ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№4 (144). 2018

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА – ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА:

Николашин Ю.Л. Генеральный директор ПАО «Интелтех». к.т.н.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА:

Кулешов И.А. Первый заместитель генерального директора ПАО «Интелтех» по научной работе. д.т.н., доцент

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА (Председатель редколлегии):

Будко П.А. Ученый секретарь ПАО «Интелтех». д.т.н., профессор

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

Катанович А.А. Главный научный сотрудник НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор. Заслуженный изобретатель РФ

Кузичкин А.В. Заместитель генерального директора Научно-исследовательского института телевидения по информационным технологиям. Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Курносов В.И. Заместитель генерального директора АО «НИИ «Рубин» по научной работе. Д.т.н, профессор. Заслуженный работник высшей школы РФ.

Лычагин Н.И. Заместитель директора научно-технического центра по развитию ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

Мирошников В.И. Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Половинкин В.Н. Научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Присяжнюк С.П. Генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Чуднов А.М. Профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Д.т.н., профессор

Яшин А.И. Заместитель генерального директора – директор научно-технического центра ПАО Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Бобровский В.И. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Виноградeнко А.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург) К.т.н., доцент

Габриэльян Д.Д. ФНПЦ «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону). Д.т.н., профессор

Дорогов А.Ю. ПАО «Интелтех» (г.Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Жуков Г.А. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). К.т.н., старший научный сотрудник

Легков К.Е. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург). К.т.н., доцент

Липатников В.А. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Макаренко С.И. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Маковий В.А. АО «Концерн «Созвездие» (г.Воронеж). Д.т.н.. старший научный сотрудник

Минаков В.Ф. ФИНЭК (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Михайлов Р.Ю. Череповецкое высшее военное училище радиоэлектроники. (г. Череповец). К.т.н.

Одоевский С.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург) Д.т.н., профессор

Пашинцев В.П. Северо-Кавказский федеральный университет. (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Путилин А.Н. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Федоренко В.В. Северо-Кавказский федеральный университет. (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Финько О.А. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (г. Краснодар). Д.т.н., профессор

Цимбал В.А. Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов). Д.т.н., профессор

Семенов С.С. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Саенко И.Б. СПИИ РАН (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Стародубцев Ю.И. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). д.т.н., профессор

EDITORIAL BOARD CHAIRMAN - JOURNAL EDITOR-IN-CHIEF:

Nikolashin Y.L. General Director of PJSC «Inteltech». Doctorate of Technical Sciences

JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Kuleshov I.A. First Deputy General Director of PJSC «Inteltech» for Scientific Work. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF (Editorial Board Chairman):

Budko P.A. Academic Secretary of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:

Katanovich A.A. Chief Research Officer of the ISIS Institute of the Navy WUNCC Navy "N.G. Kuznetsov Naval Academy". Doctor of Technical Sciences, professor. Honored Inventor of the Russian Federation

Kuzichkin A.V. Deputy Director General of Information technology television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation.

Kurnosov V.I. Director General of JSC "NII" Rubin" in scientific work. Doctor of Technical Sciences, Professor. Higher School Honored Employee of the Russian Federation

Lychagin N. I. Deputy Director of Science and Technology Development Center of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

Miroshnikov V. I. General Designer of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Polovinkin V. N. Scientific Head of FSUE Krylovsky State Scientific Center, Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Science of the Russian Federation

Prisyajnuk S.P. Director General of CJSC Institute telecommunications. Doctor of Technical Sciences, professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Chudnov A.M. Department Professor of the Communications Military Academy named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenniy. Doctor of Technical Sciences, Professor

Yashin A.I. Deputy Director General – Director of Scientific and Technical Center of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Bobrovskiy V.I. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Vinogradenko A.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg) Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Gabrielyan D.D. FNPC "Rostov-on-Don Scientific Radio Research Institute"(Rostov-On-Don). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Dorogov A.Y. PJSC "Intelteh" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Zhukov G.A. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Senior Researcher

Legkov C.E. Military Space Academy of A.F. Mozhaiskiy (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Lipatnikov V.A. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Makarenko S.I. Saint Petersburg State LETI Electrotechnical University of V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Makoviy V.A. Concern Constellation JSC (Voronezh). Doctor of Technical Sciences. Senior Researcher

Minakov V.F. FINEK (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Mikhailov R.Y. Cherepovets Higher Military School of radio electronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences

Odoevsky S.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Pashintsev V.P. North Caucasus Federal University. Institute of Information Technology and Telecommunications (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, Professor

Putilin A.N. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Fedorenko V.V. North Caucasus Federal University. (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, professor

Fin´ko O.A. Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Stemenko (Krasnodar). Doctor of Technical Sciences, Professor

Tsymbal V.A. Branch of the Great Petr RVSN Military Academy (Serpukhov). Doctor of Technical Sciences, Professor

Semenov S.S. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Saenko I.B. SPII RAN (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Starodubtsev Y.I. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

СОДЕРЖАНИЕ

Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. *Обеспечение устойчивого обмена данными с робототехническими комплексами морского базирования* 5

Кулешов И. А., Солозобов С. А., Шевченко В. В. *Мониторинг радиоэлектронной обстановки в системе связи ВМФ* 22

Яшин А. И., Мошак Н. Н. *Модель протокола Диффи-Хеллмана* 29

Баринов М. А., Веселовский А. П., Рагузин С. В. *Перспективы развития электроэнергетических устройств для питания средств связи* 34

Бобровский В. И., Латыпова С. С. *Модификация сигнальной конструкции с тридцати двух позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией* 36

Бобровский В. И., Богер Е. А. *Сокращение вычислительной сложности многоканального приема на основе быстрого преобразования Фурье* 47

Будко П. А., Литвинов А. И., Гайденко В. К., Кислицина Е. К. *Методы неразрушающего контроля в диагностике состояния сложных технических объектов* 51

Будко П. А., Литвинов А. И. *Тококинетический метод идентификации технического состояния электрооборудования систем электроснабжения военной техники связи* 59

Воловиков В. С. *Подход к оценке мероприятий технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления и их вклада в боевой потенциал войск связи* 65

Гончаров А. М., Ченцов А. Е., Замараев В. В. *Метод формирования информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами* 69

Гришин В. Д., Колесников К. Г., Москвин Б. В. *Подход к оцениванию целевых и информационно-технологических возможностей сложных организационно-технических систем военного назначения* 75

Гузарев А. С. *Метод оценки производительности встраиваемых модулей на основе x86-64 процессоров* 79

Дяченко А. Н. *Элементы системы управления автономными необитаемыми подводными аппаратами и методы их разработки* 84

Жебрун А. М., Сантус Д. С., Чибышев С. Л. *Использование комплексных радиолиний для повышения вероятности доведения информации до глобально удаленных подвижных объектов* 89

Зыков А. М., Ходор М. А., Шаймухаметов Ш. И., Свистунов Е. И. *Разработка алгоритма шифрования данных и исследование его статистической безопасности* 93

Козин И. С., Рощин А. А. *Метод построения модели угроз критически важной информации военного назначения* 98

Королев Б.В., Фролов И. В. *Космический эксперимент по отработке технологии функционирования космической оптической линии связи между космическими аппаратами* 104

Ломакова А. С., Русин С. В., Савенкова Ю. В. *Возможности миниатюризации антенны приводной радиостанции* 111

Осипенко С. А., Масалкин А. А., Павлов Д. А., Слинько А. А. *Подход к решению задачи поиска интервалов постоянства структуры кластеров малых космических аппаратов* 115

Павлов Д. А., Масалкин А. А., Чащин И. В., Слинько А. А. *Методология оценивания результативности кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли* 121

Саруханян А. И. *Перспективы использования искусственных нейронных сетей при управлении группировкой автономных необитаемых подводных аппаратов* 127

Талагаев В. И. *Управление системой связи и обмена данными ВМФ в условиях радиоэлектронного подавления* 130

Труфанов И. В. *Решение задачи синтеза монохроматических изображений по критерию максимальной разделимости классов объектов и фона* 135

Чащин И. В., Масалкин А. А. *Модель функционирования орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования земли в условиях неблагоприятных воздействий* 139

Будко В. Н., Чернецкая А. С., Баранова Е. В. *Формирование специализированного программного обеспечения лингвоориентированной компьютерной военной игры для подготовки специалистов связи* 142

Ю.Л. Николашин
кандидат технических наук, генеральный директор ПАО «Интелтех»

П. А. Будко
доктор технических наук, профессор, ПАО «Интелтех»

Г.А. Жуков
кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь ПАО «Интелтех»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ С РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены вопросы выбора методов и каналов управления робототехническими комплексами морского базирования. Предложено совместное использование радиолиний различных диапазонов волн, позволяющее обеспечить устойчивое доведение команд управления до робототехнических комплексов, находящихся в надводном положении, а также на глубине до 20 м. Рассмотрены возможные методы информационного взаимодействия между подводными аппаратами и дана оценка максимальной дальности при обмене данными между глубокопогруженными объектами по гидроакустическому каналу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: робототехнический комплекс морского базирования, автономный необитаемый подводный аппарат, каналы управления, радиолиния, спутниковая связь, гидроакустическая связь, глубокопогруженный объект.

Введение

Значительный технологический прогресс в области создания новых сверхпрочных материалов, малогабаритных энергоемких источников электропитания, нейрокомпьютеров, базовых элементов искусственного интеллекта позволяют в настоящее время создать автономные робототехнические комплексы широкого спектра применения [1, 2]. Одним из востребованных направлений в этой области является создание робототехнических комплексов морского базирования (РТК МБ) [3, 4]. К указанному классу РТК МБ относятся: автономные катера, автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), включая глайдеры, АНПА донного типа (без возможности автоматической реализации подвсплытия, т. е. имеющие «отрицательную плавучесть»).

К основному перечню задач, решаемых РТК МБ можно отнести:

измерение характеристик водной среды (температура, соленость, скорость и направление течения и т. п.) в различных точках водного пространства и на различных глубинах;

экологический мониторинг, в том числе наблюдение за изменением флоры и фауны в заданной акватории;

донную геологоразведку в труднодоступных районах мирового океана и в арктическом регионе, в том числе в подледном положении;

поиск затонувших объектов и их обследование;

фото и видеосьемку в научно-исследовательских, промышленных и военных целях;

обслуживание коммуникаций портов;

патрулирование водных рубежей и объектов;

подводное обследование корпусов судов, буровых платформ, газо- и нефтетрубопроводов и кабельных трасс различного назначения;

освещение прибрежной, надводной, подводной и воздушной обстановки в заданном водном районе;

установку радиомаяков на стационарные и движущиеся подводные объекты;

проведение противолодочной разведки и разведки пунктов базирования ПЛ и НК вероятного противника;

обнаружение и уничтожение минных полей;

установку минных заграждений;

ведение информационной борьбы путем создания ложных целей и расстановки радио и гидроакустических помех [1–3, 5–10].

Расширение территориальных зон применения и усложнение задач, решаемых робототехническими комплексами в интересах гражданских и военных ведомств, потребовало разработки автономных интеллектуальных систем управления РТК МБ [11–13]. Так в работе [12] представлены положительные результаты моделирования и экспериментальной проверки метода нейросетевого управления искусственным интеллектом, применительно к АНПА. Реализация метода обеспечила возможность автоматического обхода автономным аппаратом препятствий с последующим возвращением на заданный маршрут.

Дальнейшее повышение эффективности РТК МБ (АНПА) может быть достигнуто за счет их группового использования, что позволит при проведении аварийно-спасательных работ или поиске затонувших объектов, представляющих опасность химического или радиоактивного заражения окружающей среды, резко сократить время указанных операций, а в случае охраны протяженного периметра водной границы или поиска движущегося подводного объекта задействование группы РТК МБ становится полностью оправданным [7, 14–17].

При проведении как одиночных, так и групповых миссий РТК МБ независимо от наличия заложенной в них жесткой или интеллектуальной программы функционирования, необходимо обеспечение устойчивого взаимодействия комплекса с базовым пунктом управления (БПУ), а при групповой миссии также гарантированную надежность обмена данными между робототехническими комплексами (АНПА) группы. Потеря возможности управления РТК МБ с БПУ, или обмена информацией между АНПА, особенно при выполнении специальных задач, может привести к непредсказуемым негативным последствиям.

Обмен данными с РТК МБ в надводном положении

В настоящее время взаимодействие с АНПА обеспечивается, в основном, с использованием спутниковой системы связи, Wi-Fi и гидроакустической связи, а между АНПА (или между БПУ и АНПА) по гидроакустическому каналу. Однако при этом задача по реализации устойчивого обмена данными с необитаемыми аппаратами, удаленными на значительное расстояние от БПУ не решена в полной мере [7]. Рассмотрим возможные методы повышения вероятностно-временных характеристик обмена данными с РТК МБ, находящимися в надводном положении.

Этот режим относится к автономным управляемым кораблям (катерам) и к АНПА 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 развертывается многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец-Д1М». Основные технические характеристики абонентского терминала этой системы приведены в таблице 1 с учетом материалов, представленных в [18].

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 МБ (АНПА) для обеспечения обмена данными с БПУ представляется вполне обоснованным.

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

Учитывая возможность глобального перемещения АНПА (в 2009 году экспериментальный глайдер США менее чем за 7,5 месяцев пересек Атлантический океан, преодолев при этом около 11,7 тыс. км [7]) в качестве резервной связи целесообразно использовать радиолинии (РЛ) декаметровых (ДКМ) и сверхдлинных волн (СДВ), обеспечивающие 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 АНПА, находящимися в надводном положении, необходимо помимо параметров антенно-фидерных передающих (приемных) подсистем и эффективности сигнально-кодовых кон-

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

струкций 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. 1 представлена в графическом виде область, в которой с вероятностью $P > 0{,}99$ находятся коэффициенты внешнего шума $F_а$, для СДВ — ДКМ диапазонов частот. При этом среднеквадратичное значение напряженности поля шумов в децибелах (относительно мкВ/м) определяется выражением [19]:

$$E_п = F_а + 20 \log f_с + 10 \log \Delta f_с - 95{,}5, \qquad (1)$$

где $F_а = 10\log\left(P_а^ш / kT_о\right)$; $P_а^ш$ — мощность атмосферных шумов в полосе сигнала (Ватт); $\Delta f_с$ — ширина полосы принимаемого сигнала (Гц); $f_с$ _ «несущая» частота сигнала (МГц); k — постоянная Больцмана; $T_о$ — принятая эталонная температура (290° К).

На рис. 2 приведены графики зависимости уровня $E_п$ для различных значений $\Delta f_с$ и $f_с$, рассчитанные с использованием формулы (1) для верхней границы коэффициента внешнего шума $F_а$ (см. рис. 1, пунктирная кривая).

Из анализа графиков рис. 2 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 устойчивого приема на радиотрассах протяженностью до 1 тыс. км для ближней морской зоны можно провести с использованием графиков, представленных в [20]. На рис. 3 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. 4 приведены аналогичные графики для трасс протяженностью более 1 тыс. км (при ионосферном распространении радиоволн).

Для ДКМ диапазона расчет проводился с использованием полуэмпирической формулы Неволина-Щепотина, полученной на основе

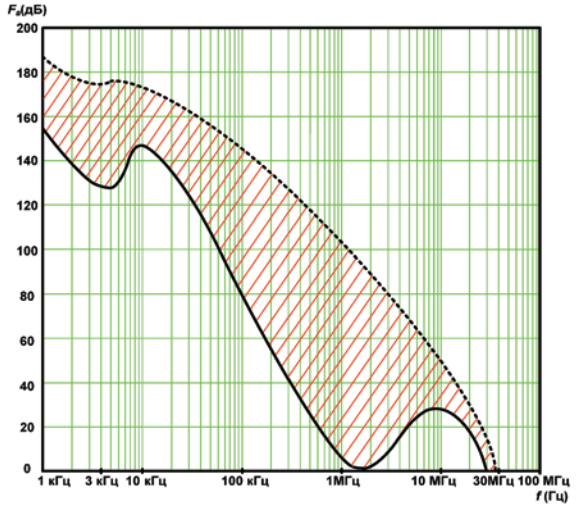

Рис. 1. Значения коэффициентов внешнего шума [19]

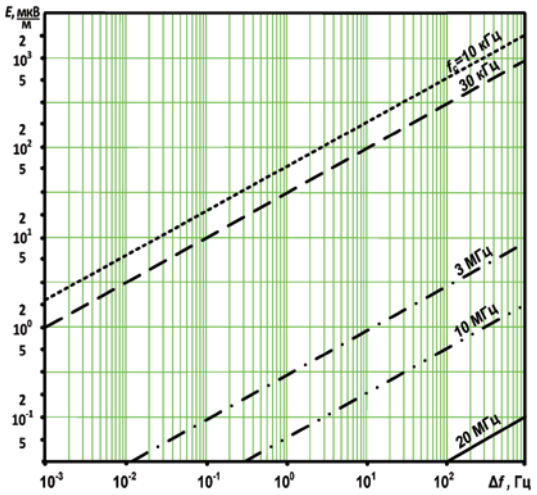

Рис. 2. Зависимость напряженности поля шумов от частотной полосы приема

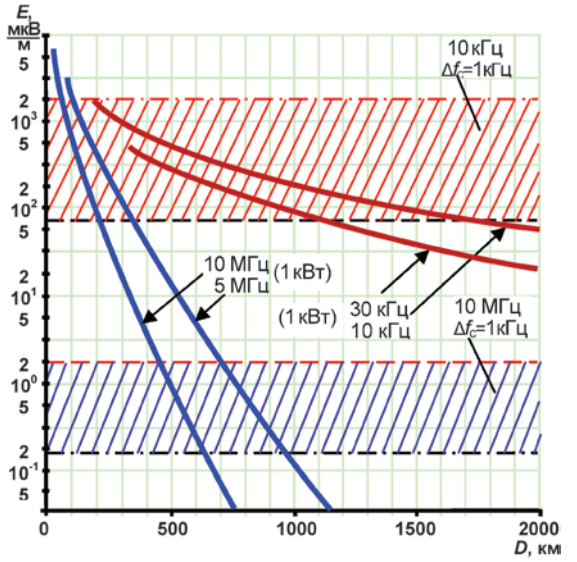

Рис. 3. Значения напряженности поля сигнала для ближней морской зоны

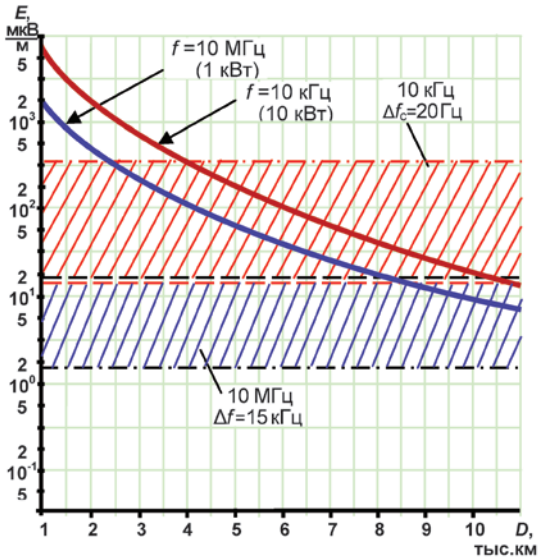

Рис. 4. Значения напряженности поля сигнала при ионосферном распространении СДВ-ДКМ волн

усреднения медианных значений напряженности поля для морских трасс при работе на оптимальных частотах [21]:

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

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

Расчеты для частот СДВ диапазона проводились по модифицированной формуле Остина [20, 22]

$$E = 120\sqrt{\frac{P\,D}{r_т\sin\theta}}\exp\left(-0,0457\,f^{0,6}\,r_т\right), \quad (3)$$

где f — частота излучения сигнала в кГц. (Отметим, что необходимую мощность излучения для достижения требуемой напряженности поля $E_{тр}$ можно определить из соотношения $P_н = \left(\frac{E_{тр}}{E}\right)^2$ кВт, где значение E, соответствую-

щее заданной протяженности трассы, берется из графиков рис. 3 (4) 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 $E_п$ для тех же значений Δf_c и f_c.

Из анализа графика следует, что в отсутствии случайных (преднамеренных) помех в ДКМ диапазоне волн, даже на радиотрассах с глобальной протяженностью может быть достигнута значительная скорость передачи информации. Так для трассы с $r \approx 6$ тыс. км и мощности излучения сигнала $P_c \approx 1$ кВт, исходя из соотношения [23]:

$$V = \log_2\left(1 + \frac{P_c}{\Delta f_c N_o}\right)^{\Delta f_c}, \qquad (4)$$

где V — скорость передачи, N_o — спектральная плотность шума, получим следующий диапазон возможных скоростей передачи для рассматриваемого случая: $V_{min \div max} \approx 10 \div 150$ кбит/с, что позволяет обеспечить доведение формуляра по коррекции программы миссии АНПА в реальном масштабе времени.

Оперативность управления АНПА по СДВ каналу существенно ниже. Например, даже при минимально ожидаемом уровне атмосферных помех (рис. 4, черная пунктирная линия) скорость передачи для достоверного доведения команды до АНПА для $r \approx 6$ тыс. км и $P_c \approx 10$ кВт составит примерно $V \approx 80 \div 90$ бит/с. Из анализа, проведенного в [24], а также представленных формул и графиков следует, что достоверное доведение информации до удаленных АНПА 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 АНПА 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. 5), что позволяет обеспечивать прием информации при заливании антенны водой, а также в подледном и подводном положении (до 15÷20 м) в случае использовании 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 АНПА. При этом в силу ограниченности габаритов АНПА 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÷0,5 мкВ при динамическом диапазоне до 120÷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÷30 МГц при динамическом диапазоне до 120 дБ, а ААС К-625, российского производства,

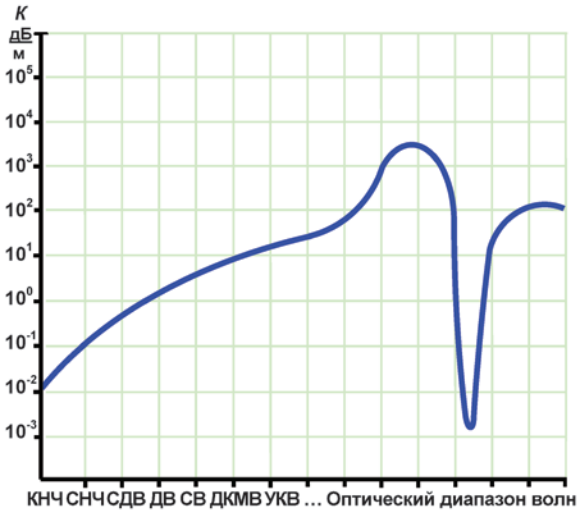

Рис. 5. Значения коэффициента ослабления волн различного диапазона в водной среде

работает в диапазоне волн 60 кГц÷80 МГц и по чувствительности превосходит шестиметровую пассивную штыревую антенну. Ферритовые плоскостные ААС имеют меньшую чувствительность, чем штыревые, однако в подводном или подледном положении АНПА они в силу своей «геометрии» становятся основными для приема сообщений в СДВ диапазоне волн. Следовательно, автономные необитаемые аппараты, предназначенные для функционирования только в надводном положении целесообразно оборудовать приемными активными штыревыми антеннами, а АНПА, 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 АНПА проблематично из-за значительных массогабаритных показателей тросовой лебедки и ограниченности энергоресурсов АНПА, низкой механической надежности буксируемой антенны на обрыв (особенно в районах со сложным донным рельефом) и по ряду других причин.

Примечание. Отметим, что для приемных ААС не соблюдается принцип универсальности передачи-приема информации, характерный, например, для судовых приемо-передающих антенн, размеры которых даже при работе в ДКМ диапазоне частот неприемлемы для установки на АНПА.

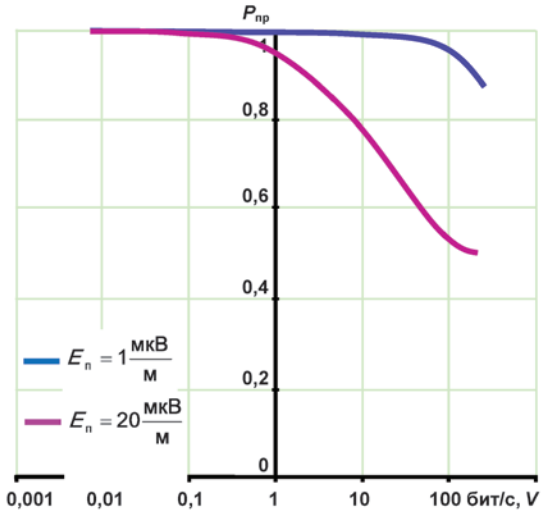

Рис. 6. Вероятность правильного приема бита сообщения для трассы протяженностью 6 тыс. км, мощности излучения $P_{изл}$ = 10 Вт при разных скоростях передачи V

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 АНПА в экстремальной надводной (подводной) обстановке.

В работах [24, 25] рассмотрен способ эффективной передачи данных с использованием мегаканальных возбудительных 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 $P_{изл}$ = 10 Вт и разных скоростях передачи V (бит/с) при напряженности поля помех $E_п$ = 1 мкВ/м для $\Delta f_c \approx 1$ кГц, (что соответствует наличию только атмосферных шумов) и $E_п$ = = 20 мкВ/м, характерных для воздействия атмосферных шумов и случайных помех в ДКМ диапазоне волн, приведена на графике рис. 6.

Вместе с тем, при отсутствии возможности получения данных по оптимальной рабочей частоте (ОРЧ) в реальном масштабе времени (что характерно для связи с глобально удаленными АНПА и при наличии непрогнозируемых локальных неоднородностей ионосферы) целесообразно вести передачу в широком диапазоне частот (практически в полосе 7÷25 МГц). Известно, что эффективность передающей антенны в таком диапазоне без дополнительной настройки антенного согласующего устройства (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 $f_{верх}/f_{нижн} \approx 1{,}3 \div 1{,}4$. Это позволяет обеспечить передачу эквивалентного суммарного сообщения в зоне оптимальных рабочих частот с максимальным КПД и, таким образом, используя менее мощные радиопередатчики реализовать высокую помехоустойчи-

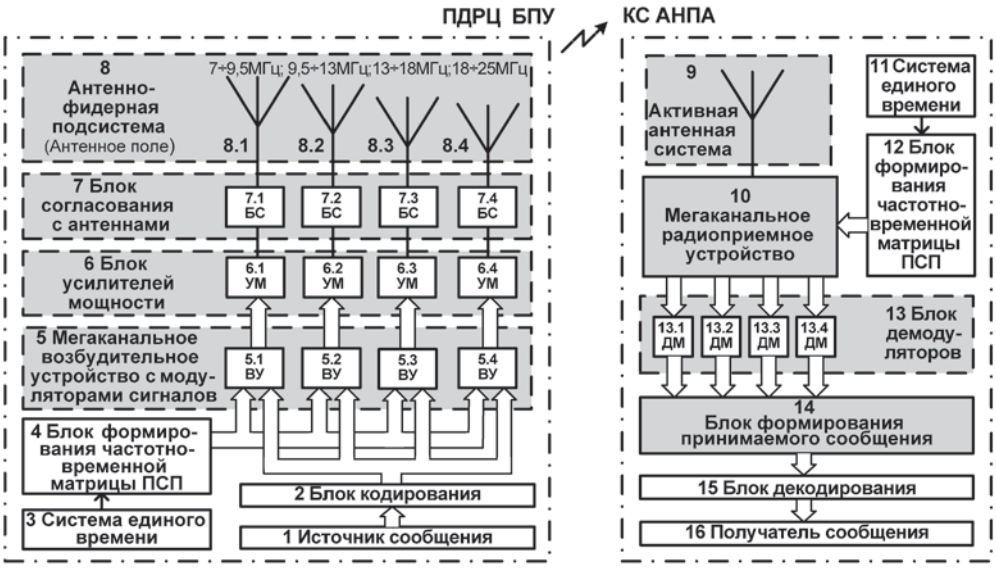

Рис. 7. Структурная схема радиолинии управления АНПА

вость приема. Пример реализации РЛ для реального диапазона частот протяженных ДКМ радиотрасс представлен на рис. 7.

Сообщение, предназначенное для передачи, «закрывается» в блоке кодирования 2 помехоустойчивым кодом. Закодированное сообщение поступает на мегаканальное возбудительное устройство (ВУ) с модуляторами 5 [24], 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.

Для приема в комплексе связи (КС) АНПА используется малогабаритная широкополосная активная антенная система 9. Принятый сигнал с ААС поступает на мегаканальное радиоприемное устройство (МРПУ) 10 [26] 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. [27].

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. 8.

При этом необходимо подчеркнуть:

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

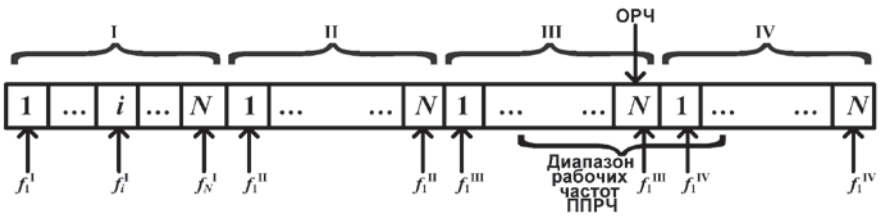

Рис. 8. Структура формирования параллельно передаваемых элементов сообщения в частотных поддиапазонах

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. 8) позволяет всегда восстановить переданное сообщение при любом реальном значении диапазона ОРЧ. Это обусловлено тем, что, при совместной оптимальной обработке в блоке весового сложения [28] будут участвовать любые элементы сообщения, принятые в I÷IV частотных участках (рис. 7 и 8).

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

5) Использование активной антенной системы [29] обеспечивает одновременный прием во всей полосе частот при использовании МРПУ, построенного на SDR-технологиях.

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 автономных необитаемых подводных аппаратах 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 связи, а также теневых методов приема гидроакустических волн. (Рассмотрение нештатных методов передачи информации, таких как нейтринная, торсионная, политронная, солитонная связь и т. д. выходит за рамки данной статьи).

Значительно меньшим коэффициентом затухания в водной среде, чем радиоволны СДВ диапазона, обладают волны оптического (сине-зеленый спектр) диапазона частот (рис. 5), что позволяет использовать *лазерную связь* (ЛС) в этом спектре для взаимодействия с подводными объектами при задействовании космических аппаратов (КА) или самолетов-ретрансляторов [7, 30, 31].

Однако применение ЛС с глобально перемещающимися АНПА 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 АНПА 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) [32]. 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 АНПА 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 АНПА.

В работе [33] предлагается обеспечить доведение информации до глубокопогруженных подводных объектов за счет использования эффекта *параметрического* взаимодействия электромагнитной и акустической волн с близкими частотами $f_э$ и $f_а$. В поверхностном слое воды (скин-слое) в этом случае, как утверждают авторы, формируется новый промодулированный электромагнитный сигнал с разностной частотой $f_р = f_э - f_а \ll f_э$, что позволяет этому сигналу из-за малого коэффициента ослабления в воде обеспечить допустимое соотношение сигнал/шум на значительных глубинах (порядка 150 м [33]). Однако в настоящее время исследования по возможности реализации рассмотренного

метода, по крайней мере для подводной связи с АНПА, проводить нецелесообразно, поскольку на подводных аппаратах с ограниченными размерами и энергоресурсами следует использовать малогабаритные активные антенные системы, эффективность которых при приеме сигналов с частотой $f_р \ll 10$ кГц становится недопустимо низкой.

Обмен данными с глубокопогруженными (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 $f_з \approx 10 \div 50$ кГц (характерных для ГАС), в зависимости от солености, 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 АНПА, 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 [34–36]. При использовании двухканального ТП (приемника) возможно формирование от «круговой» до узконаправленной диаграммы направленности. Основные характеристики экспериментального оптико-акустического приемника (ОАП) приведены в таблице 2 [34].

Учитывая высокую потенциальную чувствительность ТП, целесообразно продолжить работы по снижению их массогабаритных показателей с целью последующего использования на АНПА 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) [37, 38]. Причем потенциал, создаваемый им в точке, удаленной на расстояние $r \gg L$, можно определить по формуле:

$$\varphi_{тд} = \frac{\rho}{4\pi}\frac{IL\cos\alpha}{r^2}. \qquad (5)$$

Отсюда следует, что максимальное значение $\varphi_{тд}$ составит:

$$\varphi_{тд}^{max} = \frac{\rho}{4\pi}\frac{IL}{r^2}, \qquad (6)$$

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

Для расстояния $r = 100$ 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 $P_с/P_ш \approx 3$ из формулы (6) 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 АНПА требует дополнительной конструкторской проработки

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.

и экспериментальной проверки, а также определения влияния создаваемого электромагнитного поля на биосферу океана.

Необходимо отметить, что в современных и перспективных проектах АНПА 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) [13]. 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. 9 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 [39].

Гидроакустические приемные и передающие антенны обеспечиваются системой цифрового синтеза адаптивных диаграмм направленности, а при формировании сигнально-кодовых конструкций передаваемого сообщения 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. Сравнительные характеристики нескольких типов модемов гидроакустической связи приведены в таблице 3 [39–42].

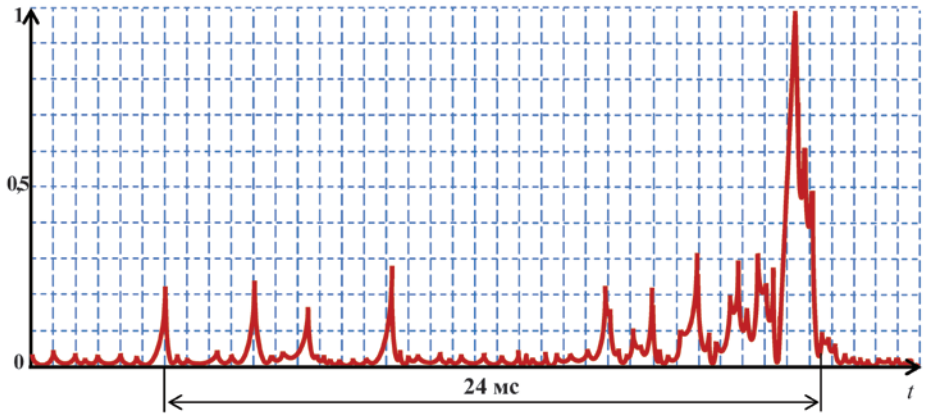

Рис. 9. Импульсная характеристика «многолучевого» подводного канала [39]

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	–	–	–	–

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.

Организация связи при групповом выполнении миссии РТК МБ

При оценке вероятности выполнения миссии, требующей глобального удаления РТК МБ (АНПА) от места базирования (т. е. многосуточного подводного похода), необходимо учесть возможность деградации основных элементов АНПА, несовместимой с успешным завершением миссии, обусловленной параметрами надежности элементов аппарата, случайными повреждениями АНПА, в том числе вследствие столкновений с крупными объектами или представителями морской фауны, айсбергами, рыболовными сетями и т. п., не исключая умышленных повреждений или уничтожения АНПА. Причем вероятность выполнения миссии $P_{вм}$ будет уменьшаться в зависимости от увеличения количества всплытий для уточнения координат и проведения сеансов связи с базовым пунктом управления. Отсюда с очевидностью следует необходимость реализации искусственного интеллекта в интегрированной системе управления АНПА, позволяющей обеспечить оптимальную трассу перемещения, и ее коррекцию в случае наличия незапланированных (случайных) препятствий или угроз. Тем не менее, вследствие указанных факторов при одиночном выполнении миссии, особенно конфиденциальной, $P_{вм}$ может оказаться неприемлемо низкой. Вместе с тем, при групповом использовании АНПА для достижения требуемого значения $P_{вм}$ достаточно задействовать количество аппаратов N, определяемое из неравенства:

$$N \geq \left| \frac{\log(1 - P_{вм})}{\log(1 - P_1)} \right|, \qquad (7)$$

где P_1 — вероятность выполнения миссии одним АНПА.

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

В ряде работ [7, 43, 44] для обеспечения живучести подводных объектов (робототехнических подводных комплексов, подводных лодок, АНПА 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 концевых гидроакустических модемов, объединенных оптоволоконной линией связи. Взаимодействие сети связи с береговым пунктом осуществляется по радиоканалу через автономный гидроакустический буй-ретранслятор, входящий в ее состав. Вместе с тем, как отмечается в работе [43], при необходимости развертывания такой СПИС в отдаленных районах ограничивающими факторами могут оказаться сложность, безопасность и стоимость ее развертывания, а также ограниченность дальности взаимодействия с подводными аппаратами.

Одним из решений при реализации миссии АНПА 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 АНПА по варианту I суммарное число взаимодействий с БПУ (количество всплытий) за время выполнения миссии составит $M_I = N{\cdot}k$, где k — число заданных сеансов связи с АНПА, 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 АНПА в составе N идентичных аппаратов, на начальном этапе назначается АНПА-«Лидер» (АНПА-Л), осуществляющий координацию функционирования остальных

АНПА. При этом программы текущих действий группы хранятся параллельно в базах данных каждого АНПА и периодически взаимно обновляются по каналу гидроакустической связи.

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

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

$$L_{\max} = (N - 1)\, l_{\max}, \qquad (8)$$

где $l_{\max}$ — максимальная дальность связи, реализуемая по каналу ГАС.

То есть при заданном N для получения максимального значения $L_{\max}$ требуется обеспечить возможно бо́льший показатель для $l_{\max}$.

Примечание. Необходимо подчеркнуть, что на время сеанса связи с БПУ ретрансляционная цепочка аппаратов служит не для доведения принятого сообщения до всех АНПА, а только для обеспечения их взаимной подводной пространственной координации, т. е. при максимальном удалении друг от друга АНПА 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 автономным необитаемым подводным аппаратом специальных заданий, предъявляются более высокие требования по максимально достижимым значениям $l_{\max}$ [7].

Оценка максимальной дальности при обмене данными между АНПА

Для оценки энергетической дальности действия гидроакустической системы в различных режимах ее функционирования (эхо-локации, шумопеленгования, телеметрии), как правило, используется общее уравнение, которое применительно к ГАС можно представить в виде [45–48]

$$\frac{p_o^2 r_o^2 D_1^2(\varphi) D_2^2(\varphi)}{R^2} \cdot 10^{-0,1\beta R} A_\Phi = h^2 p_n^2 \left(f_{рч}, \Delta f_p\right), \qquad (9)$$

где $p_п\left(f_{рч}, \Delta f_р\right)$ — давление помехи в рабочей полосе частот $\Delta f_р$; $p_о$ — давление, развиваемое передающей антенной с излучаемой мощностью $P_{изл}$ на условном расстоянии $r_о$; $D_1(\varphi)$ и $D_2(\varphi)$ — характеристики направленности передающей и приемной антенн соответственно; $p_о$ — давление, создаваемое источником излучения на удалении $r_о$; h^2 — отношение энергии сигнала к спектральной плотности помех; R — расстояние между гидроакустическими передатчиком и приемником; $f_{рч}$ — 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 [45] показано, что с учетом частотных зависимостей уровня шумов моря и затухания сигнала для трансцендентного уравнения (9) существует оптимальное значение рабочей частоты $f_{рч}$, 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: $f_{опт} \approx n' R^{-2/3} 10^3$ кГц, где $n' \approx 1{,}9 \div 3$, т. е. для $R \approx 50 \div 100$ км значения оптимальной частоты будет находиться в диапазоне $f_{опт} \approx 0{,}9 \div 2{,}2$ кГц.

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

Переход на более высокие частоты излучения, в силу уменьшения габаритов антенных элементов, позволит устанавливать на АНПА фазируемые адаптивные решетки (ФАР), обеспечивающие подавление помех от посторонних излучателей (т. е. уменьшения значения $p_п$) и увеличение коэффициента $D_2(\varphi)$ в направлении на полезный сигнал, тем самым реализуя возможность 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. 10) шумов моря.

