удалении от базовых пунктов управления (БПУ), что требует решения задачи устойчивого доведения управляющей информации по каналам связи с переменными параметрами в условиях дестабилизирующих воздействий естественного и искусственного характера.

Несмотря на повышенное внимание операторов и абонентов связи к спутниковым, волоконно-оптическим, радиорелейным и метеорным системам отношение к сверхдлинноволновой (СДВ) и декаметровый (ДКМ) радиосвязи, ее роли и месту в общей системе обмена данными остается актуальным. Развитие и улучшение характеристик радиосвязи возможно путем широкого использования современных достижений в области информационных технологий с использованием: концепций и алгоритмов «программируемого радио» (*SDR — Software-Defined Radio*); новой парадигмы беспроводной связи — когнитивного радио (*CRS — Cognitive Radio System*), способного самостоятельно определять наилучшую спектральную позицию для организации связи, создавая минимум помех другим пользователям; эффективных методов модуляции и кодирования и др. [2].

Реализация перспективных технологий требует значительного увеличения вычислительных процедур, особенно для аппаратуры связи, предназначенной для работы в каналах с переменными параметрами. Это в свою очередь, приводит к необходимости модернизации существующих и созданию новых высокоэффективных автоматизированных систем радиосвязи и радиомониторинга со сложными алгоритмами функционирования и обработки информации, которые могут быть реализованы с использованием аппарата искусственных нейронных сетей (НС) [3], базирующегося на ряде теорем, определяющих аппроксимирующие свойства многослойных НС. При этом в системе радиомониторинга реализуется большой объем

вычислительных процедур, вызванный обработкой больших массивов входной, параллельно поступающей информации, а также при частично искаженных или отсутствующих данных об объекте, что характерно в случае обработки информации, поступающей на фоне шумов (естественных и искусственных помех) по каналу с переменными параметрами [4].

Цель статьи: Оценка комплексного использования разнородных каналов связи для управления РТК при глобальных удалениях от пункта управления на основе формирования структуры единой системы радиомониторинга с применением принципов когнитивного радио и техническая реализация её элементов.

1. Когнитивное радио как средство повышения эффективности использования разнородных каналов связи для управления РТК

Стремительное развитие беспроводных телекоммуникационных систем и повсеместное вхождение в наш обиход радиоустройств широкого круга применения привело к серьезной проблеме. Практически весь частотный диапазон на сегодня распределен и лицензирован, однако при этом, проведенные исследования показали, что спектр, как драгоценный природный ресурс, используется недостаточно эффективно. Существенным образом повысить коэффициент использования спектра позволяет механизм динамического управления, согласно которому вторичным пользователям (не закрепленным за данным частотным диапазоном) предоставляется возможность передавать сообщения в диапазоне первичных пользователей в то время, пока этот диапазон не занят штатной работой передающих устройств [2].

В настоящее время за рубежом активно ведутся работы по построению систем широкополосного радиодоступа в так называемом телевизионном диапазоне волн (54–862 МГц), для которого разработан стандарт IEEE802.22 беспроводной передачи данных, основанный на принципах когнитивного радио, в том числе предусматривающий возможность безлицензионного использования частотного ресурса.

Продвижение данного направления развития интеллектуальных радиосистем выдвигает на первый план проведение обоснований и выработки концепции внедрения технологий когнитивного радио и в РФ. В 2012 г. по решению Государственной комиссии по радиочастотам при Министерстве связи и массовым телекоммуникациям в стране создана опытная зона по внедрению когнитивных систем широкополосного беспроводного доступа в РФ в полосе частот 470–686 МГц. Однако на сегодня кроме стандарта IEEE802.22 других нормативных документов, регламентирующих использование систем когнитивного радио в мировом сообществе, пока не принято. Кроме того, как отмечают в Европейском институте электросвязи, имеющиеся технологии пока ещё не обеспечивают все необходимые требования для универсального применения когнитивного радио. Вместе с тем, планируется, что системы связи с программируемыми параметрами должны работать в будущем от 9 кГц до 300 ГГц [5].

Для решения задачи управления мобильными и удаленными (находящимися в труднодоступных районах) объектами, такими как РТК космического, воздушного, морского и наземного базирования, радиосвязь имеет первостепенное значение. Однако воздействия естественного и искусственного характера агрессивной внешней среды на радиолинии и каналы управления ГПО в различных физических средах, в том числе и под водой, резко снижают эффективность информационного обмена и каналов управления, поэтому поиск путей комплексного использования разнородных каналов связи (классифицируемых по частотному диапазону) является важной и актуальной задачей, решение которой требует модернизации принципов в организации управления РТК и других ГПО (в том числе и находящихся в смешанной группе при решении общей миссии) на глобальном удалении от базового пункта управления (БПУ).

Из всех диапазонов для связи с ГПО на сегодня наиболее применимыми являются сантиметровые (каналы космической связи — КС), ДКМ и СДВ диапазоны волн. Устойчивость каналов КС во многом зависит от наличия и состояния ресурса наземной и космической группировки (использование КС будут рассмотрено в п. 3 статьи). Наиболее специфическими участками радиочастотной области для решения поставленной в статье целевой установки, в силу ряда особенностей, являются СДВ и ДКМ диапазоны частот. Это обусловлено рядом объективных причин, основными из которых являются: возможность доведения информации на дальние и сверхдальние (до 12 тыс. км и более) расстояния; сравнительно низкая стоимость и компактность технических средств ДКМ радиолиний; особенности СДВ волн проникать в толщу воды, делающие их безальтернативными для связи с погруженными РТК морского базирования. Обеспечение

устойчивого управления ГПО на больших расстояниях невозможно без комплексного использования радиоканалов и смешанной группировки объектов связи, базирующихся на суше, на море, в воздухе и в космосе. Интересы комплексного применения разнородных каналов управления в свою очередь требуют формирования ведомственной единой системы радиомониторинга.

2. Замысел построения единой системы радиомониторинга в интересах комплексного применения разнородных каналов управления

В работах [2, 6, 7] рассмотрены вопросы переноса принципов когнитивного радио на ДКМ диапазон волн. А поскольку научным сообществом ставится задача на охват в перспективе и нижнего диапазона частот вплоть до 9 кГц [5], то рассмотрим вариант построения единой системы радиомониторинга (ЕСРМ) для комплексного использования разнородных каналов связи в интересах управления РТК и других ГПО на основе принципов когнитивного радио.

Замысел построения такой системы представлен на рис. 1 и соответствует территориально-распределенной системе, в состав которой должны войти автоматизированный центр сбора и обработки данных (АЦСОД), сопряженный с территориально-разнесенными программно-аппаратными комплексами (ПАК) радиомониторинга (РМ) ведомства в каждом регионе: ПАК «РМ-Запад», ПАК «РМ-Восток», ПАК «РМ-Юг», и ПАК «РМ-Север», ПАК «РМ-Центр» и передающего центра системы радиомониторинга (ПДРЦ-РМ), предназначенного для передачи информации в частотном диапазоне 3÷80 МГц и использующийся для зондирования состояния ионосферы с целью определения оптимальных рабочих частот для заявляемых к использованию радиотрасс между БПУ и РТК.

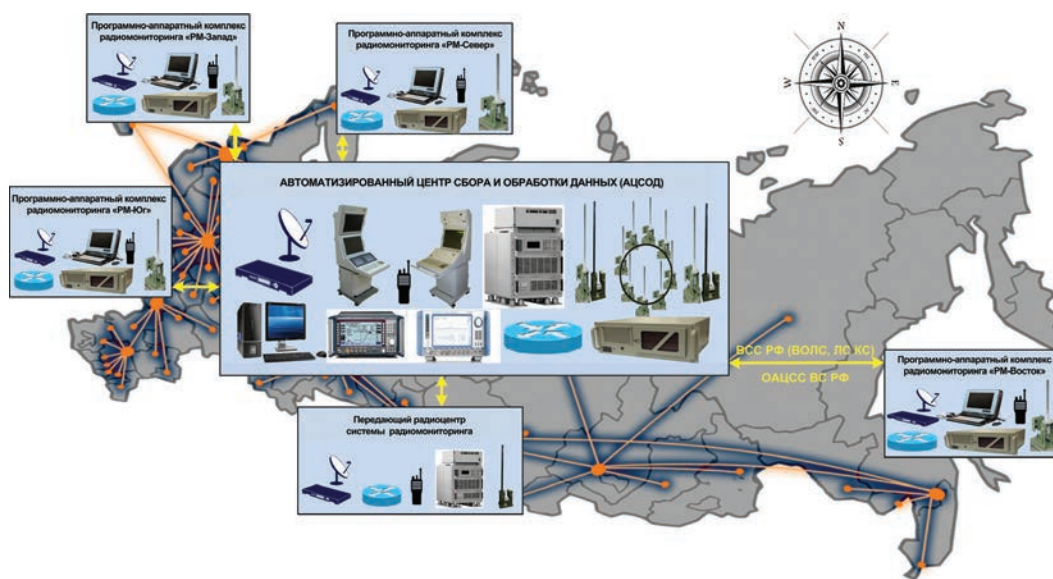


Рис. 1. Вариант структуры единой системы радиомониторинга для комплексного применения разнородных каналов связи в интересах управления РТК

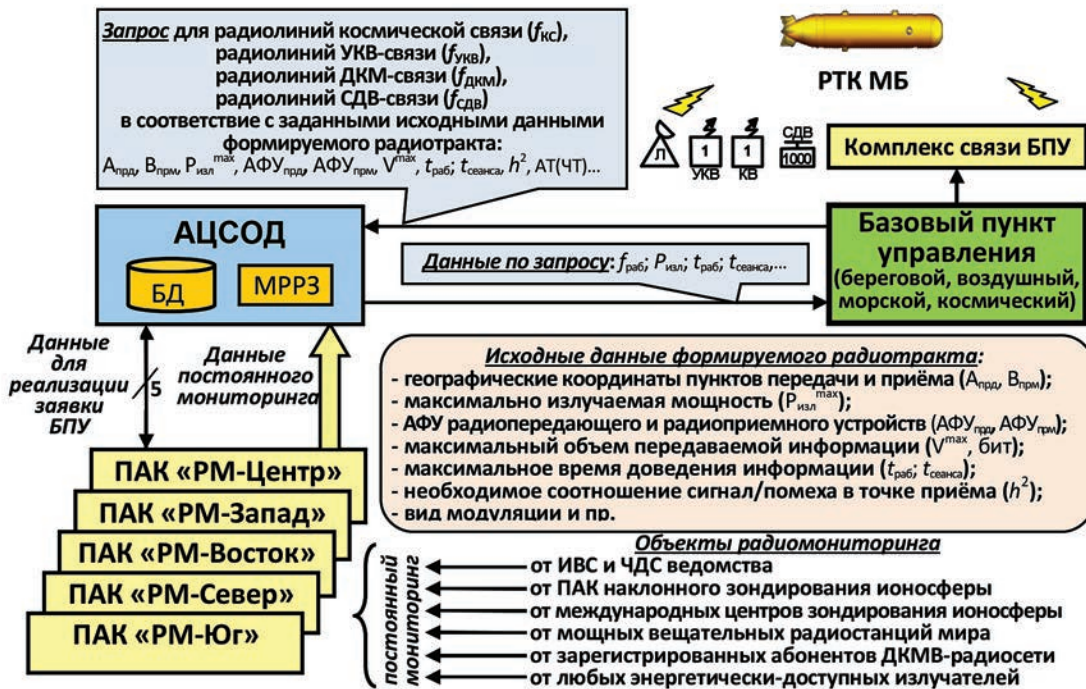


Рис. 2. Структура взаимодействия элементов системы радиомониторинга и БПУ

Взаимодействие (управление, контроль, доведение информации) АЦСОД, ПАК РМ и ПДРЦ-РМ осуществляется по каналам Интернет и спутниковому каналу связи с использованием системы «Гонец Д1М» [8].

Обобщенный состав и структура взаимодействия основных элементов системы радиомониторинга представлена на рис. 2. Основными элементами АЦСОД являются база данных (БД) и модуль решения расчетных задач (МРРЗ).

В каждый из территориально-разнесенных ПАК РМ входят панорамное многоканальное радиоприемное устройство (МРПУ) [9], кольцевая дистанционно-управляемая фазированная антенная решетка (ФАР) [4] и средства дистанционного управления устройствами ПАК РМ.

Выделение рабочих частот (частотных диапазонов) осуществляется по запросу БПУ на комплексное использование радиоканалов в интересах управления РТК (ГПО), который направляется в АЦСОД. При этом запрос на комплексное использование каналов радиосвязи при построении космических, ультракоротковолновых (УКВ), ДКМ и СДВ-радиолиний (РЛ) должен содержать: географические координаты пунктов передачи и приёма; значение излучаемой мощности; тип антенно-фидерных устройств (АФУ) радиопередатчика и радиоприемника; вид модуляции и режим передачи информации; необходимое соотношение сигнал/помеха в точке приёма.

Территориально-разнесенные ПАК РМ постоянно, в реальном масштабе времени, осуществляют сбор и доведение до АЦСОД статистических данных: от ионосферно-волновой (ИВС) и частотно-диспетчерской (ЧДС) служб ведомства; ПАК наклонного зондирования ионосферы, в том числе и от международных центров зондирования

ионосферы; мощных вещательных радиостанций мира; зарегистрированных абонентов ДКМ-радиосети и других энергетически-доступных излучателей (рис. 2).

Кроме того в МРРЗ осуществляется расчет порогового (максимального) уровня помех различного типа (случайных и преднамеренных) в точке приёма ($h_{пор}$) [10]. Необходимые исходные данные по напряженности поля в точке приема для определения $h_{пор}$ вычисляются по методике, представленной в [11].

В расчетном модуле АЦСОД реализуется определение оптимального диапазона рабочих частот, с учетом имеющихся в БД «запрещенных» частотных участков. При определении указанного оптимального диапазона учитывают время года (зима/лето), суток (день/ночь), протяженность трассы, географическое направление, а также данные постоянного мониторинга.

Основными элементами ПАК РМ, обеспечивающими возможность выполнения возлагаемых на них задач являются: антенно-фидерная подсистема (АФП); технические средства (ТС) визуального наблюдения радиосигналов в диапазоне 0,01÷80 МГц (на рис. 3 данные ТС представлены в виде МРПУ); ТС автоматизированного мониторинга работы штатных радиолиний ведомства; программно конфигурируемые модули формирования и обработки сигналов (сообщений); модуль дистанционного контроля, управления и обмена данными (МДКУ); контрольно-измерительное оборудование, рис. 1.

Одним из элементов, определяющих помехоустойчивость приема информации при обмене данными по радиоканалу, является АФП. В зависимости от решаемых задач и доступных площадей для размещения на стационарных

и мобильных объектах, как правило, используются «простые» приемные антенны штыревого или дипольного типа, малогабаритные активные антенны, ФАР, в том числе с методом «цифровой» формирования диаграммы направленности.

Для сравнительной эффективности приема информации в реальных условиях ведения связи при использовании антенн различного типа на РТК в предлагаемой ЕСРМ необходимо установить (вариант): две активные антенны типа К-625 российского производства; две активные антенны типа HE-010 фирмы Roder&Schwartz, предназначенные для работы в СДВ-ДКМ диапазонах волн; восемь штыревых антенн типа АПС-6Б, размещаемых в виде «кольцевой решетки» с радиусом 8 м; антенный комплекс с композиционной структурой 15Э1852-2; плоскостную антенну магнитного типа «Ротация»; две антенны спутниковой связи системы «Гонец-Д1М»; одну передающую антенну К-661-М.

На антенной площадке также должны быть предусмотрены места для установки и подключения антенн других типов.

В технических помещениях АЦСОД, помимо перечисленных выше элементов, размещается высокочастотный антенный коммутатор-разветвитель, блоки питания, модуль формирования преднамеренных помех (МФПП), радиопе-

редающее устройство (РПДУ), усилитель мощности (УМ) с антенным согласующим устройством (АнСУ), а также модуль формирования «цифровой» мультидиаграммной матрицы [4], структура которого приведена на рис. 3.

Возможность «параллельной» работы АФУ различных типов в различных условиях связи позволит объективно осуществлять выбор наиболее эффективных антенных устройств для решения конкретных задач, в том числе обеспечения приема в условиях действия случайных и преднамеренных помех.

На рис. 4 представлена укрупненная структурно-функциональная схема ПАК. Конструктивно модули управления и средства отображения (мониторы) интегрированы в автоматизированное рабочее место оператора системы мониторинга (АРМ-РМ), что позволит производить визуальный анализ сигналов и сообщений, коррекцию программного обеспечения SDR-ТС, управления режимами работы технических средств АЦСОД, а также удаленных ПАК-РМ и ПДРЦ-РМ непосредственно с АРМ-РМ.

Возможность дистанционного управления работой и получения информации от территориально распределенных ПАК-РМ за счет применения МДКУ позволяет

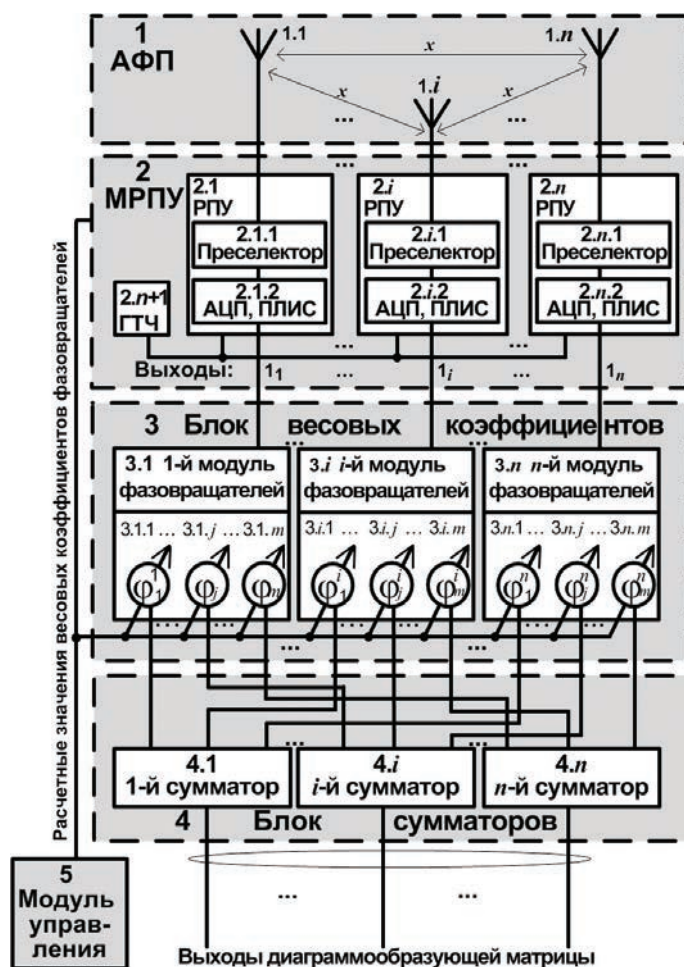


Рис. 3. Модуль формирования «цифровой» мультидиаграммной матрицы

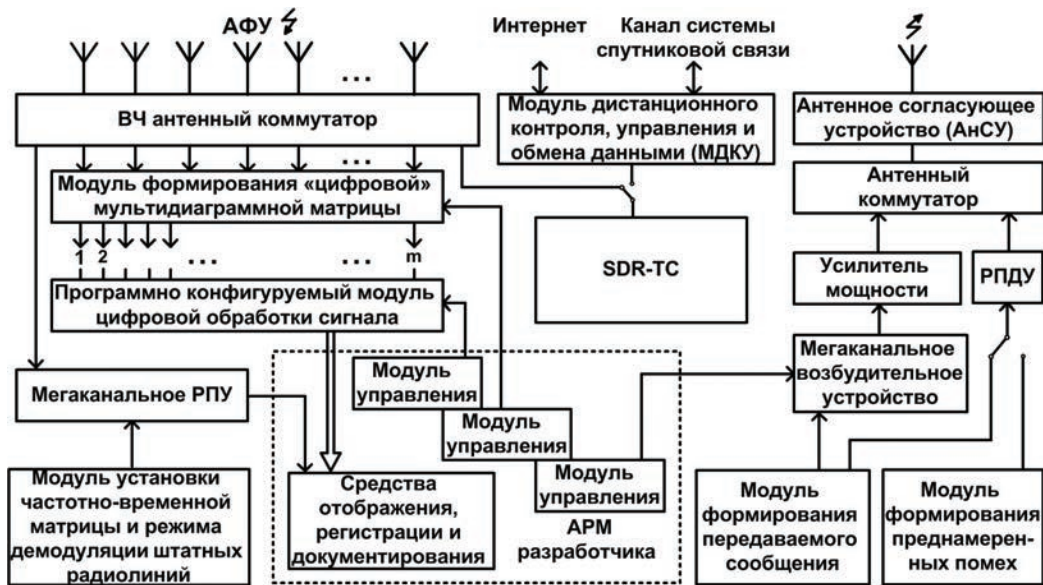


Рис. 4. Структурно-функциональная схема ПАК ЕСРМ

организовать мониторинг как унаследованных штатных РЛ ведомства, так и осуществлять реальные трассовые испытания новых РЛ, без командирования специалистов на удаленные объекты, осуществлять коррекцию технических решений разрабатываемых SDR-TC непосредственно с АРМ-РМ. Внедрение режима «виртуальная командировка» позволит существенно сократить срок разработки (внедрения) новых технологий в области радиосвязи.

Структура удаленного ДКМ ПДРЦ-РМ предлагаемой ЕСРМ в интересах комплексного использования радиоканалов управления РТК приведена на рис. 5.

Как вариант ПДРЦ может быть оснащен: двумя ненаправленными передающими АФУ; усилителем мощности (УМ) ($P \approx 1$ кВт); дистанционно управляемым SDR-возбуждающим устройством; МДКУ, обеспечивающим взаимодействие с АРМ-РМ АЦСОД; РГДУ типа Р-177 (произв. ОАО «Нептун»), реализующим работу в режимах штатных РЛ ведомства. Основными элементами радиоприемного тракта ЕСРМ являются АПФ, цифровое панорамное радиоприемное устройство (РПУ) и модуль контроля, управления и передачи информации.

На первом этапе развертывания АФП используется широкополосная активная антенна, а на втором этапе — кольцевая фазируемая антенная решетка с дистанционным управлением диаграммой направленности (ДН).

В качестве РПУ используется модифицированное мегаканальное радиоприемное устройство (МРПУ) «Радикс» (произв. ООО «АДК»), упрощенная схема которого приведена на рис. 6.

При разработке и построении предложенной единой системы радиомониторинга для комплексного использования радиоканалов управления РТК на ПАК-РМ целесообразно получать цифровой поток непосредственно с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП), однако,

как показывают расчеты и набор статистических данных по средней скорости загрузки (*Uplink*) информации при использовании каналов мобильного Интернета, возможно удовлетворительное доведение только узкой полосы спектра ($\Delta F \approx 150 \div 300$ кГц) в СДВ-ДКМ частотном диапазоне, что реализуется в МРПУ путем использования дополнительного управляемого цифрового полосового фильтра. Вместе с тем, предварительно обработанный в блоке цифровой обработки сигнал, обеспечивающий визуальное отображение спектрограммы на экране монитора в стандарте *Full HD*, требует значительно меньшей скорости передачи в канале по сравнению с передачей всего спектра сигнала и составляет примерно $1 \div 1,5$ Мбит/с, что практически с запасом реализуется мобильным Интернетом.

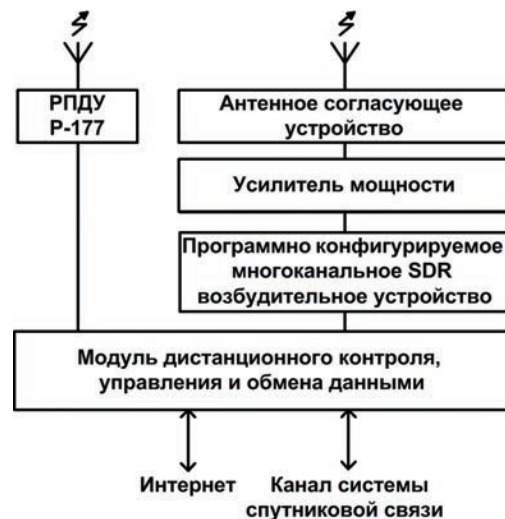


Рис. 5. Структурная схема удаленного передающего радиопередатчика

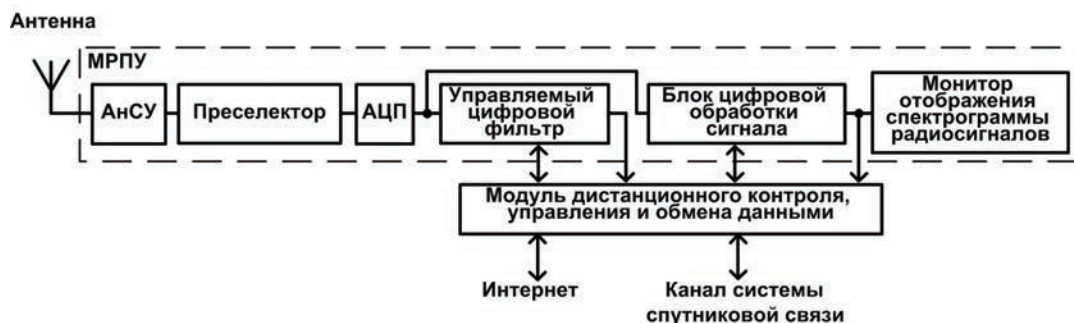


Рис. 6. Упрощенная блок-схема радиоприемного тракта

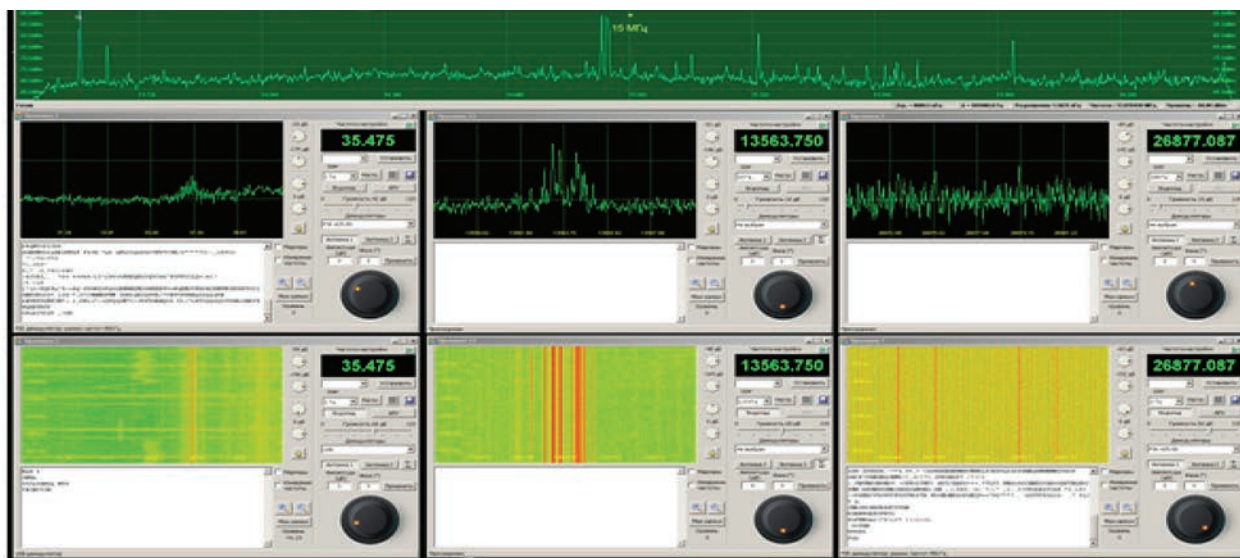


Рис. 7. Скриншоты спектрограмм, полученные с использованием МРПУ

Варианты скриншотов спектрограмм радиосигналов, принимаемых от удаленного ПАК-РМ, и также отображаемых на экране монитора МРПУ, размещаемого на АЦСОД, представлены на рис. 7.