Учитывая большой разброс численных значений величин, входящих в формулу (5), для наглядности графического представления соответствующих расчетов приведем ее к виду:

$$\lg h = \lg p_o + \lg D_1(\varphi) + \lg D_2(\varphi) + \\ + \frac{1}{2}\lg A_Ф - \lg R - \frac{1}{20}\beta R - \lg p_п(f_{рч}, \Delta f_р). \quad (10)$$

На рис. 11 представлены результаты расчетов по формуле (10) значений lg$h$ в зависимости от расстояния между АНПА для следующих исходных данных: $D_1(\varphi) = 1$, $A_Ф = 1$, $\beta = 0{,}036\ f_э^{3/2}$ дБ/км, $\Delta f_{рч} = 1$ Гц, мощность излучения сигнала $P_{изл} = 100$ Вт, $r_o = 1$ м. Значения $p_п(f_{рч}, \Delta f_р)$ вычислялись в соответствии с графиками рис. 10, в предположении использования четырехэлементной адаптивной ФАР, реализованной на базе гидроакустических приемных антенн цилиндрического типа, обеспечивающей подавление помех от посторонних излучателей и формирование максимума диаграммы направленности в направлении на полезный сигнал.

Из анализа графиков следует, что на частотах свыше 10 кГц реализовать устойчивую связь при R>100 км достаточно проблематично, поскольку даже при передаче рассматриваемого узкополосного сигнала, с полосой $\Delta f_р = 1$ Гц и $f_{рч} = 10$ 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. 11).

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.

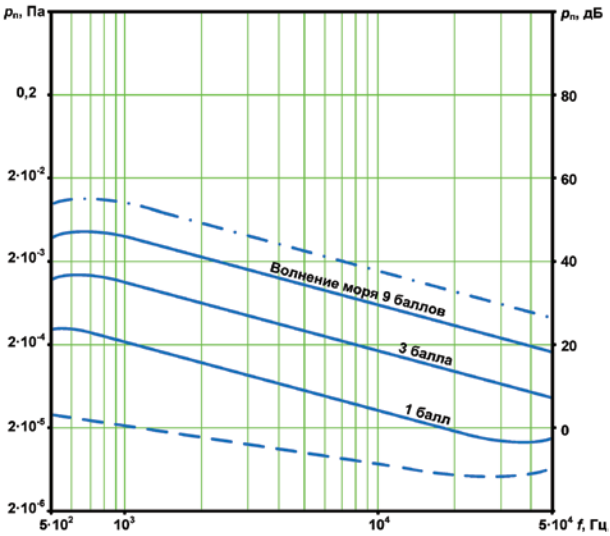

Рис. 10. Спектральные характеристики шумов моря

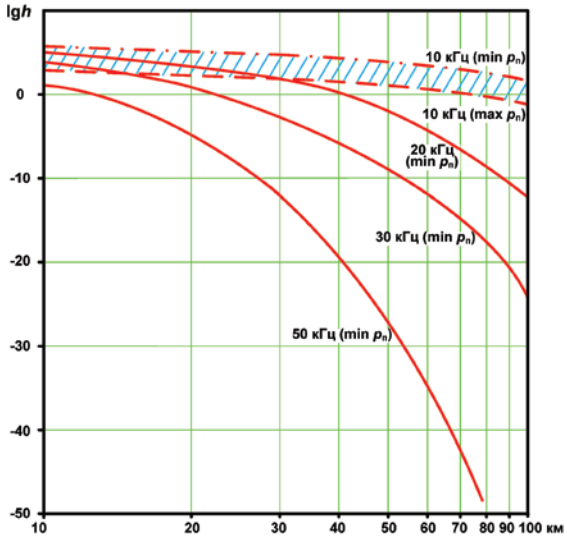

Рис. 11. Зависимость значений lg$h$ от дальности взаимодействия между АНПА в группе

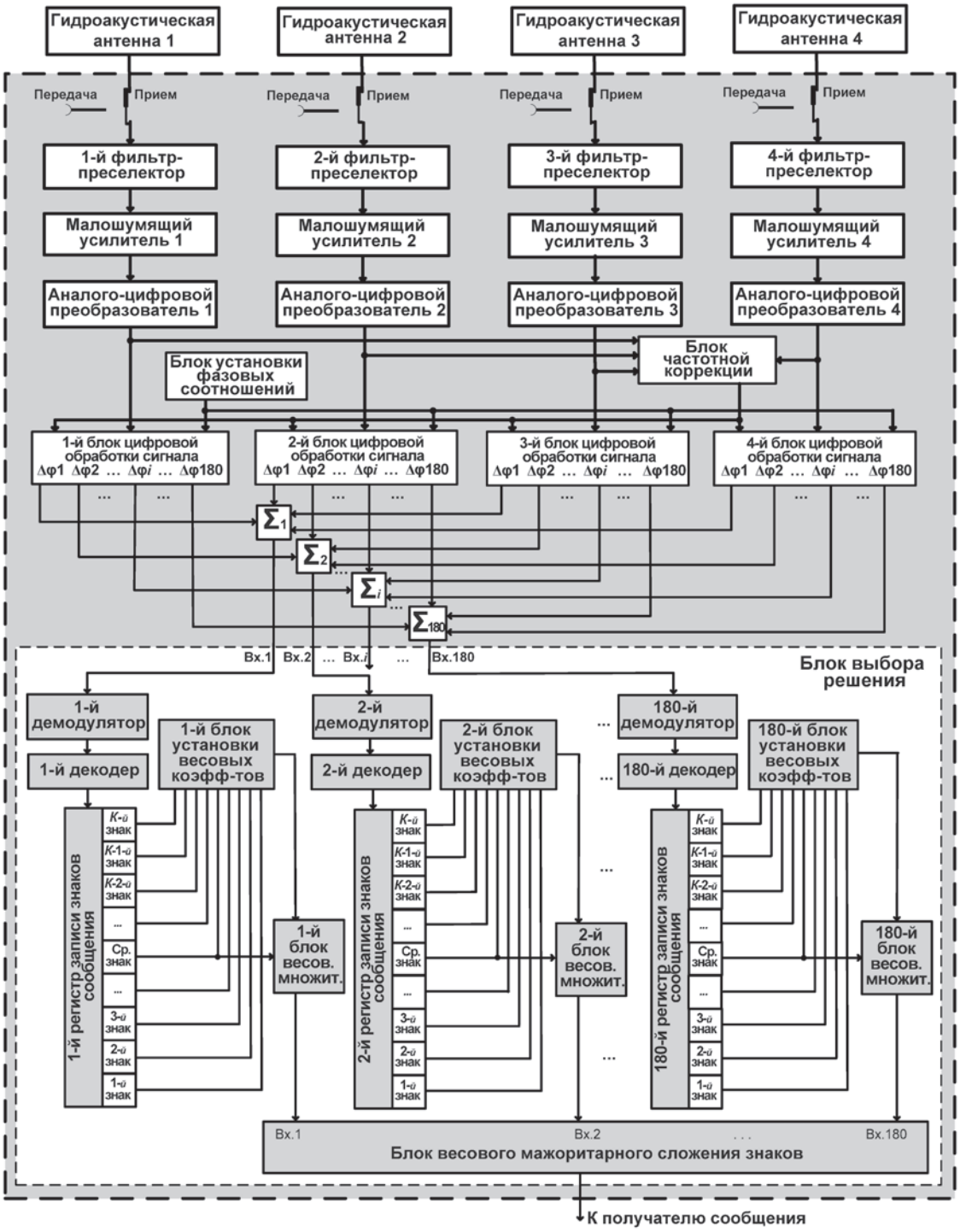

Рис. 12. Структурная схема гидроакустического модема комплекса связи РТК МБ

По результатам исследований, приведенных в [46], 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 $\Delta f_д$, приближенное значение которого для двух взаимодействующих по гидроакустическому каналу объектов, перемещающихся с относительной скоростью v, определяется по формуле:

$$\Delta f_д \approx f_{рч} \Delta \frac{v}{v_{зв}}, \qquad (11)$$

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 $\Delta f_{з.и.} \geq 2\Delta f_д$.

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 принимающего информацию АНПА в область «тени» (или значительного ослабления) гидроакустической волны, характерных как для приповерхностного, так и для подводного и мелководного звуковых каналов [47], тем не менее, показано наличие принципиальных путей реализации взаимодействия АНПА, удаленных друг от друга на расстояния свыше 50 км, особенно при групповой миссии АНПА с искусственным интеллектом, позволяющим учитывать гидрологию района их нахождения.

На рис. 12 представлен вариант структуры построения гидроакустического модема для робототехнического комплекса морского базирования, 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» [49], в соответствии с которым «подсчет» числа разрешенных знаков и установка весового коэффициента среднему знаку производится после приема каждого знака. Коэффициентом подавления помех от посторонних излучателей возможно управлять путем установления «шага» $\Delta\varphi$ (в приведенном на рис. 12 варианте $\Delta\varphi = 2^o$). Автоматический учет эффекта Доплера обеспечивается за счет использования блока частотной коррекции в каждом приемном тракте.

Заключение

Из представленных материалов следует:

совместное использование спутниковой и специализированных СДВ-ДКМВ 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 диапазоне СДВ-ДКМВ (для достоверного доведения данных до удаленного БПУ) реализовать на мало- и среднегабаритных АНПА не представляется возможным;

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 автономными необитаемыми подводными аппаратами в подводном положении, в том числе при их значительном удалении друг от друга;

высокая вероятность выполнения автономными необитаемыми подводными аппаратами различных программ на глобальном удалении от базового пункта управления может быть реализована при групповой миссии АНПА с внедренными элементами искусственного интеллекта;

обмен данными между АНПА в подводном положении на взаимном удалении 50÷100 км достигается подсистемой гидроакустической связи за счет снижения скорости передачи до

1 бит/с и м

от постороMEANS OF COMMUNICATION EQUIPMENT. Iss. 4 (144). 2018

учета эффекта Доплера. Повышение скорости

«параллельного типа».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бочаров Л.** Необитаемые подводных аппараты: состояние и общие тенденции развития // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №7. 2009.

2. **Киселев Л. В., Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В.** Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006.

3. **Гизитдинова М. Р., Кузьмицкий М. А.** Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Том 3. №1. С. 4–13.

4. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под ред. М. Д. Агеева. — С.: Наука, 2005. 398 с.

5. **Сидоренко К. С., Голобоков С. А.** Автономные необитаемые подводные аппараты — носители минного оружия // Россия и АТР. №2. 2009. С. 119–130.

6. **Красильников Р. В.** Системы борьбы с необитаемыми аппаратами — ассиметричный ответ на угрозы XXI века. — СПб.: Инфо-да, 2013. 106 с.

7. **Белоусов И.** Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. №5. 2013. С. 79–88.

8. **Кузьмицкий М. А., Гизитдинова М. Р.** Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Том 4. №3. С. 37–48.

9. **Илларионов Г. Ю., Сидоренко В. В., Смирнов С. В.** Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006. С. 31–38.

10. **Киселев Л. В., Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В.** Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006. С. 6–17.

11. **Инзарцев А. В., Павин А. М., Багницкий А. В.** Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. №1 (15) 2013. С. 4–16.

12. **Пшиханов В. Х., Чернухин Ю. В., Федотов А. А. и др.** Системы управления автономного подводного аппарата // Известия южного федерального университета. Технические науки. Вып. 3 (152) 2014. С. 87–101.

13. **Мартынов Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. Л.** Система управления — наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов. // Морская радиоэлектроника. №4. 2015. С. 27–33.

14. **Бычков И. В., Кензин М. Ю., Максимкин Н. Н., Киселев Л. В.** Эволюционные модели маршрутизации группового движения подводных роботов при многоцелевом динамическом мониторинге морских акваторий // Подводные исследования и робототехника. №2. (18). 2014. С. 4–13.

15. **Чернухин Ю. В.** Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. — 273 с.

16. **Бабак Л. Н., Щербатюк А. Ф.** Об одном алгоритме поиска подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА / Управление большими системами: сб. тр., вып. №30–1. 2010. С. 536–548.

17. **Елисеенко Г. Д., Павин А. М.** Программное обеспечение подготовки и сопровождения миссии АНПА. // Подводные исследования и робототехника. №2. (16). 2013. С. 16–23.

18. **Баканов Д. В., Мороз Н. В., Пухов Г. Г., Салюк Д. В., Тимчук А. А.** Применение многофункциональн6ой системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» для обеспечения информационного взаимодействия между удаленными абонентами. // Техника средств связи. 2018. № 2. С. 63-67.

19. МСЭ-R P.372–10.

20. **Долуханов М. П.** Распространение радиоволн. М.: Связь. 1972. 336 с.

21. **Неволин Т. Н., Щепотин В. И.** Организация и планирование радиосвязи на морском флоте. М.: Транспорт. 1977. 262 с.

22. **Акулов В. С., Салюк Д. В., Угрик Л. Н.** Учет точности прогнозирования электромагнитных полей при расчете радиотехнических систем // Техника средств связи. 2018. № 2. С. 53-56.

23. **Финк Л. М.** Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970. — 728 с.

24. **Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А.** Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхузкополосных декаметровых радиолиний // Морская радиоэлектроника. №2 (52). 2015. С. 16–22.

25. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.** Эффективность использования когнитивной радиосвязи в декаметровом диапазоне частот // Техника средств связи. 2018. № 2. С. 6-21.

26. **Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А., Будко Н. П.** SDR-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиолиниях // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2013. Т. 5. №1. С. 34–38.

27. **Жуков Г. А.** Методы весовой мажоритарной обработки дискретной информации при приеме по параллельным каналам // Техника средств связи. Сер. ТПС. Вып. 8. С. 74–84.

28. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.** Нейрокомпьютерный подход к решению задачи оптимизации приема информации в канале с переменными параметрами // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2016. №1. С. 49–58.

29. **Бредихин А.Н., Родионов Э.Н., Яблонских А.А.** Динамический диапазон активных антенн. // Теория и техника радиосвязи, Вып. 1, 2008. — С. 121–125.

30. **Катенин В. А.** Лазерные технологии в зарубежных военно-морских силах // Журнал Экспертный союз. №6. 2012.

31. **Алешин О. В., Катанович А. А.** Принципы построения автоматизированных систем спутниковой открытой оптической связи с подводными лодками // Морская радиоэлектроника. №1. 2016. С. 32–35.

32. **Боженов Ю. А.** Микроэлектромеханические устройства в необитаемых подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006. С. 39–44.

33. **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. №2. 2012.

34. **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, Т. 79. №10, 2012. С. 91–92.

35. **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.

36. **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.

37. **Стопцов Н. А., Бойцов В. И., Шелемин В. Н.** Связь под водой. — Л.: Судостроение, 1990. — 248 с.

38. Шибков А.Н. Подводная связь и навигация с использованием электромагнитного поля. Дисс. д.т.н. — Владивосток: ДВГУ. 2006. 284 с.

39. **Бобровский И. В, Козьмин С. Г.** Модем высокоскоростной гидроакустической связи. Натурные испытания 10.07.2014. — СПб.: АО «НИИ гидросвязи «Штиль». [Электронный ресурс] https://youtu.be/jxbmzNS6DXI.

40. **Вершинин А. С.** Сравнительный анализ гидроакустических модемов // Молодой ученый. 2015. №12. С. 156–161.

41. ММТ-3000 — новый малогабаритный АНПА института проблем морских технологий ДВО РАН Горнак В. Е., Инзарцев А. В., Львов О.Ю. и др. ПИиРТ 2007. №1(3) с. 12–20.

42. **Кайфаджан А.А., Ткаченко А.О.** Гидроакустическая связь и гидроакустические средства. / Материалы конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения». — Волгоград. ОАО «НИИ гидросвязи «Штиль» 2013.

43. **Брага Ю.А. Машошин А.И.** Место сетевой подводной системы обмена данными в интегрированной сетецентрической системе подводного наблюдения. / Материалы конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения». — Волгоград. ОАО «НИИ гидросвязи «Штиль» 2013.

44. **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 информационной пространство. / Материалы конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения». — Волгоград. ОАО «НИИ гидросвязи «Штиль» 2013.

45. **Свердлин Г. М.** Прикладная гидроакустика: Учеб. пособие. — Л.: Судостроение, 1990. — 320 с.

46. **Макаров А. И., Дворников В. Д., Конопелько В.К.** Передача информации в гидроакустическом канале. / Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. — Минск: БГУИР, 2004. — С. 103–118.

47. **Урик Р. Дж.** Основы гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1978. — 448 с.

48. **Евтюков А. П., Митько В. Б.** Инженерные расчеты в гидроакустике. — Л.: Судостроение, 1988. — 288 с.

49. **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. — Ленинград: Академия наук СССР, Ленинградский институт авиационного приборостроения, 1983. — С. 94–97.

И.А. Кулешов
кандидат военных наук, доцент,
первый заместитель генерального директора по научной работе ПАО «Интелтех»

С.А. Солозобов
кандидат технических наук, доцент, начальник НИО ПАО «Интелтех»

В.В. Шевченко
кандидат военных наук, доцент, начальник лаборатории ПАО «Интелтех»

МОНИТОРИНГ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ ВМФ

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты исследования цифровых сигналов, возможности использования SDR-радиоприемников Perseus и AFEDRI в КВ диапазоне. Рассматриваются вопросы создания широко разветвленной сети SDR-радиоприемных устройств для мониторинга радиоэлектронной обстановки и приема сигналов от радиоэлектронных средств с глобально перемещающихся объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровые сигналы, SDR-технологии, SDR-радиоприемники, КВ диапазон, система связи, система мониторинга, радиоприемные центра.

Введение

Концепция программного радио Software Defined Radio (SDR) была сформулирована в середине 90-х годов. Быстрый прогресс сигнальных процессоров (DSP) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) дал импульс западному радио рынку по развитию SDR-радиоустройств как важной коммерческой технологии. SDR-радиоустройства привлекли внимание тем, что обеспечивают высокое качество голосовой связи на относительно недорогом оборудовании радиовещания.

Телекоммуникационные системы, созданные с использованием SDR-технологий, могут обрабатывать несколько частотных полос в разных диапазонах, применять различные протоколы передачи, быстро изменять режим и вид работы. Системы перепрограммируемого радио SDR, потенциально могут настроиться на любую частоту диапазона в широком спектре частот с помощью всего лишь компьютерных программ обработки сигналов [1].

Европа, Северная Америка, Япония, Корея и Китай усиленно инвестируют развитие SDR-технологий.

В России SDR-технология только развивается. На начало 2015 года несколько компаний занимаются разработкой и производством SDR-оборудования. Радиолюбительские клубы и отдельные радиолюбители ведут радиообмен на нескольких десятках SDR-станций и радиоприемников.

Простейшее SDR-радиоприемное устройство стоит 2–3 тысячи рублей. Достаточно его подключить к персональному компьютеру, установить программу для приема нужного сигнала и можно слушать радиосигналы в эфире.

Прием и передача сообщений на дальние расстояния, работа всевозможными сигналами в сложной радиоэлектронной обстановке, применение сложных антенн для работы со слабыми сигналами увеличат стоимость SDR-оборудования.

Актуальность статьи заключается в показе возможности использования радиоприемных устройств, построенных на SDR-технологиях для мониторинга радиоэлектронной обстановки (РЭО) и применения ее для спецпотребителей.

Исследование возможного использования сети SDR-радиоприемников в военных целях проводится впервые.

Целью статьи является выявление возможности использования SDR-радиоприемников для мониторинга РЭО и разработка предложений по их применению в системе связи ВМФ. Объектом исследования являются различные типы SDR-радиоприемников в разных странах мира, подключение к которым осуществляется через Интернет.

Научно-методическое обоснование предложений заключается в том, что на основе проведенного авторами анализа приема контрольно-маркерных сигналов от SDR-радиоприемных устройств типа Perseus и AFEDRI в разных странах мира выявляются положения для мониторинга РЭО в интересах спецпотребителей.

О цифровых сигналах

Общепринято, что сообщение — это форма представления информации с помощью знаков, жестов, сигналов. Между людьми сообщения передаются в устной или письменной форме. Между устройствами сообщения передаются с помощью сигналов.

Изменение некоторой физической величины во времени, обеспечивающее передачу сообщений, называется **сигналом.**

Сигнал (в теории информации и связи) — это материальный носитель информации, используемый для передачи сообщений. Любой сигнал обладает тремя основными параметрами: амплитудой, частотой и фазой или их комбинациями.

Стремительное развитие вычислительной техники, программного обеспечения для обработки сигналов, появление новых способов управления параметрами электромагнитных колебаний привели к появлению новых цифровых видов сигналов.

Для передачи сообщений в сложных условиях и на дальние расстояния разработаны сигналы, в которых сообщения передаются по частям на нескольких частотах. Каждый знак сообщения может передаваться на новой частоте.

Для повышения устойчивости сигналов применяется двойная модуляция — на первом этапе частотная телеграфия, а затем — непрерывная фазовая модуляция.

Изобретены узкополосные сигналы, с шириной спектра несколько Герц, которые манипулируются частотой 1–2 Герца. Это очень высокостабильные сигналы, позволяющие устанавливать и поддерживать связь на сверхдальние расстояния в сложной электромагнитной обстановке.

Цифровой сигнал Olivia, например, позволяет менять количество тонов от 2 до 256 и регулировать ширину полосы от 125 до 2000 Гц. В зависимости от количества тонов и ширины полосы меняется скорость передачи информации и помехоустойчивость канала связи.

Новые цифровые виды сигналов получили широкое развитие, и особенно, в радиолюбительском сообществе. Наиболее востребованными являются RRTYM, BPSK 31, BPSK 63, MFSK, SSTV, Olivia, ROS.

Основные виды цифровых сигналов представлены в табл. 1.

В сложной помеховой радиоэлектронной обстановке хорошо работают Olivia и ROS.

Для сверхдальних связей на десятки тысяч километров малой мощностью разработан JT65-HF. Он имеет мощность порядка 5 Вт и обеспечивает радиосвязь с отражением сигналов от Луны.

SSTV позволяет на коротких волнах передавать цветные факсы на дальние расстояния и используется при освоении космического пространства.

Цифровые сигналы широко применяются для профессиональной радиосвязи в народном хозяйстве, на флоте, в Вооруженных силах, в дипломатии и, конечно, в радиолюбительской среде.

SDR-радиоприемные устройства, используя соответствующее программное обеспечение, могут принимать и обрабатывать практически все цифровые виды сигналов.

Результаты исследования возможностей использования SDR-радиоприемников Perseus в КВ диапазоне частот

Для проведения эксперимента на компьютер была установлена программа Perseus v40a [2], позволяющая подключаться через Интернет к SDR-радиоприемникам по всему Земному шару.

С целью поиска и определения местоположения SDR-радиоприемников использовалась программа Find your QTH locator with Google Maps [2].

SDR-радиоприемники Perseus работают в диапазоне от 0 до 41,1 МГц и принимают следующие виды сигналов: AM (амплитудная модуляция аналоговая), SAM (медленная амплитудная модуляция), CW (частотная телеграфия со сдвигами 125, 250, 500, 1000, 2000 Гц), RTTY

Таблица 1

Виды цифровых сигналов

Вид сигнала	Расшифровка наименования	Скорость передачи	Полоса частот	Модуляция	Применение
BPSK 31 и BPSK 63	Двоичная фазовая манипуляция	31 бод (62,5 бод)	31 Гц (63 Гц)	Двоичная фазовая манипуляция	Проведение повседневных радиосвязей. Оптимальные частоты — выше 10 МГц. Не терпит фазовых искажений и тресков на НЧ диапазонах. Коррекция ошибок отсутствует, помеха искажает информацию. Дальность связи этим видом ограничена до 8000 км
SSTV	Slow-scan television (цветной факс)	Режим Martin M1–114с; ScottieS1- 110 с; ScottieS2–71с.	В КВ, УКВ и ДЦВ	Частотная модуляция	Передача статических изображений SSTV широко применялась в освоении космического пространства, т. к. позволяла передавать изображения на значительные расстояния
JT65-HF	Для проведения радиосвязей с отражением сигналов от Луны	Частота манипуляции — 2,69Гц	Ширина спектра А-174Гц В-346Гц С-690Гц	65 тоновая частотная манипуляция без фазовых скачков	Разработаны радиосвязи Земля — Луна — Земля. Позволяет проводить на КВ дальние и сверхдальние радиосвязи малой мощностью. Приемники и передатчики корреспондентов должны работать строго синхронно. Разнос между несущими — в режиме А-2,69 Гц; В-5,38 Гц; С-10,76 Гц
MFSK-16 (8)	Multi-Frequency Shift Keying — многочастотная манипуляция	Скорости от 7.8 до 31.25 бод	15.625 Гц, 31.25 Гц	Многочастотная манипуляция сдвигом частоты	MFSK — совершенный, с малой мощностью, требует точной настройки частоты, дальность связи не ограничена и мало зависит от фазовых искажений, федингов, помех от других РЭС и многолучевости. Применяется коррекция ошибок. Рабочая частота — 1838 кГц
Olivia	Автор протокола Павел Ялоша, задумал его как гибрид MFSK 8 и 16	Olivia 8/250 v = = 31бод, Olivia 16/250–16 бод, а в Olivia 32/250–всего 8 бод	от 125 до 2000 Гц	Многочастотная манипуляция 8 тонов/250Гц, 16 тонов/500 Гц и 32 тона/1000Гц. Может быть 64 и 128 /1000 Гц.	Предназначен для работы в КВ диапазоне в условиях плохого прохождения на сверхдальние расстояния. Количество тонов от 2 до 256, регулируется полоса сигнала от 125 до 2000 Гц. Скорость ПРД и помехоустойчивость зависит от количества тонов и ширины полосы. Слабый сигнал не виден на индикаторе настройки. Полоса 1000 Гц и 2000 Гц для работы в общеизвестных участках и на УКВ. Contestia отличается от Olivia укороченным блоком данных — 32 бита и более компактной кодировкой символов (все латинские буквы, цифры и знаки препинания).
ROS	Цифровой режим с растянутым спектром для обмена текстовой информацией	16 бод (15.625) и 1 бод (0.9765)	15.625 Гц на канал. Общая полоса — 2.2 кГц	Последовательная односигнальная ЧТ и непрерывная ФМ, пауза между сигналами отсутствует	Для связи на очень большие расстояния, когда наблюдается периодическое затухание сигналов и в условиях сильных помех. Достоинство ROS — это его способность синхронизироваться. Перед началом передачи полезной информации излучается последовательность из 20 символов. Приемник выполняет декодирование сигнала, если правильно приняты, как минимум, 12 из 20 символов. Скорость передачи 1 бод для использования в особенно тяжелых условиях со слабыми сигналами до — 35 дБ.
WSPR	Вестник прохождения слабого сигнала	1,46 Гц	7 Гц	4-FSK	Эффективность до 28 dB (сигнал/шум). Двухминутные циклы ПРМ/ПРД. Требуется синхронизация ±1 секунды. Работа малой мощностью (единицы Вт) на большие расстояния. Передача формализованных сообщений. Оценка трасс распространения слабых сигналов.
MT63	Автор Павел Ялоша	100 знаков в минуту	1000 Гц 2000 Гц	Многочастотная манипуляция	64 модулированных тона на знак. Восстановление знака при потере ≤ 25 % информации (FEC).Распределение данных по спектру сигнала.

(радиотелетайп), LSB (прием по нижней боковой полосе), USB (прием по верхней боковой полосе), FM (частотная модуляция), DRM (амплитудная модуляция цифровая).

Имеется возможность пользователю самостоятельно в режиме USER (режим пользователя) изменять полосу приема сигнала, передний и задний фронт фильтра для приема сигнала.

Для исследования была создана база более чем из 50-ти SDR-радиоприемников. Результаты подключения к ним следующие:

1) С территории Германии, Англии, Бельгии, Швеции, Финляндии (южная и центральная часть) на частотах 10,872; 13,528; 16,332 и 20,048 МГц слышны контрольно-маркерные сигналы (КМС) центрального узла связи (ЦУС) ВМФ и узлов связи (УС) Северного и Балтийского флотов (СФ, БФ) (утреннее время).

2) В Италии, Швейцарии, Греции на частотах 16,332 и 20,048 МГц слышны контрольно-маркерные сигналы ЦУС ВМФ и УС БФ (дневное время).

3) С территории Японии на частотах 7,039; 10,872; 13,528 МГц слышны контрольно-маркерные сигналы ЦУС ВМФ и УС Тихоокеанского флота (ТОФ) (дневное время).

4) Канадский SDR-радиоприемник VE6JY в Эдмонтоне на частотах 10,872 и 13,528 МГц 21.04.2015 г. в дневное время принимал контрольно-маркерные сигналы ЦУС ВМФ, а SDR-радиоустройство в Ванкувере на частоте 13,528 МГц — контрольно-маркерные сигналы УС ТОФ.

5) Услышать КМС на 6-ти SDR-радиоприемниках в США в дневное время не удалось.

6) На территории РФ зарегистрировано 3 SDR-радиоустройства в Санкт-Петербурге, Воронеже и Нахабино Московской области.

В дневное время на SDR-радиоприемнике в Нахабино на частотах 10,872 и 13,578 МГц удалось услышать КМС УС БФ. В Воронеже в дневное время на частоте 16,332 МГц доступны КМС УС СФ и БФ.

Вывод:

SDR-радиоприемники возможно использовать для контроля излучения своих радиопередающих устройств.

SDR-радио приемные устройства могут быть резервным каналом приема сигналов от РЭС на ГПО.

Создание широко разветвленной недорогой собственной сети SDR-радиоприемников позволит иметь резервную сеть приема сигналов от РЭС на ГПО.

Факт подключения к радиоприемным устройствам с SDR-технологией будет зафиксирован их владельцами, что не приемлемо для спецпотребителей.

Время работы SDR-устройств определяется их владельцами и не всегда совпадает с потребностями лиц, заинтересованных в мониторинге радиоэлектронной обстановки.

Результаты исследования возможностей использования SDR-радиоприемников AFEDRI в КВ диапазоне частот

Большинство SDR радиоприемников AFEDRI работают в следующих диапазонах 1,804–1,996 МГц; 3,600–3,792 МГц; 5,237–5,428 МГц; 7,008–7,200 МГц; 14,130–14,322 МГц; 18,019–18,211 МГц; 14,2976–14,5024 МГц; 144,976–147,024 МГц; 431,976–434,024 МГц; 433,976–436,024 МГц; 435,976–438,024 МГц; 10,368–10,370 ГГц. В разных странах в зависимости от производителей диапазоны приемников несколько отличаются от перечисленных диапазонов. Приемники могут иметь от одного до семи диапазонов частот.

Подключение к SDR приемникам AFEDRI осуществлялось через Интернет. Для этого на компьютере использовался браузер Mozilla Firefox. К SDR-радиоустройствам AFEDRI можно подключиться, установив на компьютер приложение Java version 7u51 или HTML.

Существуют мобильные версии для Android, позволяющие подключаться мобильным телефонам к SDR-радиоприемникам AFEDRI.

SDR-радиоприемники AFEDRI подключены к 116 серверам (на 30.04.2015 г) и зарегистрированы на сайте http://websdr.org [3].

Как правило, SDR-радиоприемники AFEDRI — это любительские приемные устройства радиоклубов, на которых работают несколько пользователей. Результаты работы, обычно, выкладываются в Интернет в виде журналов. В них видно, кто и когда подключался к приемнику, частоты приема, качество приема.

SDR-радиоприемные устройства AFEDRI, в отличие от Perseus, позволяют делать запись прослушивания принятых сигналов, которые затем можно обрабатывать, скачав с компьютера. Например, сигналы от спутников космической связи или от кораблей и др. ГПО.

Для исследования было отобрано 117 SDR-радиоприемных устройств AFEDRI. Однако радиоприемники AFEDRI позволяют принимать не все КМС:

— семь SDR-радиоприемных устройств AFEDRI в Москве, Красноярске, Брянске, Вашингтоне, Бухаресте, Халкидиках — (всего 6 %) четко принимают контрольно-маркерные сигналы;

— уникальный голландский SDR-радиоприемник в Твенте (JO32KF) работает в диапазоне от 0 до 29,16 МГц. На частотах 10,872; 13,528; 16,332; 20,048 МГц в ЧТ он с хорошим качеством принимает ЦУС ВМФ, удовлетворительно — КМС УС СФ;

— пятьдесят пять SDR-радиоприемников (47 %) имеют диапазоны частот, не позволяющие принимать КМС, в том числе в России — 12, Германии — 6, США — 7, Англии — 4, Греции — 3, в других странах по 1–2 радиоустройству;

— более 20-ти SDR-радиоприемных устройств (11 %) в Англии, России, США, ЮАР, Бразилии и других странах не принимают КМС. Причина — недостаточный уровень сигнала и отсутствует соответствующая ориентация антенн;

— быстро (за 5–7 секунд) отключаются SDR-радиоустройства в РФ (KO89XC), Голландии (JO21UG), Германии (JN47RP), Чехии (JO60VR);

— требуют персональной регистрации SDR-радиоприемники в Латвии, Казахстане, Мексике.

Вывод:

1. Только отдельные SDR-радиоприемные устройства AFEDRI (всего 6 %) могут быть задействованы в сети радиомониторинга радиочастотной обстановки (РЧО).

2. В сети радиомониторинга РЧО, как резервной сети приема, обязательно нужно иметь возможность записи для последующего анализа принятых сигналов.

На основании проведенных исследований можно сделать следующий вывод, что SDR-радиоприемные устройства могут использоваться как резервный канал для приема сигналов от ГПО.

SDR-технологии в системе связи ВМФ

Основным средством приема сигналов от ГПО являются радиоприемные устройства приемных радиоцентров ВМФ. Другими источниками приема сигналов могут быть SDR-радиоприемники других ведомств и организаций на территории России.

Перспективным является предложение создать многоканальные широкодиапазонные SDR-радиоприемники, работающие в диапазоне частот ГПО, с обязательной записью принятых сигналов. В качестве антенн для многоканальных радиоприемников могут использоваться фазированные антенные решетки, позволяющие принимать сигналы с любого направления. Подобные разработки имеет ПАО «Интелтех» (рис. 1).

Сигналы от всех возможных источников приема по имеющимся каналам связи поступают на АРМ приема сигналов от ГПО и далее на пункт управления по каналам аппаратуры «Трасса-Э» для последующей обработки.

Рис. 1. SDR-технологии в системе связи ВМФ (прием сигналов от мобильных объектов)

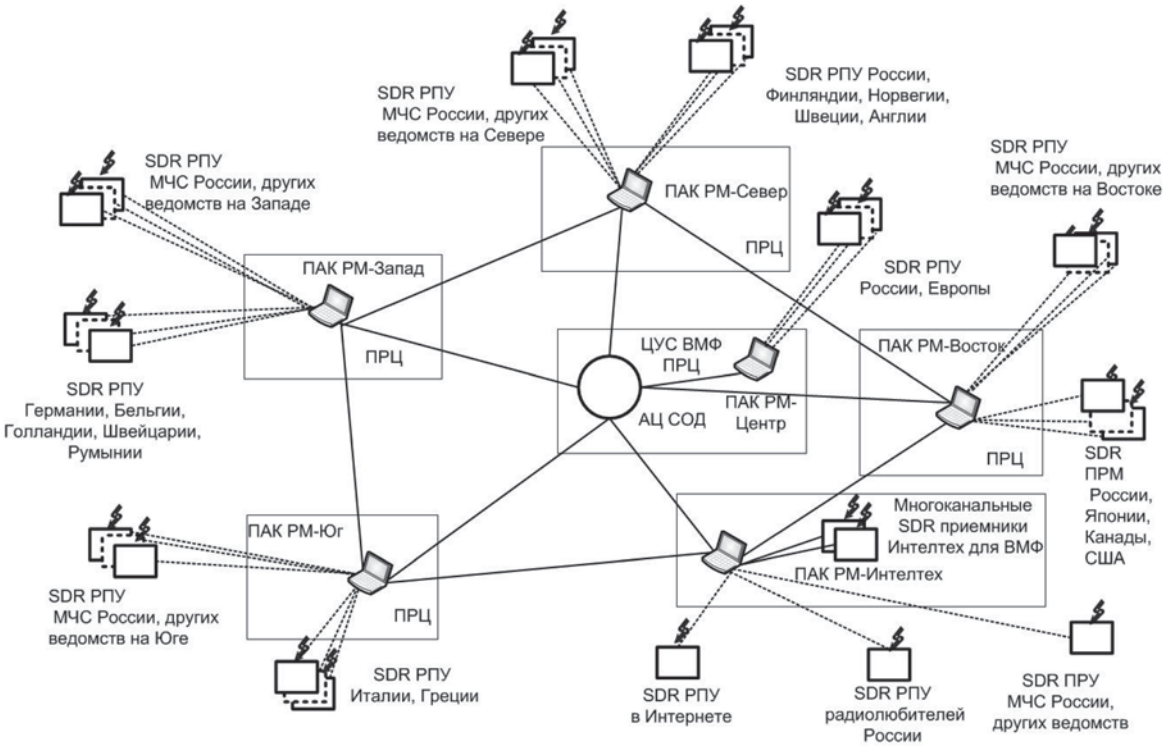

Рис. 2. Система мониторинга радиоэлектронной обстановки с использованием имеющихся РЭС

Перспективная система мониторинга радиоэлектронной обстановки с использованием SDR-радиоприемников в Интернете представлена на рисунке 2. Она включает автоматизированный центр сбора и обработки данных (АЦ СОД), программно-аппаратные комплексы радиомониторинга (ПАК РМ), SDR-радиоприемники и линии связи между ними [4].

АЦ СОД включает базу данных и модуль решения расчетных задач и предназначен для централизованного сбора и обработки сигналов от всех регионов (флотов). АЦ СОД позволяет оценить всю радиоэлектронную обстановку. В модуле решения расчетных задач определяется полоса оптимальных рабочих частот.

На АЦ СОД поступают сигналы от всех регионов (флотов), то это позволяет идентифицировать сообщение от одного абонента, принятое в распределенной системе мониторинга РЧО. При этом реализуется функция территориально-разнесенного приема и увеличивается вероятность приема сигнала от ГПО.

ПАК РМ служат для приема и обработки сигналов от ГПО на флоте или в своем регионе и постоянного мониторинга распространения радиоволн.

Кроме этой задачи, ПАК РМ постоянно, в реальном масштабе времени, осуществляют сбор и доведение до АЦ СОД статистических данных от следующих источников:

ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы ведомства;

ПАК наклонного зондирования ионосферы, в том числе и от международных центров зондирования;

мощных вещательных радиостанций мира;

зарегистрированных абонентов КВ радиосети и других энергетически-доступных излучателей [4].

ПАК РМ необходимо размещать на приемных радиоцентрах флотов или оперативно-стратегического командования. Соответственно необходимо иметь ПАК РМ Север, Запад, Юг, Восток, Центр.

ПАК РМ должны соединяться каналами связи, в том числе через ОАЦСС, с АЦ СОД и соседними ПАК РМ. Это позволит при нарушении прямых связей с АЦ СОД иметь обходные направления связи, что повышает живучесть системы.

ПАК РМ — Интелтех предполагается использовать на этапе разработки и внедрения системы мониторинга. Для мониторинга радиоэлектронной обстановки на всех флотах ПАО «Интелтех»

необходимо иметь основной и резервный многоканальные SDR-радиоприемники. С учетом потребности объектов мониторинга необходимо иметь приемники на 250–300 каналов.

Кроме этого, с помощью Интернета или ведомственных каналов необходимо иметь подключение к SDR-радиоустройствам МЧС России, других силовых ведомств, любительских радиоприемников в стране и за рубежом. В настоящее время в МЧС РФ создается сеть связи на SDR-технологиях. Она позволит осуществлять мониторинг обстановки во всех, в т. ч. малонаселенных и малодоступных пунктах РФ, на побережье Северного Ледовитого океана. Подключение к этой сети позволит иметь достаточно разветвленную сеть радиомониторинга.

Программное обеспечение ПАК РМ должно позволять фиксировать и записывать все сигналы от ГПО на всех частотах излучения по разработанным отличительным признакам.

Заключение

SDR-радиоприемные устройства возможно использовать как резервный канал приема сигналов от РЭС с ГПО.

Создание широко разветвленной сети мониторинга РЭО с использованием имеющихся РЭС позволит создать резервную сеть приема сигналов от ГПО. Применение небольшого числа (до 10) многотрактовых SDR-радиоприемников позволит отслеживать всю радиоэлектронную обстановку в ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программно-определяемая радиосистема. http:\\ru.wikipedia.org./wiki/

2. Краткая инструкция на SDR Perseus. http:\\ www.cgdx.ru

3. Инструкция на SDR AFEDRI. http:\\websdr.org

4. **Ю. Л. Николашин, И. А. Кулешов, П. А. Будко, Е. С. Жолдасов, Г. А. Жуков.** SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот // Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли, №1, 2015, — С. 20–31.

А.И. Яшин
доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора ПАО «Интелтех»

Н.Н. Мошак
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ПАО «Интелтех»

МОДЕЛЬ ПРОТОКОЛА ДИФФИ-ХЕЛЛМАНА

АННОТАЦИЯ. В статье предлагается модель протокола Диффи-Хеллмана, которая может быть использована при проектировании защищенных сетей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Мультисервисная сеть NGN, технология IntServ, протокол Диффи-Хеллмана, трафик безопасности.

Введение. Известно [1, 2], что применение механизмов защиты на фазах установления и/или поддержания сеанса связи вносит дополнительные фазовые (временные), протокольные и потоковые издержки в информационное окружение сети и приводит к ухудшению ее сетевых характеристик. В статье предложена модель протокола Диффи-Хелмана, которая может быть использована при проектировании защищенных пакетных мультисервисных сетей (МСС). Сравнительные расчеты проводятся на модели однородной МСС на технологии IntServ, которые сводятся к расчету характеристик типового незащищенного и защищенного сквозного тракта передачи и фотелекоммуникационной транспортной системы (ИТС) [2]. Указанная модель строится на базе функционального критерия эффективности системы с учетом ее архитектуры [2, 3]. Данная работа является дальнейшим развитием идей, изложенных в [1, 2, 4].

Формализация процесса генерации сеансового ключа в асимметричной криптосистеме

Использование асимметричных шифров можно свести к трем аспектам применения [5, 6]: 1) шифрование/дешифрование, при котором отправитель *i* шифрует сообщение *M* (или его сжатое отображение *H*, являющееся функцией *M*) с использованием открытого ключа P_j получателя *j*; 2) цифровая подпись $S^i(M)$, когда отправитель *i* «подписывает» сообщение *M* с помощью личного ключа S_i; 3) обмен ключами, при котором происходит обмен сеансовым ключом с применением личных ключей одной и/или обеих сторон.

Существует три метода выработки парных ключей: 1) пользователь генерирует собственные парные ключи; 2) парные ключи генерирует третья сторона; 3) парные ключи генерирует руководящий центр сертификации *CA* (Authentication Center). В данной работе мы будем рассматривать только первый метод. В общем случае механизм формирования разделяемого секрета по открытому каналу состоит в следующем. Отправитель вырабатывает разовый личный (секретный) ключ S_i (генерирует случайное число) и вычисляет открытый ключ $P_i = \alpha^{Si} (\mathrm{mod}\, p)$, который отсылает получателю. Получатель аналогичным образом вырабатывает разовый личный ключ S_j, вычисляет открытый ключ $P_j = \alpha^{S_j} (\mathrm{mod}\, p)$ и отсылает его отправителю. Оба корреспондента при этом могут вычислить общий секретный сеансовый ключ K_{ij}:

$$K_{ij} = (P_j)^{Si} = (\alpha^{Sj})^{Si} = \alpha^{SjSi} (\mathrm{mod}\, p)$$

и

$$K_{ij} = (P_i)^{Sj} = (\alpha^{Si})^{Sj} = \alpha^{SiSj} (\mathrm{mod}\, p).$$

Таким образом, любая транзакция по созданию сеансового ключа в двухключевой криптосистеме в общем случае включает в себя три фазы: а) фазу генерации общего (разделяемого) сеансового секрета K_{ij}; б) фазу взаимного обмена

общего сеансового секрета K_{ij} между корреспондентами; в) фазу аутентификации корреспондентов при создании общего сеансового секрета. Рассмотрим данные фазы подробнее.

Фаза генерации сеансового ключа K_{ij} включает в себя:

1) время, затрачиваемое на аутентификацию $t_{Pi,j}^{CAaym}$ открытых ключей пользователей P_i и P_j, получаемых по запросу из центра *CA* или без его участия — $t_{Pi,j}^{aym}$;

2) собственно время на формирование, общего секрета t_{Kij}. Время $t_{Pi,j}^{CAaym}$ в свою очередь включает время $t_{i,CA}^{запр\,Pj}$, $t_{j,CA}^{запр\,Pi}$ на запрос каждой из сторон информационного обмена сертификата партнера из центра *CA*;

3) время $t_{CA,i}^{отв\,Pj}$, $t_{CA,j}^{отв\,Pi}$ на ответ *CA* (пересылку соответствующих сертификатов) каждой из сторон;

4) время t_j^{aymCA}, t_i^{aymCA}, затрачиваемое на проверку пользователями полученных сертификатов на открытом ключе *CA*.

Если центр сертификации *CA* не участвует в процессе аутентификации, то в этом случае корреспонденты обмениваются открытыми ключами самостоятельно за время $t_{i,j}^{прд\,Pi}$ и $t_{j,i}^{прд\,Pj}$.

Фаза взаимного обмена сеансовыми ключам включает в себя время их передачи в двух направлениях между корреспондирующими парами $t_{Kij}^{прд}$.

Фаза аутентификации корреспондентов в зависимости от применяемых протоколов включает в себя:

1) время на работу протокола простой аутентификации без защиты $t_{б/з}^{aym}$ или протокола простой аутентификации с защитой $t_{с/з}^{aym}$;

2) время на работу протоколов строгой аутентификации в соответствии со стандартом X.509 с учетом одно-, двух- или трехкратном обмене аутентификациоными сообщениями $t_{строг}^{aym}$.

Таким образом, транзакции по созданию сеансового ключа K_{ij} в двухключевой криптосистеме могут быть многофазовой моделью и формализоваться следующими аддитивными формами:

— при наличии центра сертификации *CA* с применением протокола простой аутентификации без защиты (с защитой) пользователей:

$$T_{Kij}^{CA1} = (t_{Pi,j}^{CAaym} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{б/з}^{aym}\ (t_{с/з}^{aym}) =$$

$$(t_{i,CA}^{запр\,Pj} + t_{j,CA}^{запр\,Pi} + t_{CA,i}^{отв\,Pj} + t_{CA,j}^{отв\,Pi} + t_j^{aymCA} +$$

$$+ t_i^{aymCA} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{б/з}^{aym}\ (t_{с/з}^{aym}); \qquad (1)$$

— при наличии центра сертификации *CA* и с применением протоколов строгой аутентификации пользователей:

$$T_{Kij}^{CA2} = (t_{Pi,j}^{CAaym} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{строг}^{aym} =$$

$$= (t_{i,CA}^{запр\,Pj} + t_{j,CA}^{запр\,Pi} + t_{CA,i}^{отв\,Pj} + t_{CA,j}^{отв\,Pi} +$$

$$+ t_j^{aymCA} + t_i^{aymCA} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{строг}^{aym}; \qquad (2)$$

— без центра сертификации *CA* с применением протокола простой аутентификации без защиты (с защитой) пользователей:

$$T_{Kij}^{1} = (t_{Pi,j}^{aym} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{б/з}^{aym}\ (t_{с/з}^{aym}) =$$

$$= t_{i,j}^{прд\,Pi} + t_{j,i}^{прд\,Pj} + 2t_{Kij} + 2t_{Kij}^{прд} + t_{б/з}^{aym}\ (t_{с/з}^{aym}); \qquad (3)$$

— без центра сертификации *CA* с применением протоколов строгой аутентификации пользователей:

$$T_{Kij}^{2} = (t_{Pi,j}^{aym} + 2t_{Kij}) + 2t_{Kij}^{прд} + t_{строг}^{aym} =$$

$$= t_{i,j}^{прд\,Pi} + t_{j,i}^{прд\,Pj} + 2t_{Kij} + 2t_{Kij}^{прд} + t_{строг}^{aym}. \qquad (4)$$

Таким образом, процесс шифрования в двухключевой криптосистеме в общем виде можно формализовать следующей аддитивной формой

$$t_{убш_асим} = T_{Kij}^{CA1(2)}\ (T_{Kij}^{1(2)}) + t_{i,j\,убш}, \qquad (5)$$

где $t_{i,j\,убш}$ — время шифрования/дешифрования сообщения на симметричном ключе K_e на сторонах участников обмена (временем генерации ключа K_e на стороне отправителя пренебрегаем). Формализация процессов аутентификации $t_{б/з}^{aym}$ $(t_{с/з}^{aym})$, $t_{строг}^{aym}$ приведена в [3]. Здесь и далее индекс *k* в параметрах указывает класс трафика в терминах ATM Forum: изохронный трафик класса *B* или асинхронный трафик класса *C*.

Поток мультимедийных вызовов λ_{ij}^{multi} порождает в сети пропущенную нагрузку величины $\hat{a}_{ij}^{multi}$ (Эрл) от маршрутизатора i к маршрутизатору j

$$\hat{a}_{ij}^{multi} = N_i \lambda^{multi} t^{ses} (1 - b^{malty}), \text{ Эрл}, \qquad (6)$$

где b^{malty} — величина допустимых потерь мультимедийного вызова в сети; N_i — количество мультимедийных оконечных устройств (end multimedia system, EMS), включенных в маршрутизатор i, создающих суммарную нагрузку в направлении маршрутизатора j; t^{ses}, (с) — длительность мультимедийной сессии. Суммарная величина входящего в сеть потока мультимедийных вызовов задается соответствующей матрицей $Y^{malty} = \left\| a_{ij}^{malty} \right\|$.

Каждый мультимедийный вызов порождает в сети трафик безопасности Диффи-Хеллмана величиной

$$\hat{a}_{ij}^{D-H} = N_i \lambda^{multi} t^{D-H} (1 - b^{malty}), \text{ Эрл}, \qquad (7)$$

где t^{D-H}, (с) — время, необходимое для завершения транзакции протокола Диффи-Хеллмана.

При этом загрузка ρ_{ij}^{D-H} линейно-цифрового тракта сети (ЛЦТ) трафиком безопасности в сеансе связи задается выражением

$$\rho_{ij}^{D-H} = \frac{a_{ij}^{multi}}{\zeta}, \qquad (9)$$

где $\zeta = \dfrac{t^{multi}}{t^{D-H}}$, $t^{D-H} = t_{убш_асим}$, при его передаче внутри базовой полосы должна учитываться в общем балансе загрузки ЛЦТ.

Для однородных пакетных ИТС расчет сетевых характеристик логического соединения уровня межсетевого взаимодействия сводится к расчету параметров «типичного» для сети n-звенного составного канала [3]. Математическая модель, описывающая процесс передачи трафика классов B и C по однородному транспортному каналу в пакетной ИТС-IP-QoS, может быть представлена однолинейной многофазной СМО с ожиданием и абсолютным приоритетным обслуживанием (с дообслуживанием) речевых пакетов нагрузки по отношению к пакетам данных на каждой фазе.

На рисунке 1 представлена модель однородного логического соединения ИТС на межсетевом уровне в режиме установленного соединения. Однородный n-звенный транспортный канал представляет собой n последовательно включенных однородных межузловых ЛЦТ от источника до получателя (этот параметр учитывает качество маршрутизации информации в сети и ее топологию). На физическом уровне ЛЦТ образуют составной тракт передачи. При сделанных допущениях определим выражения для коэффициентов загрузки ρ^B, ρ^C.

Текущее значение ρ^B можно вычислить следующим образом [3].

$$\rho^B = \frac{L^B + H_{NI}}{L^B - H_{IP}} \frac{\upsilon^B}{V} a^B \eta. \qquad (10)$$

Загрузка ЛЦТ трафиком данных ρ^C при условии, что процесс передачи в нем моделируется СМО $M/M/1$ с абсолютным приоритетом для речевых пакетов (с дообслуживанием), дается выражением [7]

$$\rho^C = 1 - \rho^B - \left(\frac{\dfrac{n\rho^B}{1-\rho^B}(L^B + H_{NI}) + n(L^C + H_{NI})}{T^C V - (L^C - H_{IP})\dfrac{V}{\omega^C}} \right), \qquad (11)$$

где H_{NI} — заголовок уровневого примитива уровня сетевого доступа, бит; H_{IP} — заголовок уровневого примитива межсетевого уровня,

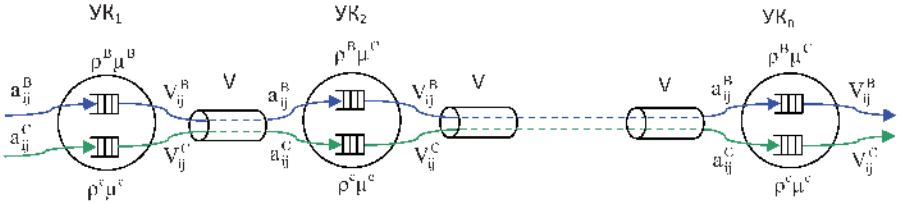

Рис. 1. Модель однородного логического соединения уровня межсетевого взаимодействия в пакетной ИТС в режиме установленного соединения

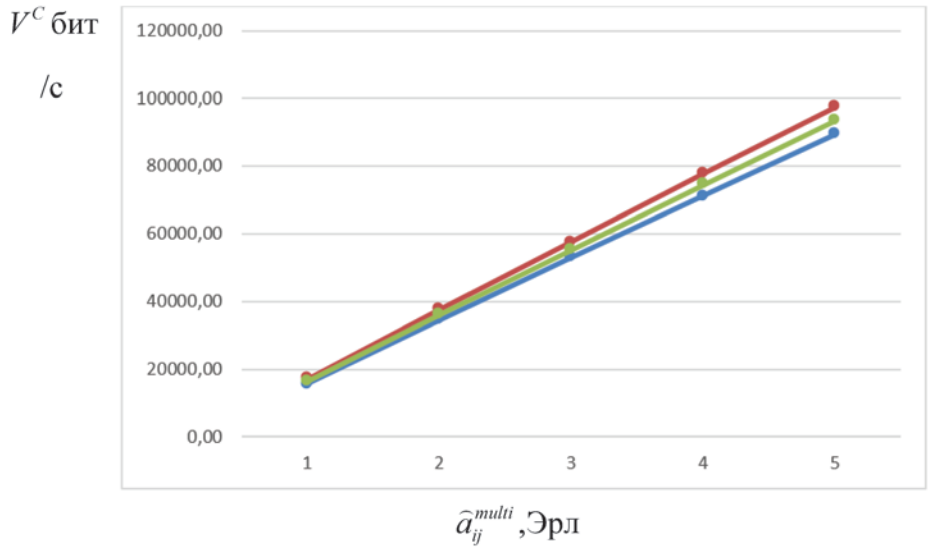

Рис. 2. Зависимость требуемой пропускной способности для передачи трафика класса *C* от величины входной речевой нагрузки в сессии:
----- без защиты, ---- с защитой (без СА), ---- с защитой (с СА)

бит; η^B — коэффициент уплотнения пауз в речевом потоке; L^B, L^C — длины протокольных блоков речи и данных на межсетевом уровне, бит; ν^B — скорость работы речевого абонента, бит/с; ω^C — скорость работы установки данных, бит/с; T^C — заданное среднее время пребывания пакета данных в ЛЦТ, с.

В предположении, что трафик безопасности обрабатывается в маршрутизаторах с приоритетом базового трафика класса *C*, загрузка ЛЦТ трафиком данных ρ^C должна увеличится на величину ρ_{ij}^{D-H}, т. е.

$$\rho^C = 1-\rho^B - \left(\frac{\frac{n\rho^B}{1-\rho^B}(L^B + H_{NI}) + n(L^C + H_{NI})}{T^C V - (L^C - H_{IP})\frac{V}{\omega^C}} \right) + \rho_{ij}^{D-H}. \quad (12)$$

Результаты расчетов параметров транспортного канала однородной ИТС представлены на графике зависимости требуемой пропускной способности ЛЦТ для передачи трафика класса *C* — V^C (бит/с) от величины входной нагрузки класса *B* (Эрл) (рис. 2). Исходные данные: $V = 128000$ бит/с, $T^C = 2c$, $n = 10$, $\omega^C = 64000$ бит/с, $\upsilon^B = 16000$ бит/с, $H_{NI} = 48$ бит, $H_{IP} = 320$ бит, $\eta^B = 0{,}497$

Анализ результатов расчетов показывает, что применение протокола Диффи-Хеллмана требует увеличения пропускной способности для трафика класса С на 4,5–9 %.

Выводы

Модели протокола Диффи-Хеллмана должны быть учтены в задачах анализа и синтеза защищенных пакетных мультисервисных сетей при расчете основных их вероятностно-временных характеристик [9,10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мошак Н. Н.** Формализация и оценка процессов представления механизмов защиты в мультисервисной сети. Общий подход // Электросвязь, №3, 2012, С. 30–35.

2. **Мошак Н. Н.** Защищенные инфотелекоммуникации. Анализ и синтез: монография / Н.Н. Мошак. — СПб.: ГУАП, 2014. — 193 с.

3. **Мошак Н. Н.** Теоретические основы проектирования транспортной системы инфокоммуникационной сети: Учеб. пос. для вузов. — СПб.: Энергомашиностроение, 2006. 159 с.

4. **Мошак Н. Н.** Модели услуг аутентификации в задаче анализа инфокоммуникационной сети // Известие вузов России, Радиоэлектроника. 2007. № 5. С. 18–25.

5. **Молдовян А. А.** Введение в криптосистемы с открытым ключом / А.А. Молдовян, Н.А. Молдовян. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 288 с.

6. **Молдавян А. А.** Криптография: от примитивов к синтезу алгоритмов / А.А. Молдовян, Н.А. Молдовян, М.А. Еремеев. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 448 с.

7. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979. — 600 с.

8. **Мошак Н. Н., Яшин И. Я., Давыдова Е. В.** Методы и алгоритмы анализа и синтеза пакетных мультисервисных сетей NGN // Электросвязь. № 11. 2015. — С. 46–52.

9. **Бельтов А. Г., Доскалов М. В., Кулешов И. А.** Анализ методов моделирования телекоммуникационных сетей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. Т. 1. № 140. — С. 7–10.

10. **Фомин Л. А., Будко П. А., Мухин А. В., Будко Н. П.** Исследование эффективности использования ресурсов при синтезе телекоммуникационных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. № 1, 2010. — С. 46–53.

М.А. Баринов
кандидат технических наук,
доцент, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

А.П. Веселовский
кандидат технических наук,
доцент, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

С.В. Рагузин
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПИТАНИЯ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Перспективы развития электроэнергетических устройств для питания средств связи тесно связаны с задачей улучшения качества электроэнергии. Одной из проблем улучшения качества электроэнергии является наличие высших гармонических составляющих искажений тока и напряжения. Наличие высших гармоник в цепи питания средств связи негативно влияет на их работу, особенно на функционирование радиопередающих средств.

В настоявшее время на территории Российской Федерации действует ГОСТ 32144–2013, нормирующий показатели качества, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения до 40-го порядка по отношению к среднеквадратичному значению основной гармоники напряжения. Наличие высших гармоник вызывает сокращение срока службы электрооборудования, выход из строя устройств компенсации реактивной мощности, кроме того, могут происходить ложные срабатывания устройств защиты и автоматизации. Наличие приемников первой категории потребителей, для которых невозможно отключение электроснабжения, создает трудности оценки влияния источников искажений со стороны питающей сети или нагрузки.

Проблема высших гармоник в установках электроснабжения средств связи связана с внедрением полупроводниковых преобразователей частоты выпрямительных устройств, регулируемых двигателей постоянного тока и частотного управления двигателями переменного тока. Процесс возникновения высших гармоник отмечен в работе [1].

Определение долевого вклада гармонических составляющих искажений тока и напряжения в питающей сети со стороны нагрузки и со стороны питающего агрегата позволяет произвести обоснованный выбор параметров устройств компенсации высших гармоник.

Рекомендации для компенсации влияния высших гармоник на электрооборудование основаны на оценке долевого вклада высших гармоник от источников питания и приемников электроэнергии.

Компенсацию влияния высших гармоник предлагают различные авторы [1–4] методом активного двухполюсника, методом потока активной мощности (реактивной мощности), индексом качества общей мощности (global power quality index). В указанных методах применяются источники измерения во многих узлах системы питания с синхронизацией измерения, в результате чего можно определить вклад в искажения со стороны потребителя и питающих устройств.

Гармонические искажения тока в электрической сети вызываются нелинейной (иногда импульсной) нагрузкой потребителя. Активная мощность потребителя неравномерна во времени.

Мгновенная мощность, потребляемая нагрузкой, является произведением мгновенного значения тока и напряжения, которые могут быть представлены в виде:

$$p(t) = u(t)\ i(t) =$$

$$= \left(u_1\ (t) + \sum_{i=2}^{n} u_i(t) \right) \left(i_1\ (t) + \sum_{i=2}^{n} i_i\ (t) \right) =$$

$$= u_i(t) i_1\ (t) + u_i(t) \sum_{i=2}^{n} u_i(t) +$$

$$+ i_1\ (t) \sum_{i=2}^{n} i_i\ (t) + \sum_{i=2}^{n} u_i(t) \sum_{i=2}^{n} i_i\ (t).$$

Анализ мгновенных мощностей проведен с использованием схемы рисунка 1, где $Z_с$ — полное сопротивление сети, $Z_н$ — сопротивление нагрузки, $R_н$ — сопротивление нелинейного элемента выпрямителя.

Для расчета использованы прикладные программы Matlab, Simulink.

В большинстве случаев источник искажения расположен со стороны нагрузки, поэтому компенсацию высших гармоник можно произвести путем установки активных или пассивных фильтров в местах подключения нелинейной нагрузки. Устройством фильтров высших гармоник снижается состав протекающих в сети реактивных токов.

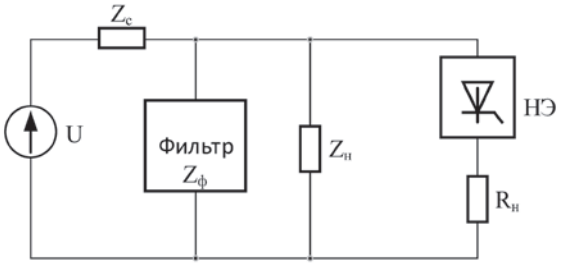

Рис. 1. Упрощенная схема замещения системы «генератор-нагрузка»

Таким образом, отсутствие высших гармоник в цепях питания средств связи может существенно улучшить электромагнитную совместимость с их источниками электроснабжения, увеличить срок службы электрооборудования и предотвратить ложные срабатывания устройств защиты и автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Железко Ю. С.** Компенсация реактивной мощности в сложных гармонических системах. — М.: Энергоиздат, 1981. — 200 с.

2. **Кириенко В. П., Слепченко М. Н.** Комплексное устройство компенсации реактивной мощности искажения в системах питания с управляемыми выпрямителями. // Электричество. 2006. №11. — С. 33–40.

3. Патент РФ №2543075. Способ снижения влияния высших гармоник на электрооборудование. / Шклярский Я.Э., Скамьян А.Н., Бунтеев Ю.Е. Опубликован 27.02.2015. Бюллетень № 6, 7.

4. Патент РФ №2573706. Способ выявления источников высших нагрузок. / Шклярский Я.Э., Скамьян А.Н., Бунтеев Ю.Э. Опубликован 27.01.2015. Бюллетень № 3–6.

В.И. Бобровский
доктор технических наук, доцент, ПАО «Интелтех»

С.С. Латыпова
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

МОДИФИКАЦИЯ СИГНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ТРИДЦАТИ ДВУХ ПОЗИЦИОННОЙ КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

АННОТАЦИЯ. В данной работе представлен способ формирования тридцати двух позиционной квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ-32) повышенной помехоустойчивости на основе максимизации минимального евклидового расстояния между точками сигнальной конструкции (СК) [1]. Приведены точные формулы вероятности ошибки на бит и представлен сравнительный анализ потенциальной помехоустойчивости традиционной «квадратной» СК КАМ-32 и оптимизированной по критерию максимума минимального евклидового расстояния — «круглой» СК КАМ-32 в модифицированном манипуляционном коде (МК), близком к МК Грея.
В работе показано, что оптимизация СК КАМ-32 способствует повышению эффективности ее применения и позволяет снизить требования к отношению сигнал/шум более чем на 1 дБ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: квадратурная амплитудная манипуляция, помехоустойчивость, сигнальная конструкция, манипуляционный код.

Способ построения СК «круглой» КАМ

На рисунке 1 показано исходное расположение сигнальных точек, соответствующее традиционному способу формирования сигнальной конструкции квадратурной амплитудной манипуляции, и их смещение при применении способа формирования «круглой» КАМ-32 [1, 2].

Предложенный способ оптимизации СК КАМ-32 не зависит от применяемого МК и может быть использован для любого МК. На рис. 1 представлен модифицированный МК Грея. Применение МК Грея для тридцати двух позиционной СК КАМ невозможно, в связи с этим применяется модифицированный МК Грея, при котором двоичный код не всех, но большинства соседних сигнальных точек отличается в одном бите. Порядок следования битов справа налево, он является обратным для номеров информационных битов, манипулирующих синфазную $\vec{u}^{\,I}_{\text{исх}}$ и квадратурную $\vec{u}^{\,Q}_{\text{исх}}$ составляющие, т. е. первый бит слева является пятым информационным битом, второй — четвертым информационным битом и т. д. Точками на рис. 1 показаны положения сигнальных точек исходной КАМ конструкции. Пунктирными окружностями на рис. 1 обозначены положения сигнальных точек оптимизированной (далее «круглой») КАМ-32. Стрелками с треугольными указателями показываются направления перемещения сигнальных точек традиционной КАМ-32 в сигнальную конструкцию «круглой» КАМ-32. Стрелками с заостренными указателями обозначены вектора сигнальных точек. Начало и конец каждого такого вектора обозначены большими латинскими буквами.

В результате оптимизации по критерию максимума минимального евклидового расстояния между сигнальными точками получена СК «круглой» КАМ-32 в модифицированном МК Грея, показанная на рис. 2. Положения сигнальных точек определяются манипуляцией векторов $\vec{u}_a = a\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_b = b\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_c = c\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_d = d\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_e = e\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_f = f\vec{u}_{\text{исх}}$, $\vec{u}_g = g\vec{u}_{\text{исх}}$. На рис. 2 если данные вектора откладываются на синфазной оси, то они обозначаются $\vec{u}^{\,I}_a$, $\vec{u}^{\,I}_b$, $\vec{u}^{\,I}_c$ и так далее. Если на квадратурной оси — то $\vec{u}^{\,Q}_a$, $\vec{u}^{\,Q}_b$, $\vec{u}^{\,Q}_c$ и так далее.

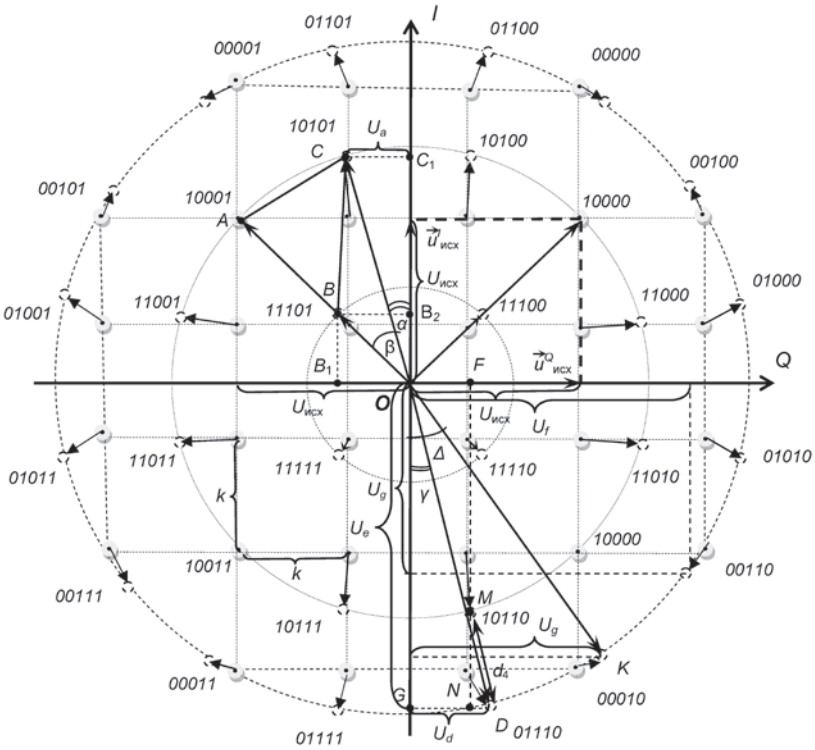

Рис. 1. Исходное расположение сигнальных точек, соответствующее традиционному способу формирования сигнальной конструкции квадратурной амплитудной манипуляции, и их смещение при применении предлагаемого способа

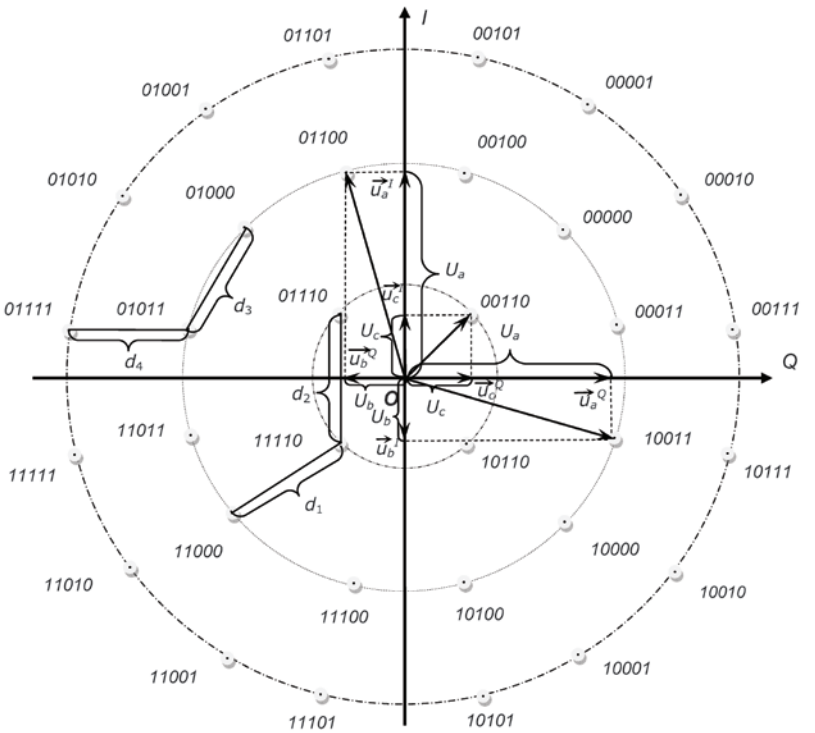

Рис. 2. Сигнальная конструкция «круглой» КАМ-32 (оптимизированная по критерию максимума минимального евклидового расстояния между сигнальными точками)

Коэффициенты *a, b, c, d, e, f, g* получены в [1]:

$$a=\sqrt{1+\frac{3}{2}}\approx 1.36603\,; \qquad (1)$$

$$c=\frac{1}{1+\sqrt{2}}\approx 0{,}41421\,; \qquad (2)$$

$$b=\sqrt{2-a^2}=\sqrt{1-\frac{\sqrt{3}}{2}}\approx 0.36603\,; \qquad (3)$$

$$e=\frac{2\left(\mathrm{tg}\gamma b+a\right)+\sqrt{\left(\mathrm{tg}\gamma b+a\right)^2-4\left(\mathrm{tg}\gamma^2+1\right)\left(8\sin\frac{\pi}{12}+a^2+b^2\right)}}{2\left(\mathrm{tg}\gamma^2+1\right)}=$$

$$=\frac{2{,}877+\sqrt{2{,}877^2-4\cdot 1{,}039\cdot 1{,}464}}{2\cdot 1{,}039}=2{,}096\,; \qquad (4)$$

$$d=e\cdot \mathrm{tg}11{,}25^0=2{,}096\cdot \mathrm{tg}11{,}25^0=0{,}417\,; \qquad (5)$$

$$f=\sqrt{\left(d^2+e^2\right)\Big/\left(tg^2\Delta+1\right)}=\sqrt{4{,}567\big/1{,}446}=1{,}777; \qquad (6)$$

$$g=f\cdot \mathrm{tg}33{,}75^0=1{,}777\cdot \mathrm{tg}33{,}75^O=1{,}187\,; \qquad (7)$$

Расчет потенциальной помехоустойчивости СК традиционной («квадратной»)КАМ-32

Пусть $h_b{}^2 \triangleq \frac{E_м}{N_0}$ — отношение сигнал/шум, численно равное отношению максимальной энергии СК КАМ-32 к односторонней спектральной плотности белого шума, а прием осуществляется по критерию минимум вероятности ошибки на групповой символ (min P_e). Тогда в канале с постоянными параметрами и белым шумом вероятность ошибки на бит традиционной КАМ-32 в модифицированном МКГрея можно представить формулами (8)[3].

$$P_{тр}[ош]=$$

$$=\frac{1}{5}\left(2P_{тр\,2}[ош]+P_{тр\,3}[ош]+P_{тр\,4}[ош]+P_{тр\,5}[ош]\right), \qquad (8а)$$

$$P_{тр\,2}[ош]=\frac{1}{8}\sum_{r_3=0}^{1}\sum_{r_4=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1}F\left(-m_Q(r_3,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right), \qquad (8б)$$

$$P_{тр\,3}[ош]=\frac{1}{2}\left(P_{тр\,3}[ош/r_3=0]+P_{тр\,3}[ош/r_3=1]\right), \qquad (8в)$$

$$P_{тр\,3}[ош/r_3=0]=$$

$$=\frac{1}{4}\sum_{r_4=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1}\left[\begin{array}{l} F\left(\left(\frac{2}{3}-m_I(0,r_4,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)- \\ -F\left(\left(\frac{-2}{3}-m_I(0,r_4,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)+ \\ +\frac{4}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{\frac{-2}{3}\sqrt{h_b{}^2}} e^{-\frac{z^2}{2}}F\left(\left(\frac{-4}{3}-m_I(0,r_4,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)\mathrm{d}z \end{array}\right], \qquad (8г)$$

$$P_{тр\,3}[ош/r_3=1]=$$

$$=\frac{1}{2}\sum_{r_4=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1}\left[\begin{array}{l} F\left(\left(\frac{-2}{3}-m_I(1,r_4,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)- \\ -\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{\frac{-2}{3}\sqrt{h_b{}^2}} e^{-\frac{z^2}{2}}F\left(\left(\frac{-4}{3}-m_I(1,r_4,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)\mathrm{d}z \end{array}\right], \qquad (8д)$$

$$P_{тр\,4}[ош]=\frac{1}{2}\left(P_{тр\,4}[ош/r_4=0]+P_{тр\,4}[ош/r_4=1]\right), \qquad (8е)$$

$$P_{тр\,4}[ош/r_4=0]=$$

$$=\frac{1}{4}\sum_{r_3=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1}\left[\begin{array}{l} F\left(\left(\frac{2}{3}-m_Q(r_3,0,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)- \\ -F\left(\left(\frac{-2}{3}-m_Q(r_3,0,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)+ \\ +\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{\frac{-2}{3}\sqrt{h_b{}^2}}^{\frac{2}{3}\sqrt{h_b{}^2}} e^{-\frac{z^2}{2}}F\left(\left(\frac{-4}{3}-m_Q(r_3,0,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)\mathrm{d}z \end{array}\right], \qquad (8ж)$$

$$P_{тр\,4}[ош/r_4=1]=$$

$$=\frac{1}{2}\sum_{r_3=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1}\left[\begin{array}{l} F\left(\left(\frac{-2}{3}-m_Q(r_3,1,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)- \\ -\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{\frac{-2}{3}\sqrt{h_b{}^2}}^{\frac{2}{3}\sqrt{h_b{}^2}} e^{-\frac{z^2}{2}}F\left(\left(\frac{-4}{3}-m_Q(r_3,1,r_5)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)\mathrm{d}z \end{array}\right], \qquad (8з)$$

$$P_{тр\,5}[ош]=$$

$$=\frac{1}{2}\left(P_{тр\,5}[ош/r_5=0]+P_{тр\,5}[ош/r_5=1]\right) \qquad (8и)$$

$$P_{тр\,5}[ош/r_5=0]=$$

$$=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sum_{r_3=0}^{1}\sum_{r_4=0}^{1}\left[\int\limits_{\frac{-4}{3}\sqrt{h_b{}^2}}^{0} e^{-\frac{z^2}{2}}\left[F\left(-m_I(r_3,r_4,0)\sqrt{h_b{}^2}\right)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-F\left(\left(\frac{-4}{3}-m_I(r_3,r_4,0)\right)\sqrt{h_b{}^2}\right)\right]\mathrm{d}z\right], \qquad (8к)$$

$$P_{\text{тр}\,5}[ош / r_5 = 1] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{r_3=0}^{1} \sum_{r_4=0}^{1} \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\frac{-4}{3}\sqrt{h_b^2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \left[F\left(\left(\frac{4}{3} - m_I(r_3, r_4, 1) \right) \sqrt{h_b^2} \right) - \right. \\ \qquad \left. - F\left(-m_I(r_3, r_4, 1) \sqrt{h_b^2} \right) \right] \mathrm{d}\, z + \\ + \int\limits_{-\infty}^{0} e^{-\frac{z^2}{2}} Fc\left(\left(\frac{4}{3} - m_I(r_3, r_4, 1) \right) \sqrt{h_b^2} \right) \mathrm{d}\, z \end{array} \right], \quad (8л)$$

где

$$m_I(r_3, r_4, r_5) = \sum_{i=0}^{7} \left(Cod\left(i, r_3, r_4, r_5\right) \cdot k_{X\,i} \right) \text{ — } \quad (9а)$$

нормированное к $\sqrt{E}$ математическое ожидание проекции СТ с координатами ($r_1 = \{0,1\} r_2 = \{0,1\}$ $r_3 r_4 r_5$) на синфазную ось; E — энергия СТ с координатами (1 0 0 0 0) в традиционное СК КАМ-32;

$$m_Q(r_3, r_4, r_5) = \sum_{i=0}^{7} \left(Cod\left(i, r_3, r_4, r_5\right) \cdot k_{Y\,i} \right) \text{ — } \quad (9б)$$

нормированное к $\sqrt{E}$ математическое ожидание проекции СТ с координатами ($r_1 = \{0,1\} r_2 = \{0,1\}$ $r_3 r_4 r_5$) на квадратурную ось;

$$Cod\left(i, r_3, r_4, r_5\right) = \begin{cases} (r_3 \oplus 1)(r_4 \oplus 1)(r_5 \oplus 1), & i = 0 \\ (r_3 \oplus 0)(r_4 \oplus 1)(r_5 \oplus 1), & i = 1 \\ (r_3 \oplus 1)(r_4 \oplus 0)(r_5 \oplus 1), & i = 2 \\ (r_3 \oplus 0)(r_4 \oplus 0)(r_5 \oplus 1), & i = 3 \\ (r_3 \oplus 1)(r_4 \oplus 1)(r_5 \oplus 0), & i = 4 \\ (r_3 \oplus 0)(r_4 \oplus 1)(r_5 \oplus 0), & i = 5 \\ (r_3 \oplus 1)(r_4 \oplus 0)(r_5 \oplus 0), & i = 6 \\ (r_3 \oplus 0)(r_4 \oplus 0)(r_5 \oplus 0), & i = 7 \end{cases} \quad (9в)$$

$x \oplus y$ — сложение двоичных чисел x и y по модулю два;

$$k_x = \left(1, \frac{5}{3}, \frac{5}{3}, \frac{1}{3}, 1, \frac{1}{3}, 1, \frac{1}{3} \right)^T,$$

$$k_y = \left(\frac{5}{3}, 1, \frac{1}{3}, \frac{5}{3}, 1, 1, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right)^T; \quad (9г)$$

$P_{\text{тр}\,2}[ош]$, $P_{\text{тр}\,3}[ош]$, $P_{\text{тр}\,4}[ош]$ и $P_{\text{тр}\,5}[ош]$ — вероятности ошибок соответственно второго, третьего, четвертого и пятого битов в СК КАМ-32*;

$P_{\text{тр}\,3}[ош / r_3 = 0]$ и $P_{\text{тр}\,3}[ош / r_3 = 1]$ — вероятности ошибок третьего бита в СК КАМ-32 при условии, что передавались соответственно $r_3 = 0$ и $r_3 = 1$; $P_{\text{тр}\,4}[ош / r_4 = 0]$ и $P_{\text{тр}\,4}[ош / r_4 = 1]$ — вероятности ошибок четвертого бита в СК КАМ-32 при условии, что передавались соответственно $r_4 = 0$ и $r_4 = 1$; $P_{\text{тр}\,5}[ош / r_5 = 0]$ и $P_{\text{тр}\,5}[ош / r_5 = 1]$ — вероятности ошибок пятого бита в СК КАМ-32 при условии, что передавались соответственно $r_5 = 0$ и $r_5 = 1$;

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_{-\infty}^{x} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ — } \quad (10а)$$

интеграл Лапласа;

$$Fc(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_{x}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ — } \quad (10б)$$

дополнение интеграла Лапласа до единицы.