Следует отметить, что ПАК-РМ при использовании малогабаритных активной СДВ-ДКМ антенны и спутниковой антенны системы «Гонец-Д1М», «ориентированных» для установки на техническом здании, представляет из себя быстро разворачиваемый комплекс технических средств (время развертывания и приведения в рабочее состояние составляет около 1 часа) с общим весом не более 40 кг, и может быть размещен на рабочем столе стандартных размеров.

«Радикс» для двух вариантов визуализации принимаемых радиосигналов

3. Обмен данными с РТК в надводном положении

В настоящее время взаимодействие с РТК обеспечивается, в основном, с использованием спутниковой системы связи, *Wi-Fi* и гидроакустической связи, а между РТК (или между морским БПУ и РТК) по гидроакустическому каналу. Однако при этом задача по реализации устойчивого

обмена данными с РТК морского базирования (МБ), удаленными на значительное расстояние от БПУ не решена в полной мере [12]. Рассмотрим возможные методы повышения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) обмена данными с РТК МБ, находящимися в надводном положении. Этот режим относится к автономным управляемым кораблям (катерам) и к РТК в надводном положении.

Безусловно, в этом случае основным видом связи следует считать спутниковый канал обмена данными. В настоящее время в рамках федеральной космической программы РФ до 2015 г. разработана и развернута многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец-Д1М». Основные технические характеристики абонентского терминала этой системы приведены в табл. 1 с учетом материалов, представленных в [8].

Таким образом, поскольку МСПСС «Гонец-ДМ1» обеспечивает возможность организации связи с абонентами, находящимися на глобальных расстояниях от БПУ, обладает малыми массогабаритными показателями и энергопотреблением, его использование на РТК для обеспечения обмена данными с БПУ представляется вполне обоснованным.

Таблица 1

Диапазон частот, ГГц	0,3–0,4
Максимальная скорость передачи информации, кбит/с: – бортовой комплекс — абонентский терминал; – абонентский терминал — бортовой комплекс	76,8 9,6
Мощность абонентского передатчика, Вт	10
Объем сообщения, передаваемого в одном сеансе связи, кбайт	до 20
Диаграмма направленности антенны абонентского комплекта	всенаправленная (антенна не требует системы наведения и сопровождения с учетом траектории движения космического аппарата)
Устойчивость к воздействию внешних факторов	пониженное атмосферное давление, соляной туман, пыль, песок, иней, дождь. Для реализации дополнительных требований комплект размещается в специальном защищенном корпусе (включая антенную систему)
Основные режимы работы МСПСС «Гонец-ДМ1»:	обмен сообщениями между абонентами системы, находящимися в любой точке Земного шара; передача данных о местоположении абонентов, полученных с использованием системы ГЛОНАС; циркулярная передача сообщений группе пользователей
Напряжение электропитания, В	12
Минимальная масса абонентского комплекта, кг	0,4

Вместе с тем, в условиях сильного волнения моря (заливание водой антенны), при нахождении РТК в подледном положении, а также выхода из строя элементов в тракте спутниковой связи, эффективность её применения представляется проблематичной.

Учитывая возможность глобального перемещения РТК (в 2009 г. экспериментальный глайдер США менее чем за 7,5 месяцев пересек Атлантический океан, преодолев при этом около 11,7 тыс. км [12]) в качестве резервной связи целесообразно использовать ДКМ и СДВ РЛ, обеспечива-

ющие возможность доведения информации до объектов, удаленных от берега на расстояния до 12 тыс. км и более.

При оценке необходимой мощности передатчика для обеспечения устойчивого обмена данными с автономными катерами и РТК, находящимися в надводном положении, необходимо помимо параметров антенно-фидерных передающих (приемных) подсистем и эффективности сигнально-кодовых конструкций передаваемого сообщения, учитывать характеристики атмосферных помех, а также помех от посторонних источников излучения, причем, минимально необходимую энергетику радиолинии целесообразно оценивать с учетом всегда присутствующих атмосферных шумов.

На рис. 8 представлена в графическом виде область, в которой с вероятностью $P > 0,99$ находятся коэффициенты внешнего шума F_a , для СДВ — ДКМ диапазонов частот. При этом среднеквадратичное значение напряженности поля шумов в децибелах (относительно мкВ/м) определяется выражением [13]:

$$E_n = F_a + 20 \log f_c + 10 \log \Delta f_c - 95,5, \quad (1)$$

где $F_a = 10 \log (P_a^{шл} / kT_0)$; $P_a^{шл}$ — мощность атмосферных шумов в полосе сигнала (Ватт); Δf_c — ширина полосы принимаемого сигнала (Гц); f_c — «несущая» частота сигнала (МГц); k — постоянная Больцмана; T_0 — принятая эталонная температура (290° К).

На рис. 9 приведены графики зависимости уровня E_n для различных значений Δf_c и f_c , рассчитанные с использованием формулы (1) для верхней границы коэффициента внешнего шума F_a (см. рис. 1, пунктирная кривая).

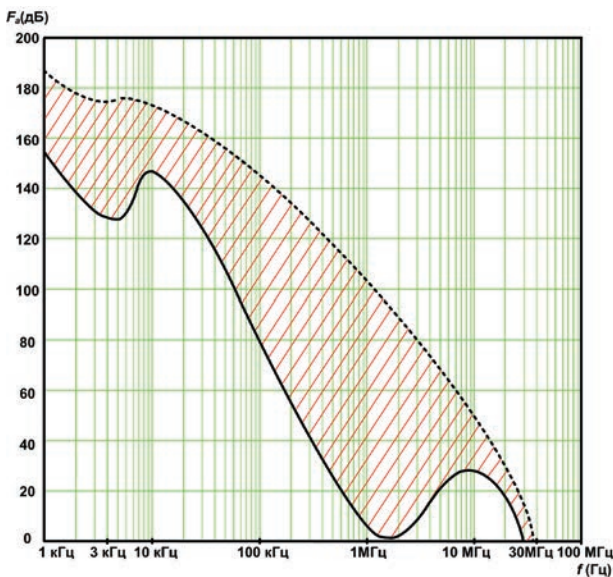


Рис. 8. Значения коэффициентов внешнего шума [13]

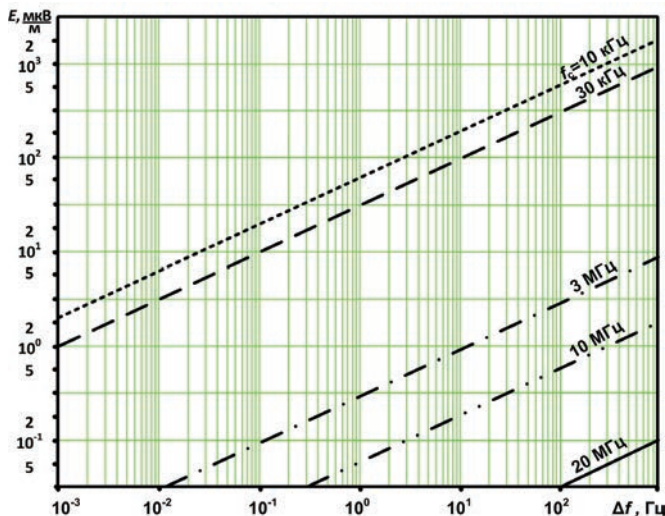


Рис. 9. Зависимость напряженности поля шумов от частотной полосы приема

Из анализа графиков рис. 9 и формулы (1) следует, что для повышения надежности связи в условиях естественных помех необходимо увеличивать мощность передачи сообщения или уменьшать полосу излучаемого сигнала.

Оценку значений необходимой мощности излучения для обеспечения РТК устойчивого приема на радиотрассах протяженностью до 1 тыс. км для ближней морской зоны можно провести с использованием графиков, представленных в [14]. На рис. 10 приведен график значений напряженности поля для нескольких номиналов частот СДВ-ДКМ диапазонов волн, характеризующих ближнюю морскую зону (заштрихованные области соответствуют уровням напряженности поля атмосферных шумов, ожидаемых с вероятностью $P > 0,99$). На рис. 11 приведены аналогичные графики для трасс протяженностью более 1 тыс. км (при ионосферном распространении радиоволн).

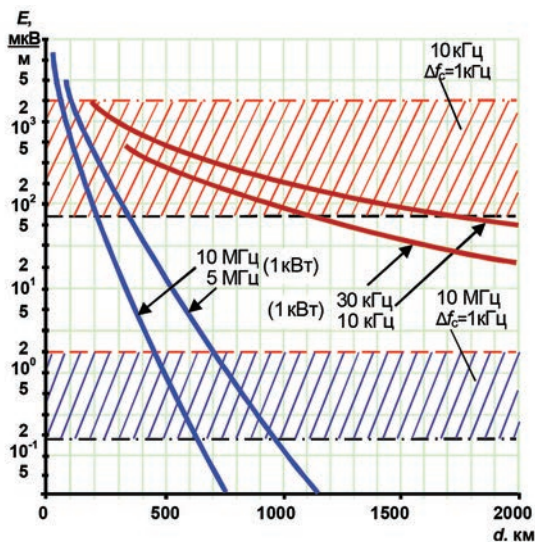


Рис. 10. Значения напряженности поля сигнала для ближней морской зоны

Для ДКМ диапазона расчет проводился с использованием полуэмпирической формулы Неволлина-Щепотина, полученной на основе усреднения медианных значений напряженности поля для морских трасс при работе на оптимальных частотах [15]:

$$E = \frac{122}{d_t} \sqrt{\frac{PD}{0,0021 + \sin \theta}} \exp\left(-\frac{3,8 \cdot 10^{-2}}{\lambda^{0,2}} d_t\right), \quad (2)$$

где P — мощность излучения сигнала (кВт); D — коэффициент усиления антенны; d_t — дальность трассы (тыс. км); θ — угловое расстояние между пунктами приема и передачи; λ — длина излучаемой волны (м).

Расчеты для частот СДВ диапазона проводились по модифицированной формуле Остина [14–16]

$$E = 120 \sqrt{\frac{PD}{d_t \sin \theta}} \exp(-0,0457 f^{0,6} d_t), \quad (3)$$

где f — частота излучения сигнала в кГц. (Отметим, что необходимую мощность излучения для достижения требуемой напряженности поля $E_{тр}$ можно определить из соотношения

$$P_n = \left(\frac{E_{тр}}{E}\right)^2, \text{ кВт,}$$

где значение E , соответствующее заданной протяженности трассы, берется из графиков рис. 10 (11) или определяется по формулам 2 (3) при $D = 1$ и $P = 1$ кВт.

Красной пунктирной линией на графике рис. 4 приведено максимально ожидаемое значение напряженности поля атмосферных шумов, соответствующее величине $\Delta f_c \approx 15$ кГц ($f_c = 10$ МГц), а штрихпунктирной черной — минимально ожидаемое значение E_n для тех же значений Δf_c и f_c .

Из анализа графика следует, что в отсутствии случайных (преднамеренных) помех в ДКМ диапазоне, даже на радиотрассах с глобальной протяженностью может быть достигнута значительная скорость передачи информации.

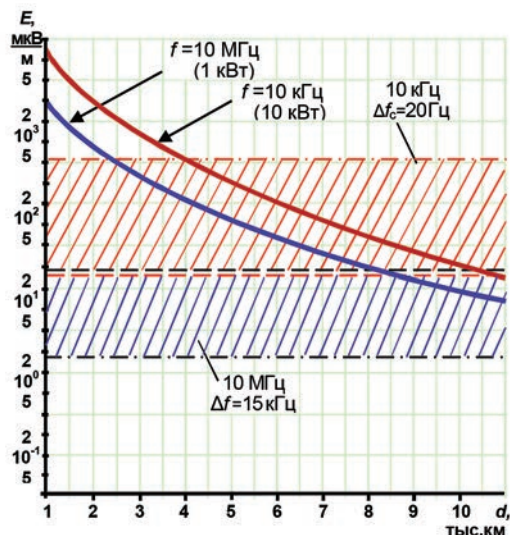


Рис. 11. Значения напряженности поля сигнала при ионосферном распространении СДВ-ДКМ волн

Так для трассы с $d \approx 6$ тыс. км и мощности излучения сигнала $P_c \approx 1$ кВт, исходя из соотношения [10]:

$$V = \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{\Delta f_c N_o} \right)^{\Delta f_c}$$

где V — скорость передачи, N_o — спектральная плотность шума, получим диапазон возможных скоростей передачи для рассматриваемого случая: $V_{\min+\max} \approx 10 \div 150$ кбит/с, что позволяет обеспечить доведение формуляра по коррекции программы миссии РТК в режиме *on-line*.

Оперативность управления РТК по СДВ каналу существенно ниже. Например, даже при минимально ожидаемом уровне атмосферных помех (рис. 11, черная пунктирная линия) скорость передачи для достоверного доведения команды до РТК для $d \approx 6$ тыс. км и $P_c \approx 10$ кВт составит примерно $V \approx 80 \div 90$ бит/с. Из анализа, проведенного в [6], а также представленных формул и графиков следует, что достоверное доведение информации до удаленных РТК в СДВ диапазоне волн при скорости передачи до 10 бит/с ($\Delta f_c \approx 10$ Гц) может быть обеспечено только при $P_c > 100$ кВт, а в ДКМ даже при $V \approx 300 \div 500$ бит/с потребуется $P_c > 500$ Вт.

Таким образом, при использовании ДКМ РЛ обеспечивается возможность доведения информации до удаленных РТК при мощности излучения меньшей, чем при использовании СДВ радиолиний при этом реализуется более высокая скорость передачи. Однако, преимуществом СДВ РЛ является относительная стабильность распространения радиоволн при возмущениях ионосферы, а также существенно меньший коэффициент ослабления напряженности поля при распространении в водной среде (см. графики на рис. 12), что позволяет обеспечивать прием информации при залипании антенны водой, а также в подледном и подводном положении (до $15 \div 20$ м) в случае использования плоскостных ферритовых активных антенн.

Исходя из этого, в качестве резервной связи целесообразно использовать передачу данных по СДВ и ДКМ радиолиниям, особенно в случае неполной информации о координатах и техническом состоянии РТК. При этом в силу ограниченности габаритов РТК следует использовать единую широкополосную приемную антенну с минимальными размерами. Этим требованием в большей степени соответствуют активные антенные системы (ААС). Применение ААС дает возможность оптимизировать соотношение сигнал/(помехи+шум) на входе радиоприемного устройства, расширить полосу пропускания, обеспечить требуемые параметры для согласования с фидером, существенно сократить габариты по сравнению с пассивными приемными антеннами.

Современные ААС позволяют достичь чувствительности $0,1 \div 0,5$ мкВ при динамическом диапазоне до $120 \div 130$ дБ, обеспечивая прием без дополнительных настроек в полосе частот СДВ-ДКМ диапазонов волн. Так штыревая активная антенна фирмы «Rohde&Schwarz» HE-010 при высоте $h = 1$ м реализует прием в полосе 10 кГц \div 30 МГц при динамическом диапазоне до 120 дБ, а ААС К-625, российского производства, работает в диапазоне волн 60 кГц \div 80 МГц и по чувствительности превосходит шестиметровую

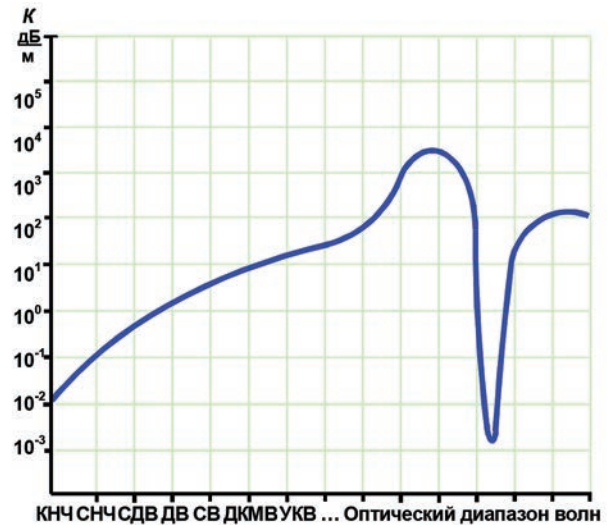


Рис. 12. Значения коэффициента ослабления волн различного диапазона в водной среде

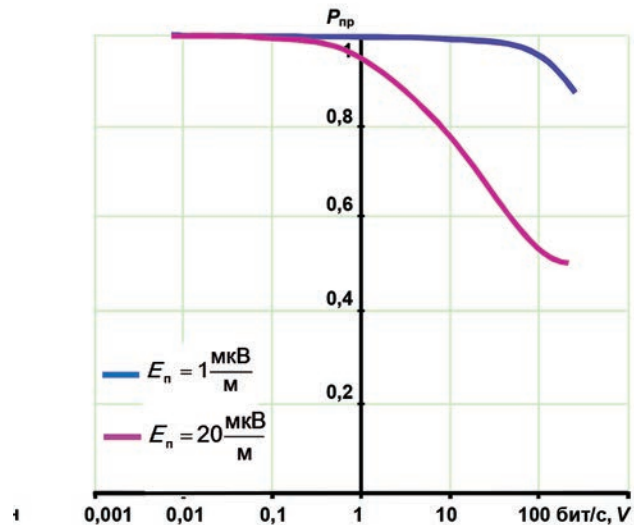


Рис. 13. Вероятность правильного приема бита сообщения для трассы протяженностью 6 тыс. км., мощности излучения $P_{\text{изл}} = 10$ Вт при разных скоростях передачи V

вую пассивную штыревую антенну. Ферритовые плоскостные ААС имеют меньшую чувствительность, чем штыревые, однако в подводном или подледном положении РТК они в силу своей «геометрии» становятся основными для приема сообщений в СДВ диапазоне волн. Следовательно, РТК, предназначенные для функционирования только в надводном положении целесообразно оборудовать приемными активными штыревыми антеннами, а РТК, предназначенными также и для выполнения миссии в подводном положении, следует оборудовать телескопическими штыревыми, а также плоскостными ферритовыми ААС.

Использование выпускных буксируемых антенн параванного типа на малогабаритных РТК проблематично из-за

значительных массогабаритных показателей тросовой лебедки и ограниченности энергоресурсов РТК, низкой механической надежности буксируемой антенны на обрыв (особенно в районах со сложным донным рельефом) и по ряду других причин.

Из приведенных выше материалов следует, что для повышения надежности связи в условиях воздействия атмосферных помех, помимо увеличения мощности излучения, можно уменьшать полосу частот передаваемого сигнала, что, в свою очередь, приведет к снижению скорости передачи команд управления, а это может оказаться неприемлемым, например, при коррекции программы миссии РТК в экстремальной надводной (подводной) обстановке.

В работах [6, 7] рассмотрен способ эффективной передачи данных с использованием мегаканальных возбуждающих устройств. Параллельное излучение элементов сообщения позволяет даже при низкой скорости передачи каждого бита достичь необходимого времени доведения и помехоустойчивости приема сообщения «в целом».

Зависимость вероятности правильного приема бита (элемента) сообщения для трассы протяженностью 6 тыс. км, мощности излучения $P_{\text{изл}} = 10$ Вт и разных скоростях передачи V (бит/с) при напряженности поля помех $E_n = 1$ мкВ/м для $\Delta f_c \approx 1$ кГц, (что соответствует наличию только атмосферных шумов) и $E_n = 20$ мкВ/м, характерных для воздействия атмосферных шумов и случайных помех в ДКМ диапазоне волн, приведена на графике рис. 13

Вместе с тем, при отсутствии возможности получения данных по оптимальной рабочей частоте (ОРЧ) в реальном

масштабе времени (что характерно для связи с глобально удаленными РТК и при наличии непрогнозируемых локальных неоднородностей ионосферы) целесообразно вести передачу в широком диапазоне частот (практически в полосе $7 \div 25$ МГц). Известно, что эффективность передающей антенны в таком диапазоне без дополнительной настройки АнСУ (что невозможно при параллельной передаче элементов сообщений в широкой полосе частот) оказывается неприемлемо низкой.

Достичь высокого КПД при параллельном излучении сигнала во всем диапазоне возможно путем использования нескольких антенн резонансного типа, каждая из которых «работает» с частотным перекрытием $f_{\text{верх}}/f_{\text{нижн}} \approx 1,3 \div 1,4$. Это позволяет обеспечить передачу эквивалентного суммарного сообщения в зоне оптимальных рабочих частот с максимальным КПД и, таким образом, используя менее мощные радиопередатчики реализовать высокую помехоустойчивость приема. Пример реализации РЛ для реального диапазона частот протяженных ДКМ радиотрасс приведен на рис. 14.

Сообщение, предназначенное для передачи, «закрывается» в блоке кодирования 2 помехоустойчивым кодом. Закодированное сообщение поступает на мегаканальное возбуждающее устройство (ВУ) с модуляторами 5 [6], реализующее параллельную установку частот, задаваемую блоком формирования частотно-временной матрицы псевдослучайной последовательности (БФ ПСП) 4. С выхода каждого мегаканального ВУ параллельно передаваемые биты сообщения поступают на соответствующие усилители мощности (УМ 6.1 — УМ 6.4), блоки сопряжения с антеннами (БС 7.1 — БС 7.4) и на антенны 8.1–8.4.

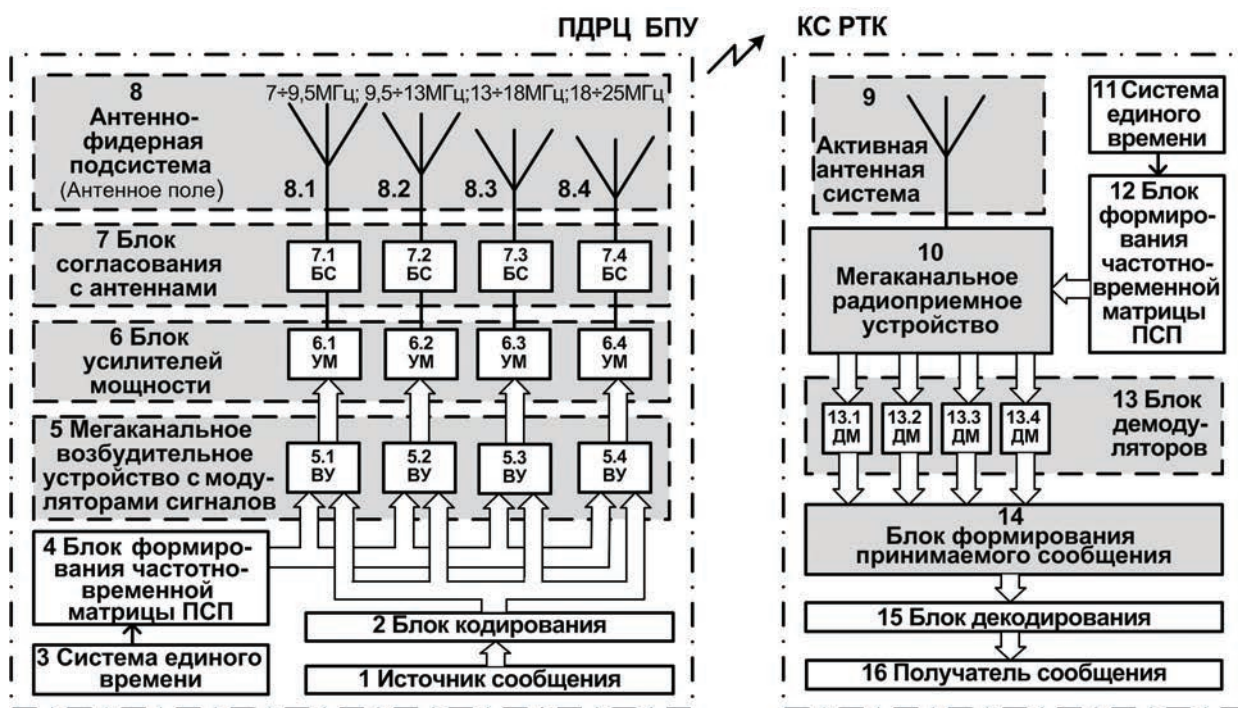


Рис. 14. Структурная схема радиолинии управления РТК

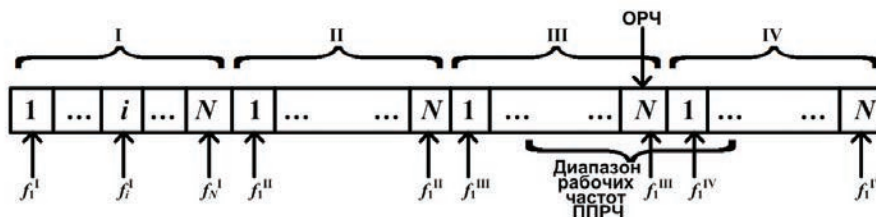


Рис. 15. Структура формирования параллельно передаваемых элементов сообщения в частотных поддиапазонах

Для приема в комплексе связи РТК используется малогабаритная широкополосная активная антенная система 9. Принятый сигнал с ААС поступает на мегаканальное радиоприемное устройство 10 [17] и после демодуляции в блоке 13 выдается на обработку в блок формирования принимаемого сообщения (БФПС) 14. В БФ ПСП, в зависимости от метода кодирования, может быть реализован один из оптимальных алгоритмов совместной обработки информации, принятой по параллельным каналам: поэлементное весовое сложение, позначное весовое сложение, прием «в целом» и т. п. [18].