График вероятности ошибки на бит при модифицированном МК Грея в зависимости от максимального отношения сигнал/шум $h_б^2$ представлены на рис. 3.

Расчет потенциальной помехоустойчивости СК «круглой» КАМ-32

Прием СК КАМ-32 повышенной помехоустойчивости предусматривает компенсационные алгоритмы, в соответствии с которыми правило оценивания двоичных символов записывается в виде [3]:

$$\mathbf{r}^* = \mathrm{rect}\left\{ \mathbf{y} - \mathbf{g} \right\}, \quad (11)$$

где

$$\mathrm{rect}(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} \text{ — } \quad (12)$$

функция принятия решения,

$\mathbf{r}^* \triangleq (r_1, r_2, ..., r_K)^{\mathrm{T}}$ — вектор информационных параметров сигналов;

$\mathbf{g} \triangleq (g_1, g_2, ..., g_K)^{\mathrm{T}}, g_i \triangleq g_i(\mathbf{y}) = g_i[(y_1, y_2, ..., y_K)]^{**}$ — вектор оптимальных границ областей принятия

* В виду симметрии СК КАМ-32 вероятности ошибок первого и второго битов равны.

** В случае отсутствия необходимости конкретизации числа детектируемых сигналов будем употреблять обозначение ГОИП, а также вектора откликов корреляторов без верхнего индекса: gi, **y**.

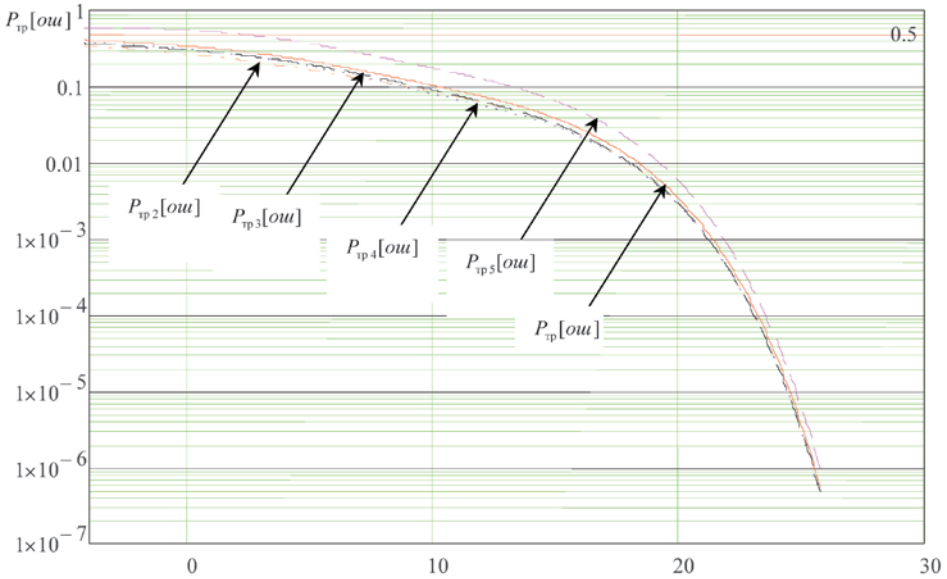

Рис. 3. График вероятности ошибки на бит в зависимости от максимального отношения сигнал/шум $h_б^2$ при модифицированном МК Грея

решений (ГОПР); $\mathbf{y} \triangleq (y_1, y_2, ..., y_K)^{\mathrm{T}}$ — вектор откликов корреляторов (вектор наблюдений), где

$y_i \triangleq (\mathrm{y}, \acute{\mathrm{s}}_i)$; $\acute{\mathrm{s}}_i = (\sqrt{E_i})^{-1}\mathrm{s}_i$, $i = 1...K$ — нормированный i-й двоичный цифровой сигнал.

Как следует из формального представления в компенсационном виде алгоритма, основной задачей является формирование вектора ГОПР **g** [3].

На рис. 4–6 представлены ГОПР первого g_1, второго g_2, третьего ($g_{30н}$, $g_{30в}$; $g_{31н}$, $g_{31в}$), четвертого ($g_{40н}$, $g_{40в}$; $g_{41н}$, $g_{41в}$) и пятого ($g_{5н}$, $g_{5в}$) битов СК КАМ-32 при модифицированном МК Грея. Очевидно, что границы, разделяющие области принятия решения по первому и второму битам, лежат на осях, соответствующих синфазной $\vec{u}_{исх}^{\,I}$ и квадратурной $\vec{u}_{исх}^{\,Q}$ составляющим (см. рис.4–6). Границы, разделяющие области принятия решения по третьему, четвертому и пятому битам, как видно из рис. 4–6, представляют собой линейно-ломанные линии.

Групповой сигнал СК КАМ-32 представим в виде:

$$s_\Sigma(r,t) = m_Q(r)\sqrt{E}\cdot s_Q(t) + m_I(r)\sqrt{E}\cdot s_I(t), \quad (13)$$

где $r \triangleq (r_1, r_2, r_3, r_4)$ – групповой символ; $s_Q(t)$ и $s_I(t)$ — исходные, не манипулированные синфазная и квадратурная составляющие группового сигнала СК КАМ-32; E — энергия синфазной (или квадратурной) составляющей группового сигнала при передаче $r = (r_1 = 0, r_2 = 0, r_3 = 0, r_4 = 0, r_5 = 0)$; $m_Q(t)$ и $m_I(t)$ — манипуляционные коэффициенты соответственно синфазной и квадратурной составляющих;

На рис. 4–6 использованы обозначения:

$g_{30н}$, $g_{30в}$, $g_{31н}$ и $g_{31в}$ – нижние и верхние границы областей принятия решения при детектировании третьего бита;

$g_{40н}$, $g_{40в}$, $g_{41н}$ и $g_{41в}$ — нижние и верхние границы областей принятия решения при детектировании четвертого бита;

$g_{5н}$ и $g_{5в}$ — соответственно нижняя и верхняя границы областей принятия решения при детектировании пятого бита.

Вследствие симметричного расположения сигнальных точек СК КАМ-32 при модифицированном МК Грея вероятность ошибки первого бита равна вероятности ошибки второго бита. Тогда справедлива запись:

$$P_к[ош] = \frac{1}{5}\left(2P_{к2}[ош] + P_{к3}[ош] + P_{к4}[ош] + P_{к5}[ош]\right), \quad (14)$$

где $P_{к2}[ош]$, $P_{к3}[ош]$, $P_{к4}[ош]$ и $P_{к5}[ош]$ — вероятности ошибок соответственно второго, третьего, четвертого и пятого битов в СК КАМ-32.

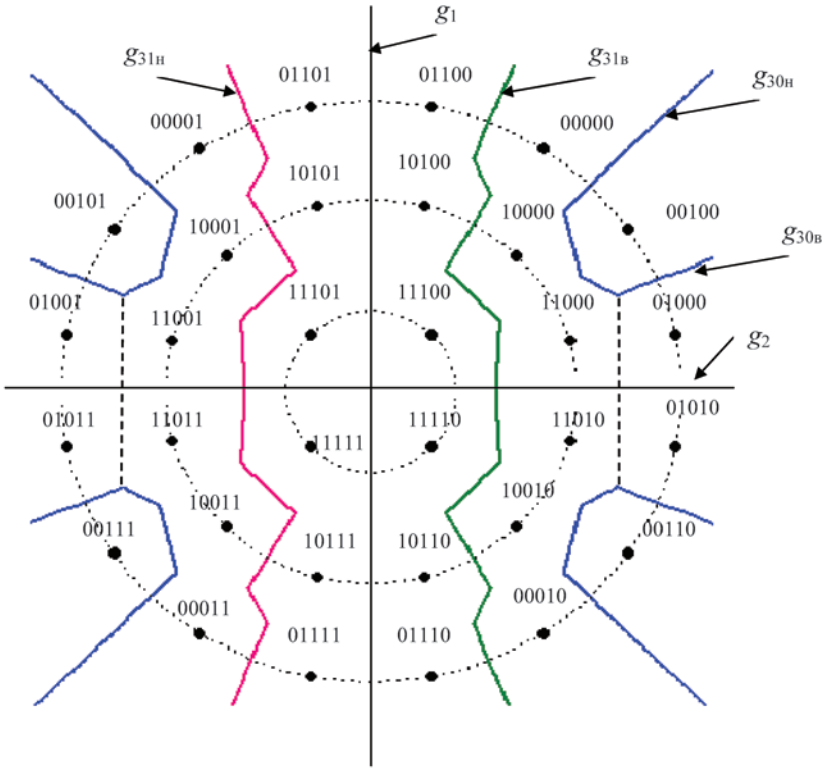

Рис. 4. Границы областей принятия решения «круглой» СК КАМ-32 с модифицированным МК Грея при детектировании третьего бита

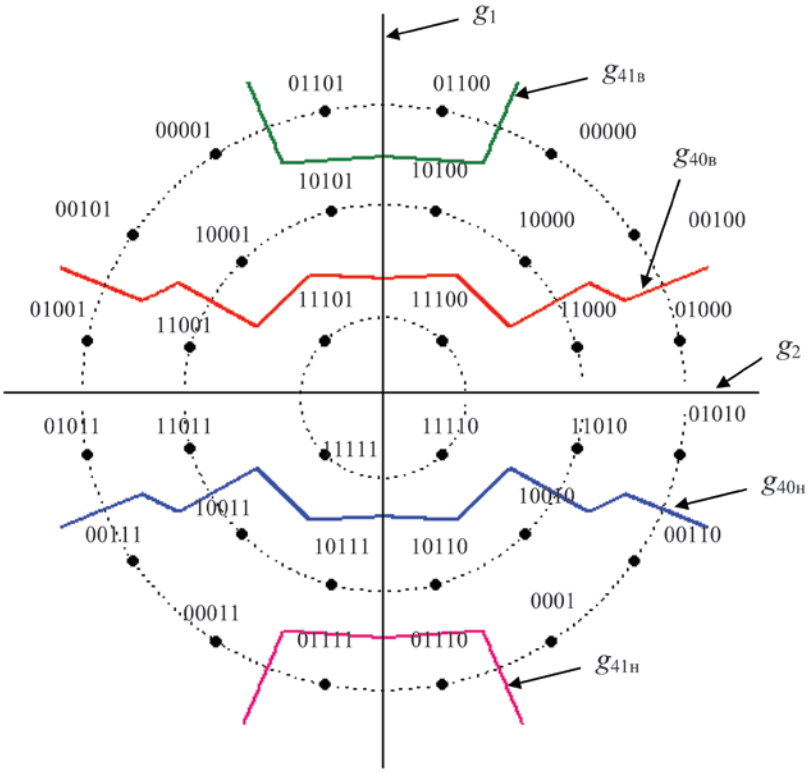

Рис. 5. Границы областей принятия решения «круглой» СК КАМ-32 с модифицированным МК Грея при детектировании четвертого бита

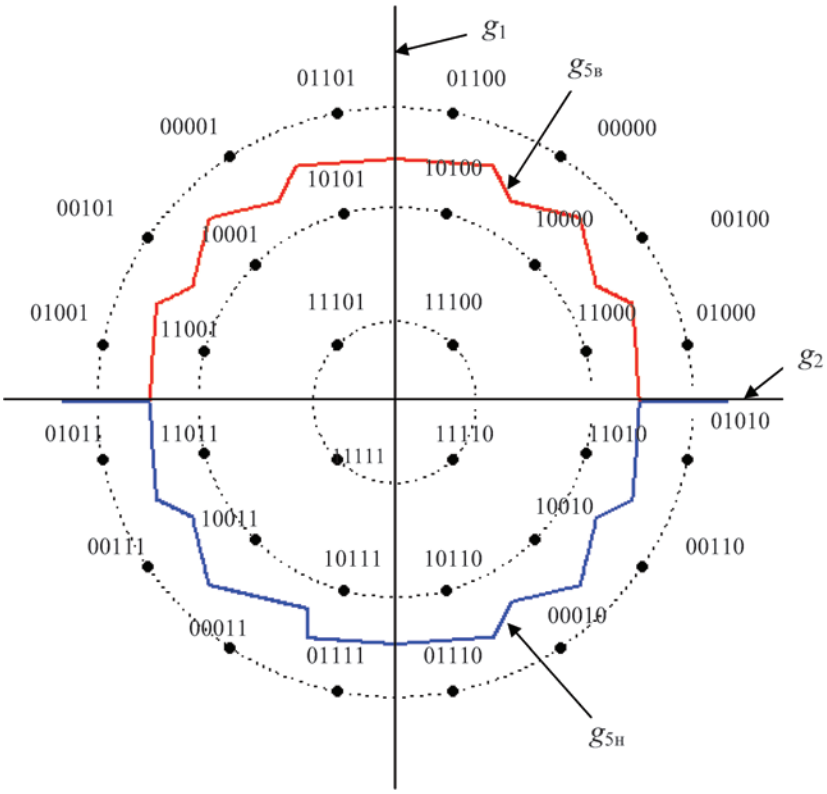

Рис. 6. Границы областей принятия решения «круглой» СК КАМ-32 с модифицированным МК Грея при детектировании пятого бита

Учитывая симметрию СК КАМ-32 в модифицированном МК Грея, при расчете вероятности ошибки достаточно ограничится четырьмя точками, лежащими в одном из квадрантов двумерной системы координат. Без ограничения общности при расчете вероятности ошибки второго бита выберем точки, соответствующие информационным параметрам

$$r = (r_1 = 0, r_2 = 0, r_3, r_4, r_5),$$

где

$$r_3 = 0,1;\ r_4 = 0,1;\ r_5 = 0,1 \qquad (15а)$$

А при расчете вероятности ошибки третьего бита выберем точки, соответствующие информационным параметрам

$$r = (r_1 = 0, r_2 = 0, r_3 = 0, r_4, r_5),$$

где

$$r_4 = 0,1;\ r_5 = 0,1. \qquad (15б)$$

Аналогично при расчете вероятности ошибки четвертого бита выберем точки, соответствующие информационным параметрам

$$r = (r_1 = 0, r_2 = 0, r_3, r_4 = 0, r_5),$$

где

$$r_3 = 0,1;\ r_5 = 0,1. \qquad (15в)$$

И при расчете вероятности ошибки пятого бита выберем точки, соответствующие информационным параметрам

$$r = (r_1 = 0, r_2 = 0, r_3, r_4, r_5 = 0),$$

где

$$r_3 = 0,1;\ r_4 = 0,1. \qquad (15г)$$

Учитывая (15а), в соответствии с (14), вероятность ошибки второго бита при модифицированном МК Грея определяется выражением (16).

$$P_{к\,2}[ош] = \frac{1}{8}\sum_{r_3=0}^{1}\sum_{r_4=0}^{1}\sum_{r_5=0}^{1} F\left(-m_Q(r_3, r_4, r_5)\sqrt{h_b^{\,2}}\right), \qquad (16)$$

где $m_Q(r_3, r_4, r_5)$ определяется выражением (9б), при этом $k_y = (f, g, d, e, 1, a, b, c)^T$; a, b, c, d, e, f и g определяются (1)–(7) соответственно; $h_b^{\,2} \triangleq \frac{E_м}{N_0}$ — отношение сигнал/шум, числено

равное отношению максимальной энергии СК КАМ-32 к односторонней спектральной плотности белого шума; $F(x)$ — определяется (10а).

Вероятность ошибки третьего бита при условии, что передавался $r_3 = 0$, исходя из особенностей расположения областей принятия решения, отличается от вероятности ошибки третьего бита при условии, что передавался $r_3 = 1$. Поэтому при равных либо неизвестных априорных вероятностях передачи третьего бита справедлива запись:

$$P_{\text{к}\,3}[ош] = \frac{1}{2}\left(P_{\text{к}\,3}[ош / r_3 = 0] + P_{\text{к}\,3}[ош / r_3 = 1]\right). \quad (17)$$

Учитывая (15б), условные вероятности ошибок третьего бита при $r_3 = 0$ и $r_3 = 1$ определяются соответственно выражениями (18) и (19).

$$P_{\text{к}\,3}[ош / r_3 = 0] =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_4=0}^{1} \sum_{r_5=0}^{1} \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(\begin{array}{l} F\left(g31_{\text{в}}(z + m_Q(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right) - \\ -F\left(g31_{\text{н}}(z + m_Q(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right) \end{array} \right) \mathrm{d}\,z + \\ +2 \cdot \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(Fc\left(g30_{\text{н}}(z + m_Q(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right)\right) \mathrm{d}\,z - \\ -\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(Fc\left(g30_{\text{в}}(z + m_Q(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(0,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right)\right) \mathrm{d}\,z \end{array} \right] \end{array} \right], \quad (18)$$

$$P_{\text{к}\,3}[ош / r_3 = 1] =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_4=0}^{1} \sum_{r_5=0}^{1} \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(\begin{array}{l} F\left(g30_{\text{н}}(z + m_Q(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right) - \\ -F\left(g31_{\text{в}}(z + m_Q(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right) \end{array} \right) \mathrm{d}\,z + \\ +\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(Fc\left(g30_{\text{в}}(z + m_Q(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_I(1,r_4,r_5)\sqrt{h_b{}^2}\right)\right) \mathrm{d}\,z \right] \end{array} \right], \quad (19)$$

где $m_I(r_3,r_4,r_5)$ определяется выражением (9а), при этом $k_x = (g,f,e,d,1,b,a,c)^T$; $m_Q(r_3,r_4,r_5)$ определяется выражением (9б), при этом $k_y = (f,g,d,e,1,a,b,c)^T$; a, b,c, d, e, f и g определяются (1)–(7) соответственно; $g30_{\text{н}}(z)$, $g31_{\text{н}}(z)$ и $g30_{\text{в}}(z)$, $g31_{\text{в}}(z)$ — соответственно нижние и верхние ГОПР СК КАМ-32 для третьего бита в модифицированном МК Грея; $h_b{}^2 \triangleq \frac{E_{\text{м}}}{N_0}$ — отношение сигнал/шум, числено равное отношению максимальной энергии СК КАМ-32 к односторонней спектральной плотности белого шума; $F(x)$ — определяется (10а), $Fc(x)$ — определяется (10б).

Описанный выше способ определения вероятности ошибки третьего бита справедлив для определения вероятностей ошибок четвертого и пятого битов. Формулы для их определения представлены ниже:

$$P_{\text{к}\,4}[ош] = \\ = \frac{1}{2}\left(P_{\text{к}\,4}[ош / r_4 = 0] + P_{\text{к}\,4}[ош / r_4 = 1]\right), \quad (20)$$

$$P_{\text{К}\,4}[ош / r_4 = 0] =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_3=0}^{1} \sum_{r_5=0}^{1} \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(\begin{array}{l} F\left(g41_{\text{в}}(z + m_I(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2} \right) - \\ -F\left(g41_{\text{н}}(z + m_I(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2} \right) \end{array} \right) \mathrm{d}\, z + \\ +2 \cdot \left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(F\left(g40_{\text{н}}(z + m_I(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,0,r_5)\sqrt{h_b{}^2} \right) \right) \mathrm{d}\, z \right] \end{array} \right], \quad (21)$$

$$P_{\text{К}\,4}[ош / r_4 = 1] =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_3=0}^{1} \sum_{r_5=0}^{1} \left[\begin{array}{l} \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(Fc\left(g41_{\text{в}}(z + m_I(r_3,1,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,1,r_5)\sqrt{h_b{}^2} \right) \right) \mathrm{d}\, z - \\ -\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(Fc\left(g40_{\text{в}}(z + m_I(r_3,1,r_5)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,1,r_5)\sqrt{h_b{}^2} \right) \right) \mathrm{d}\, z \right] \end{array} \right], \quad (22)$$

$$P_{\text{К}\,5}[ош] = \frac{1}{2}\left(P_{\text{К}\,5}[ош / r_5 = 0] + P_{\text{К}\,5}[ош / r_5 = 1] \right), \quad (23)$$

$$P_{\text{К}\,5}[ош / r_5 = 0] =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_3=0}^{1} \sum_{r_4=0}^{1} \left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(\begin{array}{l} F\left(g5_{\text{в}}(z + m_I(r_3,r_4,0)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,r_4,0)\sqrt{h_b{}^2} \right) - \\ -F\left(g5_{\text{н}}(z + m_I(r_3,r_4,0)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,r_4,0)\sqrt{h_b{}^2} \right) \end{array} \right) \mathrm{d}\, z \right], \quad (24)$$

$$P_{\text{К}\,5}[ош / r_5 = 1] =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{r_3=0}^{1} \sum_{r_4=0}^{1} \left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \left(F\left(g5_{\text{н}}(z + m_I(r_3,r_4,1)\sqrt{h_b{}^2}) - m_Q(r_3,r_4,1)\sqrt{h_b{}^2} \right) \right) \mathrm{d}\, z \right], \quad (25)$$

На рис. 7 представлены графики вероятности ошибки на бит «круглой» КАМ-32 при модифицированном МК Грея в зависимости от максимального отношения сигнал/шум $h_б^2$. Пунктирной и штрих-пунктирной линиями показаны графики зависимости соответственно второго (первого), третьего, четвертого и пятого битов.

МК Грея в зависимости от максимального отношения сигнал/шум $h_б^2$

Сравнительный анализ потенциальной помехоустойчивости «круглой» КАМ-32

На рис. 8 представлены графики вероятности ошибки на бит СК традиционной («квадратной») и «круглой» КАМ-32 при модифицированном МК Грея в зависимости от максимального отношения сигнал/шум $h_б^2$.

Из графиков на рис. 8 видно, что традиционная СК КАМ-32 в модифицированном МК Грея обладает меньшей потенциальной помехоустойчивостью по сравнению с «круглой» КАМ-32 при любом отношении сигнал/шум $h_б^2$.

В таблице 1 использованы следующие обозначения: $P_{\text{тр}}$[ош] — требуемая вероятность ошибки; Δh^2 – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}$[ош] при сравнении СК традиционной («квадратной») и «круглой» КАМ-32 в модифицированном МК Грея.

На рис. 9 представлен график зависимости запаса мощности Δh от требуемой вероятности ошибки на бит $P_{\text{тр}}$[ош] в соответствии с таблицей 1.

При анализе энергетических характеристик традиционной («квадратной») и «круглой» КАМ-32 видно, что применение СК «круглой» КАМ-32 позволяет снизить требования к отношению

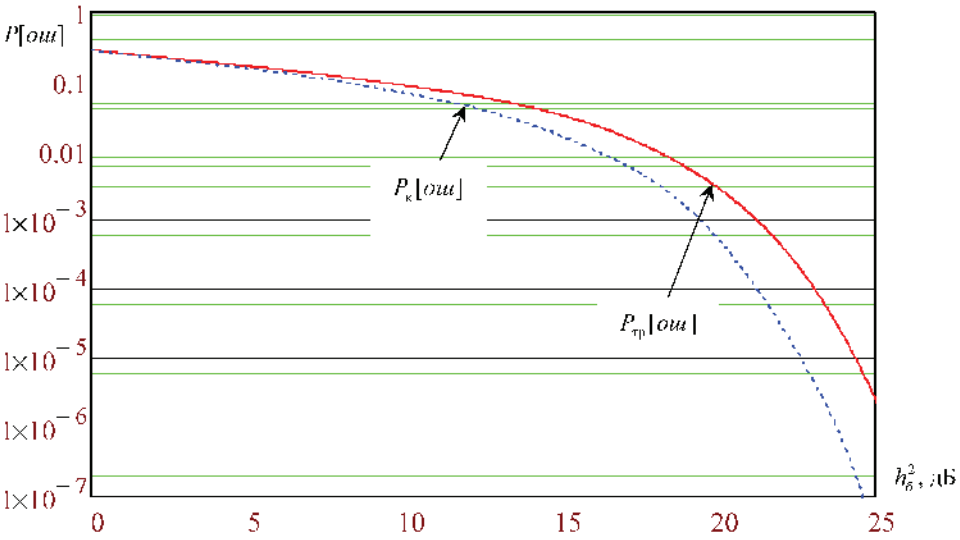

Рис. 8. Графики зависимости вероятности ошибки на бит СК традиционной («квадратной») и «круглой» КАМ-32 при модифицированном МК Грея от максимального отношения сигнал/шум

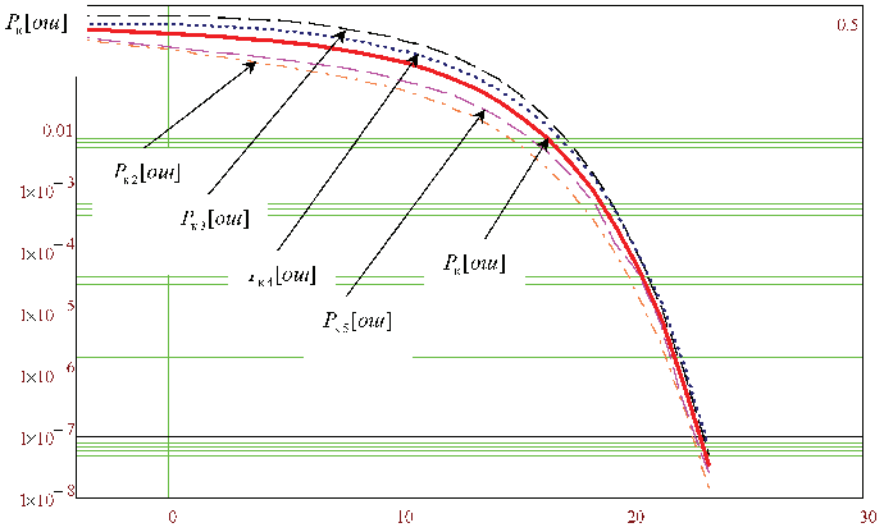

Рис. 7. Графики вероятности ошибки на бит «круглой» КАМ-32 при модифицированном

Таблица 1

Сравнительный анализ запаса мощности при использовании СК традиционной («квадратной») и «круглой» КАМ-32 при модифицированном МК Грея

	$P_{тр}$[ош]									
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
Δh^2(дБ)	0.59	0.47	0.384	0.34	0.31	0.295	0.287	0.285	0.283	0.28

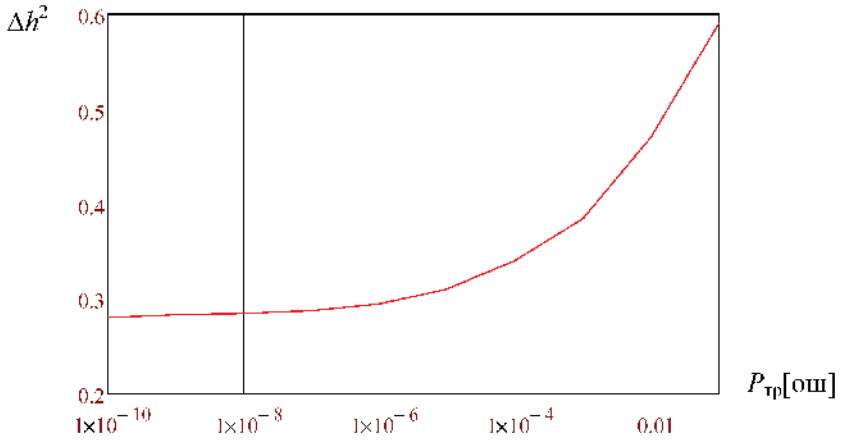

Рис. 9. График зависимости запаса мощности от требуемой вероятности ошибки на бит

сигнал/шум на входе приемного устройства не менее, чем на 0,2 дБ при требуемых значениях вероятности ошибки на бит 10^{-10} и больше.

Таким образом, оптимизированная тридцати двух позиционная сигнальная конструкция на основе квадратурной амплитудной манипуляции позволяет повысить помехоустойчивость относительно традиционной для всех значений отношения сигнал/шум $h_б^2$, при этом выигрыш составляет до 0,6 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахметзянова Н. Н., Бобровский В. И.** и др. Способ и устройство формирования сигналов квадратурной амплитудной манипуляции. Патент РФ №2486681 от 27.06.2013г.

2. **Бобровский В. И., Бураченко Д. Л. Тимошин И. В.** Потенциальная помехоустойчивость оптимального приема СК КАМ-16, синтезированных по критерию минимума вероятности ошибки на бит при двух манипуляционных кодах — натуральном и Грея. Системы связи. Анализ. Синтез. Управление. Выпуск 7 / Под ред. В.П. Постюшкова. — СПб.: Тема, 2001. — 128 с., С.119–128.

3. **Бобровский В. И.** Многопользовательское детектирование / Под ред. Д. Л. Бураченко. — Ульяновск.: «Вектор-С», 2007. 348 с.

В. И. Бобровский
доктор технических наук, доцент, ПАО «Интелтех»

Е. А. Богер
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

СОКРАЩЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРИЕМА НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

АННОТАЦИЯ. В статье показана возможность снижения вычислительной сложности алгоритмов приема и обработки радиосигналов в многоканальных системах радиосвязи за счет использования быстрого преобразования Фурье (БПФ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Вычислительная сложность, многоканальный цифровой приемник, быстрое преобразование Фурье, частотная манипуляция, фазовая манипуляция.

Введение

Интерес к созданию систем радиосвязи на основе сверхширокополосных сигналов (СШПС) обусловлен рядом преимуществ такого вида сигналов по сравнению с широко используемыми узкополосными сигналами [1]. СШПС обладают сравнительно лучшей помехозащищенностью к мешающим сигналам с относительно малой полосой частот, а также имеют улучшенные показатели разведзащищенности в виду того, что передаваемый сигнал передается под шумами и «размыт» по значительной полосе частот.

Наибольшее распространение получил метод формирования СШПС на основе ультракоротких импульсов длительностью порядка единиц наносекунд, применяемый в сантиметровом диапазоне волн и выше. Применение данного метода в диапазоне ультракоротких волн (УКВ) и ниже неэффективно из-за сложности в реализации сверхширополосных (СШП) передающих и приемных антенн. Поэтому в декаметровом (ДКМ) диапазоне радиоволн СШП система передачи может быть реализована на основе сверх многоканальной передачи, с числом каналов до 100 тысяч и более [2, 3]. Рост вычислительной сложности, неизбежно возникающий при увеличении числа каналов, предъявляет высокие требования к вычислительной мощности элементной базы многоканального устройства. Как следствие, это приводит к увеличению их масса-габаритных показателей и относительно высокой себестоимости. В связи с этим основной проблемой, возникающей при реализации СШП систем ДКМ диапазона, является снижение вычислительной сложности многоканального цифрового приемника. В работе показано, как данную проблему можно решить на основе применения быстрого преобразования Фурье (БПФ) с последующей модификацией алгоритмов многоканального детектирования.

Снижение вычислительной сложности приемных устройств многоканальных систем передачи информации

В работе рассмотрены два варианта построения многоканального приемного устройства и выполнен сравнительный анализ их вычислительной сложности. Первый вариант является традиционным и основан на применении многоканального интегратора. Структурная схема традиционного приемного устройства представлена на рис. 1.

Второй вариант построения многоканального приемного устройства, представленный на рис. 2, основан на использовании БПФ группового сигнала на выходе АЦП без предварительного понижения частоты и децимации.

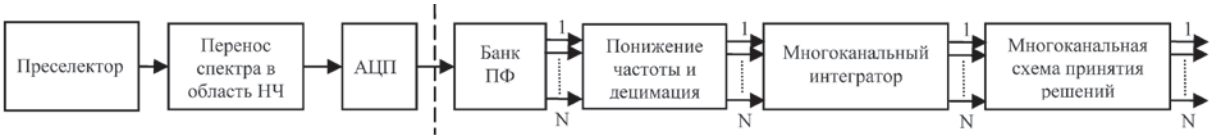

Рис. 1. Структурная схема приемного устройства

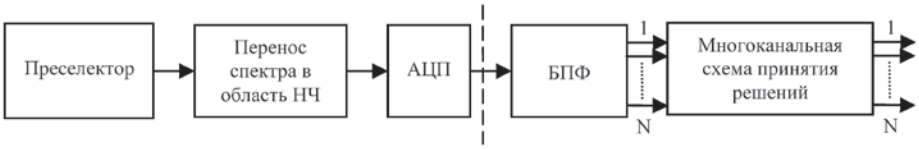

Рис. 2. Структурная схема приемного устройства на основе БПФ

В настоящий момент применяемой элементной базой, реализующей БПФ, являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и микропроцессоры.

Структурные схемы традиционного приемного устройства и устройства, реализованного на основе БПФ, имеют идентичное построение на первых этапах обработки сигнала: до АЦП включительно.

Отличием схемы на рис. 1 от схемы на рис. 2 является то, что в первом случае после преобразования в АЦП сигнал поступает в банк фильтров, состоящий из множества полосовых фильтров, каждый из которых выделяет из общего спектра определенную несущую. Далее осуществляется понижение частоты сигнала и децимация, после чего сигнал поступает на интегратор. Во втором случае, при использовании схемы приемного устройства, представленной на рис. 2, цифровой сигнал после АЦП поступает в блок, выполняющий БПФ. Многоканальные схемы принятия решений о передаваемых двоичных символах в обеих схемах с точки зрения вычислительной сложности идентичны. Поэтому для сравнения вычислительных затрат данных схем достаточно сравнить суммарное число операций (сложений и умножений), выполняемых банком фильтров, блоком понижение частоты и децимации, а также интегратором в схеме, представленной на рис. 1, с числом операций, выполняемых в блоке, вычисляющим БПФ, в схеме на рис. 2.

При рассмотрении данной задачи накладываются следующие ограничения:

1. Технические скорости передачи, используемые в разных каналах, являются одинаковыми.

2. Реализуется некогерентный прием.

3. Передающие генераторы имеют общую тактовую синхронизацию.

4. Вычислительная сложность схем тактовой синхронизации в схемах на рис. 1 и на рис. 2 считаются одинаковыми.

5. В одном информационном символе содержится целое число периодов высокочастотного заполнения.

Рассмотрим традиционную схему приемного устройства (см. рис.1).

Банк ПФ представляет собой N полосовых фильтров, где N — число принимаемых каналов. В общем случае дискретный фильтр суммирует (с весовыми коэффициентами) некоторое количество входных отсчетов и некоторое количество предыдущих выходных отсчетов:

$$\begin{aligned} y(k) = b_0 x(k) + b_1 x(k-1) + \ldots + b_m x(k-m) - \\ -a_1 y(k-1) - a_2 (k-2) - \ldots - a_n y(k-n), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(k)$ — отсчеты входного сигнала, $y(k)$ — отсчеты выходного сигнала, a_j и b_i — вещественные коэффициенты. Количество используемых входных $m_{\text{пф}}$ и выходных $n_{\text{пф}}$ отсчетов может не совпадать. В частном случае $m_{\text{пф}} = n_{\text{пф}} = m_{\text{пф}}$.

Вычислительная сложность приемного устройства определяется количеством операций сложения/умножения, необходимых для приемлемой обработки сигнала. Порядок фильтра зависит от затухания в полосе задерживания и крутизны АЧХ в полосе среза. В частном случае при заданном числе входных и выходных отсчетов полосового фильтра $m_{\text{пф}} = n_{\text{пф}} = m_{\text{пф}}$ необходимо $2m_{\text{пф}}$ операций сложения и $2m_{пф} + 2$ операций умножения, в сумме $4m_{\text{пф}} + 2$ операций. При заданном числе каналов N число операций сложения/умножения в банке фильтров составит $\left(4m_{\text{пф}} + 2\right)N$ за один отсчет времени.

Для того чтобы вычислить количество операций за длительность одного информационного символа, необходимо полученное выражение умножить на число отсчетов, приходящихся на один символ. Таким образом, число операций сложения/умножения, приходящихся на один информационный символ, в банке ПФ вычисляется следующим образом:

$$N_{\text{пф}} = \left(4m_{\text{пф}} + 2\right) N \frac{f_s}{v_c}, \qquad (2)$$

где f_s — частота дискретизации, v_c — техническая скорость передачи.

Принцип работы интегратора может быть описан следующей формулой: $\int_0^T y(t) \cdot x(t)\,dt$, где $y(t) = x(t) + n(t)$, $n(t)$ — шумовая помеха, $x(t)$ — передаваемый сигнал. При цифровой обработке сигналов операция интегрирования заменяется операцией суммирования. Например, при заданной частоте дискретизации f_s = 5 кГц и технической скорости передачи v_c = 100 Бод за один такт передачи информации, равный 0,01 с на вход интегратора поступает 50 дискретных отсчетов. Таким образом, для обработки одного информационного символа требуется 49 операций сложений и 50 операций умножения. Число операций сложения/умножения, приходящихся на обработку одного символа в многоканальном интеграторе может быть вычислено по формуле:

$$N_{\text{ми}} = (2N - 1) f_s / v_c. \qquad (3)$$

В блоке понижения частоты и децимации осуществляется перемножение входного сигнала с опорными сигналами вида $s(t) = a \cdot \cos(\omega_i t)$, где ω_i — частота несущего колебания. Для обработки одного информационного символа потребуется Nf_s / v_c операций умножения. После перемножения сигнал каждого из N каналов поступает на соответствующий фильтр нижних частот. Как было рассчитано ранее, число операций сложения/умножения в банке фильтров нижних частот составит $\left(4m_{\text{нф}} + 2\right) N \cdot \frac{f_s}{v_c}$ за один информационный символ. Операция децимации реализуется посредством счетчика, который подсчитывает количество входных дискретных отсчетов, приходящихся на один символ. После регистрации последнего отсчета выполняется операция < *if* >, которая «пропускает» только один отсчет из всех отсчетов в символе. Таким образом, на децимацию требуется $\frac{f_s}{v_c} N$ операций сложения и $\frac{f_s}{v_c} N$ операций < *if* >. Общее количество вычислительных операций, приходящихся на один информационный символ в блоке понижения частоты и децимации, вычисляется по формуле:

$$N_{\text{пчд}} = \frac{f_s N}{v_c} (4m_{\text{нф}} + 5). \qquad (4)$$

Таким образом, число операций, которые выполняются после АЦП в приемном тракте, описывается следующим выражением:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{пф}} + N_{\text{ми}} + N_{\text{пчд}} + N_{\text{пр}} =$$

$$= \frac{f_s N}{v_c} \left[4\left(m_{\text{пф}} + m_{\text{нф}} + 2\right)\right] + 2N. \qquad (5а)$$

В случае, когда порядок m в банке ПФ и блоке понижения частоты задан одинаково, выражение (5а) примет вид:

$$N_{\Sigma} = \frac{f_s N}{v_c} \left[8\left(m + 1\right)\right] + 2N. \qquad (5б)$$

Вычислительная сложность приемного устройства на основе БПФ зависит от длины анализируемого вектора. Наибольшая степень ускорения вычислений БПФ может быть достигнута при $L = 2^k$ (L — длина анализируемого вектора входного сигнала), число требуемых при

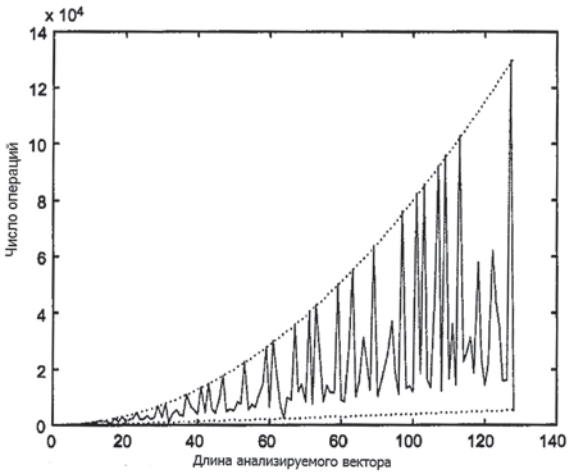

Рис. 3. Зависимость числа арифметических операций от размерности БПФ

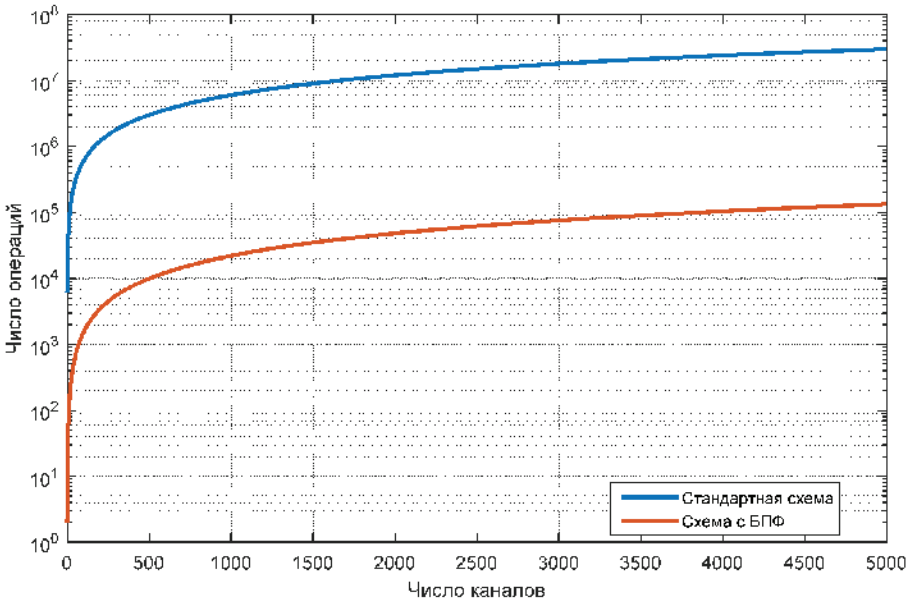

Рис. 4. Зависимость вычислительной сложности стандартной схемы приемного устройства и схемы, основанной на БПФ от числа каналов

этом пар операций сложение/умножение можно оценить как $L\log_2 L$. Зависимость числа арифметических операций от размерности БПФ приведена на рис. 3 [4]. Кроме собственно зависимости числа операций от размерности БПФ на графике также показаны верхняя и нижняя границы. Верхняя линия — это число операций, соответствующее прямой формуле ДПФ и равное L^2. Нижняя линия — число операций, соответствующее максимальному ускорению вычислений и равное $L\log_2 L$. Видно, что график числа операций при БПФ касается верхней границы, если L — простое число, и касается нижней границы, если L — степень двойки.