Для исключения потери элементов сообщения (из-за несовпадения рабочих частот с диапазоном оптимального прохождения радиоволн) в каждом поддиапазоне формируется их частотно-позиционная последовательность для параллельной передачи в соответствии со структурой матрицы формирования ПСП канальных комплектов рабочих частот приведенной на рис. 15.

При этом необходимо подчеркнуть:

1. Предлагаемое построение радиолинии позволяет обеспечить снижение вероятности пакетирования ошибок, что повышает корректирующую (исправляющую) способность кодовой конструкции.

2. Переход на низкие скорости передачи каждого бита сообщения позволяет отказаться от системы единого времени (СЕВ) и предварительной передачи синхронизирующей группы, необходимой при быстрой последовательной побитной ППРЧ, поскольку рассинхронизация перестройки частот удаленных друг от друга ПДРЦ и МРПУ 9 связанная со скоростью распространения радиоволн (≈ 10 мс на 3000 км) практически не будет влиять на эффективность приема элемента сообщения длительностью более 1 с.

3. Параллельный прием «выстроенных» в постоянной последовательности элементов (рис. 15) позволяет всегда восстановить переданное сообщение при любом реальном значении диапазона ОРЧ. Это обусловлено тем, что, при совместной оптимальной обработке в блоке весового сложения [4] будут участвовать любые элементы сообщения, принятые в I ÷ IV частотных участках (рис. 14 и 15).

4. Низкая энергетика и сверхузкая полоса передачи каждого бита сообщения обеспечивают высокую электромагнитную совместимость с другими системами (комплексами).

5. Использование активной антенной системы [19] обеспечивает одновременный прием во всей полосе частот при использовании МРПУ, построенного на SDR-технологиях.

4. Методы доведения информации до глубокопогруженных объектов

При нахождении РТК МБ в подводном положении на глубине более 15–20 м связь с ним без выпускного антенного устройства или буя-ретранслятора даже по СДВ радиоканалу, как было показано выше, не обеспечивается. В то же время, установка таких устройств на РТК проблематична.

Для решения задачи по доведению информации до глубокопогруженных объектов специалистами предлагается использование различных видов и методов связи, в том числе: оптической, гидроакустической, параметрической, электромагнитной, а также теневого метода приема гидроакустических волн. (Рассмотрение нестандартных методов передачи информации, таких как нейтринная, торсионная, поли-тронная, солитонная связь и т. д. выходит за рамки статьи).

Значительно меньшим коэффициентом затухания в водной среде, чем радиоволны СДВ диапазона, обладают волны оптического (сине-зеленый спектр) диапазона частот (рис. 12), что позволяет использовать *лазерную связь* (ЛС) в этом спектре для взаимодействия с подводными объектами при задействовании космических аппаратов (КА) или самолетов-ретрансляторов [12, 20, 21].

Однако применение ЛС с глобально перемещающимися РТК технически и экономически в настоящее время недостаточно оправдано. Это объясняется сравнительно большими габаритами входного модуля оптического приемника и необходимостью точной ориентации его диаграммы направленности (ДН) на источник лазерного излучения. В то же время, автономные малогабаритные навигационные устройства, предназначенные для определения координат РТК в процессе его подводного перемещения, не обеспечивают приемлемую точность определения местоположения в течение выполнения длительной миссии, вследствие чего подводному аппарату периодически необходимо осуществлять определение реальных координат путем всплытия и реализации взаимодействия с системой ГЛОНАС (GPS) [22]. Очевидно, что в этом случае обмен данными с базовой станцией может быть организован по основному (спутниковому) каналу обмена данными без задействования оптического канала связи. Кроме того, для надежной ЛС с использованием КА (самолетов-ретрансляторов) при доведении информации до погруженных РТК необходимо выполнение ряда условий, таких как низкая мутность воды, высокая прозрачность льда, отсутствие экстремальных погодных условий (снегопад, «густой»

туман, сильный дождь), что реально не может быть обеспечено при длительной миссии РТК.

В работе [23] предлагается обеспечить доведение информации до глубоководных подводных объектов за счет использования эффекта *параметрического* взаимодействия электромагнитной и акустической волн с близкими частотами f_3 и f_a . В поверхностном слое воды (скин-слое) в этом случае, как утверждают авторы, формируется новый промодулированный электромагнитный сигнал с разностной частотой $f_p = f_3 - f_a \ll f_3$, что позволяет этому сигналу из-за малого коэффициента ослабления в воде обеспечить допустимое соотношение сигнал/шум на значительных глубинах (порядка 150 м [23]). Однако в настоящее время исследования по возможности реализации рассмотренного метода, по крайней мере, для подводной связи с РТК, проводить нецелесообразно, поскольку на подводных аппаратах с ограниченными размерами и энергоресурсами следует использовать малогабаритные активные антенные системы, эффективность которых при приеме сигналов с частотой $f_p \ll 10$ кГц становится недопустимо низкой.

Обмен данными с глубоководными (до 100 м и более) аппаратами при их удалении от надводного (подводного) пункта базирования на расстояние до 10 км обеспечивается, как правило, путем использования *гидроакустической связи* (ГАС). Для звуковых частот в диапазоне $f_3 \approx 10 \div 50$ кГц (характерных для ГАС), в зависимости от солёности, температуры воды и гидрологии морского района коэффициент ослабления гидроакустической волны α составляет до 10 дБ/км и более, поэтому при значительных удалениях от БПУ при организации подводной ГАС, ввиду ограниченной мощности гидроакустических излучателей на РТК, необходимо обеспечить помимо оптимальной сигнально-кодовой конструкции передаваемой информации, высокую чувствительность приемника акустического сигнала.

Новым, перспективным направлением в этой области является применение *теневого прибора* (ТП), состоящего из комбинации собирающих линз, теневой диафрагмы и фотоприемника [24–26]. При использовании двухканального ТП (приемника) возможно формирование от «круговой» до узконаправленной диаграммы направленности. Основные характеристики экспериментального оптико-акустического приемника (ОАП) приведены в табл. 2 [24].

Таблица 2

Наименование параметра	Значение параметра
Дальность до источника излучения звуковой волны	1 км
Точность определения направления на источник излучения	+3 град
Чувствительность	на уровне естественных шумов моря
Угол обзора	до 360 град
Глубина погружения ОАП	до 500 м
Габариты	50×40×20 см
Масса	менее 15 кг

Учитывая высокую потенциальную чувствительность ТП, целесообразно продолжить работы по снижению их массогабаритных показателей с целью последующего использования на РТК МБ вместо традиционных пьезоэлектрических преобразователей гидроакустических сигналов.

Одним из методов обмена информацией между объектами, находящимися в подводном положении, является *электромагнитная связь*, основанная на использовании эффекта распространения электромагнитных волн в проводящих средах, в том числе в морской воде. При этом электромагнитное поле в рассматриваемой среде создается за счет применения токового диполя (ТД) [27, 28]. Причём потенциал, создаваемый им в точке, удаленной на расстояние $d \gg L$, можно определить по формуле:

$$\Phi_{\text{ТД}} = \frac{\rho}{4\pi} \frac{IL \cos \alpha}{d^2}.$$

Отсюда следует, что максимальное значение $\Phi_{\text{ТД}}$ составит:

$$\Phi_{\text{ТД}}^{\text{max}} = \frac{\rho}{4\pi} \frac{IL}{d^2}, \quad (4)$$

где ρ — удельное сопротивление среды, L — плечо диполя, I — ток, создаваемый диполем, $IL = D$ — дипольный момент токового диполя.

Для расстояния $d = 100$ м в морской воде ($\rho \approx 0,2 \div 1$ Ом·м) при значении шумовой составляющей, характерной для водной среды примерно 20 мкВ и обеспечения соотношения в точке приема сигнал/помеха $P_c/P_{\text{ш}} \approx 3$ из формулы (4) получим следующие значения дипольного момента: $D \approx 38 \div 7,6$ А·м, а при увеличении расстояния до 1 км необходимое для достижения заданного соотношения сигнал/шум значение дипольного момента может составить более 3000 А·м. Оценка возможности реализации таких значительных величин D на борту РТК требует дополнительной конструкторской проработки и экспериментальной проверки, а также определения влияния создаваемого электромагнитного поля на биосферу океана.

Необходимо отметить, что в современных и перспективных проектах РТК для решения задачи по их взаимодействию с другими подводными аппаратами (буями-ретрансляторами) в состав интегрированной системы управления (ИСУ) подводного аппарата в обязательном порядке входит подсистема *гидроакустической связи* (ГАС) [29]. Это обусловлено широким внедрением технологии цифровой обработки сигналов, позволившей реализовать гидроакустические модемы, обеспечивающие функционирование при многолучевом распространении акустического сигнала и при воздействии помех от посторонних излучателей. Для примера на рис. 16 представлена импульсная характеристика многолучевого подводного канала связи протяженностью 10,5 км в котором при испытании модема ВСГС была реализована скорость передачи до 4160 бит/с [30].

Гидроакустические приемные и передающие антенны обеспечиваются системой цифрового синтеза адаптивных диаграмм направленности, а при формировании сигнально-кодовых конструкций передаваемого сообщения

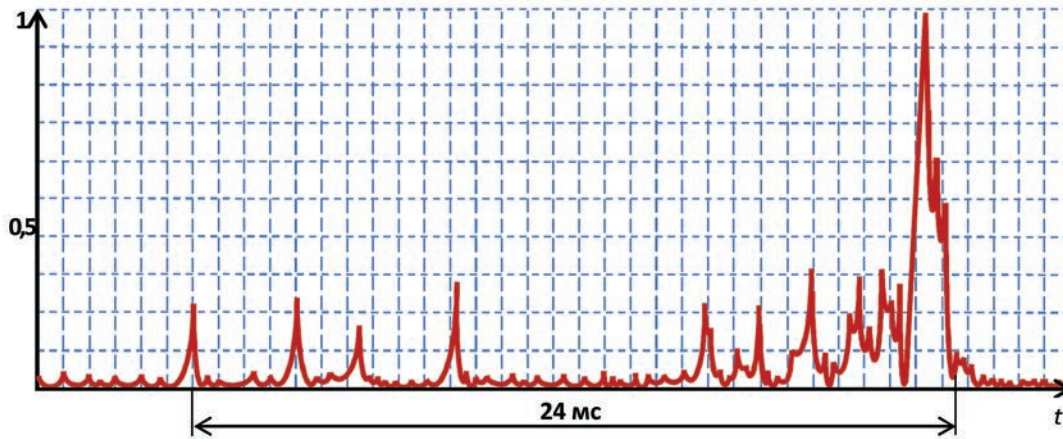


Рис. 16. Импульсная характеристика «многолучевого» подводного канала [30]

используются широкополосные сигналы и помехоустойчивые коды, что позволяет в реальных условиях достичь высоких скоростей передачи данных и требуемой вероятности доведения информации при значительных расстояниях между взаимодействующими объектами под водой. Сравнение характеристик некоторых типов гидроакустических модемов приведены в табл. 3 [30–33].

Отметим, что гидроакустические модемы предыдущего поколения (аналоговые) при той же мощности излучения, что, например, модем ГАСС, обеспечивали на дальностях до 1,5÷2 км скорость передачи 200 ÷ 400 бит/с, имея при этом в 2 ÷ 4 раза большие массогабаритные показатели.

5. Организация связи при групповом выполнении миссии РТК МБ

При оценке вероятности выполнения миссии, требующей глобального удаления РТК от места базирования (т.е. многосуточного подводного похода), необходимо учесть возможность деградации основных элементов РТК, несовместимой с успешным завершением миссии, обусловленной параметрами надежности элементов аппарата, случайными повреждениями РТК, в том числе вследствие столкновений с крупными объектами или представителями морской фауны, айсбергами, рыболовными сетями и т.п., не исключая умышленных повреждений или уничтожения РТК. Причем вероятность выполнения миссии $P_{\text{вм}}$ будет

уменьшаться в зависимости от увеличения количества всплывтий для уточнения координат и проведения сеансов связи с БПУ. Отсюда с очевидностью следует необходимость реализации искусственного интеллекта в ИСУ РТК, позволяющей обеспечить оптимальную трассу перемещения, и её коррекцию в случае наличия незапланированных (случайных) препятствий или угроз. Тем не менее, вследствие указанных факторов при одиночном выполнении миссии, особенно конфиденциальной, $P_{\text{вм}}$ может оказаться неприемлемо низкой. Вместе с тем, при групповом использовании РТК для достижения требуемого значения $P_{\text{вм}}$ достаточно задействовать количество аппаратов N , определяемое из неравенства:

$$N \geq \left\lceil \frac{\log(1 - P_{\text{вм}})}{\log(1 - P_1)} \right\rceil,$$

где P_1 — вероятность выполнения миссии одним РТК.

То есть, даже при $P_1 \approx 0,9$ для достижения $P_{\text{вм}} > 0,999$ ориентировочно потребуется не более трех-четырёх идентично оснащенных и имеющих одинаковую целевую функцию РТК. При этом возможно два варианта их перемещения в заданный удаленный район мирового океана: I вариант — независимое прохождение маршрута каждым РТК; II вариант — групповое выполнение миссии, подразумевающее реализацию «интеллектуального» взаимодействия РТК в процессе совместного перехода в заданный район.

Таблица 3

Параметры модема	S2C R 8/16 Германия	S2C R 40/80 Германия	Acoustic Modem Германия	UWM 2000H США	ВСГС Россия (АО «НИИ Гидросвязи «Штиль»)	ГАСС Россия (ДВО РАН)
Дальность действия (км)	10,0	2,5	30	6,0	10,5	8,0
Максимальная скорость передачи данных (кбит/с)	6,9	35,7	0,145	17,8	57,6	4
Частота излучения (кГц)	8 ÷ 16	40 ÷ 80	-	26,77 ÷ 44,62	18,75 ÷ 42,75	16 ÷ 20
Вероятность ошибки	-	-	-	10–9	10–9	-
Вес модема, (кг)	4,2	2,1	-	-	-	-

В ряде работ [12, 34, 35] для обеспечения живучести подводных объектов (робототехнических подводных комплексов, подводных лодок, РТК и т.п.) предлагается создавать сети подводной интегрированной связи (СПИС) с реализацией составного радио-гидроакустического канала в направлении пункт управления — подводный объект. Так предлагаемый АО «НИИ Гидросвязи «Штиль» вариант построения СПИС реализуется на базе нескольких автономных донных линий связи, каждая из которых состоит из промежуточных пунктов доступа и конечных гидроакустических модемов, объединенных оптоволоконной линией связи. Взаимодействие сети связи с береговым пунктом осуществляется по радиоканалу через автономный гидроакустический буй-ретранслятор, входящий в её состав. Вместе с тем, как отмечается в работе [34], при необходимости развёртывания такой СПИС в отдалённых районах ограничивающими факторами могут оказаться сложность, безопасность и стоимость её развёртывания, а также ограниченность дальности взаимодействия с подводными аппаратами.

Одним из решений при реализации миссии РТК по мониторингу удаленных районов мирового океана может служить создание международной сети малогабаритных буев-ретрансляторов. Однако, решение этой задачи в ближайшее время маловероятно из-за экономических и военно-политических причин.

Таким образом, представляется целесообразным возложить функции обмена данными с БПУ на сами подводные аппараты.

Исходя из этого, в случае выполнения групповой миссии РТК по варианту I суммарное число взаимодействий с БПУ (количество всплытий) за время выполнения миссии составит $M_I = N k$, где k — число заданных сеансов связи с РТК, а по варианту II, $M_{II} = k < M_I$, что в ряде случаев, может оказаться определяющим фактором его использования.

В соответствии с одним из возможных алгоритмов миссии РТК в составе N идентичных аппаратов, на начальном этапе назначается РТК — «Лидер» (РТК-Л), осуществляющий координацию функционирования остальных РТК. При этом программы текущих действий группы хранятся параллельно в БД каждого РТК и периодически взаимно обновляются по каналу ГАС.

РТК-Л при необходимости взаимодействия с БПУ или для уточнения координат группы реализует «назначение» буюм радио-гидро-ретранслятором одного аппарата из группы РТК по расписанию либо по оценке их основных параметров. Причём для проведения следующего сеанса связи, по ряду показателей ретранслятором может быть определен другой РТК (аналогично, по ряду показателей в процессе выполнения миссии автоматически может быть переназначен РТК-Л).

В зависимости от решаемых группой РТК задач, рельефа донной поверхности, наличия внешней угрозы и т.п. РТК-Л может также «принять» решение на реализацию максимального удаления от аппарата, выполняющего функцию буюм-ретранслятора, которое примерно равно:

$L_{\max} = (n - 1) l_{\max}$, где l_{\max} — максимальная дальность связи, реализуемая по каналу ГАС.

То есть при заданном количестве РТК (N) для получения максимального значения L_{\max} требуется обеспечить возможно больший показатель для l_{\max} .

Здесь необходимо подчеркнуть, что на время сеанса связи с БПУ ретрансляционная цепочка аппаратов служит не для доведения принятого сообщения до всех РТК, а только для обеспечения их взаимной подводной пространственной координации, т.е. при максимальном удалении друг от друга РТК фактически выполняют функции маяков-ответчиков с низкой информационной скоростью передачи.

Как следует из таблицы 3 для современных модемов заявляемая максимальная дальность ГАС составляет до 30 км. Однако, в настоящее время к подсистеме ГАС, в значительной степени определяющей успешность выполняемых РТК (в том числе в группе) специальных заданий, предъявляются более высокие требования по максимально достижимым значениям l_{\max} [12].

6. Оценка максимальной дальности при обмене данными между РТК

Для оценки энергетической дальности действия гидроакустической системы в различных режимах её функционирования (эхо-локации, шумопеленгования, телеметрии), как правило, используется общее уравнение, которое применительно к ГАС можно представить в виде [36–39]

$$\frac{p_0^2 l_0^2 D_1^2(\varphi) D_2^2(\varphi)}{R^2} \cdot 10^{-0,1\beta R} \cdot A_\Phi = h^2 p_n^2(f_{\text{рч}}, \Delta f_p), \quad (5)$$

где $p_n(f_{\text{рч}}, \Delta f_p)$ — давление помехи в рабочей полосе частот Δf_p ; p_0 — давление, развиваемое передающей антенной с излучаемой мощностью $P_{\text{изл}}$ на условном расстоянии l_0 ; $D_1(\varphi)$ и $D_2(\varphi)$ — характеристики направленности передающей и приемной антенн соответственно; h^2 — отношение энергии сигнала к спектральной плотности помех; R — расстояние между гидроакустическими передатчиком и приемником; $f_{\text{рч}}$ — рабочая частота передаваемого сигнала; β — пространственный коэффициент затухания звуковых волн в воде; $A_\Phi = 10 \lg \Phi$ — фактор аномалии распространения звуковых волн, учитывающий фокусировку ($\Phi < 1$) и дефокусировку ($\Phi > 1$) акустического поля.

В [36] показано, что с учетом частотных зависимостей уровня шумов моря и затухания сигнала для трансцендентного уравнения (5) существует оптимальное значение рабочей частоты $f_{\text{рч}}$, для которой при фиксированных параметрах гидроакустического тракта связи (включая передающий и приемный комплекты) обеспечивается максимальная дальность связи.

Так для антенн плоскостного типа при спектральной плотности помех вида $G(f) \sim f^{-n}$, где $n = 1 \div 2$, значение оптимальной частоты составит: $f_{\text{опт}} \approx n' R^{2/3} 10^3$ кГц, где $n' \approx 1,9 \div 3$, т.е. для $R \approx 50 \div 100$ км значения оптимальной частоты будут находиться в диапазоне $f_{\text{опт}} \approx 0,9 \div 2,2$ кГц.

Ближкие значения $f_{\text{онт}}$ получаются и при использовании антенны линейного типа, для которых в этом случае габаритные размеры составят до $1,5 \div 3$ м, что может создать значительные конструктивные трудности, а в ряде случаев и отказ от установки таких гидроакустических антенн на мало- и среднегабаритных РТК.

Переход на более высокие частоты излучения, в силу уменьшения габаритов антенных элементов, позволит устанавливать на РТК ФАР, обеспечивающие подавление помех от посторонних излучателей (т.е. уменьшения значения p_n) и увеличение коэффициента $D_2(\varphi)$ в направлении на полезный сигнал, тем самым реализуя возможность

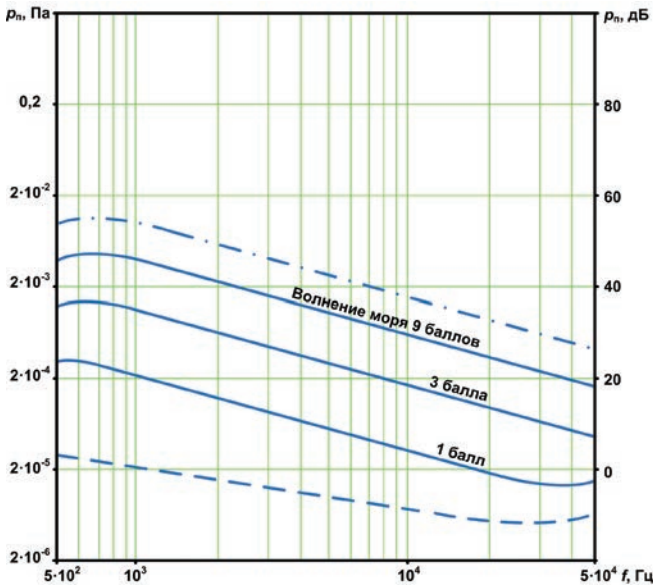


Рис. 17. Спектральные характеристики шумов моря

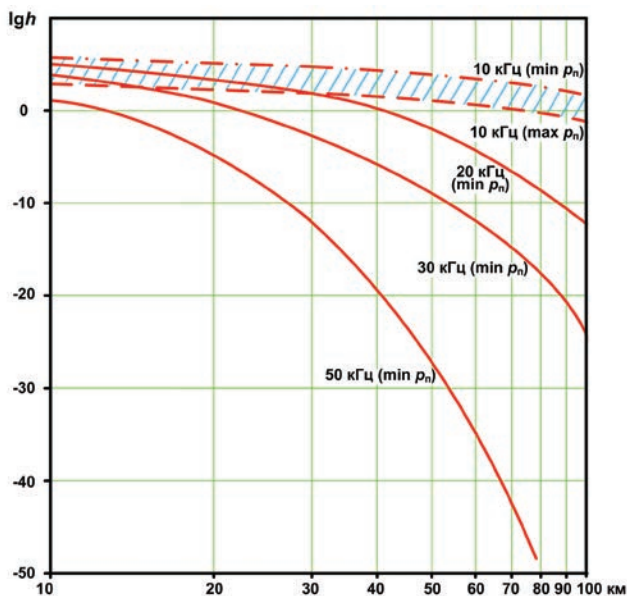


Рис. 18. Зависимость значений lgh от дальности взаимодействия между РТК в группе

увеличения дальности связи. В предположении отсутствия (подавления) помех от посторонних излучателей проведем расчеты по дальности ГАС для минимальных и максимальных значений (пунктирная и штрихпунктирная линии на рис. 17) шумов моря. Учитывая большой разброс численных значений величин, входящих в формулу (5), для наглядности графического представления соответствующих расчетов приведем её к виду:

$$lgh = \lg p_o + \lg D_1(\varphi) + \lg D_2(\varphi) + \frac{1}{2} \lg A_\varphi - \lg R - \frac{1}{20} \beta R - \lg p_n(f_{\text{рч}}, \Delta f_p). \quad (6)$$

На рис. 18 представлены результаты расчетов по формуле (6) значений lgh в зависимости от расстояния между РТК для следующих исходных данных: $D_1(\varphi) = 1$, $A_\varphi = 1$, $\beta = 0,036 f_s^{3/2}$ дБ/км, $\Delta f_p = 1$ Гц, мощность излучения сигнала $P_{\text{изл}} = 100$ Вт, $l_0 = 1$ м. Значения $p_n(f_{\text{рч}}, \Delta f_p)$ вычислялись в соответствии с графиками рис. 17, в предположении использования четырехэлементной адаптивной ФАР, реализованной на базе гидроакустических приемных антенн цилиндрического типа, обеспечивающих подавление помех от посторонних излучателей и формирование максимума ДН в направлении на полезный сигнал.

Из анализа графиков следует, что на частотах выше 10 кГц реализовать устойчивую связь при $R > 100$ км достаточно проблематично, поскольку даже при передаче рассматриваемого узкополосного сигнала, с полосой $\Delta f_p = 1$ Гц и $f_{\text{рч}} = 10$ кГц, в условиях наличия только естественных шумов моря значение отношения сигнал/шум будет находиться в пределах $h \approx 0,06 \div 5$, т.е. при реализации в гидроакустическом модеме некогерентного приема, удовлетворительная вероятность доведения информации может быть обеспечена только в условиях минимальной шумности моря (штрихпунктирная линия на рис. 18).

В случае применения когерентного «накопления» узкополосного сигнала, теоретически, за счет увеличения времени излучения (снижения скорости передачи) одного бита сообщения τ_c , можно повысить значение отношения сигнал/шум на входе решающего устройства до заданной величины, однако при практической реализации этого метода, применительно к ГАС, возникают как минимум два ограничения.

Первое из них обусловлено наличием максимального временного интервала когерентности сигналов, в реальном гидроакустическом канале. По результатам исследований, приведенных в [37], указанный интервал не превышает 4 секунд, что недостаточно для необходимого «накопления» сигнала при приеме «под шумами» для рассматриваемых условий.