Таким образом, при выборе длины анализируемого вектора равной степени двойки достигается наименьшая вычислительная сложность [4].

На рис. 4 приведена зависимость вычислительной сложности от числа каналов традиционной (стандартной) схемы приемного устройства и схемы, основанной на БПФ. Для заданных параметров $m = 15$, $f_s = 5$ кГц, $v_s = 100$ Бод и длине анализируемого в БПФ вектора, равной 512:

Заключение

Из приведенной на рис. 4 зависимости суммарного числа операций от числа каналов видно, что использование схемы на основе БПФ не зависимо от числа каналов позволяет сократить вычислительную сложность цифровой обработки более, чем на два порядка, что позволит снизить требования к вычислительной мощности элементной базы многоканального устройства, а следовательно, уменьшит ее себестоимость и масса-габаритные показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брызгалов А. П.** Сверхширокополосный сигнал большой длительности. Теория и практика применения в радиосвязи. // — Специальная техника №3, 2001.

2. **Николашин Ю. Л., Кулешов И. А., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А.** SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот. // — Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, № 1–2015. — С. 20–30.

3. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А.** Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, №1, 2014. — С. 30–37.

4. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.

П. А. Будко
доктор технических наук, профессор, ПАО «Интелтех»

А. И. Литвинов
кандидат технических наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В. К. Гойденко
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Е. К. Кислицина
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

АННОТАЦИЯ. В статье дана классификация методов неразрушающего контроля и более подробно такой его класс как тепловой контроль. Обосновано внедрение тепловых методов контроля в интересах диагностирования технического состояния военной техники связи и других сложных технологических объектов на различных этапах их жизненного цикла. Рассмотрены требования, предъявляемые к методам и средствам теплового контроля. Приведена укрупненная схема метода теплового диагностирования радиотехнических устройств. Сформулированы основные направления развития систем бесконтактного мониторинга технического состояния военной техники связи и других сложных технических объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неразрушающий контроль, тепловизор, тепловое диагностирование, теплограмма, дефект.

Введение

Боевая готовность и боевая способность войск напрямую связана с вопросами технического состояния военной техники связи (ВТС). В настоящее время определение технического состояния ВТС базируется на основе получения достоверной диагностической информации о состоянии радиоэлектронных изделий посредством разрушающих и неразрушающих методов контроля [1, 2]. Классификация видов неразрушающего контроля (НК) основана на физических процессах взаимодействия поля или вещества с объектом контроля. В основе решения диагностических задач лежит, прежде всего, оптимальный выбор физического процесса, дающего наиболее объективную информацию об объекте диагностирования.

В зависимости от общности физических принципов, на которых они основаны, различают девять видов НК: радиоволновой; акустический; магнитный; электрический; оптический; вихретоковый; радиационный; проникающими веществами; тепловой [1, 3].

Каждый из перечисленных видов НК делится на классы. Остановимся более подробнее на тепловом методе НК (ТНК).

По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом различают: тепловой контактный метод, конвективный метод, метод собственного излучения.

По первичному информативному параметру методы ТНК делят: на термометрический, теплометрический.

По способу получения первичной информации методы ТНК бывают: пирометрическими, жидких кристаллов, термокрасок, термобумаг, термолюминофоров, термозависимых параметров, оптический, интерференционный, калориметрический.

Цель статьи: обоснование внедрения тепловых методов неразрушающего контроля в интересах диагностирования технического состояния

военной техники связи и других сложных технических объектов на различных этапах их жизненного цикла.

Роль теплового контроля в диагностике технического состояния ВТС

Методы диагностирования, которые используют в качестве «параметра контроля» температуру, оказываются довольно эффективными, их кратко называют методами термографии. Это связано с тем, что 70–95 % всех форм энергии в радиотехнических устройствах (РТУ), в конечном счете, превращается в тепловую, что свидетельствует о целесообразности выбора в качестве параметра, характеризующего ее техническое состояние, температуры. Любое отклонение теплофизических и геометрических параметров материалов конструкции от своих номинальных значений, а также изменение электрического режима работы РТУ, обусловленного отклонением параметра какого-либо радиоэлемента от номинала, приводит к изменению температурного поля (или теплового поля) конструкции и являются свидетельством потенциальной ненадежности аппаратуры и ее элементов. Кроме того, измененное тепловое поле может сигнализировать о дефектах, поиск которых обычными способами (например, визуально или при помощи специального электрического стенда) может быть затруднен по ряду причин или неэффективен [4].

Например, при анализе теплового поля узла или блока РТУ по определенным температурным аномалиям может быть выявлено неправильное подключение элемента в схеме, некачественный монтаж, неудачное размещение элементов на плате. В случае многослойной печатной платы по ее тепловому полю можно выявить проблемы утоньшения и коррозионного износа проводников, некачественную металлизацию, отслоение дорожек.

В области микроэлектроники анализ тепловых полей позволяет выявлять дефекты p-n-переходов (поверхностная деградация, электромиграция, межметаллические соединения, «шнурование» тока, мезоплазма), неравномерность плотности тока, газовые пузыри между кристаллом и основанием, дефекты теплоотвода и диффузионной сварки, повреждения кристалла, обрыв проводов, короткие замыкания и другие дефекты. Посредством анализа тепловых полей интегральных схем можно контролировать качество разварки выводов на контактные площадки печатных плат. Качество высокотемпературных пленочных покрытий (отслоения от подложки, неравномерность толщины) также можно проанализировать по конфигурации их тепловых полей.

Кроме того, важную роль играет тепловой контроль на стадии компоновки устройства: визуализация теплового поля позволяет выявить конструктивные проблемы, оценить работу систем охлаждения и сделать выводы о приемлемости тепловых полей в разрабатываемом устройстве.

Бесконтактный тепловой метод контроля является эффективным средством диагностики электронной техники. Он успешно применяется для обнаружения проблем в конструкции, а также для выявления дефектов электронных ячеек и элементной базы радиоэлектронной аппаратуры [4].

Метод основан на исследовании, проводимом благодаря измерению температуры поверхности всей электрической установки или объекта, а также его определенных элементов. Чаще всего используется система бесконтактного ТНК с применением тепловизора.

Стандартные способы контроля электрических установок, в основном, требуют их временной дезактивации. Такое отключение, например, в случае работы с высоким напряжением, может спровоцировать повреждения устройства либо потерю его работоспособности. Благодаря тепловизонному обследованию появляются возможности для диагностики оборудования частями, то есть каждый элемент будет диагностироваться отдельно. Помимо этого, тепловизор позволяет оценить техническое состояние приспособления во время его эксплуатации. Большая часть дефектов может быть выявлена на ранних стадиях. Также тепловизор поможет сформировать допустимые эксплуатационные ограничения, благодаря чему возникновение дефектов можно будет предотвратить.

Требования, предъявляемые к методам и средствам ТНК

Задача обеспечения постоянной боевой готовности объектов военного назначения в условиях продолжающегося физического и морального износа ВТС обуславливает повышение роли НК как одного из основных факторов, определяющих техническое состояние указан-

ных объектов, возможность и сроки их эксплуатации [5]. В свою очередь развитие научно-технического прогресса и решение задач по улучшению качественных показателей технического состояния и поддержанию высокой эксплуатационной надежности сложных технических объектов военного назначения требуют совершенствование и более широкого использования НК в том числе и ТНК (см. рис. 1).

При этом к требованиям, предъявляемым к методам НК можно отнести:

возможность осуществления контроля на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) изготовления, при эксплуатации и при ремонте изделий;

высокая достоверность результатов контроля;

возможность контроля качества продукции по большинству заданных параметров;

согласование времени, затрачиваемого на контроль, со временем работы другого технологического оборудования;

возможность механизации и автоматизации контроля технологических процессов, а также управления ими с использованием сигналов, выдаваемых средствами контроля;

высокая надежность дефектоскопической аппаратуры и возможность использования ее в различных условиях;

простота методик контроля, техническая доступность средств контроля в условиях производства, ремонта и эксплуатации.

В ходе тепловизионного контроля (см. рис. 2) должна происходить:

объективная фиксация фактического состояния технологического оборудования в соответствии с его тепловым фоном (согласно данных теплового поля) в виде термограмм, и непосредственная локализация дефекта на фотоизображении (данные являются приложением к протоколам измерений и отчетной документации, см. рис. 3);

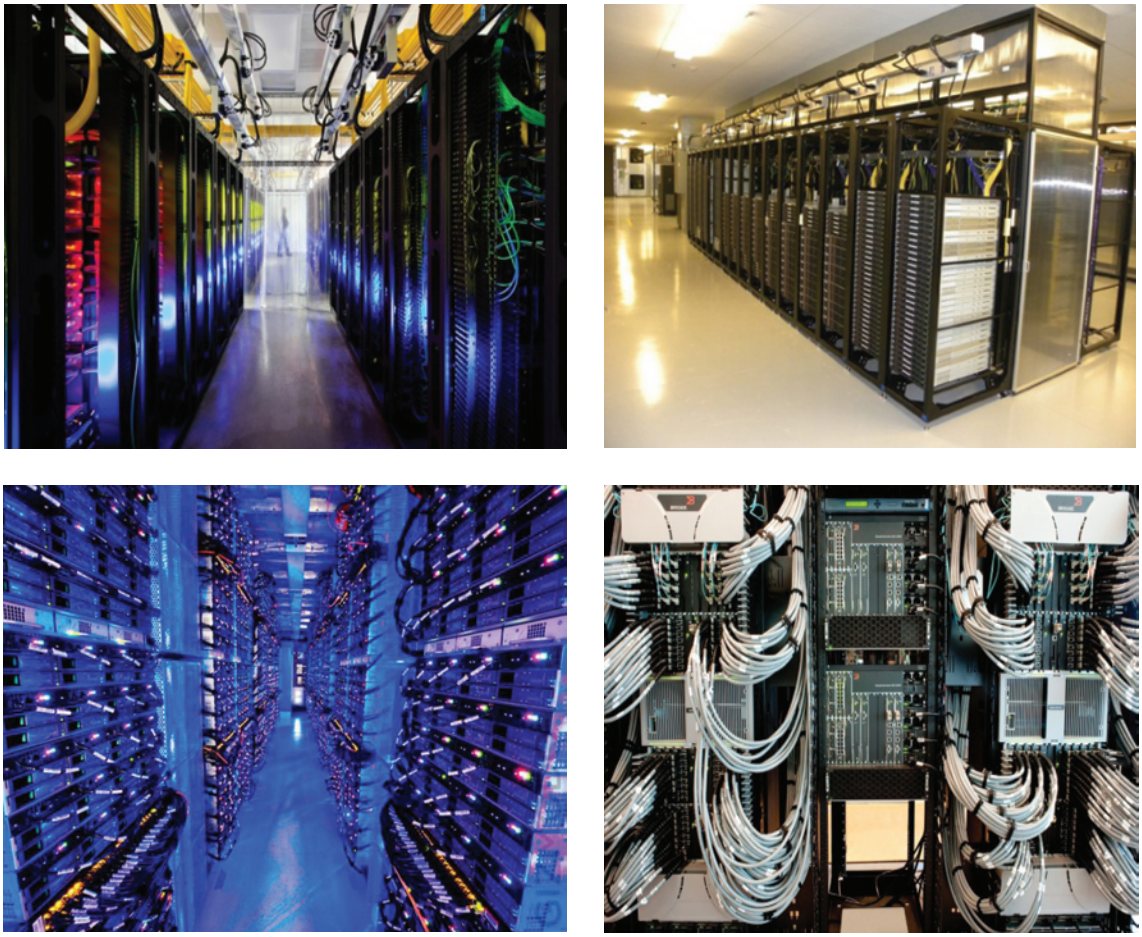

Рис. 1. Серверные и стойки коммутации необитаемых отсеков и аппаратных, подвергаемые тепловому контролю

Рис. 2. Аккумуляторный шкаф во время тестирования батареи

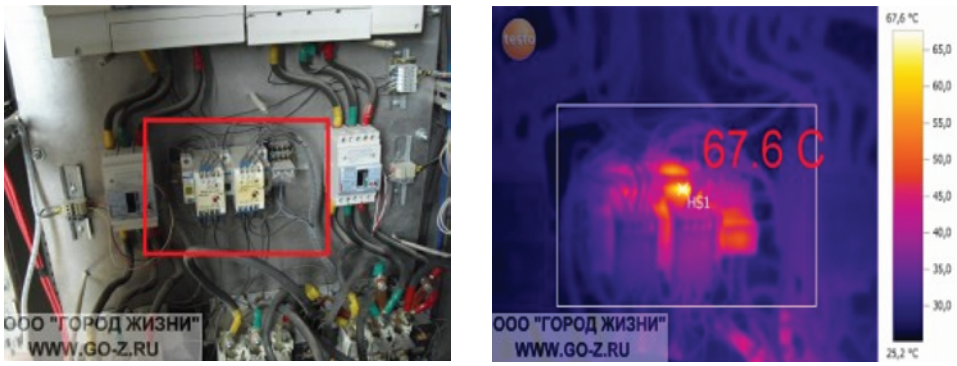

Рис. 3. Локализация места дефекта с помощью тепловизора

определение дефектов устройства, определение уровня их опасности, выявление прямых экспериментальных данных, необходимых для произведения расчетов эксплуатационных мощностей объекта. Создание проекта, направленного на устранение дефектов и формирование программы, направленной на предотвращение развития основной группы повреждений;

выявление неточных данных, связанных с выполнением процедур, предусмотренных регламентом, а также проверка выполнения испытаний электрической установки на специализированных объектах. Проверка выполняется при помощи тепловизора по образцам теплограммам технической документации;

формирование архива базы данных тепловизионного контроля с целью использования их в ходе ретроспективных мероприятий, выполнения аналитических и расчетных мероприятий, относительно технического состояния электрического оборудования, а также для формирования плана модернизации оборудования и эксплуатационных мер, направленных на продление эксплуатационного срока установок (технологически сложных объектов).

Основной задачей в ходе выполнения теплового контроля является автоматическое выявление проблемных узлов среди огромного количества анализируемых предметов, их определение, сортировка, а также классификация. Для предметов диагностического исследования определяют числовое значение порога (основой для формирования данного параметра стал метод гистограмм — поиска минимальных значений, которые соответствуют наиболее благоприятному значению порога), в соответствии с типом объекта, его технических параметров, и режимом эксплуатации. Другими словами происходит отделение качественных участков от аномальных зон. Далее необходимо выполнить сравнение ано-

мальных участков с эталонными зонами. Этот процесс происходит при помощи сравнения термограмм, в соответствии с контрольными участками либо точками. После этого выполняется анализ данных в соответствии с вышеизложенными параметрами дефектов, см. рис. 4.

Метод теплового диагностирования РТУ

Существуют современные решения, в сфере выполнения теплового контроля электрических приспособлений, которые можно применять не только для выполнения контроля оборудования, работающего в условиях высокого напряжения [5–7]. Такие решения актуальны для контроля устройств, которые гораздо чаще выходят из строя и становятся причиной аварийных ситуаций.

Данные технические решения необходимо шире использовать в военной технике связи, в необитаемых аппаратных (отсеках) узлов связи и в других сложных технологических объектах, где отсутствует контролирующий персонал (дежурная смена связи), а встроенные системы контроля не дают полного представления о техническом состоянии РТУ и сопутствующего технологического оборудования, систем жизнеобеспечения [8–10]. Предлагаемая методика позволяет выполнять контроль устройств, на основании ТНК, а также многолетнего опыта

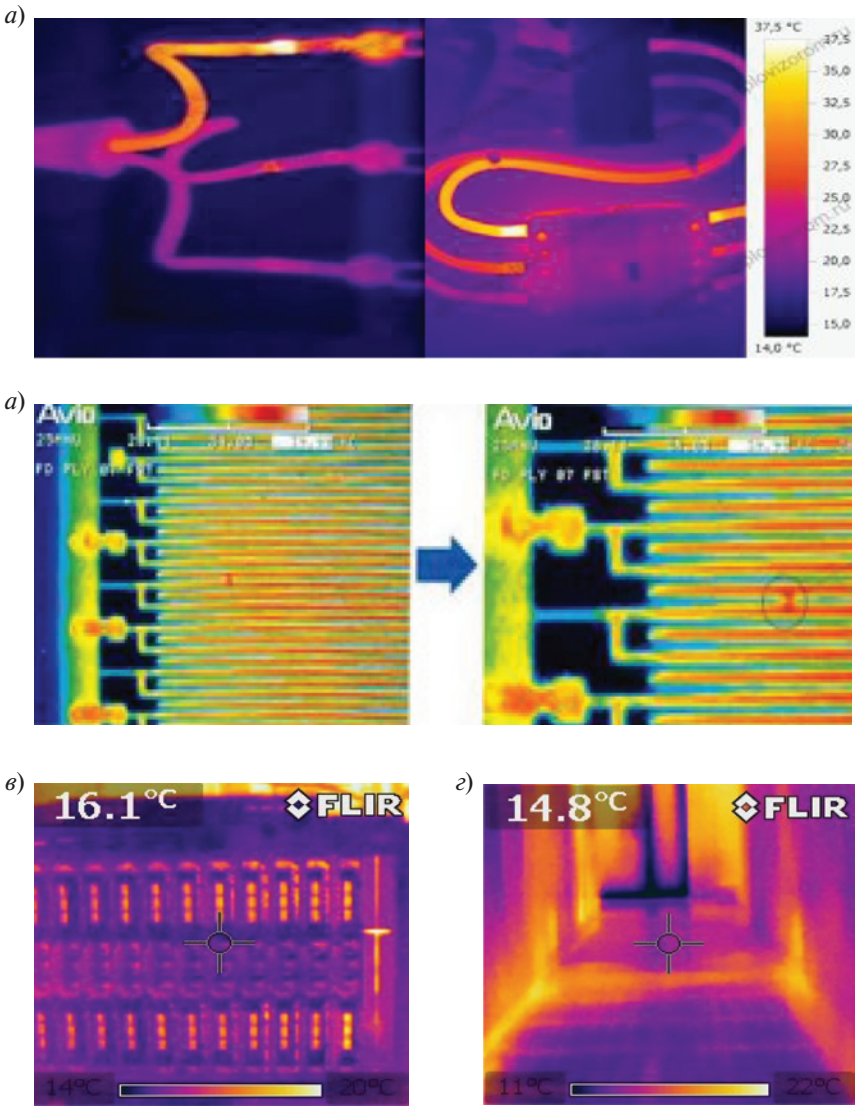

Рис. 4. Разновидности термограмм: сетевого кабеля (*а*), токоведущих дорожек электронных плат (*б*), блейда IBM с равномерно нагруженными лезвиями (*в*), помещения серверной (*г*)

тепловизионных исследований. В настоящее время существуют все возможности для выполнения более точных исследований, основанных на современных решениях. Благодаря этому можно не только выявить неисправности оборудования, но и определить степень брака, допущенного в ходе более ранних исследований, монтажных работ и эксплуатации оборудования.

Укрупненная схема метода теплового диагностирования приведена на рис. 5.

Следует отметить, что контроль тепловизором через крышку корпуса устройства провести невозможно. При удалении крышки (вскрытии помещения) могут нарушиться условия охлаждения и давления, что приведет к получению недостоверных данных. Поэтому бесконтактный метод теплового контроля целесообразно использовать на войсковых стационарных узлах связи, как правило, в необитаемых аппаратных и отсеках, в отделах АСУ, вычислительных центрах, где в качестве средств связи используются шкафы, коммутационные стойки и т. д. (рис. 1). Также, в связи с широким внедрением на полевых узлах связи ВС РФ автономных систем и агрегатов с применением кузовов-контейнеров, тепловизионный контроль может быть применен и в данном случае, к примеру, как показано на рис. 6, для полевого центра обработки данных (ЦОД) на вынесенной удаленной площадке, без присутствия оператора АСУ.

Заключение

Хочется отметить, что изложенный метод теплового контроля ВТС необходимо применять в комплексе с другими методами [5–12] для анализа электрических, механических и аэродинамических параметров радиотехнических устройств. Применение математических методов и средств вычислительной техники для анализа тепловых процессов (электрических, аэродинамических, механических), без учета взаимного влияния друг на друга не позволяет в полной мере реализовать высокую точность моделирования.

Таким образом, тепловые методы диагностирования, основанные на процессах теплообмена в объектах контроля, уже не являются уникаль-

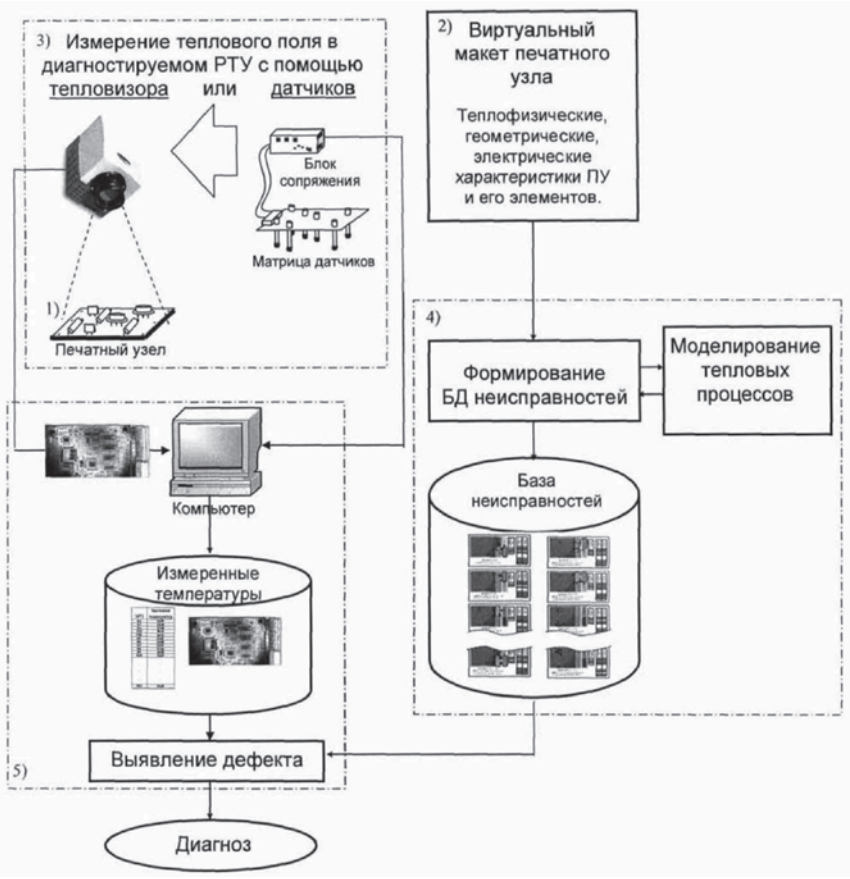

Рис. 5. Укрупненная схема метода теплового диагностирования РТУ

Рис. 6. Вариант полевого ЦОД с автономной системой электроснабжения

ными ни для промышленной практики, а также для научных исследований в области неразрушающих испытаний. Однако уровень использования таких методов в условиях войсковой эксплуатации техники связи и АСУ нельзя признать удовлетворительным. Объективные причины этого с методологической точки зрения заключаются в значительной зашумленности процессов теплового контроля и отсутствии стандартов на методики применения данных методов в конкретных изделиях, что требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В.** и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. 2-е изд. Испр. и доп., под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 2003. 656 с.

2. **Биргер И. А.** Техническая диагностика. М.: «Машиностроение», 1978. 240 с.

3. **Бакланов И. Г.** Тестирование и диагностика систем связи. М.: Эко-Трендз. 2001. 264 с.

4. **Литвинов А. И., Захаров А. А.** Анализ методов неразрушающего контроля технического состояния элементов электрооборудования систем электроснабжения стационарных узлов связи // Труды 66 НТК Санкт-Петербурского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, посвященной дню радио. Санкт-Петербург, 19–29 апреля 2011 г. СПб.:СПГЭТУ, 2011. С. 95–96.

5. **Литвинов А. И., Дорошенко Г. П.** Совершенствование процесса эксплуатации электрооборудования систем электроснабжения стационарных узлов связи // Труды всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации». Санкт-Петербург, 16–19 ноября 2011 г. СПб.: ВАС, 2011. С. 93–98.

6. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Методика бесконтактного контроля и идентификации технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов // Датчики и системы / Sensors&Systems. №8. 2014. С. 5–10.

7. **Будко П. А., Виноградeнко А. М., Юров А. С., Литвинов А. И.** Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // Датчики и системы / Sensors&Systems. №9. 2014. С. 8–13.

8. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Кинетический метод контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. №7. 2014. С. 42–47.

9. **Будко П. А., Виноградeнко А. М., Литвинов А. И.** Экспериментальные исследования по применению кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. №9. 2014. С. 53–58.

10. **Будко П. А., Будко Н. П., Литвинов А. И., Виноградeнко А. М.** Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. №8. 2014. С. 37–44.

11. **Будко П. А., Дорошенко Г. П., Ершов Г.А., Мухин А.В., Будко Н. П.** Реализация метода распределенного контроля и адаптивного управления многоуровневой системой // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. №3. С. 65–73.

12. Будко Н. П., Будко П. А., Виноградeнко А. М., Дорошенко Г. П. и др. Способ распределенного контроля и адаптивного управления многоуровневой системой и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2450335 от 11.07.2011.

П.А. Будко
доктор технических наук, профессор, ПАО «Интелтех»

А.И. Литвинов
кандидат технических наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

ТОКОКИНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ СВЯЗИ

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются основные подходы, связанные с разработкой тококинетического метода идентификации технического состояния электрооборудования систем электроснабжения военной техники связи. Указанны основные ограничения и недостатки действующих систем контроля и диагностики, связанные с тем, что по мере возрастания сложности контролируемых систем функции контроля также значительно усложняются. В результате возникает целый ряд специфических проблем, связанных с организацией обслуживания и обеспечением высокой эффективности эксплуатации электрооборудования. Сущность этих проблем определяется тем, что развитие электрооборудования в направлении усложнения схемного построения и функциональных связей порождает значительные трудности для обеспечения необходимой надежности, а также сопровождается резким увеличением временных, материальных и трудовых затрат на обслуживание, вследствие чего возросшие потенциальные возможности электрооборудования не могут быть полностью реализованы. Проведен анализ существующего научно-методического аппарата диагностирования электрооборудования. Недостатком существующего научно методического аппарата является его низкая производительность. Классические методы параметрического контроля и диагностирования для оценки технического состояния объектов не удовлетворяют требованиям систем управления по временным показателям.Определенны пути решения указанного противоречия, на основании которых предложен тококинетический метод контроля и диагностики электрооборудования систем электроснабжения промышленных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрооборудование, контроль и диагностика, техническое состояние, ток, кинетика, идентификация.

Введение

Усложнение схемного построения и функциональных связей в разрабатываемом электрооборудование (ЭО) систем электроснабжения (СЭС) военной техники связи (ВТС)порождает значительные трудности для обеспечения необходимой надежности. В результате возникает целый ряд специфических проблем, связанных с организацией технического обслуживания и обеспечением высокой эффективности эксплуатации ЭО.Сущность этих проблем определяется тем, что развитие ЭО в указанном направлении сопровождается резким увеличением временных, материальных и трудовых затрат на техническое обслуживание, вследствие чего возросшие потенциальные возможности ЭО не могут быть полностью реализованы.

Известно [1], что основным направлением разрешения возникшего противоречия, наряду с повышением надежности ЭО, является совершенствование организации обслуживания в сочетании с комплексной автоматизацией всех процессов эксплуатации ЭО. В связи с этим, вопросы всестороннего совершенствования системы технического обслуживания, важнейшими элементами которой являются постоянный мониторинг, а также контроль идентификация технического состояния (ТС), приобрели важное практическое значение и объективно становятся все более актуальными по мере развития ЭО [2–4].

Целью статьи является разработка теоретических положений направленных на повышение оперативности оценки технического состояния ЭО СЭС ВТС.

Анализ существующего научно-методического аппарата оценки технического состояния электрооборудования

Результаты и решения научных исследований, проводимых в рамках научно-методического аппарата (НМА) технической диагностики, можно условно разделить на две группы [2, 5–7]:

в первой группе научных результатов, рассматривается параметрический подход, в основу которого входят три выработанные практикой способа поиска: пробных замен, физического исключения, промежуточных измерений;

во второй группе научных результатов, исследуется функциональный подход, в основу которого входит идентификация ТС объекта контроля по выходному сигналу.

Несмотря на несомненные преимущества параметрического метода, связанные, в первую очередь, с качеством (глубиной) диагностирования, он обладает и рядом недостатков: при большом числе средств измерений каждое из них дополнительно вносит погрешности при измерении; при большом числе контролируемых точек измерение каждой требует определенного количества времени.

Несовершенством второй группы научных результатов [2, 5, 6], основанных на функциональном диагностировании, является тот факт, что измерение осуществляется в одномерном метрическом пространстве, в котором сигналы различных классов во многих точках могут пересекаться, что в свою очередь ведет к снижению достоверности и повышению времени исследования в точках пересечения различных классов.

Недостатком существующего НМА является его низкая производительность. Классические методы параметрического контроля и диагностирования ТС ЭО не удовлетворяют требованиям современных систем управления по временным показателям. Существующий НМА оценки ТС ЭО, который основывается на использовании методов параметрического диагностирования, не позволяет решить задачу сокращения числа диагностических признаков при сохранении глубины поиска отказов и полноты диагностирования, и поэтому не может быть применен для достижения поставленной цели [2].

Идентификация технического состояния электрооборудования по выходному сигналу

Анализ существующего НМА позволил выделить направление повышения производительности систем контроля при диагностике ЭО по функциональному признаку, в основу которого входит идентификация ТС ЭО по выходному сигналу. На этой основе рассмотрен новый подход к оценке ТС ЭО [8–11].

Сущность предлагаемого метода состоит в представлении диагностического пространства, содержащего информационные признаки отказов ЭО в виде векторов цифровой последовательности из которых формируют матрицу технического состояния (МТС). Идентификацию ТС и места отказа в ЭО осуществляют на основании анализа изменений в цифровых последовательностях сформированных МТС. При этом идентификация ТС ЭО осуществляется в два этапа (обучения и распознавания): на первом этапе формируют библиотеку эталонных описаний возможных ТС ЭО (информационных признаков отказов) преобразуя измеренный сигнал в МТС $g_1 ... g_M$ размерностью NxN, которую запоминают, а на втором — поэлементно сравнивают полученную МТС с эталонными МТС, идентифицируют ТС ЭО по наибольшему числу совпадений элементов сравниваемых матриц.

На рисунке 1 *а* и *б* представлен алгоритм реализации предлагаемого метода [12]. Первым этапом метода является этап обучения (рис. 1 *а*), на котором:

на шаге 1 определяют исходные данные, ограничения и допущения;

на шаге 2 с помощью модели динамических процессов в цепи питания (ДПЦП) контролируемого ЭО [12], формируют библиотеку описаний возможных технических ситуаций в ЭО и запоминают их в виде эталонных МТСg_m, размерностью NxN, где $m = 1, 2, ..., M$ — число возможных технических ситуаций в ЭО. Пример библиотеки см. на рис. 2 *а–д*, $M = 5$ (цифровые последовательности МТС представлены в виде фигур для наглядности).

Генерируют совокупность Nстробирующих импульсов через интервалы времени $\Delta t = T/N$, где T период измеренного сигнала, $N \geq 2$, число измерений в интервале T. Количество измерений в интервале T должно удовлетворять условиям теоремы Котельникова $F_{дискр} \geq 2\ F_{наив.гарм.}$,

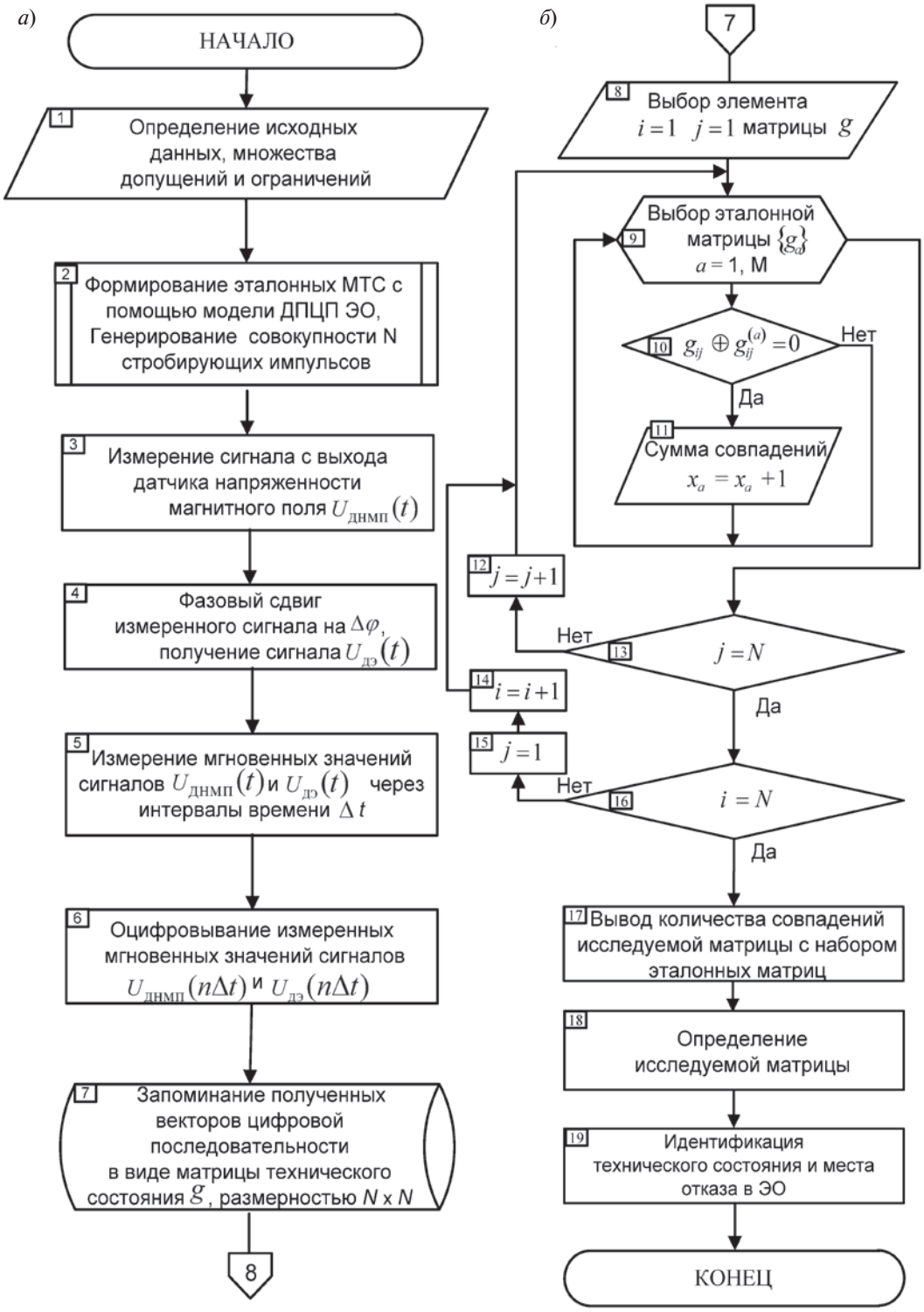

Рис. 1. Алгоритм, реализующий двухэтапный методидентификации ТС ЭО:
а — этап обучения; *б* — этап распознавания

Анализ существующего научно-методического аппарата оценки технического состояния электрооборудования

Результаты и решения научных исследований, проводимых в рамках научно-методического аппарата (НМА) технической диагностики, можно условно разделить на две группы [2, 5–7]:

в первой группе научных результатов, рассматривается параметрический подход, в основу которого входят три выработанные практикой способа поиска: пробных замен, физического исключения, промежуточных измерений;

во второй группе научных результатов, исследуется функциональный подход, в основу которого входит идентификация ТС объекта контроля по выходному сигналу.

Несмотря на несомненные преимущества параметрического метода, связанные, в первую очередь, с качеством (глубиной) диагностирования, он обладает и рядом недостатков: при большом числе средств измерений каждое из них дополнительно вносит погрешности при измерении; при большом числе контролируемых точек измерение каждой требует определенного количества времени.

Несовершенством второй группы научных результатов [2, 5, 6], основанных на функциональном диагностировании, является тот факт, что измерение осуществляется в одномерном метрическом пространстве, в котором сигналы различных классов во многих точках могут пересекаться, что в свою очередь ведет к снижению достоверности и повышению времени исследования в точках пересечения различных классов.

Недостатком существующего НМА является его низкая производительность. Классические методы параметрического контроля и диагностирования ТС ЭО не удовлетворяют требованиям современных систем управления по временным показателям. Существующий НМА оценки ТС ЭО, который основывается на использовании методов параметрического диагностирования, не позволяет решить задачу сокращения числа диагностических признаков при сохранении глубины поиска отказов и полноты диагностирования, и поэтому не может быть применен для достижения поставленной цели [2].

Идентификация технического состояния электрооборудования по выходному сигналу

Анализ существующего НМА позволил выделить направление повышения производительности систем контроля при диагностике ЭО по функциональному признаку, в основу которого входит идентификация ТС ЭО по выходному сигналу. На этой основе рассмотрен новый подход к оценке ТС ЭО [8–11].

Сущность предлагаемого метода состоит в представлении диагностического пространства, содержащего информационные признаки отказов ЭО в виде векторов цифровой последовательности из которых формируют матрицу технического состояния (МТС). Идентификацию ТС и места отказа в ЭО осуществляют на основании анализа изменений в цифровых последовательностях сформированных МТС. При этом идентификация ТС ЭО осуществляется в два этапа (обучения и распознавания): на первом этапе формируют библиотеку эталонных описаний возможных ТС ЭО (информационных признаков отказов) преобразуя измеренный сигнал в МТС $g_1 ... g_M$ размерностью NxN, которую запоминают, а на втором — поэлементно сравнивают полученную МТС с эталонными МТС, идентифицируют ТС ЭО по наибольшему числу совпадений элементов сравниваемых матриц.

На рисунке 1 *а* и *б* представлен алгоритм реализации предлагаемого метода [12]. Первым этапом метода является этап обучения (рис. 1 *а*), на котором:

на шаге 1 определяют исходные данные, ограничения и допущения;

на шаге 2 с помощью модели динамических процессов в цепи питания (ДПЦП) контролируемого ЭО [12], формируют библиотеку описаний возможных технических ситуаций в ЭО и запоминают их в виде эталонных МТСg_m, размерностью NxN, где $m = 1, 2, ..., M$ — число возможных технических ситуаций в ЭО. Пример библиотеки см. на рис. 2 *а–д*, $M = 5$ (цифровые последовательности МТС представлены в виде фигур для наглядности).

Генерируют совокупность Nстробирующих импульсов через интервалы времени $\Delta t = T/N$, где T период измеренного сигнала, $N \geq 2$, число измерений в интервале T. Количество измерений в интервале T должно удовлетворять условиям теоремы Котельникова $F_{дискр} \geq 2\ F_{наив.гарм.}$,

на шаге 19 идентифицируют ТС и место отказа в ЭО по результатам анализа числа совпадений исследуемой и эталонной матрицами (*шаг 18*).

На рисунке 3 приведены результаты математического моделирования, выполненного с использованием компьютерных технологий (MathCAD 14, Workbench 9) [14].

В ходе исследований были синтезированы два негармонических сигнала $u_1(t)$ и $u_2(t)$ (рис. 3, *а* и *б* соответственно), отличие которых друг от друга заключалось в наличии в спектре второго из них 9-й гармонической составляющей (рис. 3, *в* и *г*), амплитуда которой составляла 2...3 % от амплитуды первой гармонической составляющей. Технически такая ситуация соответствует, например, исправному трансформатору и трансформатору, имеющему два-три короткозамкнутых витка одной из обмоток. Сформированные диаграммы состояний (ДС) [10], представлены на (рис. 3, *д* и *е*). МТС сформированные путем преобразования модели ДПЦП контролируемого ЭО, представлены на (рис. 3, *ж* и *з*). Полученные результаты показывают, что ни в форме сигнала, ни в его спектре характерных анализируемых отличий нет, тогда как форма ДС и цифровые последовательности полученных МТС различаются существенно [7].

Проведенное компьютерное моделирование [14] и экспериментальные исследования [15] информационного содержания кинетики (формы) ДПЦП типового ЭО показали, что модель ДПЦП контролируемого ЭО, преобразованная

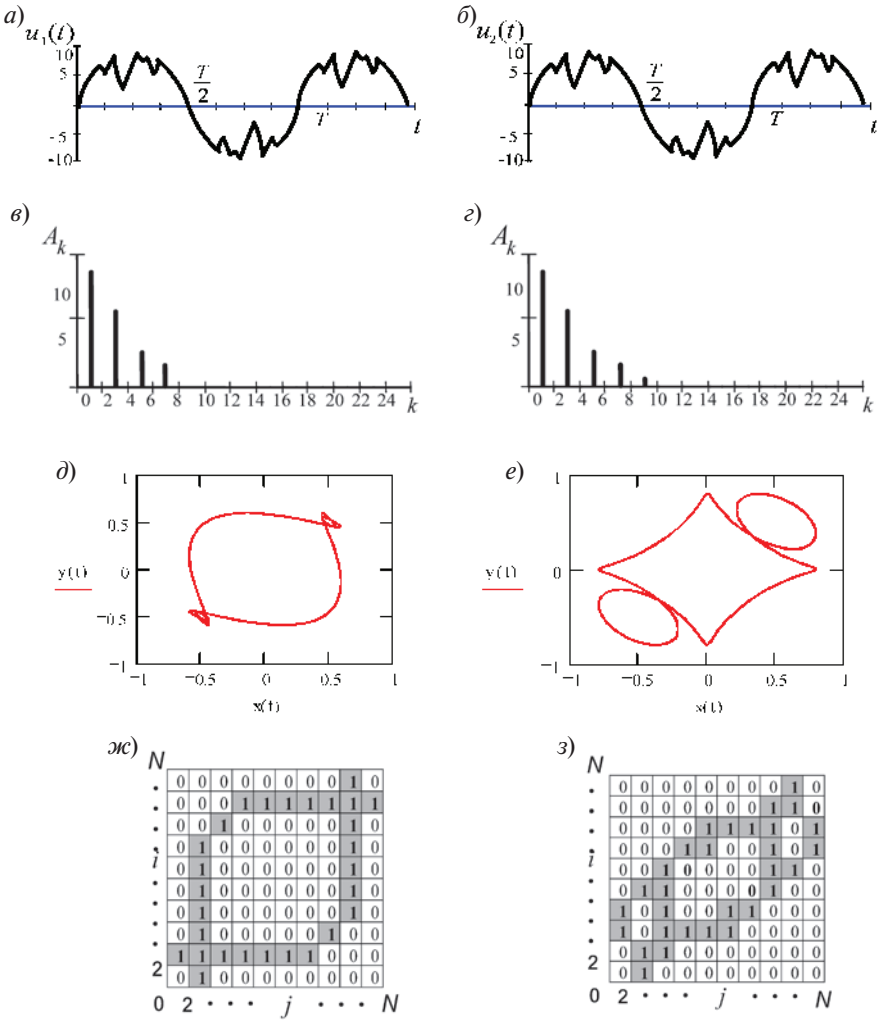

Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования:

а и *б* — синтезированные сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$; *в* и *г* — спектры сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$; *д* и *е* — диаграммы состояний; *ж* и *з* — матрицы технических состояний

к виду векторов цифровой последовательности, информативна и чувствительна к изменению ТС ЭО. Таким образом, в качестве источника диагностической информации в системах контроля и идентификации ТС ЭО могут быть эффективно использованы закономерности изменения кинетики выходного сигнала, сопровождающего процессы функционирования контролируемого ЭО.

Заключение

Благодаря новой совокупности существенных признаков разработанного метода и введенной последовательности действий, основанной на применении двухэтапной процедуры идентификации, обеспечивается повышение оперативности оценки ТС ЭО СЭС ВТС при соблюдении ограничений на другие показатели эффективности систем контроля и идентификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудрицкий В. Д., Синица М. А.**и др. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов.радио, 1977. –256 с.

2. **Литвинов А. И.** Анализ научно-методического аппарата контроля и диагностирования электрооборудования систем военного назначения // Научно-технический сборник Труды Военной академии Генерального штаба.– Москва: ВАГШ, 2014. — С. 162–173.

3. **Будко П. А., Виноградeнко А. М., Литвинов А. И., Юров А.С.** Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // Датчики и системы / Sensors&Systems. № 9, 2014.С.

4. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Метод бесконтактного мониторинга технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов/ XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. (Москва, ИППУ РАН им. Трапезникова, 16–19.06.2014 г.). М.

5. **Бритов Г. С., Мироновский Л. А.** Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования // Информационно — управляющие системы. 2010. №2. — С. 55–61.

6. **Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н.** Диагностирование систем с фазовращательными и бисингулярными передаточными функциями // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. –С. 60–66.

7. **Лоскутов А. И., Вечеркин В. Б., Шестопалов О. Л.** Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно автоматной модели и нейросетевых структур // Информационно-управляющие системы. 2012. №2. — С.74–81.

8. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Бесконтактный контроль и идентификации технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов // Датчики и системы. 2014. №8. — С. 5–11.

9. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Модель выходного сигнала электрооборудования систем электроснабжения военного назначения при формировании диаграммы состояний / Сборник материалов Девятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Четвертой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». — Таганрог: Изд-во ЮФУ,2014.

10. **Абайулы Б., Будко П. А., Литвинов А. И., Ткаченко В.Ю.** Модель неразрушающего контроля технического состояния радиоэлектронной аппаратуры. / В сборнике научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях» (Санкт-Петербург, Военная академия связи, 09 февраля 2016 г.). — СПб.: Изд. «Наукоемкие технологии», 2016. — С. 92–96.

11. **Будко П. А., Литвинов А. И.** Кинетический метод контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление № 7, 2014.

12. **Будко П. А., Виноградeнко А. М., Литвинов А. И.** и др. Способ и устройство контроля технического состояния электрооборудования Патент РФ №2548602. МПК G01R19/00. Опубликовано 29.04.2015 г. бюл. №11. — 24 с.

13. **Литвинов А. И.** Модель динамических процессов в цепи питания контролируемого электрооборудования // Сборник трудов всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации». — СПб.: ВАС, 2014. — С.192–197.

14. **Литвинов А. И., Баринов М. А., Николаев В. А., Дорошенко Г. П., Чихачев А. В.** Программный комплекс мониторинга технического состояния электронного оборудования по дисциплине «Техническое обеспечение связи и автоматизации» Свидетельство ОФЭРНИО о регистрации электронного ресурса №20346 от 25.08.2014 г.

15. **Будко П. А., Виноградeнко А. М., Литвинов А. И.** Экспериментальные исследования по применению кинетического метода контроля и диагностики технических средств //Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. — С. 53–58.

В. С. Воловиков
кандидат технических наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ВКЛАДА В БОЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ВОЙСК СВЯЗИ

Успешное выполнение мероприятий технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) на сетях связи специального назначения с началом и в ходе ведения боевых действий возможно только при наличии соответствующего научно-методического аппарата, обеспечивающего принятие обоснованных управленческих решений должностными лицами. Рациональная структура системы ТОС и АСУ будет определять качество выполнения задач системой и войсками связи.

В ходе продолжающегося реформирования Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) существует объективная необходимость в непрерывном анализе существующих угроз безопасности страны и обоснованном прогнозе их возникновения в будущем. Очевидно, что это влияет на характер решаемых ВС РФ задач, результатом изменения которых является формирование требований по эффективному применению войск, в том числе и формирований связи. Успешное выполнение соединениями, частями и подразделениями связи боевых задач напрямую зависит от постоянной готовности к применению по назначению техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ). Выбор соответствующей стратегии ТОС и АСУ уже в мирное время представляет собой сложную задачу, а в периоды нарастания угрозы агрессии против РФ и непосредственно ведения военных действий будет отягощен большой степенью неопределенности воздействия противника на систему управления войсками.

Требования к системе ТОС и АСУ будут зависеть от выбора определенного варианта построения системы военной связи, то есть зависеть от множества факторов. Необходимо помнить, что находящиеся на вооружении образцы ТС и АСУ являются сложными техническими системами, требующими проведения на них не менее сложного комплекса мероприятий по техническому обеспечению. Невыполнение требований по поддержанию ТС и АСУ в постоянной готовности к применению по назначению (возможность проведения диагностирования технического состояния, ремонтопригодность, наличие соответствующих сил и средств и т. д.) попросту сделает их бесполезными при выполнении боевых задач.

Интенсивность применения военной техники связи и характер решаемых ими задач будут влиять на требуемое качество услуг, предоставляемых системой ТОС и АСУ для обеспечения эффективного функционирования развернутой системы связи. Требования по поддержанию ТС и АСУ в постоянной готовности к применению по назначению непосредственно влияют на структуру, принципы построения и процедуры функционирования системы ТОС и АСУ. Это связано с непрерывным изменением в ходе операции (боевых действий) факторов, влияющих на условия применения ТС и АСУ [1]:

Данные изменения могут быть заранее известны и точно определены, а также иметь стохастическую природу [2], что в свою очередь подразумевает наличие необходимости в осуществлении заблаговременного планирования мероприятий ТОС и АСУ. Следовательно, важным вопросом в деятельности лица, принимающего решение становится решение задачи сравнения требований к системе ТОС и АСУ с ее реальными возможностями по их выполнению.

Результатом такого сравнения будет перечень мероприятий, которые необходимо выполнить для решения задач системой ТОС и АСУ по достижению главной цели — поддержание ТС и АСУ в постоянной готовности к применению по назначению.

Опыт содержания ТС и АСУ в пунктах постоянной дислокации воинских частей (соединений) и в ходе проведения учений показывает, что возможности существующей системы ТОС и АСУ не соответствуют потребностям войск в ее услугах [3] а, следовательно, не могут реализовать в полной мере требования по боевой готовности системы связи. Одной из причин сложившегося положения дел в предметной области является отсутствие инструментария по количественной оценке вклада, вносимого системой ТОС и АСУ в боевой потенциал войск связи.

Для разрешения выявленного противоречия необходимо разработать научно-методический аппарат, позволяющий определить степень соответствия системы ТОС и АСУ, и реализуемых ею процессов, требованиям по эффективному функционированию системы связи в целом. Наличие такого инструмента позволит в дальнейшем решать задачи по повышению качества системы ТОС и АСУ.

Система ТОС и АСУ представляет собой иерархическую структуру — совокупность подсистем, функционирующих на разных уровнях построения системы связи (тактическое, оперативное и стратегическое звенья управления (ТЗУ, ОЗУ, СЗУ)). Основные задачи, решаемые каждой из подсистем, сводятся к выполнению их структурными элементами мероприятий снабжения, технического обслуживания и восстановления ТС и АСУ, которые влияют на величину боевого потенциала войск связи. Оценка боевых потенциалов системы вооружения в целом и войск связи в частности осуществляется «снизу-вверх», начиная с нижнего уровня, представленного различными типами ТС и АСУ, составляющими номенклатуру вооружения системы связи [4]. Общая схема расчета боевых потенциалов, в соответствии с предлагаемым подходом, состоит в следующем.

Для каждого образца ТС и АСУ определяется его боевой потенциал P_{TC_i}, $(i=\overline{1,n})$. Боевой потенциал воинского формирования связи (ВФС) ТЗУ (подразделение, воинская часть, соединение), оснащенного различными образцами ТС и АСУ численностью $\zeta_c, \zeta_n \le 1$ представляется как линейная свертка боевых потенциалов образцов ТС и АСУ η_2 с коэффициентами их значимости $r_i \le 1$, характеризующими вклад образца определенного типа в решение задач ВФС:

$$P_{ВФС} = \sum_{i=1}^{n} \omega_i P_{TC_i} N_{TC_i} = \sum_{i=1}^{n} P'_{TC_i} N_{TC_i} \qquad (1)$$

где $P'_{TC_i} = \omega_i P_{TC_i}$ — скорректированное значение боевого потенциала образца ТС и АСУ *i*-го типа с учетом его значимости в составе ВФС.

Аналогично возможно рассчитать боевой потенциал войск связи ОЗУ и СЗУ, состоящих из нескольких ВФС, каждое из которых имеет расчетный боевой потенциал $Q_1 = \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}\right]$, с весовыми коэффициентами ω_j, характеризующими их вклад в решение задач системой связи соответствующего уровня.

Получение количественных оценок соответствующих боевых потенциалов связано с определенными трудностями:

методика оценка боевых потенциалов образцов ТС и АСУ отсутствует;

расчет весовых коэффициентов значимости ω требует наличие методического обеспечения, учитывающего специфику решения задач связи ВФС для достижения цели функционирования системы связи.

Представляется, что следующим шагом является нахождение взаимосвязи между боевыми потенциалами образцов ТС и АСУ, ВФС различных звеньев управления и показателями, характеризующими уровень предоставляемых системой ТОС и АСУ услуг. Установление такого соотношения позволит принимать управленческие решения, направленные на построение системы ТОС и АСУ, способной решать поставленные задачи в заданных условиях функционирования. Таким образом, в целях оптимизации функционирования системы ТОС и АСУ необходимы количественные оценки дефицита и излишков услуг, предоставляемых ею для удовлетворения потребностей войск связи. В рамках возможного применения для вычислений аддитивного подхода (выражение (1)) критерием эффективности функционирования

системы ТОС и АСУ могла бы выступить следующая функция, учитывающая результаты сравнения несбалансированных возможностей данной системы и потребностей войск в ее услугах [5]

$$F(x)=|r-ax|P(r)\times$$

$$\times\left[k\frac{1-\operatorname{sgn}(r-ax)}{2}+\frac{l}{w}\frac{1+\operatorname{sgn}(r-ax)}{2}\right], \quad (2)$$

где a — коэффициент, оценивающий боевой потенциал войск связи; x — коэффициент, определяющий оптимальный вклад системы ТОС и АСУ в боевой потенциал войск связи; r — коэффициент, характеризующий заданную стоимость мероприятий ТОС и АСУ; $P(r)$ — вероятность того, что стоимость мероприятий ТОС и АСУ составит величину, равную r; k, l — коэффициенты, характеризующие потенциал системы ТОС и АСУ относительно потребностей войск связи в ее услугах (излишки и дефицит соответственно); w — коэффициент эквивалентности потенциалов.

Выражение (1) учитывает следующие механизмы взаимодействия показателей качества системы ТОС и АСУ и реализуемых ею процессов:

1) функция $Q_0=\frac{X}{2R_{\Sigma}}$ увеличивается пропорционально увеличению дефицита или излишков в оказании услуг системы ТОС и АСУ;

2) коэффициенты пропорциональности при наличии излишек k и в случае дефицита l должны быть различны, т. е. функция (1) должна дифференцировать «веса» излишек и дефицита;

3) функция $F(x)$ равна нулю в случае уравновешивания требований к системе ТОС и АСУ с ее возможностями;

4) функция X изменяется пропорционально $P(r)$ если r является дискретной случайной переменной, или пропорционально плотности (r), если r — непрерывная случайная переменная;

5) коэффициент пропорциональности l (при наличии дефицита) «взвешен» коэффициентом w, который выражает эквивалентность рассматриваемых потенциалов (например, как потенциал системы ТОС и АСУ эквивалентен одной единице измерения боевого потенциала).

Таким образом, пусть диапазон $[x_{\min}, x_{\max}]$ обозначает ограничения, наложенные на допустимый вклад системы ТОС и АСУ в боевой потенциал войск связи. Тогда задача оптимизации состоит в нахождении оптимального вклада x^* системы ТОС и АСУ в боевой потенциал войск связи, который минимизирует критериальную функцию $F(x)$ на интервале $[x_{\min}, x_{\max}]$.

Одной из основных задач в вычислении вклада системы ТОС и АСУ в боевой потенциал войск связи является определение коэффициентов, характеризующих вклад элементов (подсистем) системы ТОС и АСУ в решение задач управления войсками (силами) на разных этапах их применения.

Решение данной задачи состоит в разработке методического обеспечения, которое бы отражало правила применения способов, позволяющих получить количественные оценки влияния конкретных мероприятий ТОС и АСУ как на качество системы ТОС и АСУ в частности, так и на эффективность функционирования системы связи в целом.

Представляется, что наличие соответствующего методического обеспечения должно решить следующие частные задачи:

получение функций, аргументы которых характеризуют выполнение конкретных мероприятий ТОС и АСУ;

преобразование абсолютных значений полученных функций в относительные для исключения влияния различных единиц измерения;

определение критериев эффективности функционирования элементов системы ТОС и АСУ;

определение «весов» мероприятий ТОС и АСУ (их вклад в решение задач системой связи).

Предложенные пути решения задач, позволяющие управлять системой ТС и АСУ на всех уровнях ее построения в целях эффективного функционирования системы связи требуют разработки соответствующего методического обеспечения. По настоящее время недостаточно полно изучены вопросы рассматриваемой предметной области, а материал относительно данной проблематики трудно найти в имеющейся научно-технической литературе. Представленные подходы могут стать предпосылками для дальнейших исследований в области разработки действенных инструментов, облегчающих принятие решений при управлении системой ТОС и АСУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гирш В. А., Баринов М. А.** и др. Техническое обеспечение связи и автоматизации. Учеб. — СПб.: СПбГУТ им. Проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2011. — 451 с.

2. **Курносов В. И., Лихачев А. М.** Методология проектных исследований и управление качеством сложных технических систем электросвязи. — СПб.: ТИРЕКС, 1998. — 496 с.

3. **Воловиков В. С., Чихачев А. В.** Анализ системы восстановления военной техники связи и направления ее совершенствования. // Труды Военно-морского политехнического института. Рецензируемый сборник. 2014, № 1(14). — СПб.: ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». — С. 78–85.

4. Оптимальное распределение ресурсов в задачах программно-целевого планирования развития вооружения и военной техники [Электронный ресурс] / Буравлев А. И., Гладышевский В. Л. // Вооружение и экономика. — 2014. — № 2 (27). — С. 21–36. — Режим доступа: http://www.viek.ru. (Дата обращения 10.05.2016).

5. **Miszalski W., Mitkow S.** Certain Acquisition Procedures of Armament and Military Equipment. Scientific Journal «Military Logistic Systems», Military University of Technology, Kaliskiego 2. 00–908, Warsaw, 2008, pp. 41–50.

А. М. Гончаров
доктор военных наук, профессор, Военная академия воздушно-космической обороны имени Г.К. Жукова, г. Тверь

А. Е. Ченцов
кандидат военных наук, Военная академия воздушно-космической обороны имени Г.К. Жукова, г. Тверь

В.В. Замараев
кандидат технических наук, с.н.с., старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Минобороны России (НИЦ ЦНИИ ВВКО МО РФ), г. Тверь

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О РАЗОРУЖАЮЩЕМ УДАРЕ КРЫЛАТЫМИ РАКЕТАМИ

АННОТАЦИЯ. Предложен метод формирования информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами (КР), основанный на принципе оценки действий противника по достижению поставленных целей, предусматривающем проверку трех гипотез: о согласованности траекторий движения КР по времени, по пространству и о возможности достижения цели разоружающего удара.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разоружающий удар, вероятность, гипотеза, закон распределения.

Введение

Развитие крылатых ракет (КР) противника, в первую очередь — стратегических КР (СКР), совершенствование способов их боевого применения позволяет решать этим средствам воздушного нападения стратегические задачи, включая нанесение разоружающих ударов по объектам стратегических ядерных сил (СЯС). Это диктует необходимость создания специальных оборонительных систем и, в первую очередь, системы предупреждения об ударе стратегических крылатых ракет (СПКР). Эта система должна являться составной частью системы разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении (СРПВКН) Воздушно-космических сил (ВКС).

Информация предупреждения, формируемая силами и средствами СРПВКН, предполагает информационные решения о последовательных этапах действий воздушно-космического противника, принимаемые в органах разведки и включающие сообщения о количестве, местоположении, массовому (групповому) взлету СВКН, построении их в боевые порядки, степени угрозы, масштабах, возможных направлениях и целях ударов и другие данные, необходимые для принятия оперативных управленческих решений командующим органами высших звеньев управления на ответные действия, соответствующие складывающейся воздушно-космической обстановке.

Обоснование метода формирования информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами

Возможности КР по использованию предельно малых высот полета (50 м и менее) не позволяют создать сплошное радиолокационное поле обнаружения по периметру и в глубине территории страны. Поэтому реально можно рассматривать только объектовые группировки ПВО, прикрывающие наиболее важные объекты (например, позиционный район СЯС). Возможное время предупреждения (время от момента получения информации до момента нанесения удара по объекту) по КР для таких группировок будет составлять единицы минут (не более 10 мин). За это время должен быть произведен анализ полученной информации, приняты и реализованы решения на ответно-встречные действия. Широко используемую в системах ПВО координатно-целевую информацию

практически невозможно применить для формирования предупреждения из-за больших объемов, малых временных интервалов для анализа и необходимости сопоставления полученной информации с информацией от других источников, которая носит некоординатный характер. Поэтому представляется целесообразным перейти от принципа оценки целевой обстановки к принципу оценки действий противника.

По этому принципу каждое действие противника рассматривается как совокупность действий сил и средств, согласованных по пространству и времени и направленных на достижение определенных целей. Информация по интересующим нас действиям, поступает на вход системы и используется для оценки степени согласованности действий по времени, пространству и целевой направленности. В свою очередь, выходная информация системы должна содержать факт вскрытия этого действия, достоверность вскрытия и пространственно-временные параметры, позволяющие проверять согласованность этого действия с действиями более высокого уровня. Так информация об обнаружении разоружающего удара должна сравниваться в системе более высокого уровня (СРПВКН) с информацией о действиях носителей КР, действиях баллистических ракет (БР), действиях обеспечивающих систем, в том числе космических.

В рамках указанного подхода к системе предупреждения об ударе КР (СПКР) простыми действиями считаются действия КР (в частности, полет по прямой с огибанием рельефа местности, различные перестроения). Действия обеспечивающих сил и средств в данной статье не рассматриваются.

Предположим, что система предупреждения создается на базе маловысотных РЛС. Для простоты будем считать объект удара точечным, зона обнаружения информационных средств района — кольцо с заданным внешним радиусом.

Противник при организации удара стремится обеспечить минимальное время предупреждения для обороняющейся стороны. Для достижения этой цели может быть использована следующая модель действия КР в интересующем нас районе.

В соответствии со способами боевого применения КР, после пуска с носителей они выстраиваются в боевой (походный) порядок (например, «пеленг колонн») и следуют к районам удара по заданным маршрутам. Особенностью полета КР, как было сказано выше, является использование на большей части траектории полета режима следования рельефу местности на малых и предельно малых высотах. Выбор высоты полета КР осуществляется за счет задания программной высоты, которая изменяется в соответствии со структурой рельефа местности, наличием искусственных и естественных препятствий, а также расположением средств ПВО вдоль маршрутов полета КР. Минимальное значение программной высоты определяется исходя из компромиссного условия между столкновением КР с поверхностью и уничтожением ее огневыми средствами ПВО.

При полете крылатой ракеты в условиях городской застройки программная высота полета ракеты выбирается из условия превышения высоты самого высокого здания по курсу полета ракеты. Маршевая скорость полета крылатых ракет зависит от высоты полета и может составлять 170–280 м/с.

Задание маршрута полета КР осуществляется с помощью поворотных пунктов маршрута, соединенных между собой частными ортодромиями. Координаты поворотных пунктов выбираются с учетом расположенных препятствий, особенностей рельефа местности вдоль предполагаемого маршрута полета (лес, холмы, горы, степь, город и т. д.) и дислокации средств ПВО.

Выход КР к поворотному пункту маршрута регламентирован по времени, что также позволяет организовать строй ракет (скорректировать ранее сформированный строй) и их взаимный полет в строю группы. Выдерживание безопасных интервалов и дистанций между ракетами в группе, а также контрольного времени прохода поворотных пунктов маршрута, происходит путем автоматического регулирования скорости полета при сравнении текущего времени прохождения контрольных промежуточных пунктов с временем, заданным по плану удара.

Выберем последнюю точку маршрута для q-й колоны из k ракет вблизи i-го района удара вне зон видимости информационных средств района. В этой точке начнем перестраивать походные колонны в боевой порядок КР для нанесения удара (исходное положение для атаки). При перестроении будем стремиться достичь цели — создать такое пространственное расположение ракет, которое обеспечивает одновременный их вход в зоны обнаружения и в конеч-

ном итоге позволяет получить минимальное время предупреждения (время от момента входа ракет в зоны обнаружения до момента нанесения удара по объектам).

При перестроении каждая ракета из колонны, достигнув последней поворотной точки маршрута, поворачивает на угол, необходимый для движения вдоль границы зоны обнаружения системы ПВО района. В дальнейшем каждая ракета осуществляет движение вдоль границы района. Через некоторое время, определяемое длиной колоны, все КР займут боевой порядок вдоль границы района. Для обеспечения одновременного входа в зоны обнаружения средств ПВО им необходимо согласованно совершить маневр в сторону объектов удара. Поворот может быть осуществлен либо по внешней команде, либо заложен заранее в полетное задание ракет. С этого момента ракеты переходят на режим индивидуального наведения на объекты удара. Построение ракет вокруг позиционного района может быть и другим, например, удар может наноситься несколькими группами ракет с разных направлений.

Получаемая информационными средствами системы совокупность траекторий полета ракет (шестимерные вектора с координатами целей и скоростями их изменения, признаки «ракета — не ракета») фактически представляет собой пространственно-временное построение группировки ракет вблизи района удара. При этом цели группировки КР могут быть различными: не только уничтожение объектов СЯС, но и удары по административно-политическим и промышленным центрам, по атомным электростанциям и т. п. Эта реальная информация будет отличаться от описанной (прогнозируемой) из-за воздействия большого числа случайных факторов, влияющих на процессы обнаружения, измерения параметров движения целей и их классификации. При этом множество случайных факторов придает вероятностный характер реальной информации. Поэтому, в качестве математических методов, которые могут использоваться для формирования информации о разоружающем ударе могут использоваться методы математической статистики (в частности методы проверки статистических гипотез).

В предлагаемом методе проверяются следующие гипотезы:

во-первых, насколько обнаруженные траектории согласованы по времени;

во-вторых, насколько обнаруженные траектории согласованы в пространстве;

в-третьих, каков уровень достижения цели.

Для перехода от описания физической сути поставленных вопросов к применению методов математической статистики необходимо упомянутые категории выразить через параметры распределения соответствующих случайных величин.

В качестве параметров, описывающих согласованность действий КР во времени, выбираются:

дисперсии моментов входа КР в зоны обнаружения (σ_i^2) для всей ($i = 1, 2, ..., I$) совокупности контролируемых районов $i \in I$;

максимальный разброс математических ожиданий ($m_{\max\ \text{вх}}$) моментов входа КР в зоны обнаружения всей ($i = 1, 2, ..., I$) совокупности контролируемых районов $i \in I$,

$$m_{\max\,\text{вх}} = \max_{\substack{i \neq j;\\ i \in I;\, j \in I}} m_{ij},$$

где $m_{ij} = \left| m_i - m_j \right|$; i — номера контролируемых районов; j — номера соседних контролируемых районов.

При точном согласовании действий КР по времени эти параметры равны нулю.

В качестве параметров, описывающих согласованность действий КР в пространстве, выбираются:

дисперсии отклонения направления движения, рассчитанные для всей совокупности обнаруженных целей, от направлений «точка обнаружения — центр района» — $\sigma_{\nu\beta}^2$;

степень достижения цели (разоружающего удара) определяется через математическое ожидание числа КР, необходимых для нанесения району необходимого ущерба — $m_{\text{р}i}$.

Будем считать, что принимаемые информационные решения (в данном случае — о разоружающем ударе) на последующих этапах принятия решений на действия обороняющейся стороны, объединяются с информацией от других источников. Для оптимального объединения информации необходима оценка значимости рассматриваемой гипотезы. Поэтому алгоритм принятия решения о справедливости гипотезы должен рассчитывать значимость гипотез относительно перечисленных выше параметров,

а затем объединять совокупность полученных значений. Блок-схема алгоритма формирования решения по трем параметрам, описывающим разоружающий удар, показана на рисунке 1.

Определение значимости гипотезы факта одновременности (т. е. согласованности моментов выхода ракет к объектам удара) для всей совокупности позиционных районов

Входная информация — совокупность времен входа $t_{\text{вх}ki}$ ракет в зоны обнаружения позиционных районов (где, $k = 1, ..., K$ — количество КР в налете на i-ый позиционный район; $i = 1, ..., I$ — номер позиционного района).

Оценка дисперсии моментов входа ракет в зоны обнаружения i-ого позиционного района:

$$S^2_{\text{вх}\,tki} = \left[\sum_{i=1}^{K}\left(t_{\text{вх}\,ki} - m_{\text{вх}\,ki}\right)^2\right] \Big/ \left(K-1\right).$$

Для оценки дисперсии времен входа ракет выбран закон, по которому используемая статистика имеет распределение хи-квадрат (χ^2) с K — 1 степенями свободы, так как в данном случае происходит проверка равенства дисперсии времен входа крылатых ракет и заданного значения дисперсии, оцениваемой на основе статистики критерия по выборке.

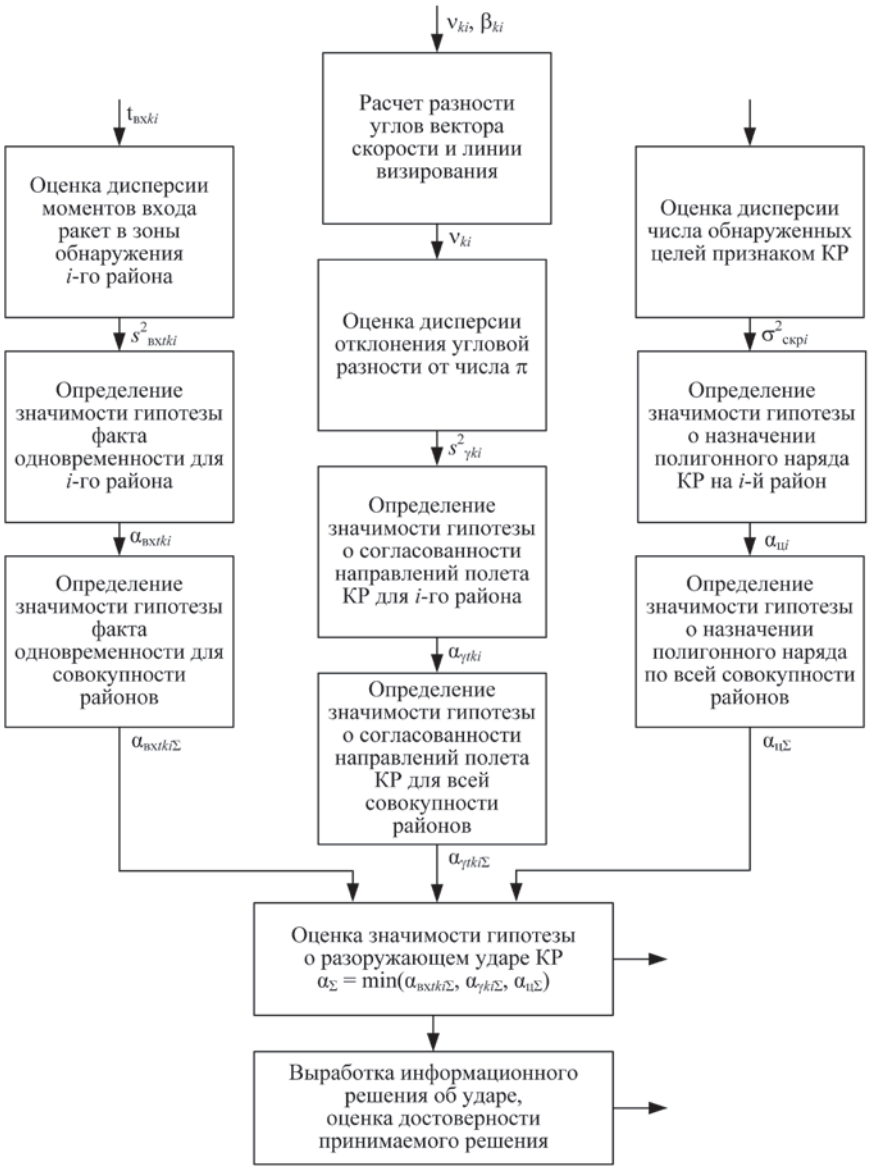

Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования решения о разоружающем ударе КР

Находим значимость гипотезы об обнаружении факта одновременности входа ракет в зону обнаружения i-го позиционного района из таблиц [1]

$$\alpha_{\text{вх}tki} = 1 - \chi^2(s^2_{\text{вх}tki}) .$$

Оценка значимости гипотезы о согласованности моментов входа КР в разные районы:

$$\alpha_{\text{вх}tki\Sigma} = \min_i \alpha_{\text{вх}tki} .$$

Кроме отмеченной выше флуктуационной составляющей моментов входа может иметь место сдвиг момента удара по какому либо району относительно других районов (например, удар по системе управления может предшествовать удару по позиционным районам).

Выше в качестве параметра, описывающего степень согласованности времен выхода ракет в разные районы, была принята величина max m_{ij}, где $m_{ij} = \left|m_i - m_j\right|$. Обозначим эту величину $\dot{Z}$.

Аналитическое определение закона распределения $\dot{Z}$ затруднительно, поэтому определяем этот закон с помощью имитационного моделирования.

Значимость по параметру согласованности моментов входа КР в зоны обнаружения совокупности районов определяется:

$$\alpha_{\text{вх}\,tkij} = 1 - \int_0^Z f(z)dz .$$

Определение значимости гипотезы о согласованности направлений полета КР к объектам удара для всей совокупности прикрываемых позиционных районов

Входная информация:

направление вектора скорости для каждой ракеты в i-м районе — $\nu_{ki,}$

направление линии визирования «центр района — цель/КР» — $\beta_{ki.}$

Рассчитывается разность этих углов $\gamma_{ki} = \nu_{ki} - \beta_{ki}$. Для целей, следующих в центр района, эта разность равна π.

Ищется оценка дисперсии отклонения γ_{ki} от π.

$$s^2_{\gamma ki} = \sum_{k=1}^{K} \frac{(\gamma_{ki} - \pi)^2}{K-1} ,$$

которая распределена по закону χ^2 с K — 1 степенью свободы.

Из таблиц [1] определяется значимость гипотезы о согласованности направлений полета КР для i-го района:

$$\alpha_{\gamma ki} = 1 - \chi^2(s^2_{\gamma ki}) .$$

Значимость гипотезы о согласованности направлений полета обнаруженных целей для всех районов определяется выражением

$$\alpha_{\text{т}ki\Sigma} = \min_{\text{т}ki} \alpha_{\text{т}ki} .$$

Определение значимости гипотезы о назначении полигонного наряда по всей совокупности объектов прикрываемых позиционных районов

Входная информация:

полигонный наряд КР, необходимый для достижения цели (с требуемым уровнем) — $n_{i,}$

вероятность правильного обнаружения КР — $p_{0,}$

вероятность правильной классификации обнаруженной цели как КР — $p_{\text{скр}}$,

совокупность обнаруженных целей с признаком «КР» — (p_1, ..., p_k, ..., p_K).

Математическое ожидание числа обнаруженных целей с признаком «КР» равно:

$$m_{\text{скр}i} = n_i\, p_0\, p_{\text{скр}}.$$

Дисперсия числа обнаруженных целей с признаком «КР» равна

$$\sigma^2_{\text{скр}i} = n_i p_0 (1 - p_0) + n_i p_0 (1 - p_{\text{скр}}) .$$

При известных p_0 и $p_{\text{скр}}$ закон распределения числа обнаруженных КР можно считать нормальным с указанными выше математическим ожиданием и дисперсией.

Значимость гипотезы о том, что на i — тый район назначен полигонный наряд, равна

$$\alpha_{\text{ц}i} = \frac{1}{2}\left(1 - \Phi\left(\frac{K - m_{\text{скр}i}}{\sigma_{\text{скр}i}}\right)\right).$$

При неизвестных вероятностях обнаружения число обнаруженных КР будет распределено по закону Стьюдента и соответственно может быть рассчитана значимость гипотезы о требуемых масштабах удара для всей совокупности районов, которая равна

$$\alpha_{\text{ц}\Sigma} = \min_i \alpha_{\text{ц}i} .$$

Результирующая значимость по всем составляющим, характеризующим разоружающий удар, равна

$$\alpha_\Sigma = \min(\alpha_{\text{ц}\Sigma}, \alpha_{\text{вх}t\Sigma}, \alpha_{\gamma\Sigma}) .$$

Заключение

Таким образом, предлагаемый метод формирования информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами основывается на принципе оценки действий противника по достижению поставленных целей, предусматривающем проверку трех гипотез: о согласованности траекторий движения КР по времени, по пространству и о возможности достижения цели разоружающего удара. Применение предлагаемого метода позволяет выработать информационное решение о наблюдаемой ситуации и оценить достоверность принимаемого решения.

Предлагаемый метод формирования информации о разоружающем ударе крылатыми ракетами позволяет:

проводить анализ получаемого объема информации в жестких временных рамках;

рационально использовать всю информацию об обнаруженных целях, что повышает обоснованность принятия управленческих решений;

информацию, полученную от средств радиолокационного обнаружения, учесть в подсистеме обработки информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами, использующей принцип анализа действий;

обосновать необходимость наличия подсистемы обработки информации предупреждения о разоружающем ударе крылатыми ракетами в составе системы предупреждения об ударе крылатых ракет (СПКР).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ллойд Э., Ледерман У., Айвазян С.А., Тюрин Ю.Н. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 2. — М.: Финансы и статистика, 1990.