Вторым ограничением является наличие эффекта доплеровского смещения частоты Δf_d , приближенное значение которого для двух взаимодействующих по гидроакустическому каналу объектов, перемещающихся с относительной скоростью v , определяется по формуле:

$$\Delta f_d \approx f_{\text{рч}} \cdot \frac{v}{v_{\text{ЗВ}}}$$

откуда для характерной скорости звука в воде $v_{зв} = 1500$ м/с, $v = 5$ км/ч и $f_{рч} = 10$ кГц получим: $\Delta f_{д} \approx 9$ Гц.

Таким образом, при приеме узкополосного сигнала в модеме ГАС необходимо реализовать алгоритм автоматической адаптивной перестройки приемного фильтра для «отслеживания» за изменением частоты, обусловленного эффектом Доплера. Кроме того, вследствие этого, при создании модема, обеспечивающего повышение скорости передачи за счет одновременного излучения элементов сообщения на заданном количестве разных частот, следует учитывать необходимость формирования в блоке параллельных фильтров защитного интервала между соседними рабочими частотами $\Delta f_{з.н.} \geq 2\Delta f_{д}$.

Хотя расчеты в представленных материалах велись для «благоприятных» условий связи в предположении наличия минимального уровня шумов и подавления помех от посторонних излучателей, а также без учета возможного попадания принимающей информации РТК в область «тени» (или значительного ослабления) гидроакустической волны, характерных как для приповерхностного так и для подводного и мелководного звуковых каналов [38], тем не менее, показано наличие принципиальных путей реализации взаимодействия РТК, удаленных друг от друга на расстояния свыше 50 км, особенно при групповой миссии РТК с искусственным интеллектом, позволяющим учитывать гидрологию района их нахождения.

На рис. 19 представлен вариант структуры построения гидроакустического модема для РТК МБ, реализующего многоканальный прием и пространственную обработку гидроакустического сигнала. При этом в блоке принятия решения предложенного модема реализован алгоритм весовой мажоритарной обработки информации методом «среднего знака» [40], в соответствии с которым «подсчет» числа разрешенных знаков и установка весового коэффициента среднему знаку производится после приема каждого

Коэффициентом подавления помех от посторонних излучателей возможно управлять путем установления «шага» $\Delta\varphi$ (в приведенном на рис. 19 варианте $\Delta\varphi=2^\circ$). Автоматический учет эффекта Доплера обеспечивается за счет использования блока частотной коррекции в каждом приемном тракте.

7. Обеспечение оптимального сложения приема сигнала по параллельным каналам

Учитывая, что частотный сдвиг между соседними каналами приема сигнала меньше полосы спектра сигнала, на решающее устройство (блок выбора решения, рис. 19) может поступить несколько копий сообщений. Кроме того, при использовании M территориально-частотно-разнесенных источников сигнала (что, как правило, применяется для передачи информации на удаленные морские объекты), имеющих малый коэффициент корреляции между каналами, количество таких копий сигнала (сообщения) дополнительно увеличивается в M раз. Одним из экономичных способов с точки зрения сокращения вычислительных операций при

синтезе суммарного решения о принятой информации является позначное весовое мажоритарное сложение.

Рассмотрим способ определения весовых коэффициентов. Пусть при приеме знака сообщения по Q каналам зарегистрировано v коалиционных групп, содержащих $q(r_1)$ знаков r_1 , $q(r_2)$ знаков r_2 , ..., $q(r_v)$ знаков r_v и $q(r_0)$ знаков с обнаруженными ошибками, причем величина $q(r_k)$ может принимать значения от 1 до Q , а r_1, r_v принадлежат алфавиту из Θ разрешенных знаков. Рассмотрим произвольную пару коалиционных групп с соответствующими априорными и апостериорными условиями вероятности приема:

$$\left\{ P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_i); P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_j) \right\},$$

$$\left\{ P(r_i | \overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)}); P(r_j | \overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)}) \right\}.$$

Воспользовавшись формулой умножения вероятностей и формулой Байеса [6], представим данные условные вероятности в явном виде (7).

$$P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_i) = \frac{1}{P(r_i)} \prod_{s=1}^{q(r_i)} \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_i)}{p_{\text{тп } s}(r_i)} \prod_{k=1}^{q(r_0)} p_{\text{ст } k} \prod_{l=1}^v \prod_{m=1}^{q(r_l)} p_{\text{тп } m}(r_l),$$

$$P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_j) = \frac{1}{P(r_j)} \prod_{s=1}^{q(r_j)} \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_j)}{p_{\text{тп } s}(r_j)} \prod_{k=1}^{q(r_0)} p_{\text{ст } k} \prod_{l=1}^v \prod_{m=1}^{q(r_l)} p_{\text{тп } m}(r_l),$$

$$P(r_i | \overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)}) = \frac{P(r_i) P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_i)}{\sum_{s=0}^v P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_s)},$$

$$P(r_j | \overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)}) = \frac{P(r_j) P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_j)}{\sum_{s=0}^v P(\overline{q(r_0)}, \overline{q(r_v)} | r_s)}.$$

Предполагая априорное равенство вероятностей передачи различных знаков сообщения, с учетом формул (7) и критерия максимального правдоподобия, получаем правило (8) решения о передаваемом знаке, где

$$A_s(r_i) = \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_i)}{p_{\text{тп } s}(r_i)} \text{ и } A_s'(r_j) = \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_j)}{p_{\text{тп } s'}(r_j)},$$

$$r = \begin{cases} r_i, & \prod_{s=1}^{q(r_i)} A_s(r_i) > \prod_{s'=1}^{q(r_j)} A_s'(r_j), \\ r_j, & \prod_{s'=1}^{q(r_j)} A_s'(r_j) > \prod_{s=1}^{q(r_i)} A_s(r_i), \end{cases} \quad (8)$$

Учитывая, что $A_s(r_i) > 1$ и $A_s'(r_j) > 1$, правило (7) представим в виде (9):

$$r = \begin{cases} r_i, & \sum_{s=1}^{q(r_i)} \ln \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_i)}{p_{\text{тп } s}(r_i)} > \sum_{s'=1}^{q(r_j)} \ln \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_j)}{p_{\text{тп } s'}(r_j)}, \\ r_j, & \sum_{s'=1}^{q(r_j)} \ln \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_j)}{p_{\text{тп } s'}(r_j)} > \sum_{s=1}^{q(r_i)} \ln \frac{1 - p_{\text{омс}}(r_i)}{p_{\text{тп } s}(r_i)}, \end{cases} \quad (9)$$

что при $\overline{p_{\text{тп}}(r_1)}, \overline{p_{\text{тп}}(r_{\Theta-1})} = p_{\text{тп}}(r_i) = \frac{p_{\text{тп}}}{\Theta - 1}$ эквивалентно позначному мажоритарному сложению с весовыми коэффициентами в s -м канале:

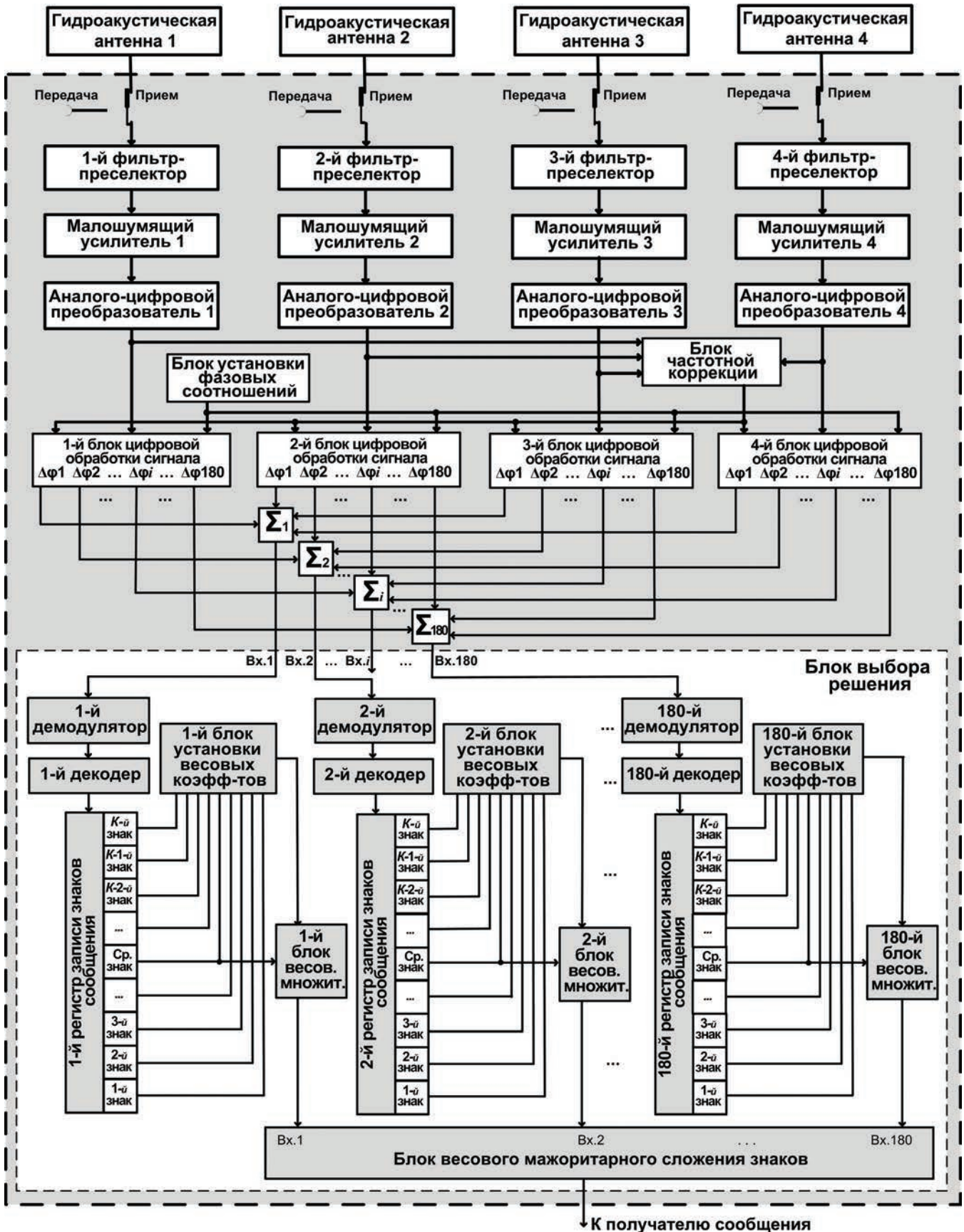


Рис. 19. Структурная схема гидроакустического модема комплекса связи РТК МБ знака

$$K_s = \ln \frac{(\Theta - 1)(1 - p_{\text{ош } s})}{p_{\text{тр } s}}. \quad (10)$$

В том случае, когда количества коалиционных групп в принятой по Q каналам реализации сигнала равно двум, переданной знак определяется по правилу (9). При наличии большего числа коалиционных групп необходимо вычислить с использованием формулы (10) значения сумм $\sum_{s=1}^{q(r_1)} K_s(r_1)$, $\sum_{s=1}^{q(r_v)} K_s(r_v)$ и расположить их в виде вариационного ряда с убывающими членами. Тогда, значение r_x , соответствующее первой сумме вариационного ряда, т.е. $\sum_{s=1}^{q(r_x)} K_s(r_x) = \max \left\{ \sum_{s=1}^{q(r_1)} K_s(r_1), \sum_{s=1}^{q(r_v)} K_s(r_v) \right\}$, является оптимальным решением о переданном знаке при использовании критерия максимального правдоподобия.

В том случае, когда при передаче сообщения не используется второй контур кодирования и отсутствует семантическая избыточность, а первичный код имеет малую исправляющую способность, целесообразно ввести более жесткие критерии выбора решения s при поэлементном весовом мажоритарном сложении, весовые коэффициенты при котором определяются аналогичным способом [41]. Данный принцип, описанный в процессе разработки многоканального РПУ позволяет перейти к созданию помехозащищенных РЛ.

Заключение

Из представленных материалов следует:

совместное использование спутниковой и специализированных СДВ-ДКМ радиолиний позволит обеспечить устойчивое доведение команд управления до РТК МБ (в том числе глобально удаленных от БПУ) находящихся в надводном положении, а также на глубине до 20 м;

доведение до БПУ данных о состоянии или другой информации от РТК МБ доступно только по спутниковому каналу связи, поскольку габариты эффективных передающих антенн и необходимая мощность передатчика в СДВ-ДКМ диапазоне (для достоверного доведения данных до удаленного БПУ) реализовать на мало- и среднегабаритных РТК не представляется возможным;

высокая вероятность выполнения робототехническими комплексами различных программ на глобальном удалении от базового пункта управления может быть реализована при групповой миссии РТК с внедренными элементами искусственного интеллекта;

несмотря на значительное количество перспективных методов доведения информации до глубокопогруженных объектов, гидроакустическая связь является основным методом при решении такой задачи, а также для реализации обмена данными между РТК в подводном положении, в том числе при их значительном удалении друг от друга;

обмен данными между РТК в подводном положении на взаимном удалении 50÷100 км достигается подсистемой гидроакустической связи за счет снижения скорости пере-

дачи до 1 бит/с и менее, при условии подавления помех от посторонних излучателей и автоматического учета эффекта Доплера. Повышение скорости передачи в этом случае может быть обеспечено путем применения гидроакустических модемов «параллельного типа».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04326 офи_м

Литература

1. Николашин Ю.Л., Мирошников В.И., Будко П.А., Затуливетер Ю.С., Семенов С.С. Общий подход к формированию единого информационно-управляющего пространства морской компоненты ВС РФ. Часть II. Принципы формирования сильносвязной телекоммуникационной подсистемы единого информационно-управляющего пространства Военно-морского флота России // Морская радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 22–28.
2. Николашин Ю.Л., Кулешов И.А., Будко П.А., Жолдасов Е.С., Жуков Г.А. SDR радиоприемника и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот. // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 1. С. 20–31.
3. Чернухин Ю.В. Искусственный интеллект и нейрокompьютеры. Таганрог: ТРТУ, 1997. 273 с.
4. Николашин Ю.Л., Будко П.А., Жуков Г.А. Нейробихимический подход к решению задачи оптимизации приема информации в канале с переменными параметрами // Нейрокompьютеры: разработка, применение. 2016. № 1. С. 49–57.
5. Михалевский Л.В. Когнитивное радио — передовая технология на пути к более рациональному использованию радиочастотного спектра // Конвергенция служб радиосвязи как средство повышения эффективности использования радиочастотного спектра: тезисы докладов Семинара МСЭ. (Ереван, 28–30 апреля 2008 г.).
6. Николашин Ю.Л., Мирошников В.И., Будко П.А., Жуков Г.А. Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхзвукполосных декаметровых радиолиний // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2 (52). С. 16–22.
7. Николашин Ю.Л., Будко П.А., Жуков Г.А. Эффективность использования когнитивной радиосвязи в декаметровом диапазоне частот // Техника средств связи. 2014. Вып. 3 (142). С. 6–21.
8. Баканов Д.В., Мороз Н.В., Пухов Г.Г., Салюк Д.В., Тимчук А.А. Применение многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» для обеспечения информационного взаимодействия между удаленными абонентами. // Техника средств связи. 2014. Вып. 3 (142). С. 63–67.
9. Николашин Ю.Л., Будко П.А., Жолдасов Е.С., Жуков Г.А. Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2014. Т. 6. № 1. С. 30–37.
10. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.

11. *Барабашов Б. Г., Анишин М. М., Огарь А. С.* Прогнозирование качества передачи дискретных сообщений по ионосферному каналу // Радиотехника, электроника и связь («РЭИС-2013»): Сб. докладов II Международной науч.-техн. конф. (Омск 01–04 октября 2013) Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2013. С. 147–154.
12. *Белоусов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.
13. Рекомендации МСЭ–R P.372–10 (Ред. 10/2009). Радишум. Серия Р: Распространение радиоволн. Женева, 2010. 75 с.
14. *Долуханов М. П.* Распространение радиоволн. М.: Связь. 1972. 336 с.
15. *Неволин Т. Н., Щепотин В. И.* Организация и планирование радиосвязи на морском флоте. М.: Транспорт. 1977. 262 с.
16. *Акулов В. С., Салюк Д. В., Узрик Л. Н.* Учет точности прогнозирования электромагнитных полей при расчете радиотехнических систем // Техника средств связи. 2014. Вып. 3 (142). С. 53–56.
17. *Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А., Будко Н. П.* SDR-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиоприемах // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2013. Т. 5. № 1. С. 34–38.
18. *Жуков Г. А.* Методы весовой мажоритарной обработки дискретной информации при приеме по параллельным каналам // Техника средств связи. Сер. ТПС. Вып. 8. С. 74–84.
19. *Бредихин А. Н., Родионов Э. Н., Яблонских А. А.* Динамический диапазон активных антенн. // Теория и техника радиосвязи. 2008. Вып. 1. С. 121–125.
20. *Катенин В. А.* Лазерные технологии в зарубежных военно-морских силах // Экспертный союз. 2012. № 6. URL: <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/419-laser-technology-in-foreign-naval-forces> (дата обращения 25.01.2017).
21. *Алешин О. В., Катанович А. А.* Принципы построения автоматизированных систем спутниковой открытой оптической связи с подводными лодками // Морская радиоэлектроника. 2016. № 1. С. 32–35.
22. *Боженов Ю. А.* Микроэлектромеханические устройства в необитаемых подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 39–44.
23. *Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С.* Энергетический потенциал и тактико-технические возможности использования эффекта параметрической демодуляции для подводного радиоприема сигналов в морской воде // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 2. С. 1–13.
24. *Яковлев В. А., Журенков А. Г., Шульженко П. К., Мусин Л. Ф., Фролов А. П.* Оптико-акустическое устройство наведения для системы подводной беспроводной оптической связи // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 10. С. 91–92.
25. *Журенков А. Г., Яковлев В. А.* Обнаружение гидроакустических волн теневыми приборами на фоне турбулентности и взвеси // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 28–33.
26. *Буданов С. П., Гончаров Э. Г., Мартинсон Б. М., Журенков А. Г., Яковлев В. А.* Диаграмма направленности гидрооптического приемника акустических колебаний // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 34–38.
27. *Стопцов Н. А., Бойцов В. И., Шелемин В. Н.* Связь под водой. Л.: Судостроение, 1990. 248 с.
28. *Шибков А. Н.* Подводная связь и навигация с использованием электромагнитного поля. Дисс. д.т.н. Владивосток: ДВГУ. 2006. 284 с.
29. *Мартынов Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. Л.* Система управления — наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов. // Морская радиоэлектроника. 2015. № 4. С. 27–33.
30. *Бобровский И. В., Козьмин С. Г.* Модем высокоскоростной гидроакустической связи. Натурные испытания 10.07.2014. URL: <https://youtu.be/jxbmzNS6DXI> (дата обращения 25.02.2017).
31. *Вершинин А. С.* Сравнительный анализ гидроакустических модемов // Молодой ученый. 2015. № 12. С. 156–161.
32. *Горнак В. Е., Икзарцев А. В., Львов О. Ю., Матвиенко Ю. В., Щербатюк А. Ф.* ММТ-3000 — новый малогабаритный АНПА института проблем морских технологий ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1(3). С. 12–20.
33. *Кайфаджан А. А., Ткаченко А. О.* Гидроакустическая связь и гидроакустические средства / Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: сборник трудов научно-технической конференции (Волгоград, 5-9 августа 2013). Волгоград: НИИ гидросвязи «Штиль», 2013.
34. *Брага Ю. А., Машошин А. И.* Место сетевой подводной системы обмена данными в интегрированной сетевидецентрической системе подводного наблюдения / Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: сборник трудов научно-технической конференции (Волгоград, 5-9 августа 2013). Волгоград: НИИ гидросвязи «Штиль», 2013.
35. *Козлов Н. С., Микушин И. И., Паршуков В. Н.* Направления развития средств обмена данными по гидроакустическому каналу в интересах включения подвижных погруженных объектов в единое информационное пространство / Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: сборник трудов научно-технической конференции (Волгоград, 5-9 августа 2013). Волгоград: НИИ гидросвязи «Штиль», 2013.
36. *Свердлов Г. М.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
37. *Макаров А. И., Дворников В. Д., Конопелько В. К.* Передача информации в гидроакустическом канале / Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2004. С. 103–118.
38. *Урик Р. Дж.* Основы гидроакустики: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
39. *Евтюков А. П., Митько В. Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
40. *Жуков Г. А., Попков В. Я.* О методах определения весовых коэффициентов для дискретного сложения сигналов,

принятых по параллельным каналам / Тезисы докладов VIII симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах. Часть 2. Л.: Академия наук СССР, Ленинградский инст-т авиационного приборостроения, 1983. С. 94–97.

41. Жуков Г. А. Эффективность совместного использования различных методов обработки сигналов при приеме параллельным каналам // Техника средств связи. Сер. ТПС. 1984. Вып. 6. С. 66–74.

COMPLEX USE OF DIVERSE COMMUNICATION CHANNELS FOR MANAGEMENT OF ROBOTIC COMPLEXES ON THE BASIS OF UNIFORM SYSTEM OF RADIO MONITORING

Pavel A. Budko,
St. Petersburg, Russia, budko62@mail.ru

Gennadii A. Zhukov,
St. Petersburg, Russia, intelteh@inteltech.ru

Aleksei M. Vinogradenko,
St. Petersburg, Russia, vino_grad-82@mail.ru

Alexander I. Litvinov,
St. Petersburg, Russia, litvinovaleks@mail.ru

ABSTRACT

Questions of complex use of diverse radio channels of management of robotic complexes of sea basing with use of the single system of radio monitoring constructed on the principles of functioning of cognitive radio systems are considered. The plan of creation of single system of radio monitoring as for the benefit of subscribers of radio networks and the radio directions of department, and it is direct for the benefit of basic control centers groups of the robotic complexes using radio lines of superlong-wave, decameter, ultrashort-wave and space communication is provided. The analysis of applicability of radio channels of various wave bands in case of management of a robotic complex is this, both in surface, and in the deep-shipped provision. At the same time along with radio channels application of optical, parametrical, hydroacoustic and electromagnetic communication is considered. Possibilities of the mixed groups of the robotic complexes operating in different environments (space, air, water) on increase in efficiency of accomplishment of the set mission are estimated. Possible methods of information exchange between submersibles are considered and an assessment of the maximum range in case of data exchange between the deep-shipped objects on the hydroacoustic channel is given. The arising difficulties in reasons for options of creation of distributed control systems by the mixed groups of robotic complexes, the ensuring necessary stability of control paths consisting in impossibility and interaction in group on borders of physical environments, and also small ranges in ensuring hydroacoustic communication are revealed. The comparative characteristic of the main types of modems of hydroacoustic communication of domestic and foreign manufacturers is this. Offers on further increase in range of hydroacoustic communication due to reduction in the rate of transfer and use of hydro-acoustic modems of "parallel type" are formulated. Calculations of a rational number of the robotic complexes operating in group are given. The conclusion is drawn that essential increase in efficiency of actions of the mixed robotic group is reached along with complex use of diverse control paths application of the methods based on modern technologies of programmable radio with elements of cognitive radio systems, artificial intelligence and neurobionics when handling of the accepted information during intensive information interaction on the basis of general databases of the distributed systems.

Keywords: robotic complex; channel of space communication; decameter radio line; hydroacoustic communication; Doppler's effect.