В.Д. Гришин
кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

К.Г. Колесников
кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Б.В. Москвин
кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ЦЕЛЕВЫХ И ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ. Анализ различных направлений исследования информационно-технологических возможностей показывает, что представление сложных организационно-технических систем потребовало новых, нетрадиционных подходов, основывающихся на комплексном (системном) рассмотрении всего круга вопросов, связанных с целевым функционированием систем в различных условиях обстановки. Количественные оценки целевых и информационно-технологических возможностей систем позволяют разрабатывать практические рекомендации по совершенствованию техники, технологии решения целевых задач и алгоритмов управления сложными системами на этапах их создания и эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многомодельный комплекс, оперативный анализ, показатели информационно-технологических возможностей.

Современный этап развития сложных организационно-технических систем (ОТС), в том числе космических систем (КС), подразумевает существенное изменение качественных и количественных характеристик объектов и систем управления, внедрение новых принципов и подходов к процессу управления в этих системах. В связи с этим возникает острая необходимость в полновесной системной оценке потенциальных и реальных возможностей систем управления (их характеристик), специально предназначающихся для функционирования в условиях воздействия «внешней среды». Малейшие неточности в достоверности оценки, недостаточная оперативность оценки ресурсных возможностей систем управления, особенно в условиях целенаправленного воздействия противника, серьезно сказываются на эффективности программ (планов) целевого применения элементов систем управления и управляемых ими объектов, ярчайшими представителями которых могут являться орбитальные группировки космических аппаратов (ОГ КА).

Неформальное определение состава показателей, характеризующих результат применения сложной ОТС может производиться с использованием сложившегося общего подхода [1]. Данный подход включает составление возможно более полного набора явных показателей результата с последующим построением их иерархии снизу вверх (к обобщению) и наоборот. Построение иерархии показателей позволяет избежать излишней детализации и восполнить возможные «пробелы». В результате осуществляется выбор состава показателей, удовлетворяющих требованиям: полноты, неизбыточности, операциональности, представительности и группового свойства.

Соответственно изложенному подходу определим состав показателей результатов применения рассматриваемых ОТС. Такие результаты, как указывалось ранее, определяются информационным взаимодействием объектов управления (ОУ) со средой или с потребителями [2]. Состав показателей информационного взаимодействия ОУ,

удовлетворяющий изложенным требованиям, включает показатели, характеризующие области взаимодействия ОУ со средой (потребителями), показатели интенсивности информационного взаимодействия и качества взаимодействия. Данный состав показателей в полной мере определяет результат применения ОТС.

Показатели областей взаимодействия отражают их геометрические характеристики. Определение состава и меры этих показателей для конкретных систем всегда возможно. Показатель интенсивности является характеристикой количества информации обмена ОУ с областью взаимодействия в единицу времени. Интенсивность информационного обмена как дифференциальная характеристика позволяет определять интегральные оценки количества информации за заданное время и такие характеристики, как пропускная способность, быстродействие, производительность и т. п. Оба вида изложенных показателей однозначно определяются для ОТС. Показатели качества обмена имеют специфику для каждого вида ОТС.

Состав и значение показателей данного вида рассматриваются при анализе конкретных систем в заданных условиях их применения. Количественное значение показателей установленного состава, характеризующих результат применения, который может быть достигнут, будем называть ***возможностями*** ОТС. При таком определении возможности выступают как нечеткая мера результата применения КА. В связи с существующей многозначностью трактовок понятия «возможности» [1] выделим целевые (Ц) и информационно-технологические возможности (ИТВ) ОТС. Показатели целевых возможностей характеризуют применение ОТС в целом, а показатели ИТВ, как правило, характеризуют использование подсистем и элементов этих ОТС.

Проведенный анализ подтверждает, что показатели ИТВ ОТС существенным образом зависят от тактико-технических характеристик (ТТХ) подсистем и элементов, а также их структурного построения.

Большая размерность и сложность структуры общей задачи управления такой специфической ОТС, как АСУ КА делают практически невозможной разработку единого алгоритма для оценивания показателей целевых и ИТВ. Сложность определяется составом подсистем и элементов АСУ КА, спецификой связей между ними, которые, в свою очередь, зависят от целевого аспекта функционирования космической системы.

Разрешить сложность возможно за счет функционально-временной декомпозиции системы управления ОТС, которую необходимо решать на основе программно-целевого подхода, обеспечивающего строгую ориентацию всех звеньев сложной системы управления на достижение конечных целей функционирования. Функциональная декомпозиция общей задачи управления ОТС при условии, что будут выполнены требования по поддержанию готовности системы к применению, высокой оперативности и надежности в выполнении задач целевого применения ОТС, может быть произведена разбиением всего комплекса задач анализа процесса функционирования и принятия решения по управлению и применению системы на два класса:

— задачи управления целевым применением ОТС;

— задачи технологического управления подсистемами и системой в целом.

При этом, несмотря на функциональное разделение, необходимо помнить, что наиболее полные и достоверные оценки можно получить, учитывая логико-целевую и логико-функциональную взаимосвязь между задачами обоих классов. Говоря о временной декомпозиции общей задачи управления (оценивания целевых и ИТВ) ОТС и учитывая, что наборы управляющих воздействий характеризуются большой размерностью, можно утверждать: задача анализа и оценивания должна быть выделена как предваряющая процесс управления применением ОТС. Эта задача является задачей оценивания возможностей, результаты решения которой позволяли бы с достаточным основанием утверждать о структурных, пространственно-временных, информационно-технологических и технических возможностях системы, являющихся исходными данными и ограничениями при решении задачи управления. Временных этапов управления обычно выделяют четыре:

— перспективное планирование;

— долгосрочное планирование;

— оперативное планирование;

— оперативное управление.

Перед решением задач приведенных этапов следует решать задачу оценивания возможностей ОТС.

Исследование любой системы управления, как показывает опыт и соответствующий анализ

рассматриваемой проблемы оценивания возможностей, необходимо проводить на базе функционально-целевых причинно-следственных моделей, содержащих информацию о причинно-следственных отношениях между переменными системы и системной информацией о функционально-целевых свойствах топологии и параметров системы. В общем случае при исследовании топологически сложной системы управления в результате концептуального определения системных функционально-целевых свойств топологии структуры и параметров системы становится возможным проведение всестороннего анализа сложных ОТС.

Принцип многоуровневой функционально-целевой и причинно-следственной интеграции лежит в основе формирования сложной системы управления и соответствующего представления ее в виде множества моделей различного уровня интеграции. Интегративно-системная модель системы управления может быть представлена совокупностью моделей:

$$M_{IS} = \langle M_V, M_S, M_{SV} \rangle$$

В этом выражении:

1) $M_V = \langle M_{V_1}, M_{V_2} \rangle$ — модель воздействия «внешней среды» на элементы структуры системы управления, которая может быть определена при наличии априорной информации, полученной в результате исследований «внешней среды», либо же частично или полностью не определена. В последних двух случаях априорная информация о внешней среде на входе системы управления должна быть частично или полностью доопределена за счет выбора типовых моделей воздействия, наиболее полно отвечающих условиям функционирования и целям исследования системы управления. Модели воздействия «внешней среды представлены:

— M_{V_1} — модель воздействия «внешней среды» на элементы организационной структуры;

— M_{V_2} — модель воздействия «внешней среды» на элементы технической структуры;

2) $M_{SV} = \langle M_{SV_1}, M_{SV_2} \rangle$ — модель связи «внешней среды» с входом системы управления, которая устанавливает отношения между множеством независимых переменных модели M_V — «внешней среды» с множеством переменных модели M_S — самой системы управления;

3) $M_S = \langle M_{S_1}, M_{S_2} \rangle$ — причинно-следственная модель самой системы управления S устанавливает отношения на множестве переменных системы и может иметь различную степень детализации топологии в зависимости от того, какое число переменных включаются в модель M_S.

Оценивание возможностей ОТС в любом случае может быть сведено к оценке возможностей по использованию ресурсов для достижения генеральной (глобальной) цели. Для этого необходимо определить систему показателей, характеризующую состояние системы и элементов по достижению основной цели (подцелей). В свою очередь, показатели должны отражать расход ресурсов, которые приведут к достижению цели, или их недостаток, вследствие чего цель достигнута не будет.

Необходимость оценивания возможностей ОТС приводит к необходимости оценивания возможностей составляющих ее видов обеспечения, в частности, возможностей организационного [организационной структуры (ОС)] и технического [технической структуры (ТС)] обеспечения, и выделения соответствующих им частных показателей.

На ТС могут быть получены и оценены следующие показатели ИТВ ОТС.

– пропускная способность контуров управления, в частности контура по приему и обработке различных типов информации;

— показатели загрузки технических средств;

— показатели оперативности выполнения операций;

— показатели интенсивности информационных потоков.

Рассматривая организационную структуру, можно определить следующие показатели:

— производительность обслуживающего персонала (пропускную способность);

— равномерность загрузки различных коллективов и подразделений;

— показатели оперативности выполнения технологических операций.

Предельные значения возможностей, которые могут быть достигнуты, определяются исходя из тактико-технических и конструктивных характеристик средств подсистем ОТС, приводимых в технической документации, а также при анализе руководящих документов, определяющих порядок работы в конкретной ОТС.

Полученные в результате исследования оценки показателей ИТВ ОТС легко сравнить с предельными и получить оценку степени близости к ним. Полученные на приведенном комплексе моделей показатели позволят на основании приведенной выше аналитической зависимости получить значение показателей целевых возможностей ОТС. Исходя из их оценок по данному показателю, существует возможность получения рекомендаций с целью улучшения как структурного построения АСУ КА КС, так и ее функционального использования.

Для проведения исследований требуется разработка имитационной системы. Обращаясь к приведенной выше схеме исследования, отметим, что решать задачу оперативного анализа функционирования подсистем ОТС следует как многоэтапную:

— на первом этапе определяются и оцениваются структурные возможности системы на основе нечетко-возможностного подхода, причем оценивается как ОС, так и ТС;

— на втором этапе оцениваются возможности технической структуры с использованием причинно-следственных моделей системной динамики (динамические модели операций и потоковые модели передачи информации при выполнении этих операций);

— на третьем этапе оценивается организационная структура с использованием имитационных моделей вследствие сложности формализации отдельных моментов функционирования элементов ОС;

— на четвертом этапе, исходя из полученных оценок для различных подсистем ОТС, могут быть получены оценки целевых возможностей ОТС и возможно проведение кластеризации для различных видов структурного построения ОТС с целью уменьшения размерности при дальнейшем решении приведенной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем / Б. В. Москвин, Е. П. Михайлов, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Известия вузов. Приборостроение. — 2006. — № 11. — С. 7–12.

2. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / — М.: Наука, 2006. — 410 с.

А. С. Гузарев
ПАО «Интелтех»

МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВСТРАИВАЕМЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ X86–64 ПРОЦЕССОРОВ

АННОТАЦИЯ: В данной статье представлен новый метод расчета производительности процессоров на основе характеристик указываемых производителем и определяемых показателей запускаемых на системе приложений. Метод предназначен для оценки встраиваемых вычислительных модулей на основе процессоров с архитектурами x86 и x86–64.

Под встраиваемыми системами обычно понимают набор аппаратных средств, которые применяются для работы в составе какой-либо другой системы [1]. Применяемыми аппаратными средствами, как правило, являются вычислительные модули на базе различных процессоров. Наиболее часто применяются архитектуры x86, x86–64 и ARM, в данной статье будут рассмотрены только первые две архитектуры.

Встраиваемые системы применяются для решения задач управления, обработки сигналов поступающих с датчиков, обработки мультимедийных данных и других задачах. При выборе модуля под конкретные задачиинтеграторы системориентируются, прежде всего, на состав необходимых интерфейсов и производительность. Производительность процессора показывает количество операций, которые он может выполнить за единицу времени [2]. Основное требование к производительности — быстродействие модуля должно быть достаточным для выполнения заданного набора команд за отведенное время. Основными единицами измерения производительности являются MIPS [2], показывающая число миллионов выполненных операций в секунду, и FLOPS [3], показывающая число выполненных операций с плавающей запятой в секунду. В настоящее время часто используются смеси операций и бенчмарки [2]. Бенчмарк — это компьютерная программа, содержащая заранее записанные команды и позволяющая измерять время выполнения. В отличие от смеси операций, бенчмарки создаются на основе пользовательских приложений, например, архивации или обработки видео. Для проведения оценки производительности вычислительного модуля с использованием бенчмарка или смеси операций необходимо проводить натурные испытания с реально существующими модулями. При создании встраиваемой системы не всегда есть возможность проведения натурных испытаний, поэтому возникает задача разработки метода расчетной оценки встраиваемых модулей.

Поскольку все операции выполняются процессором, то именно этот объект встраиваемого модуля будет рассматривается на предмет измерения быстродействия. Смеси операций и бенчмарки позволяют оценить быстродействие системы при выполнении задачи часто сильно отличающей от задачи выполняемой встраиваемой системой. Это обстоятельство может вызвать неточности в оценке, поэтому эффективнее будет оценивать программное обеспечение, которое будет запускаться на этой системе. Рассматривая вычислительную систему и запущенную на ней программу, можно выделить следующие факторы, влияющие на производительность процессора:

1. Скорость обработки команд процессором.
2. Быстродействие памяти
3. Способность программы использовать все ресурсы процессора.

Создание метода оценки производительности процессора, учитывающего перечисленные факторы, нужно определить составные части вычислительной системы до необходимого уровня детализации и задать связи между ними.

В рамках работы над данной статьей была составлена обобщенная схема вычислительного модуля, схема представлена на рис.1.

Обобщенная схема содержит процессор, оперативную память и запускаемые программы. Жесткий диск отсутствует, поскольку в современных системах он не влияет на производительность, более подробно этот вопрос будет освящен при рассмотрении информации хранимой в оперативной памяти. Подсистема ввода-вывода не рассматривается, так как она работает гораздо медленнее процессора и не является «узким местом» при выполнении различных операций.

Основным элементом представленной схемы является процессор. Компьютерный процессор представляет собой микросхему, которая отвечает за выполнение всех вычислительных и управляющих операций. Перед выполнением любой программы ее код загружается в оперативную память. Далее команды начиная с первой передаются в процессор, где выполняется операция, соответствующая принятой команде. Результат операции либо остается в процессоре, либо записывается в оперативную память. Последовательность указанных действий называется машинным циклом [2, 3]. Главным элементом процессора является вычислительное ядро, от которого напрямую зависит производительность вычислительной системы. Для увеличения производительности разработчики процессоров либо увеличивают тактовую частоту $P_{к\,2}[ош]$, либо увеличивают количество ядер $P_{к\,4}[ош]$. Превышение частотного потолка приводит к нестабильной работе процессора [4]. Поскольку бесконечно увеличивать тактовую частоту невозможно, увеличивается количество ядер. При добавлении вычислительных ядер увеличивается площадь, занимаемая процессором и повышается энергопотребление. Таким образом, производительность процессора напрямую зависит от частоты и количества ядер.

Равномерная загрузка ядер процессора зависит от распараллеливания алгоритма на потоки выполнения в многопоточных приложениях и от возможности операционной системы распределять потоки приложений между ядрами процессора [5]. Поскольку всегда есть последовательная часть алгоритма, которую невозможно распараллелить, то часть ядер будет простаивать. Для определения простаивающей части можно воспользоваться Законом Амдала [5], но для этого придется для всех алгоритмов определить фактор определяющий какая часть не может быть распараллелена. Альтернативным вариантом является использование монитора ресурсов, который есть в составе каждой современной операционной системе. В Windowsподобных операционных системах есть приложения «Монитор ресурсов» и «Диспетчер задач», позволяющие определить насколько загружен каждое из ядер процессора

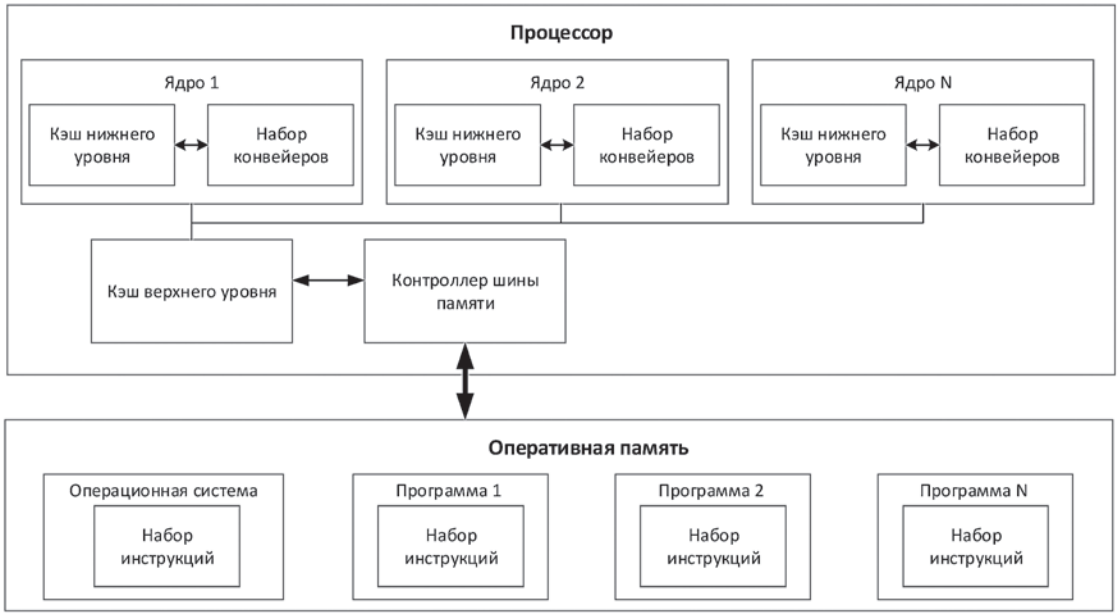

Рис. 1. Обобщенная схема вычислительного модуля

[6]. В Windowsподобных операционных системах это так же легко определяется системной утилитой top или напрямую через виртуальную файловую систему/proc [7]. Определение простаивающих и работающих ядер целесообразно выполнять посредством инструментов операционной системы. При оценке производительности системы учитываются только те ядра процессора, которые заняты обработкой инструкций $P_{\text{к}}[ош]$. Таком образом, простейшую расчетную оценку производительности процессора $P_{\text{к}}[ош]$ можно рассчитать по формуле:

$$P = f_{cpu} \times N_{core}. \quad (1)$$

Дальнейшее увеличение производительности процессора достигается за счет использования эффективных микроархитектур [3, 4] позволяющих выполнить большее количество операций за один такт. Производители применяют различные методы построения микроархитектуры, среди них можно выделить:

— увеличение размера кэша данных и команд;

— использование многоуровневого вычислительного конвейера;

— декодеры трансляции CISC-команды в одну или несколько RISC-подобных микроопераций;

— многопоточность выполнения команд;

— внедрение новых команд.

Построение расчетной модели, учитывающей все особенности микроархитектуры процессоров, является нецелесообразным ввиду сложности, закрытости технологий и неоднозначности влияния на производительность в различных алгоритмах. Оценку производительности микроархитектуры процессора предлагается оценивать по двум параметрам. Первым параметром является среднее число выполненных за такт команд IPC (InstructionsPerClock) [2–4]. В настоящее время величину IPC или обратную ей CPI (среднее число тактов для выполнения одной команды) можно найти в открытом доступе для большинства современных массовых процессоров.Дополнительным основанием в пользу применения IPC является фирменный анализатор производительности процессоров Intel VTune Performance Analyzer определяющий знание данного параметра.

$$IPC = \frac{1}{\text{CPI}}. \quad (2)$$

Как правило, анализаторы производительности выдают значение IPC для процессора в целом. Поскольку при анализе производительности все ядразадействуются в равной степени, то значение для одного ядра IPC_1 можно получить делением на число ядер в процессоре $N_{core_{\max}}$. Значение IPC_1 удобно использовать по той причине, что количество работающих ядер уже учтено в выражении (1).

$$IPC_1 = \frac{IPC}{N_{core_{\max}}}. \quad (3)$$

Несмотря на все технологии, применяемые в микроархитектуре процессоров, производительность в большой степени зависит от скорости выборки команд и данных из памяти. По этой причине, следующим параметром для оценки производительности микроархитектуры процессора предлагается использовать объем кэш-памяти. Кэш-память размещается на процессорном кристалле и ее скорость гораздо выше оперативной памяти [2, 3]. В кэш-памяти хранятся данные и команды, к которым наиболее часто обращается процессор. Кэш-память имеют несколько уровней, обычно два или три уровня. Первый уровень наименьший по объему и наиболее быстрый по скорости доступа. Производители процессоров часто встраивают первые два уровня в ядра, а третий является общим для всех ядер [4]. При считывании процессором команд или данных из кэш-памяти, происходит обращение к первому уровню.В случае, когда нужной информации в первом уровне нет, происходит обращение на второй уровень и далее по иерархии. Если в кэш-памяти отсутствует запрашиваемая информация, происходит обращение к оперативной памяти, такое явление называется кэш-промахом и вызывает задержки выполнения команд. Поскольку часть общего объема кэш-памяти, предназначенная конкретным ядрам $L_{idle\,\text{кэш}i}$, может пустовать по причине простаивания ядра, необходимо это учитывать при оценке производительности. Размер кэш-памяти, используемой во время работы программ $L_{\text{кэш}}$, можно определить как суммарный объем каш-памяти всех уровней $L_{\text{кэш}_i}$ с вычетом суммарного пустующего объема $L_{idle\,\text{кэш}i}$.

$$L_{\text{кэш}} = \sum_{1}^{n} L_{\text{кэш}_i} - \sum_{1}^{n} L_{idle\,\text{кэш}i}. \quad (4)$$

На этапе включения системы из жесткого диска в оперативную память (ОЗУ) происходит загрузка ядра операционной системы, драйверов, системных программ, которые хранятся до завершения работы [3, 6, 7]. Исполняемые коды пользовательских программ при их запуске тоже загружаются в ОЗУ и вместе с выделенными им областями хранятся до завершения программы пользователем. Поскольку в данной статье рассматриваются только встраиваемые системы, в которых обычно не предполагается работа с большими объемами данных, то после загрузки исполняемого кода в оперативную память жесткий диск не используется и никак не влияет на производительность. Очевидно, что производительность системы может снизить медленная работа памяти, в том случае если данные будут поступать медленно, а процессор будет простаивать в ожидании. Обращение к оперативной памяти происходит каждый раз, когда требуемая информация отсутствует в кэш-памяти. На время обращения к ОЗУ выполнение потока прерывается и в зависимости от реализации микроархитектуры процессор приостанавливается или переключается на выполнение другой нити. Производительность оперативной памяти зависит от пропускной способности памяти и количества тактов, необходимых для выполнения чтения или записи данных. Пропускная способность памяти определяется произведением частоты шины памяти $f_{ОЗУ}$ соединяющей контроллер шины памяти и ОЗУ, на количество бит передаваемых за один такт. Количество передаваемых за такт бит часто называется разрядностью шины S_{bus}. При использовании двухканальной памяти разрядность увеличивается вдвое. Следует отметить, согласно тестированию производительности, опубликованным изданием THG[8], разница в производительности при использовании одноканальной и двухканальной памяти мала, а в ряде операции отсутствует, вследствие этого предложено при оценке производительности процессора учитывать разрядность шины без учета количества каналов памяти ОЗУ. Каждая операция работы с памятью требует своего определенного количества тактов, все эти задержки сведены производителями ОЗУ в общую совокупность, которая называется «системой триммингов». При оценке производительности из «системы триммингов» предлагается учитывать только одно значение t_{RAS}. Значение t_{RAS} всегда является самым большим, поскольку содержит задержку на выполнение следующих операций [3]:

1) выбор строки строку в банке памяти с помощью команды ACTIVATE;

2) чтения данных командой READ;

3) считывания данных, поступающих на внешнюю шину данных микросхемы.

Низкая тактовая частота памяти может привести к простою ядер процессора, слишком большая частота памяти приводит к тому, что ядра не успевают обрабатывать поступающ информацию и подобное увеличение частоты не увеличит производительность. Существует несколько спецификаций модулей памяти (DDR, DDR2, DDR3 и др.), в которых определены тактовые частоты, энергопотребление и другие параметры. Разработка каждого процессора ведется с поддержкой определенной спецификации памяти, что гарантирует возможность работы с ОЗУ на максимальной таковой частоте $f_{ОЗУ_{max}}$.

При оценке производительности можно учитывать разницу между максимально допустимой частотой шины памяти, заложенной в процессоре, и частотой оперативной памяти в рассматриваемой системе. Таким образом, производительность оперативной памяти $P_{ОЗУ}$ можно оценить следующим выражением:

$$P_{ОЗУ} = \frac{f_{ОЗУ} \times S_{bus}}{t_{RAS} \times (f_{ОЗУ_{max}} - f_{ОЗУ})}. \qquad (5)$$

В алгоритмах программ часто требуется с большим объемом данных провести одинаковую операцию. Такая ситуация типична при воспроизведении мультимедийных файлов, которые представляют собой массив однородных данных с заголовком. При помощи SIMD-инструкций [3, 9] можно за один такт выполнить одинаковый набор операций над несколькими числами, записанными в одном регистре, и таким образом увеличить производительность. Для обеспечения такого режима работы необходима компиляция программы с вызовами SIMD-инструкций, а так же поддержка процессором в виде дополнительных инструкций и регистров. В настоящее время производителями процессоров разработаны несколько наборов инструкций, таких как MMX, SSE, 3DNow!, AVX и другие [9]. Эффективность применения таких инструкций зависит от наличия необходимых команд в SIMD-наборе, периодичности их вы-

зова в алгоритме и размера SIMD-регистров S_{SIMD}. При наличии циклов и подпрограмм в разрабатываемых приложениях достаточно сложно оценить количество SIMD-вызовов без автоматизации, вместо этого предлагается использовать весовой коэффициент λ_{SIMD}. Целесообразным является выбор λ_{SIMD} на основе публикаций со сравнениями прироста производительности при использовании различных SIMD-инструкций для выполнения различных задач.

Из неучтенных факторов, влияющих на производительность системы, можно выделить количество кэш-промахов $N_{\text{кэш промах}}$, возникающих при работе приложения. Как говорилось ранее, кэш-промахи вызывают приостановление выполнения нити программы до получения необходимых данных или команд из ОЗУ, что снижает производительность. Время передачи значений в регистры ядра из кэш-памяти занимает несколько тактов, а время передачи из оперативной памяти — несколько десятков тактов. Можно дополнить выражение (1) всеми перечисленными параметрами системы, повышающими и понижающими производительность:

$$P = \frac{B}{N_{\text{кэш промах}}}, \qquad (6)$$

$$B = f_{cpu} \times N_{core} \times IPC_1 \times \left(L_{\text{кэш}} \cdot \lambda_{\text{кэш}}\right) \times \times \left(P_{\text{ОЗУ}} \cdot \lambda_{\text{ОЗУ}}\right) \times \left(S_{SIMD} \cdot \lambda_{SIMD}\right),$$

где $\lambda_{\text{кэш}}$ и $\lambda_{\text{ОЗУ}}$ весовые коэффициенты зависимости производительности от размера кэш-памяти и производительности оперативной памяти.

Весовые коэффициенты $\lambda_{\text{кэш}}$, $\lambda_{\text{ОЗУ}}$ и λ_{SIMD} должны удовлетворять условию $\lambda < 1$. Как правило, каждый из указанных коэффициентов показывает прирост производительности 5–20 %, конкретные значения предлагается выбирать на основе публикаций информационно-технических изданий о тестировании производительности различных систем.

Таким образом, полученное выражение позволяет выполнить расчет оценки производительности процессора для встраиваемой системы. Входными данными являются сведения о процессоре и оперативной памяти, указываемые производителями в открытом доступе, показатели запускаемой программы, определяемые входящими в состав операционной системы средствами мониторинга. Разработанный метод позволяет оценить производительность вычислительного модуля без использования макетов или опытных образцов, что делает метод полезным при создании и интеграции встраиваемых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокин А.** Промышленные компьютеры для встраиваемых систем. Журнал СТА №1, 2011.

2. **Гуров В. В.** Архитектура микропроцессоров: Учебное пособие / В.В. Гуров — М.: Интернет — Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.

3. Архитектура компьютера. Таненбаум Э. 6-е изд. — СПб.: 2016.

4. Методы увеличения вычислительной производительности [Электронный ресурс].iXBT.com, 27 июля 2009 г. URL: http://www.ixbt.com/cpu/cpuspeed.shtml (дата обращения: 07.05.2016).

5. **Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.** Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2008.

6. **Станек Р.** Windows Server 2008. Справочник администратора. — БХВ-Петербург: 2008.

7. **Немет Э., Снайдер Г., Хейн Т.** Unix и Linux. Руководство системного администратора. — Вильямс: 2012.

8. Параллельные вычисления, часть II. Число каналов памяти и массивы RAID [Электронный ресурс]. Редакция THG, 27 октября 2007. URL: http://www.thg.ru/mainboard/dual_channel_raid_benchmark/print.html (дата обращения: 14.05.2016).

9. The significance of SIMD, SSE and. AVX. — Intel Compiler Labs. Software and Services Group — 2010.

А.Н. Дяченко
ПАО «Интелтех»

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ И МЕТОДЫ ИХ РАЗРАБОТКИ

АННОТАЦИЯ. Рассматриваются вопросы, связанные с применением АНПА и разработкой их подсистем. Представлен вариант схемы объединения подсистем аппарата и возможное ее расширение при переходе от одиночного применения АНПА к выполнению заданий в составе группы. Рассмотрен подход к разработке управляющих и исполнительных подсистем АНПА.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономные необитаемые подводные аппараты, группировка АНПА, многоагентные системы, разработка систем управления.

Введение

Развитие технологий, обеспечивающее увеличение производительности вычислительных систем в совокупности со снижением количества потребляемой ими энергии и их габаритов, стимулирует разработку автономных роботов, в частности автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Одним из преимуществ аппаратов подобного класса, как известно, является возможность длительной работы в сложной окружающей обстановке, при сведенном к минимуму участии человека в процессе выполнения задания.

Предпосылки к применению группировок АНПА

Обобщая список задач, эффективность решения которых возможно повысить за счет применения АНПА, можно свести его к таким группам как задачи поиска объекта и задачи воздействия на объект поиска. Переход между обозначенными группами задач требует принятия решения, в выработке которого, в общем случае, должен участвовать человек. В ряде случаев, с учетом наличия дополнительных требований и ограничений на процессы выполнения задания (скрытности, непрерывности воздействия на объект и т. п.), решение поставленных задач одиночным АНПА, может быть неэффективно, либо невозможно, в том числе из-за повышенных требований к характеристикам процесса управления.

Из перечня характеристик процесса управления, представленного в [1], можно выделить как минимум две: непрерывность и обоснованность, на которые в немалой степени оказывает влияние обеспечение связи между АНПА и управляющим объектом. Обоснованность управления зависит и от полноты информации об окружающей обстановке. Ограниченные возможности технических средств одиночного АНПА, вероятнее всего, будут отрицательно сказываться на указанных характеристиках.

Формирование группировки АНПА представляется доступным способом преодоления возможных ограничений. В этом случае между участниками группы распределяются задачи, решение которых обеспечивает необходимый уровень характеристик в целом для группировки. Использование полностью идентичных, либо специализированных под конкретные задачи аппаратов должно при этом определяться в соответствии со спецификой применения группировки.

Структурная схема АНПА

Рассматривая АНПА как сложную систему, в ней можно выделить ряд подсистем:

— управляющая подсистема (решение задач функционального назначения);

— подсистема управления движением и навигацией;

— подсистема контроля и диагностики;

— подсистема связи;

— подсистема освещения обстановки;

— подсистема энергообеспечения;

— подсистемы управления полезными нагрузками.

На рисунке 1 изображен возможный вариант организации взаимодействия между перечисленными подсистемами АНПА.

Управляющая подсистема должна реализовывать набор алгоритмов, направленных на достижение целей применения АНПА. Она взаимодействует с остальными подсистемами, формируя управляющие воздействия (командную информацию), и обрабатывая информацию функционального назначения от подсистем, такую как: текущие координаты от подсистемы управления движением и навигацией, принятую по каналам связи информацию от подсистемы связи, и т. п. Подсистемы формируют информацию о своем техническом состоянии, которая посредством подсистемы контроля и диагностики также доводится до управляющей подсистемы для применения в процессе выработки командной информации.

Реализация рассмотренного варианта в общем случае предполагает объединение отдельных компонентов посредством организации локальной вычислительной сети, при этом возможно достижение устойчивого взаимодействия подсистем, в частности, применением проводных сетевых решений.

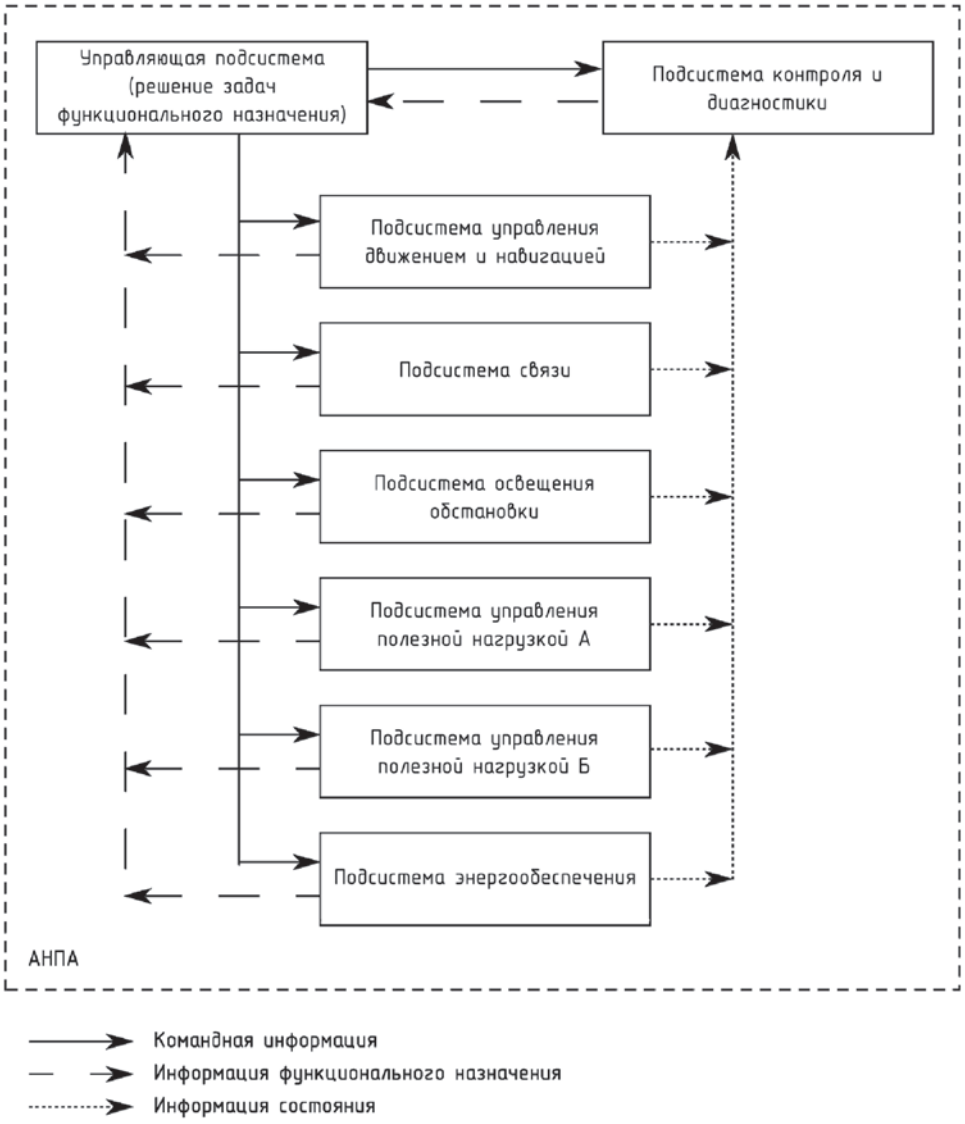

Рис. 1. Организация взаимодействия между подсистемами АНПА (вариант)

Расширение структурной схемы АНПА при формировании группировки

Не исключая сложности с объединением подсистем в рамках одного аппарата, расширение областей применения АНПА за счет создания группировок требует решения задачи по управлению отдельными единицами в процессе достижения общей цели.

В процессе управления группировкой важным вопросом является организация связи между единицами при решении таких задач, как:

— обеспечение связи с управляющим объектом (формировании цепочки ретрансля—торов в группировке);

— обмен информацией подсистемы освещения обстановки;

— координирование действий группировки.

Другой не менее важной задачей является организация управления порядком (строем) группировки в процессе перемещения, учитывая неблагоприятные факторы окружающей обстановки (течения, рельеф дна, препятствия и пр.). В случае неидеальной связи между единицами группировки необходимо реализовывать комбинированный вариант централизованного/децентрализованного управления движением (подготовка задания, указание точек размещения, контроль положения).

На рисунке 2 приведен вариант расширения взаимодействия подсистем в группировке АНПА.

Сохранение автономности действия группировки предполагает объединение в общую структуру управляющих подсистем каждого АНПА, входящего в группировку для обеспечения согласованного управления. Динамически изменяющаяся обстановка и сложная структура в группировке требует непрерывной адаптации подсистемы связи, которая также должна рассматриваться как распределенная.

Публикации в области теоретических исследований

В целом группировку АНПА необходимо рассматривать как сложную сетевую динамическую систему. Основываясь на информации об увеличении количества публикаций, содержащих ключевые слова по тематике [2], интерес к данному направлению возрастает.

Изучением общих законов функционирования систем занимается Теория систем [3]. В качестве основного математического аппарата при решении вопросов управления используется Теория управления, связанная с исследованием динамических систем [4].Одним из перспективных направлений для систем со сложной организацией является применение адаптивных систем управления, классифицируемых, в числе прочих, по типу взаимодействия элементов выделяя многоагентные системы [5].

Многоагентные системы рассматривают в качестве основной модели при решении проблем коллективного поведения и группового управления [6].

Стоит отметить, что мощный математический аппарат Теории управления, при попытках его практического применения, сталкивается с проблемами реализации,для решения которых предлагаются различные подходы [7, 8].

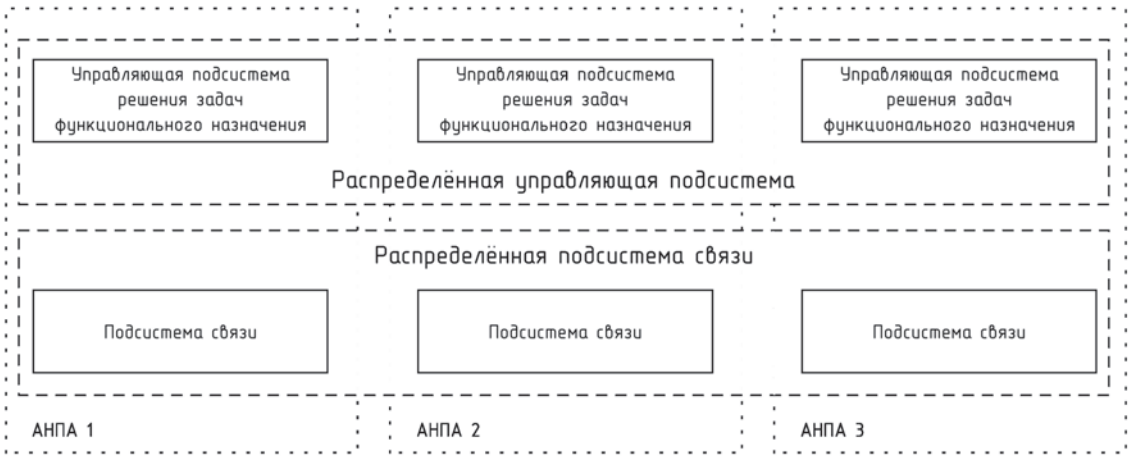

Рис. 2. Расширение взаимодействия подсистем в группировке АНПА (вариант)

Разработка управляющих и исполнительных подсистем

Разработка системы управления АНПА, в том числе решающей задачи по управлению группировкой, начинается с выбора моделей воздействия окружающей среды (на связную компоненту, на компоненту управления движением и т. п.). Приоритет при выборе следует отдавать моделям, имеющим эмпирическое подтверждение корректности. Этап основной разработки предпочтительнее выполнять в рамках имитационного стенда, при этом необходима разработка моделей, описывающих исполнительные устройства и датчики обратной связи.

На рисунке 3 представлена обобщенная схема, применение которой позволяет проводить отработку алгоритмов управления с возможностью имитации работы в «реальных» условиях.