References

1. Nikolashin Iu.L., Miroshnikov V.I., Budko P.A., Zatuliveter Iu.S., Semenov S.S. General approach to formation of uniform management information space sea components of Russian Armed Forces. Part II. Principles of formation of a silnosvyazny telecommunication subsystem of uniform management information space of Navy of Russia. *Morskaiia radioelektronika* [Marine Radio electronics]. 2015. No. 1. Pp. 22-28. (In Russian)
2. Nikolashin Iu.L., Kuleshov I.A., Budko P.A., Zholdasov E.S., Zhukov G.A. SDR of a radio unit and a cognitive radio communication in the decameter range of frequencies. *H&ES Research*. 2015. Vol. 7. No. 1. Pp. 20-31. (In Russian)
3. Chernukhin Iu.V. *Iskusstvennyy intellekt i neyrokomp'yutery* [Artificial intelligence and neurocomputers]. Taganrog: Taganrogskaa gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet Publ. 1997. 273 p. (In Russian)
4. Nikolashin Iu.L., Budko P.A., Zhukov G.A. Neurobionic approach to the decision of the task of optimization of reception of information in the channel with variable parameters. *Neirokomp'iutery: razrabotka, primeneniye*. 2016. No. 1. Pp. 49-57. (In Russian)
5. Mikhalevskii L.V. Kognitivnoe radio – peredovaya tehnologiya na puti k bolee racional'nomu ispol'zovaniju radiochastotnogo spectra [Cognitive radio – advanced technology on the way to more rational use of a radio-frequency range]. *Konvergencija sluzhb radiosvjazi kak sredstvo povysheniya jeffektivnosti ispol'zovaniya radiochastotnogo spectra: tezisy dokladov Seminara Mezhdunarodnogo Soyuzu Elektrosvyasi* [Seminar of the International Telecommunication Union The Convergence of Radiocommunication services as a means of improving the efficiency of spectrum use: abstract] Erevan, 28-30 april 2008. (In Russian)
6. Nikolashin Iu.L., Miroshnikov V.I., Budko P.A., Zhukov G.A. Cognitive communication system and influence of use of the supernarrow-band decameter radio lines given monitoring on a noise stability. *Morskaiia radioelektronika* [Marine Radio electronics]. 2015. No. 2 (52). Pp. 16-22. (In Russian)
7. Nikolashin Iu.L., Budko P.A., Zhukov G.A. Efficiency of use of a cognitive radio communication in the decameter range of frequencies. *Tekhnika sredstv svyazi*. 2014. No. 3 (142). Pp. 6-21. (In Russian)
8. Bakanov D.V., Moroz N.V., Pukhov G.G., Saliuk D.V., Timchuk A.A. Application mnogofunktsional'noy systems of personal satellite communication "Gonets-D1M" for support of information exchange between remote subscribers. *Tekhnika sredstv svyazi*. 2014. No. 3 (142). Pp. 63-67. (In Russian)
9. Nikolashin Iu.L., Budko P.A., Zholdasov E.S., Zhukov G.A. Perspective methods of increase in a noise stability of decameter radio lines. *H&ES Research*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 30-37. (In Russian)
10. Fink L.M. *Theory of transfer of discrete messages*. Moscow: Sovetskoe Radio. 1970. 728 p. (In Russian)
11. Barabashov B.G., Anishin M.M., Ogar' A.S. Prognozirovaniye kachestva peredachi diskretnykh soobshcheniy po ionosfernomu kanalu [Forecasting of quality of transfer of discrete messages according to the ionospheric channel]. *Radiotekhnika, elektronika i svyaz: Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Radio Engineering, Electronics and Communication ("REES2013"): Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference. Omsk 01-04 October 2013]. Omsk: Omskiy nauchno-issledovatel'skiy institut priborostroeniya, 2013. Pp. 147-154. (In Russian)
12. Belousov I. Sovremennyye i perspektivnyye neobitaemye podvodnyye apparaty VMS SshA [Modern and perspective uninhabited submersibles of Naval Forces of the USA]. *Zarubezhnoye voennoye obozreniye*. 2013. No. 5. Pp. 79-88. (In Russian)
13. Recommendation ITU-R P.372-10. Radio noise (10/2009). Geneva, 2010. 75 p..
14. Dolukhanov M.P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Distribution of radio-waves]. Moscow: Svyaz', 1972. 336 p. (In Russian)
15. Nevolin T.N., Shchepotin V.I. *Organizatsiya i planirovaniye radiosvyasi na morskoy flote* [The organization and planning of a radio communication on the naval fleet]. Moscow: Transport, 1977. 262 p. (In Russian)
16. Akulov V.S., Saliuk D.V., Ugrik L.N. Accounting of a forecasting accuracy of electromagnetic fields when calculating radio engineering systems. *Tekhnika sredstv svyazi*. no. 3 (142). 2014. Pp. 53-56. (In Russian)
17. Budko P.A., Zholdasov E.S., Zhukov G.A., Budko N.P. SDR technologies and the new principles of reception of messages in simplex radio lines. *H&ES Research*. 2013. Vol. 5. No. 1. Pp. 34-38. (In Russian)
18. Zhukov G.A. Metody vesovoy mazhoritarnoy obrabotki diskretnoy informatsii pri prieme po parallelnym kanalams [Methods of weight majority processing of discrete information at reception on parallel channels]. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. TPS*. No. 8. Pp. 74-84. (In Russian)
19. Bredikhin A.N., Rodionov E.N., Iablonskikh A.A. Dynamic range of active antennas. *Teoriya i tekhnika radiosvjazi* [Radio communication theory and equipment]. 2008. Iss. 1. Pp. 121-125. (In Russian)
20. Katenin V.A. Lazernyye tehnologii v zarubezhnykh voenno-morskikh silakh [Laser technologies in the

- foreign Navies]. *Ekspertnyi soiuz* [Expert Union]. 2012. No. 6. URL: <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/419-laser-technology-in-foreign-naval-forces> (дата обращения 25.01.2017). (In Russian)
21. Aleshin O.V., Katanovich A.A. The principles of creation of the automated systems of satellite open optical communication with submarines. *Morskaja radioelektronika* [Marine Radio electronics]. 2016. No. 1. Pp. 32-35. (In Russian)
22. Bozhenov Iu.A. Microelectromechanical devices in uninhabited submersibles. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika* [Underwater investigations and robotics]. 2006. No. 1. Pp. 39-44. (In Russian)
23. Shaidurov G. Ia., Kudinov D.S. Power potential and performance capabilities of using the parametric demodulation effect in application to radio reception in the depth of the sea water. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics]. 2012. No. 2. C. 1-13. (In Russian)
24. Iakovlev V.A., Zhurenkov A.G., Shul'zhenko P.K., Musin L.F., Frolov A.P. The optico-acoustic device of targeting for system of underwater wireless optical communication. *Journal of Optical Technology*. 2012. Vol. 79. No. 10. Pp. 91-92. (In Russian)
25. Zhurenkov A.G., Iakovlev V.A. Detection of hydroacoustic waves shadow devices against the background of turbulence and a suspension. *Journal of Optical Technology*. 2004. Vol. 71. No. 4. Pp. 28-33. (In Russian)
26. Budanov S.P., Goncharov E.G., Martinson B.M., Zhurenkov A.G., Iakovlev V.A. Directional pattern of the hydrooptical receiver of acoustic vibrations. *Journal of Optical Technology*. 2004. Vol. 71. No. 4. Pp. 34-38. (In Russian)
27. Stoptsov N.A., Boitsov V.I., Shelemin V.N. *Svyaz' pod vodoy* [Communication under water]. Leningrad: Sudostroenie, 1990. 248 p. (In Russian)
28. Shibkov A.N. *Podvodnaja svjaz' i navigacija s ispol'zovaniem jelektromagnitnogo polja* [Underwater connection and navigation with use of the electromagnetic field]. Dis. dokt. tehn. nauk. Vladivostok, DVGU. 2006. 284 p. (In Russian)
29. Martynov L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.L. Control system – the most difficult part of independent uninhabited submersibles. *Morskaja radioelektronika* [Marine Radio electronics]. 2015. No. 4. Pp. 27-33. (In Russian)
30. Bobrovskii I.V., Koz'min S.G. *Modem of high-speed hydroacoustic communication*. Natural tests 10.07.2014. URL: <https://youtu.be/jxbmzNS6DXI>. (In Russian)
31. Vershinin A.S. Comparative analysis of hydroacoustic modems. *Young Scientist*. 2015. No. 12. Pp. 156-161. (In Russian)
32. Gornak V.E., Ikzartsev A.V., L'vov O. Yu., Matvienko Yu.V., Shcherbatyuk A.F. MMT-3000 – new small-sized ANPA of institute of problems of sea technologies of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics]. 2007. No. 1. Pp. 12-20. (In Russian)
33. Kaifadzhan A.A., Tkachenko A.O. *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva* [Hydroacoustic communication and hydroacoustic means]. *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: sbornik trydov nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Hydroacoustic communication and means of emergency and rescue purposes: proceedings of the scientific-technical conference (Volgograd, 5-9 August 2013)]. Volgograd: Nauchno-issledovatel'skii institut gidrosviazi "Shtil", 2013. (In Russian)
34. Braga Iu.A., Mashoshin A.I. *Mesto setевой podvodnoj sistemy obmena dannymi v integrirovannoj setecentricheskoy sisteme podvodnogo nabljudeniia* [The place of network underwater system of data exchange in the integrated network-centric system of underwater observation] *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: sbornik trydov nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Hydroacoustic communication and means of emergency and rescue purposes: proceedings of the scientific-technical conference (Volgograd, 5-9 August 2013)]. Volgograd: Nauchno-issledovatel'skii institut gidrosviazi "Shtil", 2013. (In Russian)
35. Kozlov N.S., Mikushin I.I., Parshukov V.N. *Napravlenija razvitija sredstv obmena dannymi po gidroakusticheskomu kanalu v interesah vkljucheniia podviznykh pogruzhennykh ob'ektov v edinoe informacionnoe prostranstvo* [The directions of development of means of exchanging by data on the hydroacoustic channel for the benefit of inclusion of the mobile shipped objects in uniform information space]. *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: sbornik trydov nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Hydroacoustic communication and means of emergency and rescue purposes: proceedings of the scientific-technical conference (Volgograd, 5-9 August 2013)]. Volgograd: Nauchno-issledovatel'skii institut gidrosviazi "Shtil", 2013. (In Russian)
36. Sverdlin G.M. *Prikladnaja gidroakustika* [Applied hydroacoustics]. Leningrad. Sudostroenie. 1990. 320 p. (In Russian)
37. Makarov A.I., Dvornikov V.D., Konopel'ko V.K. *Peredacha informacii v gidroakusticheskom kanale*

- ale [Information transfer in the hydroacoustic channel]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian state university of informatics and radio electronics]. 2004. Pp. 103-118. (In Russian)
38. Urik R.J. *Principles of underwater sound*. New York: McGraw-Hill, 1975. 384 p.
39. Evtiukov A.P., Mit'ko V.B. *Inzhenernye raschety v gidroakustike* [Engineering calculations in hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1988. 288 p. (In Russian)
40. Zhukov G.A., Popkov V. Ia. O metodah opredelenija vesovyh koeficientov dlja diskretnogo slozhenija signalov, prinjatyh po paralel'nym kanalim [About methods of determination of weight coefficients for discrete addition of the signals accepted on parallel channels] Tezisy dokladov VIII simpoziuma po probleme izbytochnosti v informacionnyh sistemah [Theses of reports of the VIII symposium on a redundancy problem in information systems]. Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, Leningrad inst-t of aviation instrument making, 1983. Part 2. Pp. 94-97. (In Russian)
41. Zhukov G.A. Effektivnost' sovместnogo ispol'zovaniya razlichnykh metodov obrabotki signalov pri prieme paralel'nym kanalim [Efficiency of joint use of various methods of handling of signals in case of acceptance to parallel channels]. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. TPS*. 1984. No. 6. Pp. 66-74. (In Russian)

Information about authors:

Budko P. A., PhD, professor, professor of Military academy of communication of Marshall of the Soviet Union S. M. Budenny;

Zhukov G. A. , PhD, associate professor, scientific secretary of the public joint-stock company «Information telecommunication technologies»;

Vinogradenko A.M., PhD, associate professor, associate professor of Military academy of communication of Marshall of the Soviet Union S. M. Budenny;

Litvinov A.I., PhD, assistant department head of the organization of scientific work and training of research and educational personnel of Military academy of communication of Marshall of the Soviet Union of S. M. Budenny.

For citation: Budko P.A., Zhukov G.A., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I., Kosyak A.I., Doncov D.V. Complex use of diverse communication channels for management of robotic complexes on the basis of uniform system of radio monitoring. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 18-41. (In Russian)

ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В ПРОЦЕССЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАСПОЛОЖЕНИЯ АБОНЕНТА

Семенец Вячеслав Олегович,

аспирант кафедры Уральского технического института связи
и информатики – филиал Сибирского государственного университета
телекоммуникаций и информатики,
г. Екатеринбург, Россия

Трухин Михаил Павлович,

преподаватель кафедры Уральского технического института связи
и информатики – филиал Сибирского государственного университета
телекоммуникаций и информатики,
г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является выявление способов корректировки и снижения ошибок, возникающих в процессе определения месторасположения абонента. В работе рассматривались только программные методы, так как на сегодняшний день их актуальность особенно высока. В процессе работы были рассмотрены основные ошибки, возникающие в процессе определения координат абонента. А именно такие как: ошибки часов приемника и спутника, спутниковые инструментальные задержки, ионосферные задержки, тропосферные задержки и другие. Были представлены программные методы коррекции ошибок локализации такие как: метод дифференциальной коррекции, метод усреднения по фильтру Калмана, метод повышения точности за счет наблюдений от нескольких спутников. Метод усреднения принятых данных на основе фильтра Калмана был рассмотрен детально и приведена математическая модель работы данного алгоритма, выявлены способы снижения погрешностей измерений. По результатам данной работы можно сделать следующий вывод. Программные методы позволяют значительно повысить точность данных при этом без увеличения числа спутников или других измерителей в процессе определения координат месторасположения. Но зачастую они требуют больших вычислительных мощностей и нуждаются в постоянно развитии и доработке алгоритмов коррекции. Применяя рассмотренные методы, важно учитывать цель проводимых измерений, так как различные задачи требуют разную точность и зачастую не так важна точность, как скорость измерений. Не до конца решенной проблемой на сегодняшний день остается быстрое определение координат мобильного объекта с сантиметровой точностью. Решение данной задачи позволило бы решать многие актуальные проблемы в современной навигации.

Ключевые слова: координаты абонента; коррекция ошибок; программные методы; фильтр Калмана; метод кинематических наблюдений.

Для цитирования: Семенец В.О., Трухин М.П. Программные методы коррекции ошибок в процессе определения координат расположения абонента // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 42-46.

Современные методы определения и визуализации координат месторасположения абонента позволяют достаточно точно определить этот параметр вне зависимости от вида связи. Однако все они сводятся к тому, что для более точного определения координат требуется как можно большее число «измерителей». В условиях ограниченного числа измерителей — спутников или базовых станций — единственным способом решения становится программная коррекция ошибок.

Дадим определение ошибок локализации абонента на примере системы космического позиционирования. Под ошибкой понимается какой-либо сдвиг координат спутника или часов, установленных на приемнике абонента и спутнике. Изменение скорости прохождения сигнала на каком-либо участке траектории, называемое задержкой, также приводит к ошибке локализации. В качестве общей временной шкалы обычно используют среднее время по Гринвичу (время на нулевом меридиане). Псевдодальность до спутника находится по формуле

$$P_i = c[t(T_2) - t_i(T_1)],$$

где c — скорость света; $t(T_2)$ — время получения сигнала приемником по часам приемника; $t_i(T_1)$ — время отправления сигнала спутником по часам спутника с номером i .

Псевдодальность, определяемая как расстояние от i -го спутника до приемника, содержит также ошибку синхронизации часов спутника и приемника, задержку сигнала в атмосфере, релятивистский эффект, инструментальные задержки, помехи типа «повторных изображений», интерференции и другие ошибки (рис. 1).

Уравнение мгновенной псевдодальности имеет вид:

$$P_i = p_i + c[(d_i - d_{ii}) + T_i + aI_i + K_i + M_i + e_i], \quad (1)$$

где p_i — геометрическое расстояние от спутника с номером i до приемника, т. е.

$$p_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2};$$

d_i — изменение часов приемника;

d_{ii} — изменение часов i -го спутника от общей временной шкалы;

T_i — тропосферная задержка;

I_i — ионосферная задержка;

K_i — инструментальная задержка, независящая от частоты;

M_i — эффект приема отраженного сигнала, зависящий от частоты;

e_i — неучтенные ошибки.

Применение метода дифференциальной коррекции позволяет уменьшить ошибку в измерении координат до нескольких метров: у статичных объектов с точностью до 2 м, у движущихся — до 5 м. Дифференциальный метод коррекции реализуется с помощью контрольного GPS-приемника, называемого базовой станцией. Она располагается в пункте с известными координатами в том же районе, что и GPS-приемник, и дает возможность одновременно отслеживать GPS-спутники. В состав базовой станции



Рис. 1. Ошибки в определении дальности и их средние уровни

входят: измерительный датчик GPS с антенной, процессор, приемник и передатчик данных с антенной. Сравнивая известные координаты (полученные в результате прецизионной геодезической съемки) с измеренными координатами, контрольный GPS-приемник вырабатывает поправки, которые передаются потребителям по радиоканалу в заранее оговоренном формате. В свою очередь, потребителю необходим GPS-приемник с антенной, оснащенный процессором и дополнительным радиоприемником с антенной, который и позволяет получать дифференциальные поправки с базовой станции. Поправки, принятые от базовой станции, автоматически вносятся в результаты собственных измерений пользовательских устройств. Для каждого спутника, сигналы которого поступают на GPS-приемник, поправка, полученная от базовой станции, складывается с собственным результатом измерения псевдодальности. Коррекция может осуществляться как в режиме реального времени, так и при оффлайн-обработке данных (например, на компьютере) [1, 2].

Метод усреднения по времени измеряемых данных позволяет уменьшить влияние флуктуационных ошибок. Самым эффективным способом является усреднение показателей с помощью фильтра Калмана. Это эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий текущий вектор состояния динамической системы (в нашем случае функцию от псевдодальности) по поступающей последовательности неполных и зашумленных измерений (рис. 2).

Дискретный вариант фильтра Калмана с аддитивным гауссовским шумом измерения $w[n]$ и входными данными $u[n]$ записывается в виде двух уравнений

$$x[n + 1] = Ax[n] + B(u[n] + w[n]), \quad (2)$$

$$y[n] = Cx[n]. \quad (3)$$

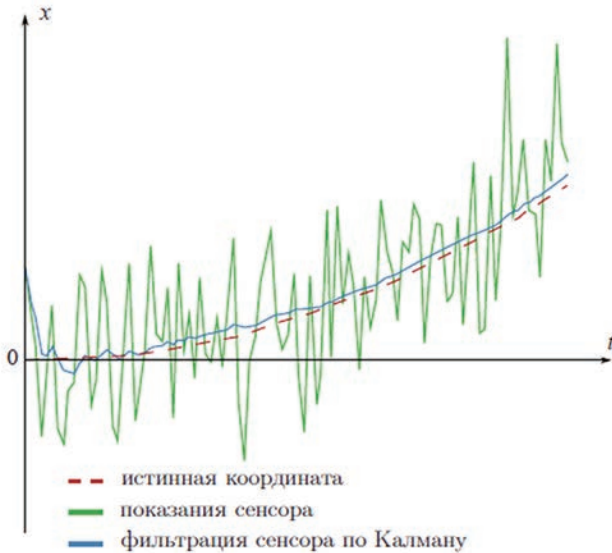


Рис. 2. Усреднение значений фильтром Калмана

Матрицы A , B и C должны быть определены априори в соответствии со статистическими характеристиками названных процессов. При этом выходной процесс также содержит гауссовский белый шум, определяемый входным процессом и шумом измерения

$$y_v[n] = Cx[n] + v[n]. \quad (4)$$

Уравнение, описывающее оценку измеряемого процесса имеет вид

$$\hat{x}[n] = \hat{x}[n-1] + M(y_v[n] - C\hat{x}[n-1]), \quad (5)$$

а уравнение фильтрации —

$$\hat{x}[n+1] = A\hat{x}[n] + Bu[n], \quad (6)$$

где $\hat{x}[n-1]$ — оценка $x[n]$, определяемая по результатам предыдущего значения $y[n-1]$; $\hat{x}[n]$ — оценка $x[n]$, определяемая по результатам последнего значения $y[n]$,

Если известна оценка состояния $\hat{x}[n]$ фильтра Калмана в момент n , то можно определить оценку его состояния $\hat{x}[n+1]$ в следующий момент времени $n+1$ и спрогнозировать на один шаг вперед выходной сигнал $y_v[n+1]$. Этот прогноз уточняет состояние, основанное на новом измерении. Поправкой при этом будет функция от разности $y_v[n+1] - C\hat{x}[n+1]$ между измеренным $C\hat{x}[n+1]$ и предсказанным $y_v[n+1]$ значениями. Введением (и подбором) коэффициента M стараются уменьшить дисперсию ошибок оценивания, зависящую от дисперсии шума измерения Q и дисперсии шума самого измеряемого процесса R :

$$E(w[n]w[n]^T) = Q, E(v[n]v[n]^T) = R, E(w[n]v[n]^T) = 0. \quad (7)$$

Комбинация уравнений измерения и фильтрации приводит к дискретной модели фильтра Калмана, записанной в форме уравнений состояния:

$$\hat{x}[n+1] = A(I - MC)\hat{x}[n] + [B \ AM] \begin{bmatrix} u[n] \\ y_v[n+1] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\hat{y}[n] = C(I - MC)\hat{x}[n] + CM y_v[n]. \quad (9)$$

Этот фильтр вычисляет оптимальную оценку $\hat{y}[n]$ измеряемой величины $y[n]$. Отметим, что при этом оценка состояния фильтра Калмана есть $\hat{x}[n]$ [4, 5].

Метод повышения точности за счет наблюдений от нескольких спутников позволяет существенно снизить ошибки локализации. Автономные наблюдения, выполненные на одном пункте без учета измерений на других объектах, обеспечивают точность от пятнадцати до тридцати метров и используются только для нахождения примерных значений. Если записать дальность от приемника до спутника в виде

$$r_{\text{изм}} = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} + c(\delta t_p - \delta t_s + \delta t_a), \quad (10)$$

где выражение под квадратным корнем — длина вектора, определенная через координаты спутника S и приемника P ; δt_s — временная задержка, определяемая для каждого спутника с помощью станции управления и передаваемая в составе навигационного сообщения;

δt_a — временная задержка, вычисляемая на основе моделирования задержек прохождения сигнала через атмосферу.

Формула (10) содержит четыре неизвестных — координаты приемника и поправка за временные задержки приемника. Они определяются путем решения системы уравнений, полученных по результатам одновременных наблюдений не менее четырех спутников. Координаты определяются по результатам кодовых измерений с точностью около 3 м.

Режим реокупации применяется в случаях, когда невозможно обеспечить видимость требуемого количества спутников. В этом случае измерения производятся в несколько этапов, в процессе которых собирается нужный объем информации. Впоследствии происходит объединение этих данных.

Режим быстрой статики сокращает продолжительность измерений за счет использования активных алгоритмов на линиях связи до пятнадцати километров между базовой GPS-станцией и приемником. Длительность измерений и наблюдений в данном режиме не превышает двадцати минут.

Кинематический режим применяется для определения координат мобильной станции. Его главной особенностью является необходимость непрерывной поддержки связи между спутниками и передвижным объектом. Если имеется цифровой радиоканал и данные с базового приемника в процессе измерений можно передавать на подвижную станцию, координаты получают в режиме реального времени, т. е. непосредственно на определяемой точке.

Режим «Стой-иди» — это один из видов кинематического режима, при котором подвижной объект перемещают с одного места на другое, производя при этом несколько циклов измерений на каждой из точек. Длительность не

превышает 30 секунд. При необходимости повысить точность до сантиметровой величины нужно произвести инициализацию показателей для того, что бы определить неоднозначности фазы. Как правило, это производится, с помощью искусственных базовых станций (антенна на жёсткой штанге) [3].

Заключение

Рассмотрели основные способы снижения погрешностей измерений в спутниковой навигации.

В настоящее время погрешность локализации может быть доведена до долей сантиметров, но чаще всего это возможно в случаях статичного месторасположения объекта и применяется в основном в геодезии.

Чтобы обеспечить такую точность локализации для подвижных объектов, необходимо усовершенствовать известные методы расчетов, принимая во внимание ресурсные ограничения в виде скорости выполнения измерений и проводимых расчетов.

Литература

1. Метод спутниковых геодезических измерений URL: http://wiki.cadastre.ru/doku.php?id=metod_sputnikovyyih (дата обращения 15.01.2017)
2. RTKLib — Сантиметровая точность GPS/ГЛОНАСС в пост-обработке. URL: <https://habrahabr.ru/post/244475/> (дата обращения 15.01.2017)
3. *Першин Д. Ю., Щербаков А. С.* Определение местоположения высокой точности для одночастотных приемников спутниковой навигации с использованием инерциальных датчиков // «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. ГИС технологии: Материалы XLVIII Международной научной студенческой конференции / Новосибирский гос. университет. Новосибирск, 2011. С. 38.
4. *Браммер К., Зиффлинг Г.* Фильтр Калмана–Бьюси: Детерминир. наблюдение и стохаст. фильтрация: пер. с нем. В. Б. Колмановского. М.: Наука, 1982. 199 с.
5. Фильтр Калмана. URL: <https://habrahabr.ru/post/140274/> (дата обращения 15.01.2017)

PROGRAM METHODS OF MISTAKES CORRECTION IN THE COURSE OF COORDINATES DETERMINATION OF AN ARRANGEMENT OF THE SUBSCRIBER

Vyacheslav O. Semenets,
Ekaterinburg, Russia

Mikhail P. Truhin,
Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

The aim of this work is to identify ways to adjust and reduce errors arising in the process of determining the location of the subscriber. The paper examined software-only methods, since today their relevance is particularly high. In the process, we were considered major errors in determining the coordinates of the subscriber. Namely, such as receiver clock errors, and satellite, satellite instrumental delays ionospheric delays, tropospheric delays, and others. software localization error correction methods were presented such as: differential correction method, averaging method for the Kalman filter, a method of increasing the accuracy of the observations by several satellites. The method of averaging the received data based on the Kalman filter has been reviewed in detail and shows the mathematical model of the algorithm, identified ways to reduce measurement errors. According to the results of this work can be concluded. Nye-program techniques can significantly improve the accuracy of the data at the same time without increasing the number of satellites or other measuring devices in the process of determining the coordinates of the location. But they often require large computational-enforcement capacity and in need of constant development and refinement of the algorithm-atoms correction. Applying the methods considered, it is important to consider the purpose of the pro-reducible measurement, because different tasks require different accuracy And she conceived, stuyu accuracy is not as important as the speed of measurement. Not completely solved the problem today is the rapid determination of the coordinates of the object stably mo-centimeter accuracy. The solution to this problem would make it possible-it possible to solve many current problems in modern navigation.

Keywords: local coordinate; error correction software methods; the Kalman filter method; kinematic observations.

References

1. Metod sputnikovyh geodezicheskikh izmerenij [Method of satellite geodetic measurements] URL Cadastre.ru: http://wiki.cadastre.ru/doku.php?id=metod_sputnikovyh
2. RTKLib – Santimetrovaja tochnost' GPS/GLONASS v post-obrabotke [RTKLib – Centimeter accuracy GPS / GLONASS post processing] URL: <https://habrahabr.ru/post/244475/>.
3. Pershin D. Ju., Shherbakov A.S. Opredelenie mestopolozhenija vysokoj tochnosti dlja odnochastotnyh priemnikov sputnikovoj navigacii s ispol'zovaniem inercial'nyh datchikov [Determining the location of high precision single-frequency receivers for satellite navigation with integrated sensors]. Materialy XLVIII Mezhdunarodnoj nauchnoj studencheskoj konferencii "Student i nauchno-tehnicheskij progress": Informacionnye tehnologii. GIS tehnologii. Novosibirskij gos. universitet. Novosibirsk, 2011. P. 38.
4. Brammer K., Ziffing G. *Kalman-Bucy Filter-Deterministic Observing and Stochastic Filtering*. Munich: Oldenbourg- Verlag, 1975, 232 p.
5. Fil'tr Kalmana The Kalman filter // habrahabr.ru URL: <https://habrahabr.ru/post/140274/>

Information about authors:

Semenets V. O., postgraduate student of chair of the Ural technical institute of communication and informatics (branch) of federal public budgetary educational institution of the higher education «Siberian state university of telecommunications and informatics»;

Truhin M. P., lecturer of chair of the Ural technical institute of communication and informatics (branch) of federal public budgetary educational institution of the higher education «Siberian state university of telecommunications and informatics».

For citation: Semenets V.O., Truhin M.P. Software error correction methods. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 42–46. (In Russian)

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



ТПП РФ



СВЯЗЬ

Информационные и коммуникационные
технологии

25—28 апреля 2017

**В НОВЫЕ
СРОКИ**

29-я международная
выставка

Организатор:



При поддержке:

- Государственной Думы Федерального Собрания РФ
- Министерства связи и массовых коммуникаций РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ
- Федерального агентства связи (Россвязь)
- Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК)

Под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.sviaz-expo.ru

Реклама 12+



ИНФОКОММУНИКАЦИИ КАК СИСТЕМНЫЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ ФИНАНСОВ

Колотов Юрий Олегович,

д.э.н., профессор, и.о. проректора по экономике, финансам и развитию Московского технического университета связи и информатики,
г. Москва, Россия, ykolotov@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

В современном информационном обществе, основанном на знаниях, происходят кардинальные изменения структуры общественного производства в основе которых находится трансформация существенных характеристик инфраструктуры инфокоммуникационного и финансового рынков.

Применение информационных технологий на рынке финансовых услуг обусловили качественное изменение роли финансового капитала в воспроизводственных процессах. В результате интеграции инфокоммуникационного и финансового рынков происходит становление и развитие информационно-финансовой инфраструктуры, как следствие, информационно-финансовых услуг. Генезис финансового капитала привел к образованию информационно-финансового капитала и его современных форм.

По мере развития инфокоммуникационного и финансового рынков меняется роль институтов оказывающих телекоммуникационные и финансовые услуги. Происходит взаимопроникновение хозяйствующих субъектов отмеченных рынков, представляется возможным отметить наличие объективных предпосылок интеграции рынков инфокоммуникационных и финансовых услуг.

Переход к информационному обществу делает возможным развитие интеллектуальных форм бизнеса на финансовых рынках, в том числе развитие мобильной и интернет коммерции. При этом, эффективность инфокоммуникаций на рынке финансовых услуг обуславливает увеличение поступлений в структуре доходов за счет интеллектуальной ренты в результате оказания услуг финансового посредничества.

В результате интеграции инфокоммуникационного и финансового рынков происходит становление информационно-финансовой инфраструктуры предполагающей инновационное применение информационных технологий на рынке финансовых услуг. Эффективность инфокоммуникаций на финансовых рынках обуславливает качественные изменения структуры производства и отражает роль информационных технологий в развитии финансового посредничества.

На современном этапе развития финансовых рынков особое значение приобретает анализ становления современных форм финансового капитала, при этом в качестве основы формирования информационно-финансового капитала выступает инфокоммуникационная инфраструктура.

Развитие интеграционных процессов на финансовом и инфокоммуникационном рынках оказывает трансформирующее воздействие на финансовые институты. Имеет место серьезная корректировка всей институциональной среды рынков финансовых услуг. Место традиционных финансовых институтов начинают занимать предприятия, работающие в других отраслях, прежде всего, телекоммуникационной.

Ключевые слова: инфокоммуникации; информационно-финансовый капитал; инфраструктура, платежная система; финансовый рынок

Для цитирования: Колотов Ю. О. Инфокоммуникации как системный фактор развития финансов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 48-51.

Анализ финансового капитала и современное его состояние предполагает исследование генезиса финансового капитала и становления его современных форм, при этом на первый план выходит информационное обеспечение развития финансового капитала.

Поскольку Россия находится на переходном этапе не только общих рыночных преобразований, но и совершенствования финансово-кредитных отношений, готова ли она адаптироваться, взять положительное и за короткий срок внедрить в практику технологические новшества, связанные с обращением финансового капитала на базе современных телекоммуникационных систем, и преодолеть консервативность имеющегося финансово-кредитного механизма как совокупности методов, способов, приемов организации фондов финансовых ресурсов?

Предпосылки глобализации рынков капитала были созданы во второй половине XX века. Произошла стандартизация мирового капитала и его инфраструктуры (клиринговой, расчетной систем) путем регулирования и контроля за доступом всех участников рынка. Параллельно идут процессы региональной межстрановой интеграции в форме создания мировых валютно-финансовых блоков.

Глобализация экономики, как и всякое явление, несет в себе как положительные, так и отрицательные черты. Страны с целью реализации своих экономических и политических интересов стремятся объединяться в экономико-валютные союзы и создавать единые валюты.

При этом под сомнение ставится руководящая роль доллара в мировой экономике. Высказываются мнения о необходимости ухода от доллара в резервах и расчетах.

Вместе с тем, по мнению М. Хазина: «на самом деле проблема возникновения единой мировой валюты — это даже не проблема финансов, а проблема ответственности за мировую экономику. И пока ни Евросоюз, ни Китай, ни Россия не готовы взять на себя такую ответственность» [7].

На наш взгляд, несмотря на негативные моменты использования доллара в качестве мировой валюты для многих стран, объективных предпосылок для создания альтернативы нет.

Вместе с тем, в разных регионах мира постепенно создаются предпосылки для создания если не мировой, то, по крайней мере региональной валюты. Так, в рамках Совета сотрудничества арабских государств Персидского залива (ССАГПЗ¹) велись переговоры о переходе на единую валюту — динар и создание единого Центрального банка.

Экономико-валютные союзы в мировой практике получают все большее развитие. Наиболее известным и значимым является Европейское экономическое сообщество (ЕЭС) имеющее общую валюту — евро. В рамках Евросоюза проводится единая валютная политика, а также контролируются ряд других макроэкономических параметров. Вместе с тем, большое количество вопросов связанных с финансовыми рынками, страховыми услугами и др. регулируется на

национальном уровне. Следует отметить, что обозначилась тенденция к реинтеграции в рамках ЕС (выход из союза Великобритании), что создает предпосылки к нестабильности евро и, в целом, экономической структуры ЕС.

При этом у отечественного рынка есть определенные особенности, в частности, международные системы денежных переводов на российском рынке являются лидерами только при пересылке средств за рубеж (здесь на Western Union и его конкурента MoneyGram приходится порядка 50% валютных переводов), а на территории СНГ формируются свои достаточно сильные игроки, которые не стремятся за пределы бывшего СССР. В частности, сейчас, по некоторым данным, система «Юнистрим» контролирует около 25% рынка стран СНГ [6].

Основные платежные карточные системы — Visa и MasterCard — стали мировыми лидерами еще в 70-х годах прошлого века и остаются ими по сегодняшний день. В России на них приходится более 65% рынка в пропорции 40% и 25% соответственно. [4, с. 18] При этом, в результате введенных против России санкций, в том числе в финансовом секторе, была активизирована работа по созданию и внедрению отечественной платежной системы. Так, на карты платежной системы «МИР» с 2018 г. планируется перевод всех социальных и бюджетных денежных выплат.

Претерпела существенные изменения корпоративная структура и финансовая инфраструктура экономики. Процессы консолидации финансового и промышленного капитала качественно возросли. Основой глобализации являются крупные ТНК (промышленные и финансовые). На межгосударственном уровне глобализация основана на регламентирующих действиях МВФ, Всемирного банка, клубов кредиторов (Парижский, Лондонский).

Вместе с тем, одновременно происходит реинтеграция отдельных стран поскольку бедные страны обладают существенно меньшими возможностями по внедрению информационных технологий. Кроме того, существуют цивилизационные различия (экономические, языковые, культурные, религиозные и др.).

В целом, современную экономику представляется возможным охарактеризовать как информационно-глобальную с главенствующим положением финансовых рынков, что позволяет определить ее отличительные черты и взаимосвязь между ними.

Отмеченный тезис подтверждается изменением структуры совокупного капитала в последние десятилетия. Так, по стоимости финансовый капитал превысил другие виды капитала более чем в 2 раза. На рубеже веков в ведущих странах Западной Европы размеры «невещного» капитала (включая и финансовый) превышали объемы основного капитала в 1,5 раза, а в США — в 2,4–2,6 раза, что говорит о росте затрат на создание информационных технологий, служащих основой финансирования общественной жизни [5].

Необходим инновационный вариант развития. По объему ВВП Россия в первой десятке, но если разделить ВВП страны на численность населения, то по уровню ВВП на душу населения мы не попадаем даже в тридцать стран.

¹ССАГПЗ — создан в 1981 г., в 1983 г. создана зона свободной торговли, в 2003 г. был создан таможенный союз.

Вследствие того что у России не хватает ресурсов превратить всю экономику в инновационную, целесообразно выделить несколько несырьевых зон экономического роста, где российские компании имеют реальный потенциал доминирования в соответствующих секторах мировой экономики [3].

Финансовый сектор неразвит и нестабилен. Необходимо комплексное развитие финансовой инфраструктуры на основе применения инфокоммуникационных технологий.

Отрасль инфокоммуникаций — это комплекс организаций (предприятий) обладающих общностью создаваемых инфокоммуникационных услуг, применяемых технологий, факторов производства и удовлетворяемых потребностей [2].

Полагаем, что игнорирование возможностей, предоставляемых финансовыми рынками, как внутри страны, так и на международной арене необоснованно, поскольку международный финансовый рынок превращается во все более влиятельную силу в движении капитала в России. В этой связи представляется важным создание рынка, способного адаптироваться к потребностям и требованиям международного финансового рынка, что делает необходимым поиск и анализ наиболее эффективных механизмов интенсивного развития финансовых рынков и соответственно рынка финансовых услуг.

С созданием принципиально новых технологических систем, обеспечивающих предельно высокую скорость обращения финансового капитала, произошла интеграция сфер производства этих технологий и финансовых институтов, что выразилось в огромных капиталовложениях в отрасли репродуцирующие такие технологии. Таким образом, финансовый капитал на рубеже тысячелетий сумел преодолеть объективно ранее существовавшее противоречие между временем оборота и массой прибыли, а на рынке деривативов — временной лаг.

Современные информационно-коммуникационные системы позволили вторгнуться на рынок финансовых ресурсов огромному числу частных инвесторов и профессионалов, производящих различные финансовые сделки. Финансовый капитал стал превалировать в организации общественного производства и социальной жизни.

В современных условиях финансовые рынки становятся основным системообразующим элементом рыночного механизма распределения ресурсов: непосредственно-денежных и кредитных средств, опосредовано — всех прочих

видов товаров и услуг. Благодаря возможности определять условия мобилизации капитала они способны оказывать серьезное воздействие на объем и структуру инвестирования средств в реальном секторе экономики.

В результате интеграции инфокоммуникационного и финансового рынков информационно-финансовая инфраструктура генерирует информационно-финансовые услуги, обращение и потребление которых влияет на производство финансовых ресурсов и организацию движения финансового капитала. Представляется возможным отметить существенные изменения роли финансового капитала в воспроизводственных процессах и возникновение новой формы капитала — информационно-финансового капитала, требующего качественно отличной от прежней инфраструктуры рынка финансовых услуг, призванной сыграть ключевую роль в обеспечении устойчивого развития экономики России, выборе направления и темпов преобразований [1].

На наш взгляд, необходимо структурное изменение экономики России позволяющее эффективно применять внедряемые инновации, при этом необходимо отметить две значимые тенденции: усиление роли государства и повышение доли фондового рынка как источника финансирования корпораций.

Литература

1. Колотов Ю. О. Развитие информационно-финансовой инфраструктуры. Методологический аспект. Saarbrücken: Palmarium Academic Publ., 2012. 236 с.
2. Кузовкова Т. А., Тимошенко Л. С. Анализ и прогнозирование развития инфокоммуникаций. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия — Телеком, 2016. 174 с.: ил.
3. Инновационная экономика: научно-методическое пособие / под ред. М. В. Кудиной, М. А. Сажиной. М.: ИД ФОРУМ: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 304 с.
4. Долговский М. Рынок финансовых услуг в России: реальность и перспективы // Почта России. 2008. № 4. С. 14–19.
5. Желтоносов В. М. Финансизация экономики как глобальный процесс // Экономическая наука в XXI веке: опыт, проблемы, перспективы: сб. науч. тр. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2005. С. 166–175.
6. Зверева Т. Особенности национального рынка денежных переводов // Почта России. 2008. № 4. С. 20–21.
7. Зыкова Т. Наследники доллара // Российская газета от. 2009. № 63 (4887). С. 5.

INFOCOMMUNICATIONS AS A SYSTEM FACTOR FOR FINANCE DEVELOPMENT

Yuriy O. Kolotov,

Moscow, Russia, ykolotov@rambler.ru

ANNOTATION

Today's based on knowledge information society is dramatically changing its structure of social production due to a transformation of essential characteristics of infocommunication infrastructure and financial markets. Application of information technologies at the financial services market led to a qualitative change of financial capital's role in reproductive processes. Integration of information and communication and financial markets creates formation and development of informational and financial infrastructure as a consequence of information and financial services. Financial capital's genesis has led to the creation of information and financial capital and it's nowadays forms.

With the development of infocommunication and financial markets changes the role of institutions providing telecommunications and financial services. Economical entities of these markets starts to penetrate each other and today its easy to note the presence of objective preconditions to the integration of telecommunication's and financial services' markets.

The transition to the information society makes possible the development of intelligent forms of business on financial markets, including the development of mobile and Internet commerce. At the same time, the effectiveness of infocommunications in financial services' market causes an increase of the revenue inside the structure of income because of intellectual property rents from provision of financial intermediation's services.

This integration of information and communication and financial markets is resulting creating of information-financial infrastructure involving innovative use of information technology in the financial services market. Infocommunication efficiency at financial markets leads to qualitative changes in the structure of production and reflects the role of information technology in the development of financial intermediation. The process of analysis of finance capital's modern forms is becoming the major task at a current financial markets' development's stage. Meanwhile the infocommunication infrastructure serves as the basis for the formation of information and financial capital.

Development of integration processes has created a transformative effect on the financial institutions in the financial markets and infocommunication. The serious adjustment of the whole institutional environment of financial services markets is taking the place. Traditional financial institutions are being swapped by companies operating in other sectors, majorly telecommunication companies.

Keywords: information communication technologies; information and financial capital; infrastructure, payment system; financial market.

References

1. Kolotov Y.O. *Razvitie informacionno-finansovoj infrastruktury. Metodologicheskij aspekt* [Development of information and financial infrastructure. Methodological aspect]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2012. 237 p.
2. Kuzovkova T.A., Tymoshenko L.S. *Analiz i prognozirovanie razvitija infokommunikacij* [Analysis and forecasting of development of info-communications]. 2 nd ed. M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2016. 174 p.
3. Kudina M.V., Sajina M.A. (Eds.). *Innovacionnaja jekonomika Innovative Economy*. M.: FORUM: INFRA-M, 2014. 304 p.
4. Dolgovsky M. *Rynok finansovyh uslug v Rossii: realnost' i perspektivy* [Market of financial services in Russia: reality and prospects]. Pochta Rossii. 2008. No. 4. Pp. 14-19.
5. Zheltonosov V.M. *Finansizacija jekonomiki kak globalnyj process* [Financialization of the economy as a global process]. *Ekonomicheskaja nauka v XXI veke: opyt, problemy, perspektivy: Sb. nauch. trudov* [Economic science in the XXI century: experience, problems, prospects: Pros. scientific. tr.]. Krasnodar: Kubanskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2005, Pp. 166-175.
6. Zvereva T. *Osobennosti nacionalnogo rynka denezhnyh perevodov* [Features remittances national market]. Pochta Rossii. 2008. No. 4. Pp. 20-21.
7. Zykova T. *Nasledniki dollara* [Heirs dollar]. Rossiyskaya Gazeta. 2009. № 63 (4887). P. 5.

Information about author:

Kolotov Y. O., PhD, professor, acting Vice-Rector for economy, finance and development Moscow Technological University of Communication and Informatics.

For citation: Kolotov Y. O. Infocommunications as a system factor for finance development. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 48-51. (In Russian)

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

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

Нестеренко Олег Евгеньевич,

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления
Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия, benaffee@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В условиях повышения требований к эффективности вычислительных комплексов, используемых при построении информационных систем и сетей специального назначения, особую актуальность приобретают вопросы повышения их производительности. В качестве основного показателя эффективности исследуемого вычислительного комплекса информационной системы выбрано количество обработанных заявок в единицу времени, а основным показателем, характеризующим данное свойство, является длительность выполнения программы, реализующей алгоритм обработки информации. Сокращение данного показателя предполагается за счёт рационального распределения операций между вычислительными модулями и узлами.

Раскрыты основные направления исследований и развития вычислительной техники, позволяющие увеличить производительность вычислительных систем и комплексов различного назначения. Причём отмечена важность совершенствования научно-методического аппарата формирования информационной структуры параллельных программ.

Определены особенности иерархических вычислительных систем, обуславливающие сложности при формировании информационной структуры параллельных программ, выполняемых на них. Поставлена задача формирования информационной структуры параллельной программы, доставляющей максимум аргумента функции длительности её выполнения. В качестве исходных данных используется граф структуры программы и некоторые характеристики вычислительной системы. Результатом выполнения алгоритма является оптимальный (по длительности) план выполнения операций параллельной программы в форме матрицы назначений операций на вычислительные модули системы. Отмечена возможность решения данной задачи методами математического программирования и определены основные этапы решения задач данными методами.

Выделены основные особенности при формировании математической модели задач математического программирования. Определены основные ограничения, накладываемые на область допустимых решений. Рассмотрены основные группы методов решения задач целочисленного программирования.

Задача о формировании информационной структуры параллельной программы сведена к решению общей задачи линейного программирования. В качестве метода оптимизации информационной структуры выбран симплекс метод. Доказана целочисленность решений данной задачи методами линейного программирования. Получен оптимальный план выполнения операций параллельной программы без учёта ограничений на количество вычислительных модулей системы.

Предложен алгоритм формирования информационной структуры программы на основе оптимального плана выполнения операций без учёта требований по максимальному количеству вычислительных модулей системы.

Ключевые слова: вычислительная система; вычислительный комплекс; NUMA; параллельная программа; длительность информационного обмена.

Для цитирования: Легков К.Е., Нестеренко О.Е. Алгоритм формирования информационной структуры параллельных программ иерархической вычислительной системы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 52-59.

Введение

Рост масштабов и сложности решаемых задач средстами информационных систем и сетей специального назначения (ИС СН) в условиях повышения требований к эффективности, обуславливает необходимость поиска путей увеличения значений показателей оперативности вычислительных систем и комплексов, при выполнении целевых задач [1].

В настоящий момент на смену устаревшим вычислительным комплексам (ВК) приходят перспективные вычислительные системы, выполняющие следующие задачи [2]:

- многоканальная цифровая обработка информации в режиме реального времени;
- управление аппаратурой различного назначения;
- реализация универсальных алгоритмов обработки информации на пунктах управления.

Однако в настоящий момент времени имеет место использование устаревшего программного обеспечения (разработанного для ВК старого парка) на современных вычислительных системах, что не позволяет им функционировать в полном объеме за счет неэффективного использования аппаратного ресурса.

Проведенный анализ показал, что данное несоответствие обусловлено в основном несовершенством научно-методического аппарата используемого для организации параллельных вычислений. Это связано, прежде всего, с отсутствием учёта характеристик и особенностей информационного обмена между компонентами иерархических вычислительных систем, находящихся на разных уровнях с учётом накладываемых требований по функционированию в режиме реального времени [3].

Постановка задачи

Одним из основных показателей эффективности функционирования ИС СН является количество обработанных заявок в единицу времени. Очевидно, что данный показатель находится в прямой зависимости от показателя производительности вычислительных средств, обрабатывающих поступающие заявки.

Если принять предположение о том, что на обработку одной единицы информации используется n циклов некоторой программы обработки, то можно сделать вывод о том, что количество обработанных заявок в единицу времени C зависит от длительности выполнения T_g программы, реализующей алгоритм обработки и количества циклов его выполнения, т.е.:

$$C = f(n, T_g) \quad (1)$$

Под длительностью выполнения программы будем понимать время, затрачиваемое ею на обработку информации с момента поступления её на вход до получения всех выходных данных [4].

Сокращение длительности выполнения программы достигается за счёт:

- совершенствования элементной базы;
- развития архитектурных решений по построению вычислительных систем;

оптимизации алгоритмов реализуемых в программном обеспечении.

Если первые два направления вполне очевидны и лежат в области технологических достижений промышленности, то вопросам оптимизации алгоритмов реализуемых в программном обеспечении незаслуженно уделено значительно меньше внимания.

Особенностью вычислительных систем, способных осуществлять параллельную обработку информации, является наличие значительных временных издержек на информационное взаимодействие, между её компонентами, находящимися на разных иерархических уровнях. Необходимость их учёта обуславливает сложность формирования параллельных структур программ.

Предположим, задана вычислительная система (ВС) (рис. 1):

$$S(K(q, c), n, m)$$

где, n — количество вычислительных узлов (ВУ), объединённых коммуникационной средой $K(q, c)$;

m — количество вычислительных модулей (ВМ), входящих в состав вычислительного узла, объединённых общей шиной (второй уровень);

c — объём буфера коммутатора сети;

q — пропускная способность коммутатора;

На нижнем уровне ВС расположены ВМ, которые объединены шиной HyperTransport и формируют ВУ. На втором уровне ВС ВУ объединены через коммуникационную среду InfiniBand или Gigabit Ethernet.

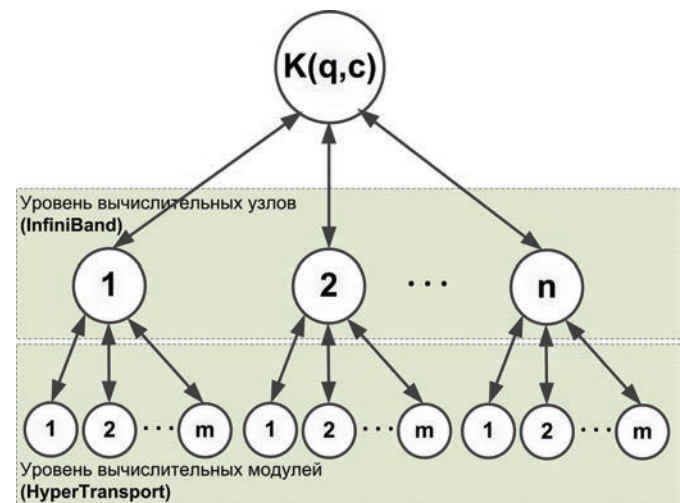


Рис. 1. Двухуровневая вычислительная система

В соответствии с рис. 2 определена программа, реализующая алгоритм обработки информации:

$$P(G(V, U), T, K)$$

где, $G(V, U)$ — граф описывающий структуру информационных обменов $u_i (i = \overline{0, n})$ между операциями $v_j (j = \overline{0, m})$;

T — множество значений длительностей выполнения t_j операций v_j ;

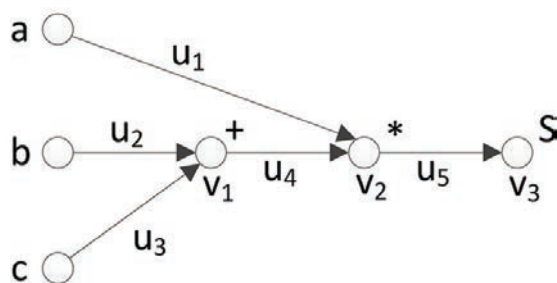


Рис. 2. Структура информационных обменов между операциями программы

K — множество значений объёмов k_i передаваемой информации при информационном обмене u_i ;

Реализация программы P на вычислительной системе S предполагает формирование матрицы $|X|$ назначений программы на ВМ, т.е.:

$$X = \|x_{ij}\|_{m \times n}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ и } j \text{ связаны} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Длительность выполнения T_g полученной реализации будет определяться временем окончания последней операции на одном из модулей, т.е.:

$$T_g = \max \left\{ \sum_{j=0}^n t_j \right\} \quad (2)$$

Соответственно, наилучшей реализацией X^* будем считать реализацию, доставляющую минимум длительности выполнения программы, т.е.:

$$X^* = \arg \min(T_g) \quad (3)$$

Таким образом, данная задача является задачей нахождения минимума функции и может решаться методами математического программирования.

Основная часть

При всем многообразии содержания конкретных задач, решение задачи формирования информационной структуры параллельных программ проходит последовательно следующие основные этапы:

1. Постановка задачи минимизации длительности T_g выполнения параллельной программы.
2. Построение математической модели и составление системы ограничений определяющих область допустимых решений задачи формирования информационной структуры параллельных программ.
3. Выбор метода решения и решение задачи.
4. Проверка полученного плана выполнения операций параллельной программы на его адекватность и его корректировка.

В построении математической модели можно выделить следующие этапы:

1. Выбор неизвестных величин $X = (x_0, x_1, \dots, x_n)$, воздействуя на которые можно изменять длительность выполнения программы. При решении задачи формирования информационной структуры параллельной программы, данной величиной является момент времени начала x_i каждой операции. Эти величины также называются переменными, управляемыми параметрами, планом, стратегией и т.д.

2. Необходимо выделить цель формирования информационной структуры параллельной программы и записать ее в виде математической функции от выбранных переменных. Такая функция называется целевой (функция цели, критерий оптимальности, критерий качества, показатель эффективности и т.д.) и позволяет, изменяя значения управляемых параметров x_i выбрать наилучший вариант из множества возможных. В нашем случае функцией цели является длительность выполнения программы (2).

3. Запись в виде математических соотношений (уравнений, неравенств) условий, налагаемых на переменные. Эти соотношения называют ограничениями.

Программой предполагается выполнение элементарных операций, на которые накладываются следующие ограничения:

1. Ограничения на возможность только последовательного выполнения двух операций.
 2. Ограничение на целочисленность решения.
- Обозначим через x_j, x_k ($j < k$) моменты начала выполнения некоторых операции, соответственно длительности выполнения этих операции — t_j, t_k .

Тогда в формализованном виде ограничения первой группы примут вид:

$$x_j + t_j \leq x_k \quad (4)$$

Ограничение второй группы:

$$x_i \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

Учитывая требование по целочисленности решения, то предполагается решение поставленной задачи методами дискретного (целочисленного) математического программирования.

К числу наиболее распространённых методов решения задач целочисленного программирования относятся:

- методы отсечений
- комбинаторные методы.

Несмотря на то, что методы отсечений являются надёжным средством решения некоторых задач, имеющих специальную структуру, данные методы не подходят для решения задачи формирования информационной структуры параллельной программы большой размерности. Более того, при непреднамеренном изменении порядка следования ограничений, вычислительная сложность решения значительно увеличивается [5].

В основе комбинаторных методов лежит идея перебора всех допустимых целочисленных решений задачи формирования параллельной программы. Разумеется, на первый план здесь выдвигается проблема разработки процедур, позволяющих непосредственно рассматривать лишь отно-

нительно небольшую часть указанных решений. Наиболее известным комбинаторным методом является метод ветвей и границ, который также опирается на процедуру решения задачи с ослабленными переменными.

Согласно общей идее метода сначала решается задача линейного программирования без учёта требований целочисленности. Пусть x_r — целочисленная переменная, значение x_r^* — которой в оптимальном решении ослабленной задачи является дробным. Интервал $[x_r] < x_r < [x_r^*] + 1$ не содержит допустимых целочисленных компонент решения. Поэтому допустимое целое значений x_r должно удовлетворять одному из неравенств:

$$\begin{aligned} x_r &\leq [x_r^*] \\ x_r &\geq [x_r^*] + 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Введение этих условий в задачу с ослабленными ограничениями порождает две не связанные между собой задачи. Осуществляемый в процессе разбиения учёт необходимых условий целочисленности позволяет исключить части многогранника допустимых решений, не содержащие точек с целыми координатами. Затем каждая подзадача решается как задача линейного программирования с целевой функцией исходной задачи.

Рассматривается полностью целочисленная задача определения оптимальных моментов времени начала операций x_i (оптимальный план выполнения программы):

Минимизировать момент окончания последней операции, т. е.

$$L = c^T x = x_n \rightarrow \min \quad (7)$$

При ограничениях:

$$Ax \leq b \quad (8)$$

$$x \leq 0 \quad (9)$$

$$x \in \mathbb{Z} \quad (10)$$

Пусть задан граф $G(V, U)$ информационной структуры программы (рис. 3), для которого необходимо получить оптимальный план.

Для ограничения целевой функции введены две операции (x_1 и x_{12}) нулевой длительности. Операция x_1 соединена с операциями не имеющими входящих дуг, а x_{12} с операциями не имеющими исходящих.

Известна длительность t_i выполнения каждой из операций (табл. 1).

Очевидно, что в этом случае задача сводится к минимизации момента начала операции x_{12} , а вся система при-

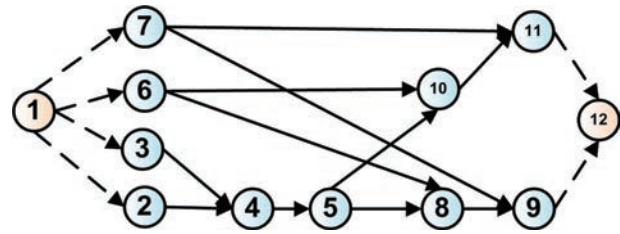


Рис. 3. Граф информационной структуры программы

мет (с учётом ограничений на порядок следования операций) примет вид:

$$\begin{cases} z = x_{12} - x_0 \rightarrow \min \\ x_1 \leq x_2; \quad x_1 \leq x_3; \quad x_1 \leq x_6; \quad x_1 \leq x_7; \\ x_2 + 6 \leq x_4; \quad x_3 + 7 \leq x_4; \quad x_4 + 3 \leq x_5; \\ \dots \\ x_{11} \leq x_{12}; \quad x_9 \leq x_{12} \\ x_i \in \mathbb{Z} \\ x_i \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Соответствующая системе уравнений матрица примет вид (табл. 2).

Оптимальное решение x^* задачи линейного программирования (7-9) соответствует вершине выпуклого многогранника $M(A,b)$, задаваемого ограничениями (8), (9). Тогда, если все решения, соответствующие вершинам многогранника $M(A,b)$ целочисленны, то и оптимальное решение x^* будет целочисленным.

Пусть G множество целочисленных точек, принадлежащих $M(A,b)$. Тогда множество решений задачи (7-10) содержится в выпуклой оболочке $M(G)$. Очевидно, что $M(G) \subseteq M(A,b)$. Следовательно, если выделить класс задач целочисленного линейного программирования, для которых $M(G) = M(A,b)$, то для нахождения оптимального решения в таких задачах можно использовать методы линейного программирования.

Многогранник $M(A,b)$, задаваемый ограничениями (8), (9), является целочисленным при любом целочисленном b тогда и только тогда, когда матрица A абсолютно унимодулярна [6]. Причём, матрица A называется абсолютно унимодулярной, если любой минор (любого порядка) матрицы A равен $\{-1; 0; 1\}$.

Очевидно, что матрица A задачи (11), является унимодулярной, таким образом можно сделать вывод о целочисленности её решения методами линейного программирования.

Таблица 1

Длительность выполнения каждой операции

Операция:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длительность:	0	6	7	3	7	1	7	3	7	3	7	0

Таблица 2

Симплекс-таблица системы

БП	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	Свободный член
	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-6
	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-7
	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-3
	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	-7
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	-7
	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	-1
	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	-7
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	-7
	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	-3
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-7
Z	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Если решение задачи линейного программирования (ЗЛП) существует, то оно достигается хотя бы в одной вершине (опорном решении) многогранника допустимых решений, следовательно, поиск оптимального решения необходимо осуществлять среди вершин многогранника (опорных решений). Однако при больших значениях m и n , перебор всех вариантов практически невозможен. Для решения данных задач был предложен симплекс-метод, разработанный в 1947–49 гг. американским математиком Дж. Данцигом. Идея симплекс-метода состоит в целенаправленном переборе вершин многогранника допустимых решений (опорных планов) в направлении «улучшения» значений целевой функции.

В результате решения ЗЛП (11) симплекс методом был получен оптимальный план, со значением целевой функции $z = 27$. Моменты начала каждой из операций представлен в табл. 3.

Соответствующий решению сетевой график выполнения операций представлен на рис. 4.

Данный сетевой график построен без учёта ограничений по количеству исполнителей операций. Для выполнения плана, соответствующего данному графику необходимо 3 элементарных исполнителей.

Предположим в вычислительной системе, на которой предполагается выполнение параллельной программы, имеется $m = 2$ вычислительных модулей. Таким образом, при реализации данного плана возникает «узкое место» в интервале между моментами времени 16 и 20. Разрешить данное противоречие возможно, перемещением операций 7, 6 и 10 на другие вычислительные модули (например,

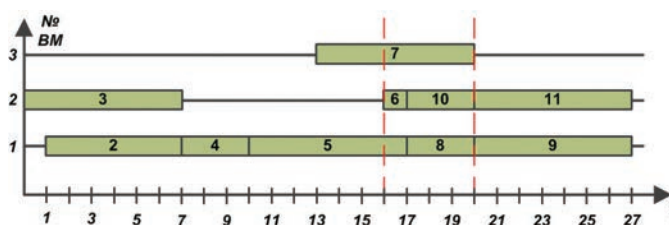


Рис. 4. Оптимальный сетевой график выполнения операций

на второй вычислительный модуль в интервале времени между моментами 7 и 16) с учётом требований по порядку следования операций, т.е. момент начала операции x_7^* после перемещения должен соответствовать ограничениям:

$$\begin{aligned} x_7^* &\geq x_1 + 0 \\ x_7^* &\geq 7 \end{aligned} \tag{12}$$

А момент окончания удовлетворять ограничениям:

$$\begin{aligned} x_7^* + 7 &\leq x_{11} \\ x_7^* + 7 &\leq x_9 \\ x_7^* &\leq 16 \end{aligned} \tag{13}$$

Блок-схема выполнения алгоритма представлена на рис. 5. Основными этапами предложенного алгоритма являются:

1. Ввод исходных данных (граф информационной структуры программы $G(V, U)$ и множества длительностей T каждой операции).

2. Формирование множества ограничений, целевой функции и соответствующей им симплекс-таблицы.

Таблица 3

Решение ЗЛП (11)

Операция:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Момент начала:	0	1	0	7	10	16	13	17	20	17	20	27

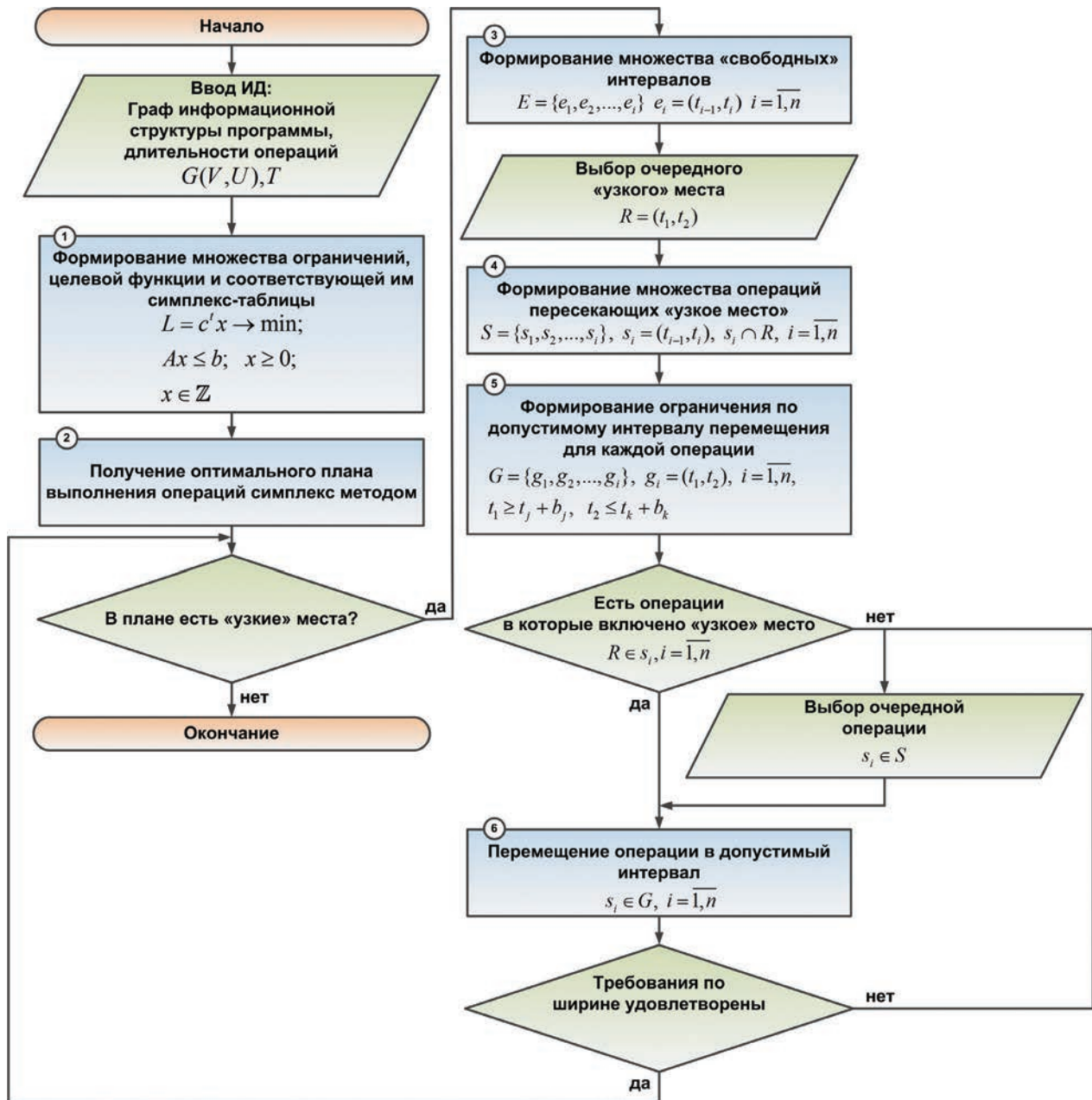


Рис. 5. Общая схема выполнения алгоритма

3. Получение оптимального плана выполнения операций симплекс методом (без учёта требований по максимальному количеству вычислительных модулей).

4. Выявление «узких мест» оптимального плана.

5. Перемещение операций.

Заключение

Преимуществом алгоритма является использование методов линейного программирования для решения целочисленной задачи формирования информационной структуры параллельной программы, не прибегая к применению комбинаторных методов решения, обладающих рядом недостатков. Эта возможность достигается за счёт использова-

ния унимодулярной матрицы, описывающей область допустимых решений задачи линейного программирования.

Таким образом, идея предлагаемого алгоритма заключается в:

1. Использовании хорошо проработанных методов линейного программирования для решения целочисленной задачи формирования оптимального плана выполнения операций параллельной программы.

2. Последовательном перемещении операций между вычислительными модулями, с целью сокращения необходимого количества вычислительных модулей, до тех пор, пока не выполнится требование по максимальному количеству модулей.

Литература

1. *Ледянкин И. А., Легков К. Е.* О некоторых концептуальных вопросах разработки параллельных структур вычислительных задач кластерных вычислительных систем // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли.* 2014. Т. 6. № 6. С. 30–38.
2. *Буренин А. Н., Легков К. Е.* Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. М.: Медиа Паблшер, 2015. 348 с.
3. *Курносков М. Г.* Алгоритмы организации функционирования распределенных вычислительных систем с иерархической структурой. Дис. ...док. технич. наук: Новосибирск, 2016. 177 с.
4. *Нестеренко О. Е.* Модель процессов организации обработки оперативной информации распределенными вычислительными комплексами специального назначения // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт.* 2016. Т. 10. № 12. С. 48–54.
5. *Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю.* Дискретное программирование. М: Наука, 1969.
6. *Линейные неравенства и смежные вопросы: сб. статей / под ред. Г. У. Куна, А. У. Таккера.* М.: Изд. иностр. лит-ры, 1959. 472 с.

THE ALGORITHM OF FORMING THE INFORMATION STRUCTURE OF PARALLEL PROGRAMS FOR HIERARCHICAL COMPUTING SYSTEM

Konstantin E. Legkov,

St-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

Oleg E. Nesterenko,

St-Petersburg, Russia, benaffee@gmail.com

ABSTRACT

Increasing performance requirements of computing systems used in the construction of information systems and networks, with particular relevance to enhancing their productivity. As the main indicator of efficiency of the investigated computing complex information system of a selected number of processed requests per unit of time, and the main measure of this property is the completion time of a program implementing the algorithm of information processing. The reduction of this indicator is expected due to the rational distribution of operations between the compute modules and nodes.

Basic directions of research and development computational techniques to increase the performance of computing systems and complexes of various purpose. And noted the importance of improving the scientific and methodological apparatus of forming the information structure of parallel programs.

The features hierarchical computing systems, causing difficulties in the formation of the information structure of parallel programs running on them. The task of forming the information structure of a parallel program that delivers the maximum argument of the function in the duration of its execution. As input data use the graph structure of the programme and some of the characteristics of the computing system. The result of this algorithm is optimal (in duration) the plan of operations of a parallel program in the form of matrix assignment operations on the computational modules of the system. The possibility of solving this problem by methods of mathematical programming and the main stages of the task solution by these methods.

Main features in the formation of mathematical models of problems of mathematical programming. The main constraints imposed on the range of permissible decisions. Describes the main groups of methods for solving problems of integer programming.

The problem of forming the information structure of a parallel program is reduced to the solution of the General problem of linear programming. As a method of optimization of the information structure chosen by the simplex method. Proved the integrality of the solutions to this problem the

methods of linear programming. The resulting optimal execution plan operations of the parallel program without restrictions on the number of computing modules of the system.

The algorithm of forming the information structure of the program based on the optimal execution plan operations without taking into account the requirements on the maximum number of compute

Keywords: computer system; computer complex; NUMA; parallel program; the duration of information exchange.

References

1. Ledyankin I. A., Legkov K. E. On some conceptual issues of development of parallel structures computing tasks cluster computing systems. *H&ES Research*. 2014. T. 6. No. 6. Pp. 30-38. (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. Kurnosov M. G. the Algorithms of functioning organization of distributed computer systems with hierarchical structure. Dissertation for the degree of doctor of technical Sciences: 05.13.15 – Novosibirsk, 2016. 177 p. (In Russian).
4. Nesterenko O. E. The process Model of the organization of the processing of operational information, distributed computer systems, special purpose. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 12. Pp. 48-54.
5. Korbut A. A., Finkelstein Y. Yu. *Diskretnoe programmirovaniye* [Discrete programming] . Moscow: Nauka, 1969. (In Russian).
6. Kuhn H. W. , Tucker A. W. (Eds.). *Lineine neravenstva i cmezhne vopros: sbornik statei* [Linear inequalities and related questions: collection of articles]. Moscow: Inostrannaya literatura Publ., 1959. 472 p. (In Russian).

Information about author:

Legkov K. E., PhD, postgraduate student, Head of the Department of automation, Military Space Academy;

Nesterenko O. E., postgraduate student of the Department of automation, Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia, benaffee@gmail.com.

For citation: Legkov K. E., Nesterenko O. E. The algorithm of forming the information structure of parallel programs for hierarchical computing system. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 52-59. (In Russian)

ANALYSIS OF CONTRAST ENHANCEMENT EFFECTS ON HISTOGRAM

Sharma Ved,

Bachelor Of Engineering in Electronic and Telecommunication Engineering,
Student, Thakur College of Engineering and Technology, Mumbai University,
Mumbai, India, vedsharma776@gmail.com

ABSTRACT

To transform the information from the sensor into an image, each colour of the scene is converted into a pixel value in the range: [0, 255]. Such a value is interpreted as the amount of photons hitting a pixel during the exposure time. This is denoted as the pixel intensity. It is visualized as a shade of gray denoted as gray-level value, ranging from black 0 to white 255. An image is a two-dimensional array of various intensity levels, which can be denoted by $f(x, y)$, where, f value denotes intensity at a particular spatial coordinate (x, y) . The intensity is a measure of the relative brightness of each point. Each point in the image denoted by the (x, y) coordinates is referred to as a pixel.

As images obtained from camera are not sharp as per our requirements. Thus image Enhancement and processing techniques are used to improve the visual appearance of the overall image. Image processing is required to remove the unwanted noise and restore the original image while Image Enhancement is required to improve the contrast. Due to low contrast, we cannot clearly distinguish objects from the dark background. Hence both, Processing and Enhancement are equally vital to improve the credibility of the image. The best Enhancement technique is the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization and we will prove how it is better than Histogram Equalization and Adaptive Histogram Equalization by using Histogram Plot as a comparison factor. MATLAB software has been used to perform the analysis on image. The subsequent advantages and disadvantages of all the enhancement techniques have also been discussed along with their algorithm and analysis. The contrast equalization can be used for many purposes where the detection of target from background in image is important such as Defence, Medical and Astronomy.

Keywords: Contrast Enhancement; Histogram Plot; Histogram Equalization; Adaptive Histogram Equalization; Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization.

For citation: Sharma V. Analysis of contrast enhancement effects on histogram. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 60-66.

1. Introduction and Methodology:

The aim of Contrast enhancement process is to adjust the local contrast in different regions of the image so that the details in dark or bright regions are brought out and revealed to the observer. Hence, we need to balance the contrast. Contrast enhancement is usually applied to input images to obtain a superior visual appearance of the image by transforming original pixel values using a transform function of the form.

$$G(x, y) = T[r(x, y)]$$

Where, $g(x, y)$ and $r(x, y)$ are the output and input pixel respectively, and T is the operator or which varies the enhancement of output image. Various Contrast enhancement techniques like Histogram Equalization (HE), Adaptive Histogram Equalization (AHE) and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization have been discussed in this paper.

There are three important methods to process an image. These are spatial-based domain, frequency-based domain and Global & Local methods.

1.1. Spatial based domain:

Spatial domain methods operate directly on these pixels. Image processing functions in the spatial domain may be expressed as:

$$g(x, y) = T[f(x, y)]$$

where $f(x, y)$ is the input image data, $g(x, y)$ is the processed image data, and T is an operator on f , defined over some neighborhood of (x, y) .

1.2. Frequency based domain:

The foundation of frequency domain techniques is the convolution theorem. The processed image, $g(x, y)$, is formed by the convolution of an image $f(x, y)$ and a linear, position-invariant operation $h(x, y)$, that is

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y)$$

By the convolution theorem, the following frequency domain relation holds

$$G(u, v) = H(u, v) F(u, v)$$

where G , H and F are the Fourier transforms of g , h and f respectively. $H(u, v)$ is called the transfer function of the process. In a typical image enhancement application, $f(x, y)$ is given and the goal, after computing $F(u, v)$, is to select an $H(u, v)$ so that the desired image $g(x, y)$ exhibits some highlighted feature of $f(x, y)$, i.e.

$$g(x, y) = F^{-1} [H(u, v) F(u, v)]$$

For instance, edges in $f(x, y)$ can be accentuated by using a function $H(u, v)$ that emphasizes the high-frequency components of $F(u, v)$.

1.3. Global & Local Methods:

Image processing methods that involve using a single transformation function for the whole image are classified as global methods. The low pass/high pass filters and histogram transformation are examples of global enhancement methods. The main advantage of global methods is that they are computationally inexpensive and simple to implement. However, global methods may attenuate or miss local information while working on the overall characteristic of the image. The transformation function of a local processing method is dependent on the location and the neighbourhood of the pixel looked at,

$$g(x, y) = T[x, y, f(x, y)]$$

These methods are therefore “adaptive” to the local information within the image.

Adaptive histogram equalization is an example of such a local processing method and is effective in enhancing details in local areas of the image.

2. Histogram & Histogram Plot:

An image histogram is a plot of the distribution of intensities or gray levels in an image. The histogram of a digital image with gray levels in the range $[0, L-1]$ can be represented by the discrete function.

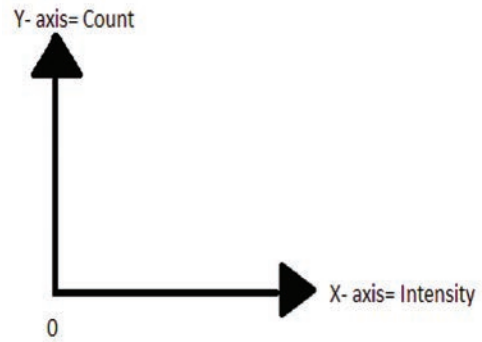


Fig. 1. Basic Histogram plot

$$P(r_k) = n_k/n$$

where r_k is the k th gray level, n_k is the number of pixels in the image with that gray level, n is the total number of pixels in the image, and $k = 0, 1, 2, \dots, L-1$. The image histogram gives an estimate of the probability of occurrence of a gray level. Contrast is the difference between maximum and minimum pixel intensity. Histogram is basically a graph (Histogram plot) showing number of pixels in an image at each intensity value found in that image (fig. 1).

2.1. Contrast Enhancement:

Contrast Enhancement is a technique which is generally involved with manipulating the histogram plot so as to make the object in the image distinguishable from its background. The most widely used Contrast Enhancement techniques are Histogram Equalization, Adaptive Histogram Equalization and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. These three techniques will be further analysed with their histogram plots.

2.2. Histogram Plot relative to Contrast Enhancement:

Increasing Contrast increases the intensity and decreases the count.

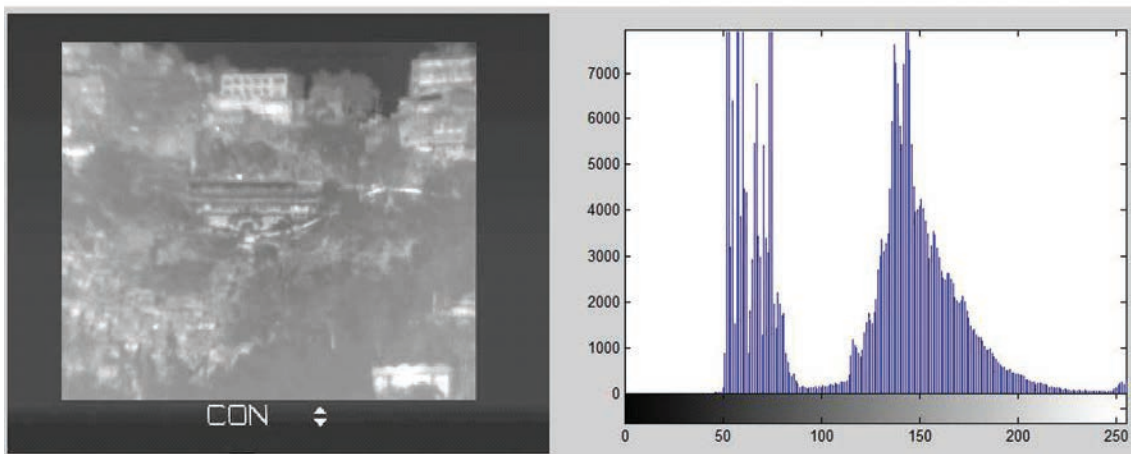


Fig. 2. Original Image and it's Histogram plot

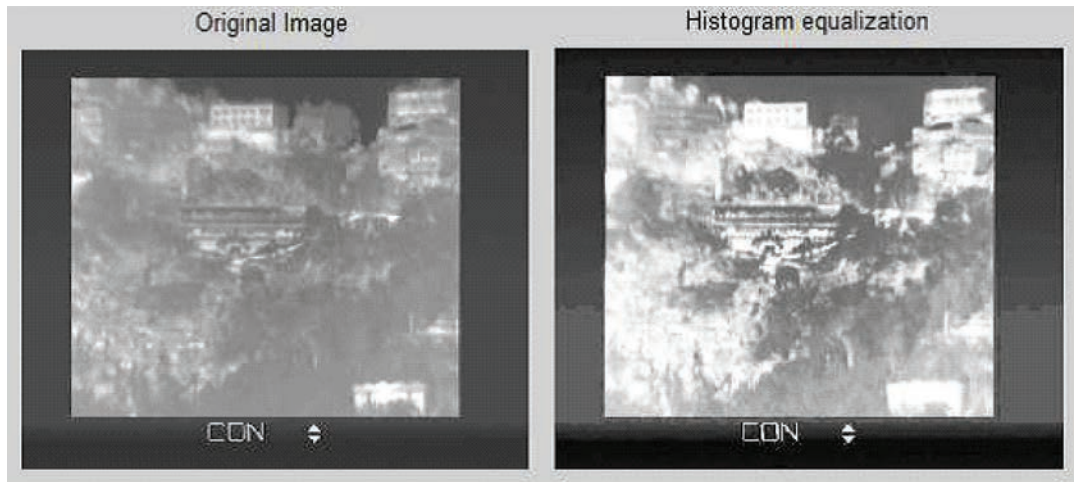


Fig. 3. Original Image and Histogram Equalized Image

Increasing Brightness increases the count and decreases the intensity.

The Histogram of the sample Image is shown in fig. 2, which has intensity values from 47 to 255 and maximum count of 8000. The image does not has a good contrast, thus we need to apply Contrast Enhancement techniques to make its appearance better for various application.

Histogram Plot is the most effective tool in easily understanding the property variations imposed by filter and enhancement techniques on an Image.

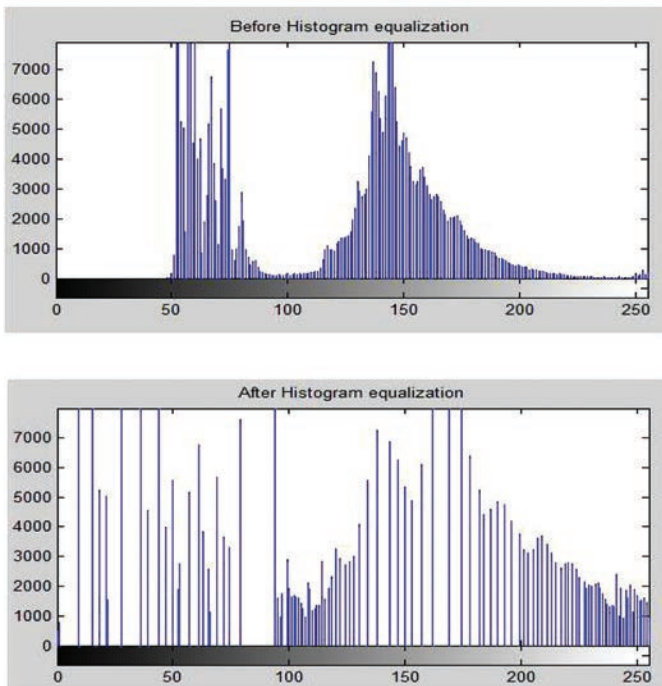


Fig. 4. Histogram plot of original Image and Histogram Equalized Image

3. Histogram Equalization (HE):

The histogram of an image (fig. 3) indicates the frequency of occurrence of particular gray levels over the complete range of gray levels for a particular image. It also represents the probability of such an occurrence. The probability of occurrence of all gray level pixels should be uniform. In histogram equalization, the goal is to obtain a uniform histogram distribution for the output image, so that an optimal overall contrast is perceived. The algorithm of the histogram equalization process is as follows:

Let the variable r represent the gray levels in the image to be enhanced or equalized.

The pixel values can be normalized to form continuous quantities in the interval $[0, 1]$, with $r = 0$ representing black and $r = 1$ representing white. For any r in the interval $[0, 1]$, the transformation is of the form:

$$s = T(r),$$

it produces a gray level s for every level of r in the original image. It is assumed that the transformation function satisfies the conditions:

(a) $T(r)$ is single-valued and monotonically increasing in the interval $0 \leq r \leq 1$; which means it preserves the order from black to white in the gray scale

(b) $0 \leq T(r) \leq 1$ for $0 \leq r \leq 1$, which means it guarantees a mapping that is consistent with the allowed range of gray levels.

The inverse transformation from s back to r is then denoted

$$r = T^{-1}(s), 0 \leq s \leq 1$$

where, the assumption is that $T^{-1}(s)$ also satisfies conditions (a) and (b) with respect to the variable s .

The gray levels in an image may be viewed as random quantities in the interval $[0, 1]$. If they are continuous variables, both the original and transformed gray levels can be characterized by their probability density function $p_r(r)$ and $p_s(s)$ respectively, where the subscripts on p are used to indicate that p_r and p_s are different functions. This is then followed by cal-

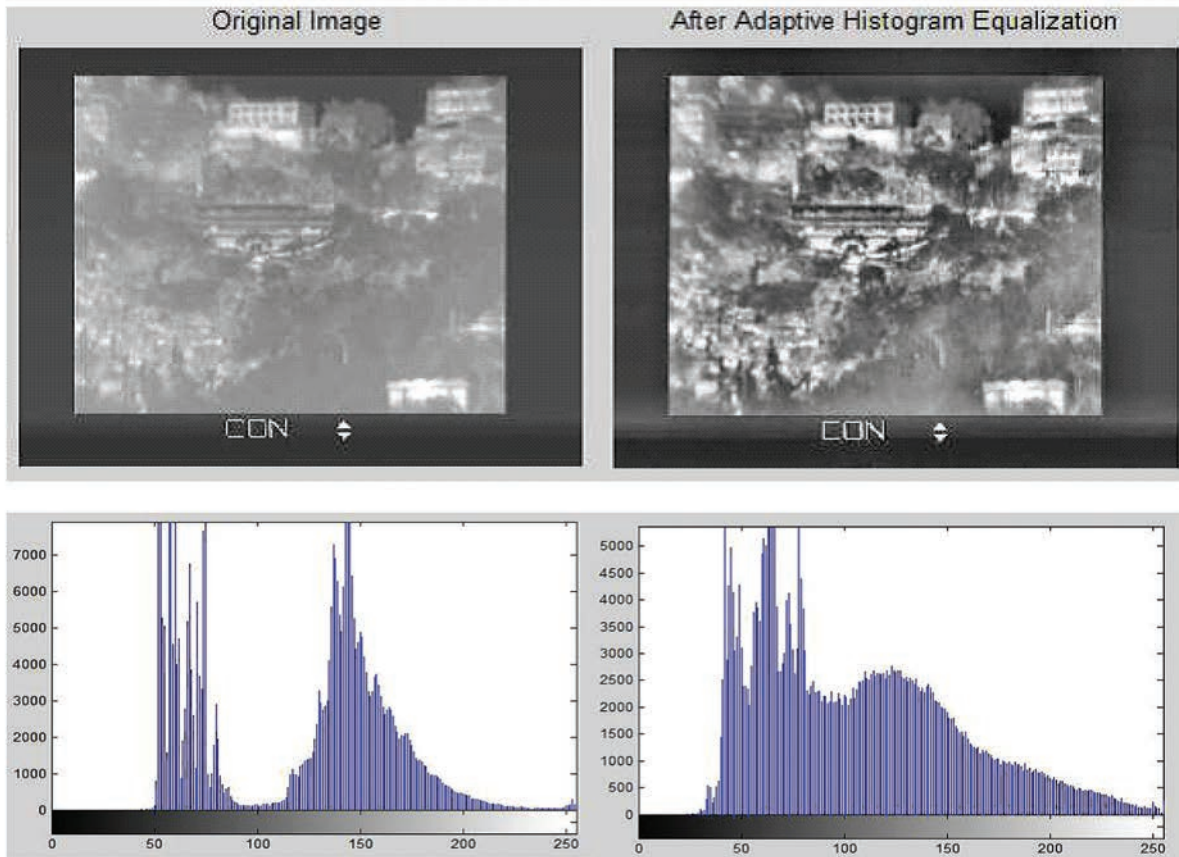


Fig. 5. Original Image and Adaptive Histogram Equalized Image with their respective Histogram plots

culating the PDF (Probability Density Function) and CDF (Cumulative Density Function) of r as the transformation function produces an image with uniform density gray levels and with better contrast distribution (fig. 3, 4).

4. Adaptive Histogram Equalization (AHE):

Adaptive Histogram Equalization (AHE) algorithm is similar to Histogram Equalization procedure which modifies the data based on local image data. The main aim in AHE is to divide the entire image into multiple grids of different regions and then apply the normalised Histogram Equalization in each grid. The number and size of regions vary according to input image. The standard size is 8×8 pixels. Also a linear interpolation technique is used for a smooth interfacing between the adjacent region boundaries (fig. 5).

Advantage: AHE overcomes the limitations of HE and it improves the visual presentation of information present in the image.

Disadvantage: AHE is not able to separate between the actual information and noise in the regions and because of it the noise also gets amplified in region.

5. Contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE):

The only disadvantage in AHE is the noise problem which can be scaled down by limiting contrast enhancement

in the homogenous areas and it is used in CLAHE technique. CLAHE allows only a specific number of pixels in each bin of each local histogram. The Histogram is accordingly clipped and then the pixels from the clipped area are redistributed equally over the entire range of original histogram so as to keep total count of histogram same. The clipping limit is the average of histogram contents. Clip limit is the contrast factor. Clip limit value selection should be appropriate as a very low value results in no contrast enhancement and is just reflection of the original image. While a very high value results in a image identical to AHE. The advantage of CLAHE is it's simple computational requirements and supreme results on images (fig. 6).

Below figure compares the CLAHE result to that obtained by the standard histogram equalization method. The CLAHE image has less amplified noise and avoids the brightness saturation in the standard histogram equalization. CLAHE does have its limitations. Since the method is aimed at optimizing contrast, there no direct one-to-one direct relationship between the gray values of the original image and the CLAHE processed result. Pixels of the same gray level in the original image may be mapped to different gray levels in the output image, because of the equalization process and bilinear interpolation. Consequently, CLAHE images are not suited for quantitative measurements.

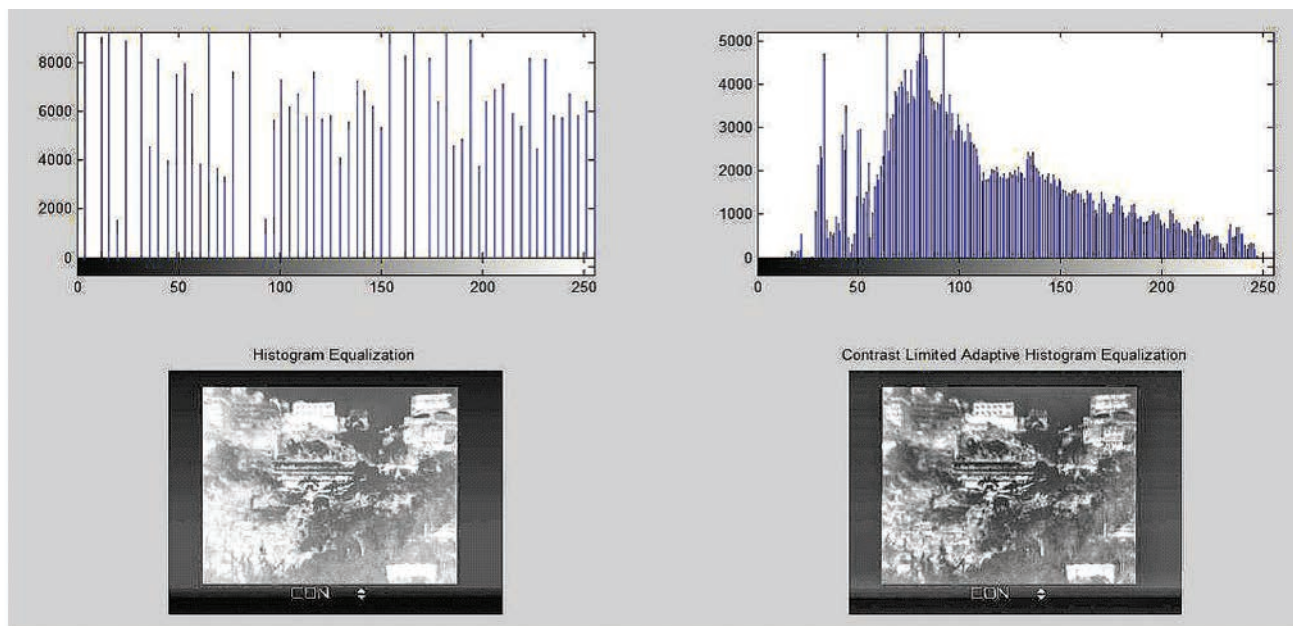


Fig. 6. Histogram Equalized and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalized Image with their respective Histogram plots

Analysis of enhancement results:

The comparison of Original Image, Histogram Equalized Image, Adaptive Histogram Equalized Image and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalized Image prove that CLAHE Image has the best Contrast Enhancement. Also, CLAHE has a good balance of Count (Y-axis) vs Intensity (X-axis). As the image moves from original to HE to AHE then CLAHE, we can observe variations in both count and intensity. HE has good count values but it has far less intensity and distance between the adjacent intensities is more. While AHE has good intensity levels but it lacks in the count, its count is half of that of HE. Intensity values increase due to Contrast stretching property. A good Enhancement technique is the one in which there is proper count and intensity balance also it should be an overall smooth curve. All these characteristics are only obtained in Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. Thus CLAHE is the best technique to obtain balanced and enhanced Images.

The CLAHE algorithm is a digital contrast enhancement technique that emphasizes local details in the image while limiting noise amplification. This process is achieved with local histogram equalization and clipping, followed by bilinear interpolation. CLAHE contrast enhancement has been found to be visually significant and object detection is improved with the higher contrast in the images. Examining the frequency response of the enhanced image reveals increase in the higher spatial frequencies. As higher spatial frequencies correspond to edges in the image, the increase in power represents an enhancement of the edges and hence, an increase in visible image details. This indicates that the CLAHE enhanced images were more informative than the original images. Results indicated that the CLAHE process is effective in enhancing low contrast

images. However, the improvement is limited for images with initially good contrast (fig. 7).

Conclusion

Therefore from the analysis of enhancement result it is clear that the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization has better visual appearance and a good overall histogram balance as compared to other Histogram Equalization and Adaptive histogram equalization. Thus we can extend the use of Contrast Equalization for better detection of target or object from background to many fields such as Defence, Medical Imaging, Surveillance and remote sensing.

References

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 3rd edition. Prentice-Hall, 2008, 954 p.
2. Vollmer M., Möllmann K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2010. 612 p.
3. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. 3rd edition. Thomson, 2008, 866 p.
4. URL: <https://in.mathworks.com/help/images/?requestedDomain=www.mathworks.com>.
5. Divya K.A., Roshna K.I. A Survey on Various Image Enhancement Algorithms for Naturalness Preservation. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2015. Vol. 6. No. 3. Pp. 2043–2045.
6. Yang F., Wu J. An Improved Image Contrast Enhancement in Multiple-Peak Images Based on Histogram Equalization. Proceedings of a meeting IEEE International Conference on Computer Design and Applications (Qinhuangdao 25–27 June 2010). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. Vol. 1. Pp. 346–349.

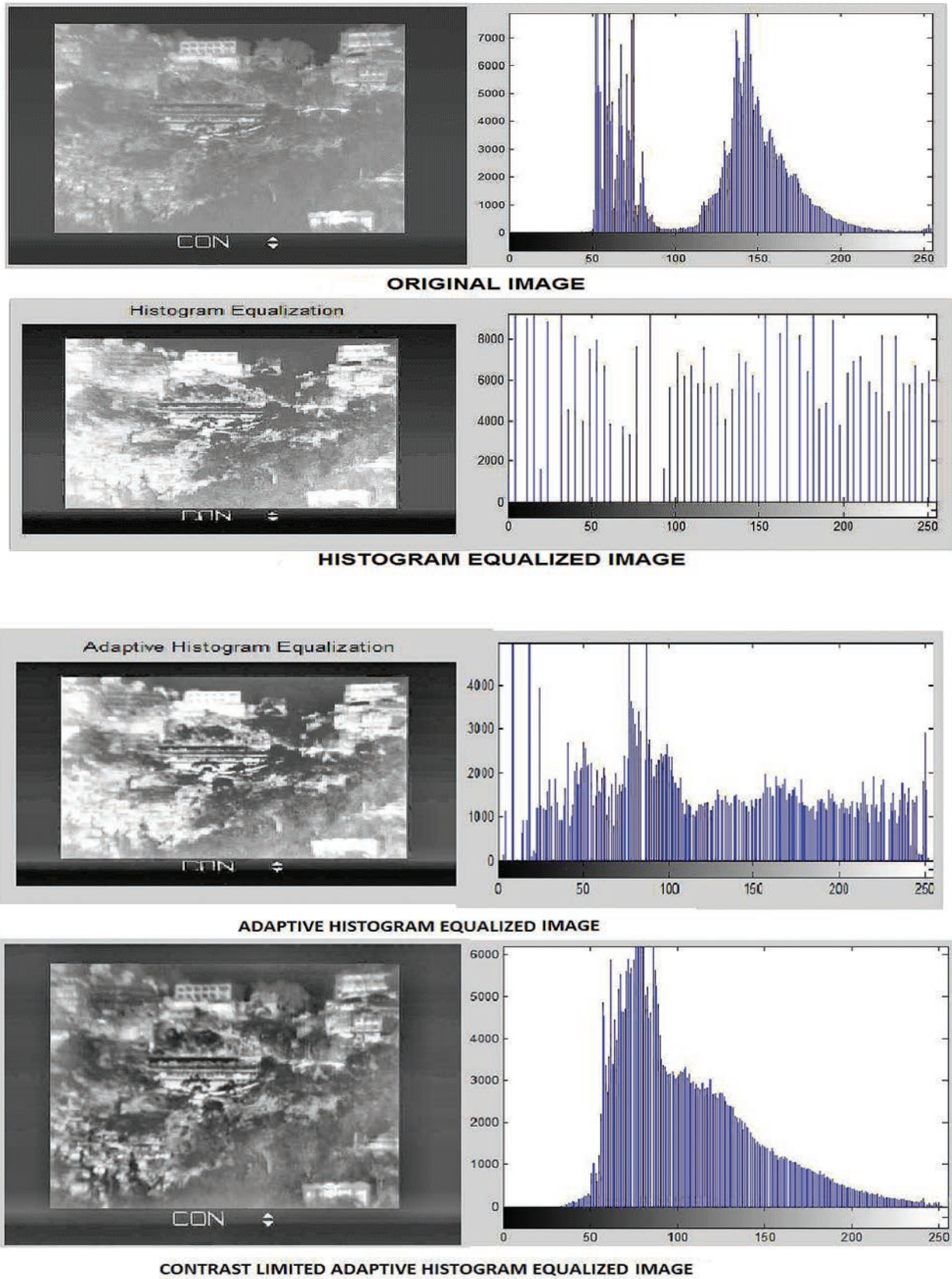


Fig. 7. Original Image, Histogram Equalized Image, Adaptive Histogram Equalized Image and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalized Image with their respective Histogram plots

АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ ГИСТОГРАММЫ

Шарма Вед,

Бакалавр технических наук, студент колледжа техники и технологии университета Мумбаи, Мумбаи, Индия, vedsharma776@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Чтобы преобразовать информацию от датчика в изображение, каждый цветовой компонент преобразован в значение пикселя в диапазоне: $[0, 255]$. Такое значение интерпретируется как количество фотонов, поражающие пиксель за время экспозиции. Это обозначается как пиксельная интенсивность. Это визуализируется как оттенок серого, обозначенного в виде серого уровня яркости, в пределах от черного 0 к белому 255. Изображение – двумерное множество различных уровней интенсивности, которые могут быть обозначены $f(x, y)$, где f значение обозначает интенсивность в особой пространственной координате (x, y) . Интенсивность – мера относительной яркости каждого точки. Каждая точка по изображению, обозначенная координатами (x, y) , называется пиксель.

Изображения, полученные с камеры, не достаточно четкие согласно нашим требованиям. Повышение качества изображения и техника обработки используются, чтобы улучшить визуальное появление полного изображения. Обработка изображения требуется для того, чтобы удалять нежелательный шум и восстанавливать исходное изображение, в то время как повышение качества изображения требуется, для того чтобы улучшать контраст. Из-за низкого контраста, мы не можем ясно отличить объекты от темного фона. Следовательно, оба метода, обработка и повышение качества одинаково жизненно важны, чтобы улучшить правдоподобность изображения. Лучшая техника повышения качества – контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы. Мы докажем, что оно лучше, чем выравнивание гистограмм и адаптивное выравнивание гистограммы при использовании графика гистограммы как фактора сравнения. Для анализа изображений использовалось программное обеспечение MATLAB. Последующие преимущества и неудобства всех методов улучшения были также обсуждены наряду с их алгоритмом и анализом. Контрастное выравнивание может использоваться во многих целях, в которых требуется обнаружение цели по изображению, в таких как оборона, медицина и астрономия.

Ключевые слова: повышение контрастности; график гистограммы; выравнивание гистограммы; адаптивное выравнивание гистограммы; контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы.

Для цитирования: Шарма В. Анализ эффектов повышения контрастности гистограммы. Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 60-66.



Уважаемые дамы и господа!

COMNEWS приглашает Вас и Ваших коллег принять участие в IX Международной конференции **SATELLITE RUSSIA & CIS 2017**.

Даты и место проведения: 13–14 апреля 2017 года, отель «Марриотт Новый Арбат» (г. Москва, ул. Новый Арбат, д.32).

Конференция **SATELLITE RUSSIA & CIS** - это единственное в России независимое мероприятие по темам спутниковой связи и вещания, производства ракетно-космической техники и пусковых услуг, а также финансирование и страхованию космической деятельности. На **SATELLITE RUSSIA & CIS** ежегодно присутствуют представители всех конкурирующих компаний из каждой ниши рынка: от разработки, производства, запуска космических аппаратов до услуг фиксированной и мобильной спутниковой связи и дистанционного зондирования Земли.

В 2017 г. конференция **SATELLITE RUSSIA & CIS** будет приурочена к значимым в международном масштабе историческим датам — к 60-летию вывода на орбиту первого в мире искусственного спутника Земли и 50-летию запуска первой в СССР сети спутниковой связи («Орбита»). Первый в мире спутник Советский Союз запустил 4 октября 1957 года, под кодовым названием ПС-1 («простейший спутник»). Первая в России и СССР спутниковая сеть — «Орбита» — начала работу 2 ноября 1967 года. Она предназначалась для доставки первой программы телевидения из Москвы в 20 городов страны в Сибири, на Дальнем Востоке и в Средней Азии, увеличив охват Центрального ТВ на 20 млн человек.

Ключевые темы **SATELLITE RUSSIA & CIS 2017**:

- Обзор рынка спутниковых услуг связи в России, Европе и мире
- Сети спутниковой связи в эпоху новой промышленной революции («Индустрии 4.0»)
- Опыт сосуществования и сотрудничества национальных и международных игроков на российском рынке
- Совместное производство космической техники на территории России: особенности взаимодействия партнеров
- Национальное производство космических аппаратов, ракет-носителей и приборов/узлов/модулей для них
- Развитие рынка VSAT и новые возможности спутникового широкополосного доступа
- Непосредственное спутниковое вещание (DTH): на пути к Ultra HD 4K и 8K
- Финансирование космических программ: кредитование, страхование, юридические аспекты
- Спутниковая связь в социально и политически значимых регионах России
- Взаимодействие сетей мобильной спутниковой связи и наземных сотовых сетей
- Частные инвестиции в космос: системы спутниковой связи на низких орбитах, новые средства выведения
- Практическое применение систем дистанционного зондирования Земли и геоинформационные системы в России

В конференции **SATELLITE RUSSIA & CIS 2017** примут участие представители регулирующих органов, руководители российских и зарубежных операторов спутниковой связи, телерадиокомпаний и операторов вещательных сетей, производителей спутников и космического оборудования, провайдеров пусковых услуг, финансовых и страховых компаний, консультанты, отраслевые и деловые СМИ, представители корпоративных потребителей услуг спутниковой связи.

Satellite Russia & CIS 2017 — это:

- Главная ежегодная площадка для обсуждения «горячих» тем и обмена опытом между российскими и зарубежными игроками рынка спутниковой связи;
- Открытый диалог между партнерами о текущих и перспективных проектах в России и СНГ;
- Демонстрация новейших решений и технологий для обеспечения развития бизнеса;
- Динамичный формат и отличные возможности для налаживания деловых связей.

Ждем Вас на конференции в Москве!

С уважением,
Татьяна Бочарова,
продюсер COMNEWS Conferences
tb@comnews.ru

По вопросам спонсорского участия, пожалуйста, обращайтесь к Сергею Болдыреву, директору по продажам COMNEWS:
sr@comnews.ru

По вопросам делегатского участия, пожалуйста, обращайтесь к Татьяне Сурковой, руководителю отдела делегатских продаж COMNEWS: **ts@comnews.ru**

Предоставляемая для публикации статья 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.

1. **Статья подготавливается в редакторе MS Word. Шаблон статьи можно скачать на сайте журнала [www. h-es.ru](http://www.h-es.ru).**

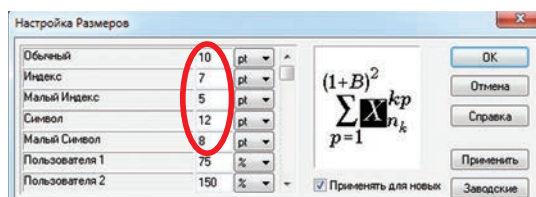
2. **Объем статьи** без аннотации – от 10 до 20 тыс. знаков. Рисунки и таблицы в объеме статьи не учитываются.

3. **Объем аннотации** 250-300 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** (не менее пяти), разделенных точкой с запятой.

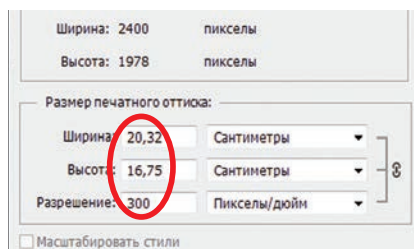
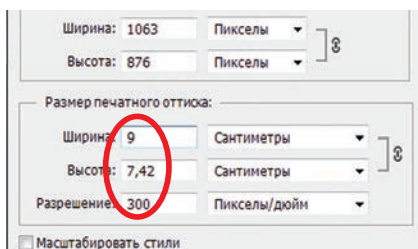
5. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и полное название организации - места работы, город, страна, адрес электронной почты и почтовый адрес каждого автора полностью.

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 8-9см. 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 четкие 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 *.tif с разрешением не менее 300 dpi для оригинального размера в печатном издании (для больших рисунков ширина от 14 до 19 см, для маленьких от 7 до 9 см).



8. **Список литературы** не менее пяти наименований, для статей – с указанием страниц, для книг – с указанием общего числа страниц в книге, для интернет-сайта – с указанием даты обращения. Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. В списках литературы не размещать ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты и другую нормативную и неперiodическую 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 7.05-2008. Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала.

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.

10. Статья предоставляется в электронном виде, единым файлом, имеющим следующую структуру: заглавие статьи, сведения об авторах, ключевые слова, аннотация, текст статьи (включая иллюстрации, таблицы и формулы), приставный список литературы, англоязычный блок. Также представляется отдельная папка с экспортированными изображениями рисунков в формате TIFF, по требованиям указанным в п.7.

11. К статье прилагается экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати и две рецензии кандидатов или докторов наук по профилю планируемой публикации материалов (сканированные копии в электронном виде).

Все материалы высылаются электронной почтой в адрес журнала: HT-ESResearch@yandex.ru

Редакция принимает к публикации статьи на английском языке.

Внимание! Редакция оставляет за собой право отклонить представленные материалы, оформленные не по указанным правилам.