Проектируемая подсистема может представлять собой как программный, так и программно-аппаратный комплекс, который предполагается применять для решения поставленных задач. Основным условием является использование «штатных» интерфейсов подключения устройств в разрабатываемом элементе АНПА, таким образом, чтобы функционирование на испытательном стенде не отличалось от использования в реальных условиях.

В имитационном комплексе реализуются модели исполнительных устройств и датчиков обратной связи, позволяющие имитировать поведение реальных устройств, а также реализуют интерфейсы с моделью среды, обеспечивающие передачу управляющих воздействий и получение датчиками обратной связи информации о среде. В модель среды загружаются исходные данные для проведения моделирования. Данные для моделирования можно загружать и в соответствующие модели исполнительных устройств и датчиков для проведения проверок нештатного обмена.

Возможно включение в имитационный комплекс нескольких единиц устройств, для обеспечения моделирования поведения группировки, при этом используется общая модель среды.

Применение испытательного стенда также позволяет выполнять автоматическое тестирование работоспособности и корректности функционирования разрабатываемых элементов в случае внесения изменений в алгоритмы или в их конструкцию.

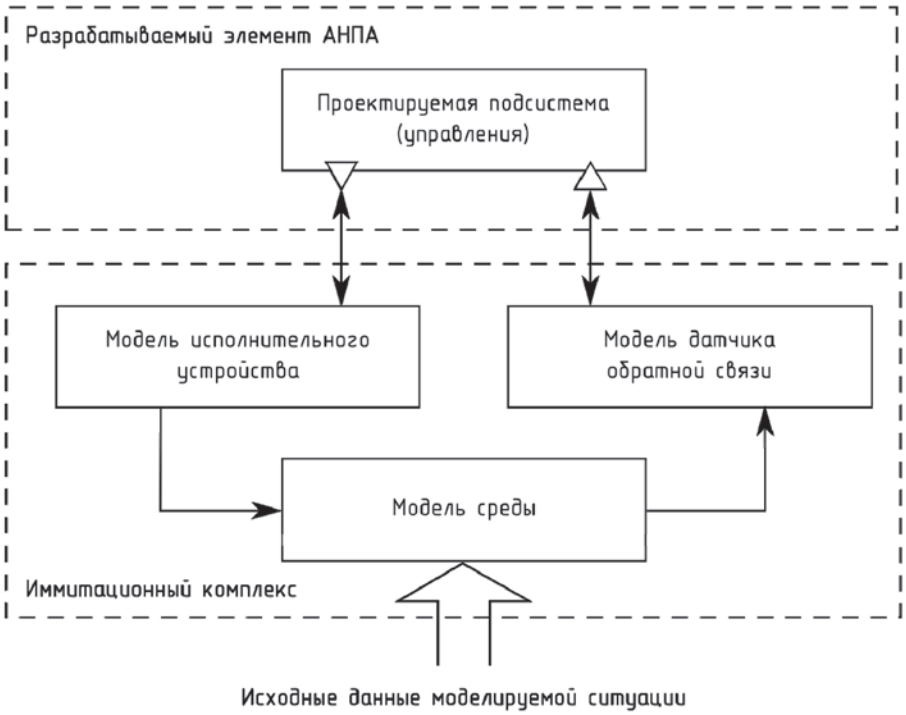

Рис. 3. Комплекс для отработки алгоритмов функционирования разрабатываемой системы управления

Заключение

Ограничения на применение одиночных АНПА могут быть преодолены за счет формирования группировки, в которой задачи распределяются между ее участниками. Для применения в составе группы, проектирование и разработку ряда подсистем АНПА необходимо выполнять с учетом их распределенного характера. Одной из областей исследований, применимой в разработках по обозначенной тематике являются работы в области многоагентных адаптивных систем управления.

Применение рассмотренного метода при разработке управляющих и исполнительных подсистем АНПА способствует достижению таких целей как снижение стоимости, сокращение времени и сложности работ, повышения качества программного и аппаратного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Директоров Н. Ф., Дорошенко В. И., Житов Ю. И., Завалишин А.А., Мирошников В. И., Мясников О. Г., Нероба Г. С., Ничников А. В., Соловьев И. В., Шпак В. Ф.,** Автоматизация управления и связь в ВМФ./ Под общ. ред. Ю.М. Кононова. Изд. 2-е. — СПб.: «Элмор», 2001. — 512 с.

2. **Фрадков А. Л.** Управление синхронизацией в сетевых динамических системах // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2011. - №4 (5). — С. 2548–2550

3. **Чернышов В. Н., Чернышов А. В.** Теория систем и системный анализ : учеб. пособие // Тамбов: ТГТУ. — 2008. — 96 с.

4. **Терехов В. А.** Управление в динамических системах: Современные задачи и подходы // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. Раздел I. Проблема самоорганизации и научное познание.–2011. — №6. — С. 20–29

5. **Жмурко Д. Ю.** Понятие, сущность и классификация адаптивного управления системами с организационной сложностью // Научный журнал КубГАУ.–2013. — №90 (06).–С. 968–986

6. **Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.** Прикладные многоагентные системы группового управления// Искусственный интеллект и принятие решений.– 2009. — №2. — С. 3–24

7. **Бобцов А. А., Холунин С. А.** Развитие методов робастного управления в задачах адаптации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.–2002. — №6. — С. 229–234.

8. **Подвальный С. Л., Васильев Е. М.** Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы// Управление большими системами. Выпуск 48. Системный анализ. — 2014. — С. 6–58

А.М. Жебрун
ПАО «Интелтех»

Д.С. Сантус
ПАО «Интелтех»

С.Л. Чибышев
ПАО «Интелтех»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ РАДИОЛИНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ДОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ДО ГЛОБАЛЬНО УДАЛЕННЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Введение

Результаты военно-технической деятельности в области совершенствования средств и систем управления (связи) Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ), возможности научно-производственного потенциала оборонно-промышленного комплекса России и научных достижений иностранных государств определяют дальнейшее развитие и совершенствование системы связи ВС РФ как важнейшего элемента государственной и военной инфраструктуры по применению войск и оружия [1].

Улучшение и расширение системы связи ВС РФ требует вложения значительного объема временных и финансовых ресурсов для модернизации уже имеющихся технической основы системы связи и создание новых объектов связи, распределенных по территории страны.

Система связи ВС РФ должна обладать высокими показателями по устойчивости, достоверности, своевременности и безопасности доведения информации в заданный район земного пространства независимо от времени суток и состояния среды распространения, изменения структуры системы, а также обеспечивать возможность взаимодействия с существующими системами электросвязи страны [2].

В современных условиях особую важность приобретает гарантированное доведение информации (команд управления) до глобально удаленных подвижных объектов (ГУПО), находящихся в акватории мирового океана. По состоянию на данный момент, действующие на территории страны системы доведения информации до ГУПО обеспечивают недостаточную вероятность своевременного доведения информации в условиях воздействия преднамеренных помех и повышенной ионизации ионосферы. Исходя из требований к комплексам связи специального назначения, первоочередными задачами должны являться:

— увеличение значений вероятности своевременного доведения информации до ГУПО в различных условиях воздействия;

— повышение устойчивости управления ГУПО путем оперативного наращивания или восстановления действующих систем за счет применения мобильных быстроразвертываемых средств;

— расширение возможностей системы боевого управления и доведения информации до ГУПО.

Целью статьи является рассмотрение принципа построения комплексной радиолинии (КР), представляющей собой систему доведения информации до ГУПО и базирующуюся на комплексных методах управления доведением информации.

Основной принцип построения комплексной радиолинии

В общем случае КР должна включать в свой состав:

— пункт управления (ПУ);

— сеть обмена данными (СОД);

— автоматизированную систему управления (АСУ);

— передающие радиоцентра (ПДРЦ).

В свою очередь, каждый ПДРЦ должен состоять из:

— комплекса средств автоматизации и управления (КСАУ);

— устройств формирования структуры радиолинии (УФС);

— комплекса технических средств единого времени (КТС ЕВ);

— радиопередающих устройств (РПДУ) и антенно-фидерных трактов (АФТ).

Структурная схема КР приведена на рис. 1.

Одним из основных принципов, закладываемых в построение КР, является территориально разнесенная передача информации от объекта, осуществляющего управление в сторону ГУПО. Благодаря высокому уровню развития современных систем автоматизации управления и многоканальных систем передачи и приема информации [3], можно добиться значительного прироста вероятности доведения информации до ГУПО. Это достигается обеспечением возможности параллельной передачи сообщения с использованием нескольких передающих радиоцентров и многоканального приема со сложением принятой информации. Таким образом, даже в случае деградации системы управления (выхода из строя одного или нескольких РПДУ) информация до ГУПО будет доведена сохранившимися РПДУ. Это также справедливо и для наличия преднамеренных помех — существующим и перспективным станциям радиоэлектронного подавления не хватит мощности для подавления сразу нескольких территориально разнесенных РПДУ.

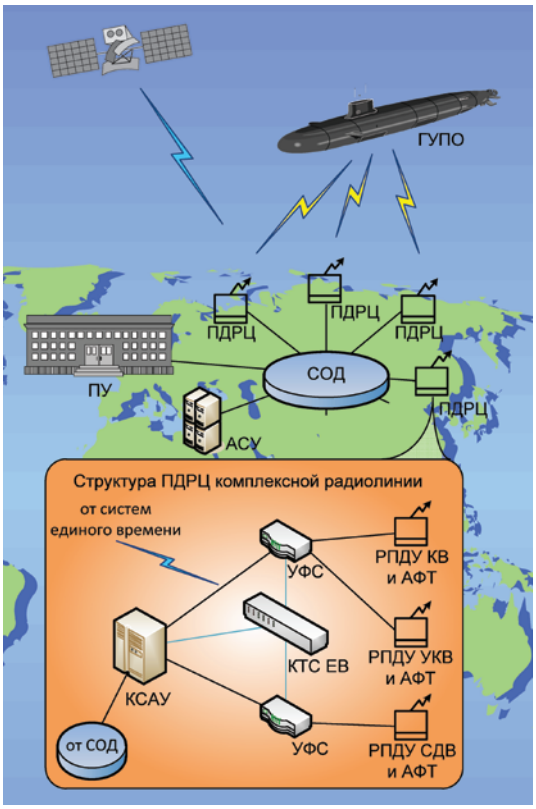

Рис. 1. Структурная схема комплексной радиолинии

Кроме того, применение современных методов передачи информации [4] позволит сократить время, необходимое для осуществления гарантированного доведения информации до ГУПО при сохранении или даже при увеличении вероятности доведения.

Основной принцип работы комплексной радиолинии

АСУ обеспечивает сопряжение между КСАУ через существующую СОД. КСАУ на основании информации от АСУ формирует передаваемое по КР сообщение на доведение до ГУПО, которое состоит из заголовка и текста сообщения. В заголовке передается базовая информация о сообщении, такая как идентификаторы отправителя и получателя, время и дата начала выдачи в эфир, признак получателей, задействованных в радиосети, рабочий ключ псевдослучайного закона перестройки рабочих частот (ППРЧ) для конкретного ГУПО и приоритет. Кроме того, КСАУ должен обеспечивать формирование часто-временной матрицы для каждого конкретного УФС и РПДУ с целью обеспечения смещения опорной рабочей частоты каждого РПДУ. Это делается для исключения возможности взаимного влияния РПДУ, работающих на «одной» частоте.

В случае потери КСАУ управления от АСУ задачи возлагаются на региональный КСАУ, который в этом случае берет на себя задачи по передаче информации между связными ПДРЦ.

При поступлении сообщения на доведение до удаленного подвижного корреспондента УФС формирует очередь передачи, в которой сообщения выдаются на передачу в момент времени, указанный в поле признака начала выдачи. Если поле признака начала выдачи не заполнено, то сообщения выдаются в эфир немедленно при

поступлении, но сообщения с признаком времени выдачи имеют высший приоритет по сравнению с обычными сообщениями и при наступлении назначенного времени любая передача приостанавливается и начинается выдача приоритетной информации.

УФС должно иметь возможность ввода и хранения нескольких рабочих ключей ППРЧ, каждый из которых предназначен для одного конкретного корреспондента или группы корреспондентов, а также возможность управления несколькими РПДУ, работающими на смежных частотах.

В радиоэфир сообщения должны выдаваться с использованием радиосредств СДВ, КВ и УКВ диапазонов волн в режиме изменения рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ).

Прием информации ГУПО должен осуществляться с использованием мегаканальных радиоприемных устройств [3], которые должны обеспечивать одновременный прием сигналов, передаваемых одновременно по нескольким радиолиниям в режиме ППРЧ, их обработку и сложение для повышения вероятности правильного приема информации.

Наращивание КР может осуществляться за счет применения быстроразвертываемых мобильных радиопередающих средств (мобильных ПДРЦ), позволяющих вводить дополнительные передающие радиоцентры, тем самым повышать избыточность сети без проведения дорогостоящих подготовительных работ и работ по капитальному строительству.

Кроме того, предлагается для развития радиопередающих систем использовать РПДУ меньшей излучаемой мощности, но при этом обладающих значительно более простой структурой систем согласования с АФТ и меньшей стоимостью, что позволит значительно увеличить количество радиопередающих радиоцентров.

Оценка эффективности предложенных технических решений

Для совершенствования системы связи ВС РФ предлагается использовать когнитивные радиолинии декаметровых (ДКМВ) и сверхдлинных волн (СДВ), обеспечивающих доведение информации до ГУПО.

В соответствии с [5] наиболее эффективным режимом передачи сообщений является работа в режиме ППРЧ.

Эффективность применения ППРЧ [6] заключается в том, что данный метод передачи сообщений вынуждает систему радиоэлектронного подавления с ограниченной мощностью передатчика распределять спектральную мощность помехи по всему частотному диапазону.

Для выполнения поставленной задачи требуется мегаканальное радиопередающее устройство с возможностью передачи многочастотных сигналов, реализуемое на основе цифрового синтезатора частот [4], в котором сигнал на «выходе» представляет собой сумму гармонических функций с частотами, изменяющимися по псевдослучайному коду. Многочастотный сигнал проходит цифро-аналоговое преобразование, фильтрацию, усиление и согласование с антенной, после чего излучается в эфир.

На приемной стороне необходимо использовать мегаканальное радиоприемное устройство с числом каналов приема, соответствующим числу каналов передачи до 100 тысяч [3], что позволит доводить команды до ГУПО без необходимости знания частоты передачи на приемной стороне.

Для выбора передатчиков в ДКМВ и СДВ диапазонах необходимо учитывать мощность излучения при доведении информации на заданное расстояние.

Обеспечение устойчивого приема на радиотрассах глобальной протяженности можно осуществлять с использованием методики, изложенной в [7], откуда следует, что в ДКМ диапазоне волн на трассах протяженностью до 6 тыс. км и мощностью излучения сигнала Р≈1 кВт диапазон возможных скоростей передачи составляет

$$V_{\min \div \max} \approx 10 \div 150 \text{ кбит/с},$$

что позволяет обеспечить доведение информации до объекта в реальном масштабе времени.

Оперативность доведения информации по СДВ каналу существенно ниже. Например, даже при минимально ожидаемом уровне атмосферных помех скорость передачи для достоверного доведения для $r \approx 6$ тыс. км и $P_c \approx 10$ кВт составит примерно $V \approx 80 \div 90$ бит/с [7].

Таким образом, при использовании ДКМВ радиолинии обеспечивается возможность доведения информации до удаленных объектов при мощности излучения меньшей, чем при использовании СДВ радиолиний, при этом реализуется более высокая скорость передачи.

Однако, преимуществом СДВ является относительная стабильность распространения радиоволн при возмущениях ионосферы, а также существенно меньший коэффициент ослабления напряженности поля при распространении в водной среде, что позволяет обеспечивать прием информации в подводном положении (до 15÷20 м).

Из вышеизложенного 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 информации.

В работе [5] рассмотрен способ эффективной передачи данных с использованием мегаканальных возбудительных устройств. Параллельное излучение элементов сообщения позволяет даже при низкой скорости передачи каждого бита достичь необходимого времени доведения и помехоустойчивости приема сообщения в целом.

При переходе скорости передачи с $V = 500$ бит/с к скорости передачи $V = 1$ бит/с при числе бит в сообщении, равном 100, общее время передачи увеличится с 0,2 с до 100 с. Для сохранения общего времени передачи при одновременном увеличении длительности излучения одного бита возможно использовать мегаканальное передающее устройство. Таким образом, при увеличении числа каналов и уменьшении скорости передачи эффективность радиолинии увеличивается в разы.

Заключение

Из рассмотренных материалов следует, что для доведения информации до ГУПО следует применять СДВ-ДКМВ диапазон, что позволит обеспечить устойчивость с оптимальной мощностью за счет использования мегаканальных передатчиков/приемников, а использование режима ППРЧ позволит получить наибольшую вероятность приема.

Ввод в действие предложенной системы целесообразно осуществлять поэтапно. На первом этапе создания КР предлагается использовать действующие системы передачи информации с доработкой их систем управления в части обеспечения территориально распределенной передачи, а также оснащение ГУПО оборудованием, обеспечивающим мегаканальный прием. Кроме того, на первом этапе предлагается сформировать окончательные технические и конструктивные требования к применяемой устойчивой ППРЧ радиолинии и приступить к ее реализации и внедрению. На втором этапе предлагается модернизация действующих объектов в части перевода их работы на устойчивые ППРЧ радиолинии, а также создание мобильных передающих быстроразвертываемых радиоцентров. На третьем этапе развертывание сети мобильных передающих радиоцентров с устойчивыми ППРЧ радиолиниями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воропаев В. А.** Краткие итоги деятельности Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации // Связь в Вооруженных силах Российской Федерации // 2015. —С. 17–18.

2. **Макаров Н. Е.** Основные направления модернизации системы управления Вооруженных Сил Российской Федерации в современных условиях. http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-7/III/Makarov.pdf.

3. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А.** Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, №1, 2014. — С. 30–37.

4. **Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А.** Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхузкополосных декаметровых радиолиний // Морская радиоэлектроника, №2, 2015. — С. 16–22.

5. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А.** Повышение эффективности функционирования декаметровых радиолиний. // Телекоммуникации и транспорт (T-Comm), №2, 2015. — С. 4–10.

6. **Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А.** Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. // Свое издательство, 2013. — 166 с.

7. **Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.** Обеспечение устойчивого обмена данными с робототехническими комплексами морского базирования // Техника средств связи. 2018. № 4. С. 5-21.

А.М. Зыков
кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

М.А. Ходор
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Ш.И. Шаймухаметов
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Е. И. Свистунов
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СТАТИСТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассматривается малоитерационный метод симметричного шифрования/дешифрования данных и разработанный на его основе криптографический алгоритм (КА). В основу метода положена схема шифрования/дешифрования данных, представляющая собой последовательное выполнение над преобразуемым блоком данных функции шифрования F, инволюции Е и обратной функции F^{-1}. Основное требование, предъявляемое к функции F, заключается в том, что она должна быть обратимой. Функция F^{-1} является обратной для функции F. Функции F и F^{-1} выполняют преобразование блоков данных под управлением ключа K_o, а функция E — под управлением ключа K_1. Ключи K_o и K_1 могут быть получены из одного исходного ключа путем его преобразования. Функции F и F^{-1} реализуются в виде композиции преобразований, для того, чтобы обеспечивать хорошее рассеивание и перемешивание разрядов входного блока и ключа. При этом целесообразно использовать сочетание линейных и нелинейных преобразований. В качестве нелинейных функций чаще всего используют подстановки, сочетаемые с перестановками разрядов, которые являются линейными. Разработанный на основе рассмотренного метода, частный КА обеспечивает высокую скорость преобразования данных для случая шифрования/дешифрования данных 64-разрядными блоками с использованием 80-битного ключа. Для обеспечения высокой стойкости шифрования, функции F и F^{-1} выполняются за четыре итерации. Оценка разработанного симметричного криптоалгоритма шифрования данных на предмет определения зависимости между отдельными наборами его входной и выходной последовательностей проводилась по критерию проверки правдоподобия гипотез χ^2. Кроме этого, были проведены испытания криптоалгоритма на предмет статистической зависимости между различными выборками входного и зашифрованного текста, а также ключа и зашифрованного текста. Во всех испытаниях полученные значения статистики χ^2 принадлежали доверительным интервалам, что позволяет сделать вывод о том, что для разработанного криптоалгоритма зависимость между отдельными наборами входного и зашифрованного текста, а также ключа и зашифрованного текста отсутствует.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защита информации, криптографическое преобразование информации, алгоритм шифрования/дешифрования данных, подстановка, перестановка, ключ.

Введение

Широкое внедрение средств вычислительной техники в системы управления войсками и оружием приводит к необходимости хранения и обработки больших объемов информации. Информация, хранимая в памяти компьютерных систем и передаваемая по каналам связи, подвергается воздействию случайных процессов, а также преднамеренному доступу к ней посторонних лиц. С принятием на вооружение сложных автоматизированных систем управления, использующих большое количество современных вычислительных средств, проблема защиты информации приобретает все большее значение [1, 2].

При этом одной из основных задач защиты информации является скрытие ее от потенциального противника. Вся передаваемая по кана-

лам связи информации должна преобразовываться к виду, не позволяющему раскрыть ее содержание [3].

Эту задачу наилучшим образом решает криптографическое преобразование информации [4, 5]. Высокие скорости передачи данных по каналам связи обуславливают необходимость разработки новых высокоскоростных алгоритмов шифрования.

Малоитерационный метод симметричного шифрования/дешифрования данных

В основу метода положена схема шифрования/дешифрования данных, представляющая последовательное выполнение над преобразуемым блоком функции шифрования F, инволюции E и обратной функции F^{-1}. Такая схема позволяет создавать алгоритмы шифрования/дешифрования данных, обеспечивающие преобразование на каждом шаге шифрования всего обрабатываемого блока.

Любой блочный симметричный КА можно представить в виде подстановки, реализованной при помощи криптографических преобразований. Входными данными такой подстановки является блок открытой информации, а выходными — зашифрованный блок. При дешифровании выполняется обратная подстановка. Следовательно, преобразования, используемые при построении блочных КА, должны быть обратимыми. На рисунке 1 представлена обобщенная схема блочного шифрования/дешифрования данных, которая может быть положена в основу построения высокоскоростных симметричных КА.

Входной блок данных $X = X_o$ подвергается последовательному преобразованию с использованием функций F, E и F^{-1}. В качестве функций F и F^{-1} могут использоваться любые известные функции шифрования или их комбинации. Основное требование, предъявляемое к функции F, заключается в том, что она должна быть обратимой. Функции F и F^{-1} выполняют преобразование блоков данных под управлением ключа K_o, а функция E — под управлением ключа K_1.

Функции F и F^{-1} могут быть реализованы в виде композиции преобразований и должны обеспечивать хорошее рассеивание и перемешивание разрядов входного блока и ключа. Функция E является инволюцией. Ее аргументами являются блок X_1, полученный путем преобразования входного блока с помощью функции F, и ключ K_1.

Ключи K_o и K_1 могут быть получены из одного исходного ключа путем его преобразования.

Для достижения хорошего рассеивания и перемешивания чаще всего используют сочетание линейных и нелинейных преобразований. В качестве нелинейных функций используют подстановки. Для обеспечения хорошего рассеивания и перемешивания подстановки сочетают с перестановки разрядов, которые являются линейными.

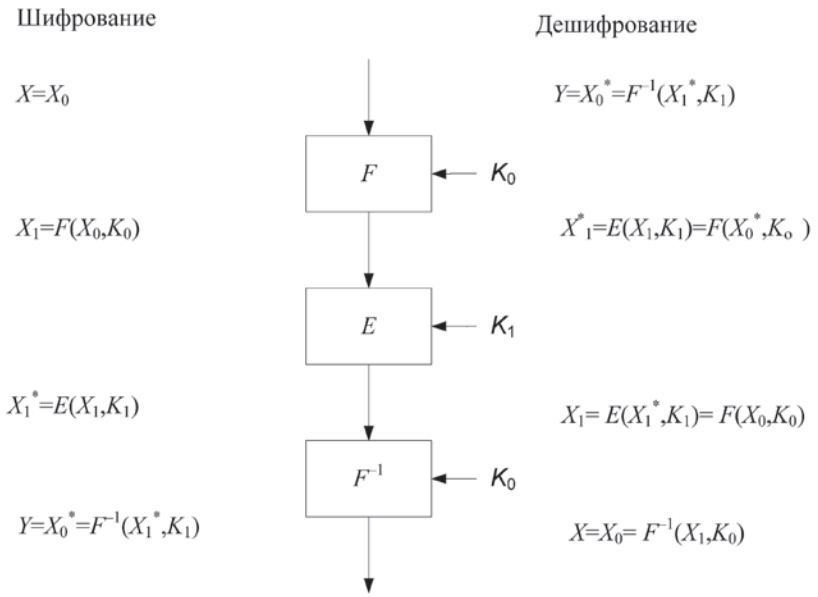

Рис. 1. Обобщенная схема блочного шифрования/дешифрования данных

Алгоритм симметричного шифрования/ дешифрования данных

Разработанный частный КА обеспечивает высокую скорость преобразования данных для случая шифрования/дешифрования данных 64-разрядными блоками с использованием 80-битного ключа.

Прямое и обратное преобразования данных выполняются с использованием функций шифрования $F_i(X_i,K_i)$, $E(X_4,K_4)$ и $F_{i-1}(X_i,K_i)$, где $i = 0,..,3$. При этом функции F_i и F_i^{-1} являются взаимно обратными:

$$F_i\,(F_i^{-1}\,(X_i,\ K_i),K_i) = F_i^{-1}\,(F_i\,(X_i,K_i),K_i) = X_i.$$

Функция E представляет собой инволюцию:

$$E\,(E\,(X_4,K_4),K_4) = X_4.$$

Схема реализации функции F_i представлена на рис. 2. Функция шифрования F_i представляет собой суперпозицию функции перестановки P_i, побайтового суммирования по модулю 256 $\oplus$ и групповой подстановки S_i.

$$F_i(X_i,K_i) = S_i(P_i\,(X_i) \oplus W_i(K_i)).$$

Функция побайтового суммирования по модулю 256 $\oplus$ входного блока с 64-битной частью W_i ключа K_i служит для обеспечения «лавинного эффекта» влияния одного входного бита на все биты выходного блока. Перед суммированием по модулю 256 производится перестановка 4-х битных частей исходного блока.

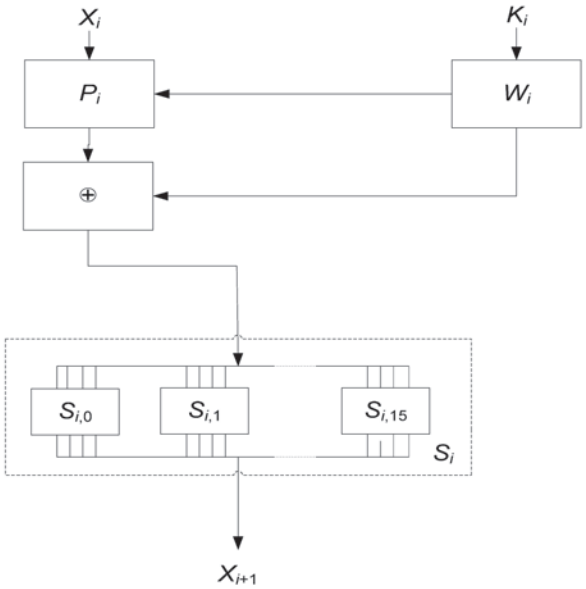

Рис. 2. Схема реализации функции F_i

Функция S_i представляет собой групповую подстановку. Входной 64 разрядный блок разделяется на 16 4-битовых подблоков. Каждая из функций $S_{i,j}$ принимает в качестве входного 4-битовый блок и порождает другой 4-битовый блок.

Схема реализации перестановки Р 4-х битных частей на втором раунде показана на рисунке 3.

Функция шифрования F_i^{-1} (рис. 4) является суперпозицией функции групповой подстановки

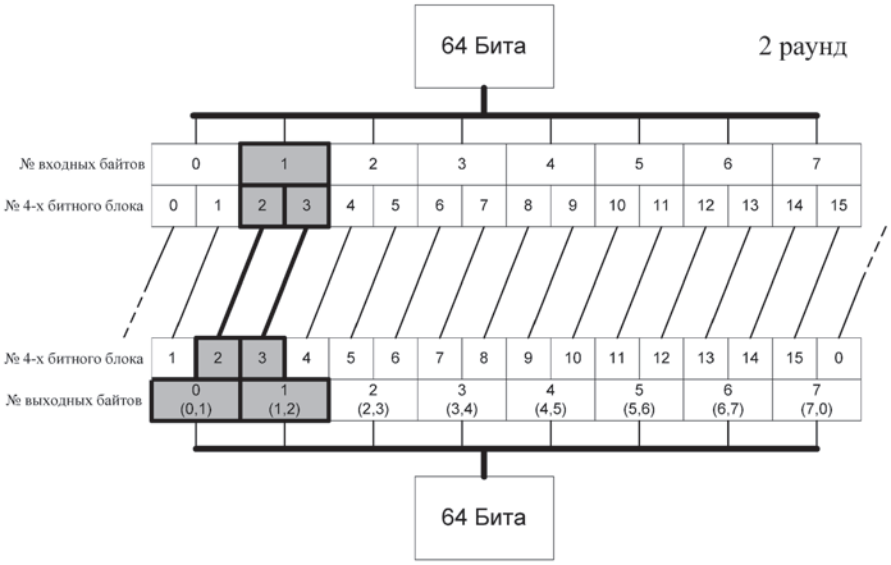

Рис. 3. Схема реализации функции P на втором раунде

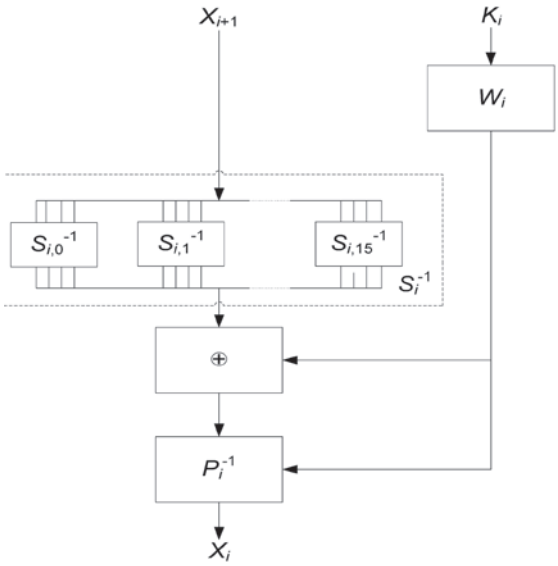

Рис. 4. Схема реализации функции F_i^{-1}

S^{-1}, побайтового вычитания по модулю 256 $\oplus$ и функции P_i^{-1}

$$F^{-1}(X_{i+1}, K_i) = P_i^{-1}(S_i^{-1}(X_{i+1}) \oplus W_i(K_i)),$$

где F_i^{-1}, S_i^{-1} — функции обратные соответственно к P_i и S_i:

$$P_i(P_i^{-1}(X_i)) = P_i^{-1}(P_i(X_i)) = X_i;$$

$$S_i(S_i^{-1}(X_i, Y_i(K_i))) =$$

$$= S_i^{-1}(S_i(X_i, Y_i(K_i))) = X_i.$$

На шестом, седьмом, восьмом цикле (раунде) шифрования после побайтного вычитания по модулю 256 $\oplus$ производится перестановка 4-х битных частей, исходного блока.

На первом и девятом раундах шифрования при реализации функции P_i, P_i^{-1} перестановка 4-х битных частей не производится.

Схема реализации перестановки 4-х битных частей на шестом раунде показана на рис. 5. Инволюция E (рис. 6) представляет суперпозицию функций перестановки P_4, поразрядного суммирования по модулю два $\oplus$, групповой подстановки I, поразрядного суммирования по модулю два $\oplus$ и обратной перестановки P_4^{-1}:

$$E(X_4, K_4) =$$

$$= P_4^{-1}(I(P_4(X_4) \oplus W_4(K_4) \oplus W_4(K_4)),$$

где I — групповая подстановка обладающая свойством инволюции.

Функции W_i принимает блок из 80 битов и порождает блок из 64 битов. Указанная функция производит выбор определенных бит входного блока, путем циклического сдвига на два байта вправо начального 64-битного блока.

Функция I представляет собой групповую подстановку. Входной 64-разрядный блок разделяется на 16 4-битовых подблоков. Каждая из функций I_i принимает в качестве входного 4-битовый блок и порождает другой 4-битовый блок.

Результаты оценки алгоритма

Оценка разработанного симметричного частного криптоалгоритма шифрования данных на предмет определения зависимости между отдельными наборами его входной и выходной последовательностей проводилась по критерию проверки

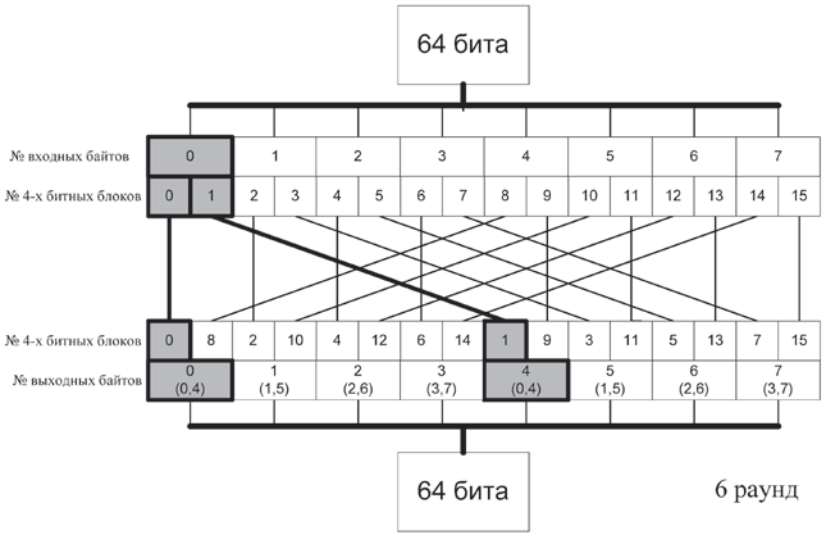

Рис. 5. Схема реализации функции P^{-1} на шестом раунде

правдоподобия гипотез χ^2. Выбор указанного критерия обусловлен в частности тем, что он использовался в ходе оценки эффективности криптоалгоритма DES, проведенной фирмой *I*BM, Национальным бюро стандартов и Управлением национальной безопасности США.

Исходный текст шифруется по выбранному криптоалгоритму и преобразуется в зашифрованный текст. Выбираются небольшие наборы входной и выходной последовательностей размерностью три бита. По результатам независимых испытаний формируется матрица смежности.

Возможны две гипотезы:

H_0 — выходная последовательность не зависит от входной;

H_1 — выходная последовательность зависит от входной.

Выбор между гипотезами H_0 и H_1 осуществляется на основе вычисления статистик χ^2. Вычисленное значение сравнивается с числами из заранее составленных таблиц для распределения χ^2, при значениях доверительного интервала от 1 % до 99 %. Если вычисленное значение попадает в доверительный интервал, то принимается гипотеза H_0, в противном случае — H_1.

Кроме этого, были проведены испытания криптоалгоритма на предмет статистической зависимости между различными другими выборками входного и зашифрованного текста, а также ключа и зашифрованного текста. Во всех испытаниях полученные значения статистики χ^2 принадлежали доверительным интервалам.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для разработанного частного криптоалгоритма зависимость между отдельными наборами входного и зашифрованного текста, а также ключа и зашифрованного текста отсутствует.

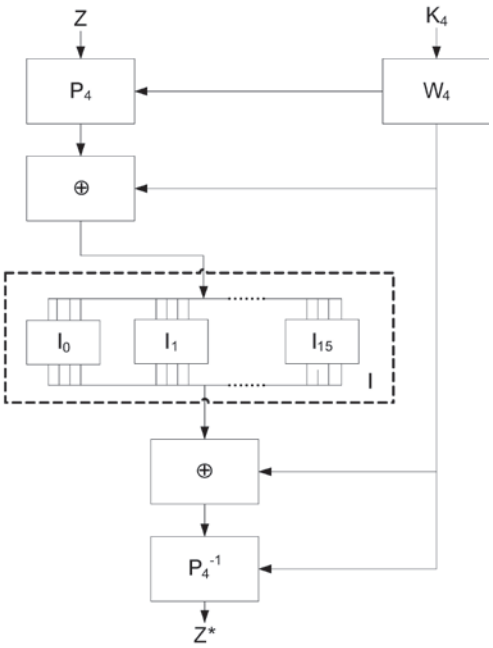

Рис. 6. Схема реализации инволюции *E*

Заключение

Описанный малоитерационный метод симметричного шифрования/дешифрования данных, позволяет разрабатывать криптографические алгоритмы, использующие различные функции шифрования. Разработанный частный криптографический алгоритм использует в качестве функций шифрования классические подстановки и перестановки и обеспечивает высокую скорость преобразования данных для случая шифрования/дешифрования данных 64-разрядными блоками с использованием 80-битного ключа. Рассмотренный алгоритм обладает высокой скоростью шифрования/дешифрования, обусловленной девятью раундами шифрования, и может быть использован при реализации аппаратных и программных средств шифрования данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 27.07.2006 №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

2. **Романец Ю. В., Тимофеев П. А., Шаньгин В. Ф.** Защита информации в компьютерных системах и сетях/ Под ред. В.Ф. Шаньгина. — 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Радио и связь, 2001. — 376 с.: ил.

3. **Петров А. А.** Компьютерная безопасность. Криптографические методы защиты. –М.: ДМК, 2000. — 448 с.: ил.

4. **Панасенко С. П.** Алгоритмы шифрования. Специальный справочник. –СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 576 с.: ил.

5. **Смарт Н.** Криптография. Москва: Техносфера, 2005. 528 с.

И.С. Козин
ПАО «Интелтех»

А.А. Рощин
кандидат технических наук, доцент, ПАО «Интелтех»

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ УГРОЗ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ: Предложен подход к определению критически важной информации военного назначения, критической автоматизированной системы военного назначения, а так же метод построения модели угроз критически важной информации военного назначения, позволяющий подготовить перечень актуальных угроз с учетом степени важности объекта защиты, имеющихся уязвимостей, опасности деструктивных воздействий на характеристики достоверности и подконтрольности.

Введение

На протяжении последних 10 лет активно обсуждается вопрос защиты критически важной информации и критически важных объектов.

Федеральной службой по техническому и экспортному контролю, Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, а так же Федеральной службой безопасности [1] были подготовлены определения критически важной информации и критически важного объекта. В общем случае примерами критически важных объектов являются:

— системы управления электропитанием;

— системы управления объектами нефтегазовой отрасли;

— системы управления водоканалами;

— системы управления финансово-кредитной сферы;

— системы управления транспортом.

В настоящей статье используются следующие определения понятий критически важной информации военного назначения (КВИ ВН) и критически важной автоматизированной системы военного назначения (КВ АС ВН):

критически важная информация военного назначения — это информация, необходимая для осуществления управления критически важным процессом военного назначения и в результате воздействия на которую может сложиться чрезвычайная ситуация;

критически важные автоматизированные системы военного назначения– это управляющие и телекоммуникационные системы, осуществляющие обработку КВИ ВН.

Примерами КВ АС ВН являются системы управления подводными лодками, надводными кораблями, боевыми роботами, крылатыми ракетами, летательными и космическими аппаратами.

Для КВИ ВН характерны следующие особенности:

— не содержит сведений, составляющих государственную тайну;

— не относится к конфиденциальной информации;

— в первую очередь требует обеспечения целостности и доступности.

Актуальность вопросов обеспечения безопасности КВИ ВН обусловлена следующими факторами:

— прекращение или нарушение функционирования КВ АС ВН может привести к снижению эффективности функционирования управляемых объектов ниже допустимого уровня и, как следствие, к созданию чрезвычайной ситуации;

— современные КВ АС ВН представляют собой объекты сложной структуры с программным управлением, количество угроз в отношении которых постоянно увеличивается вследствие про-

цесса глобального развития мультисервисных сетей связи;

— исследование вопросов обеспечения безопасного функционирования КВ АС ВН на сегодняшний день не завершено;

— обеспечение информационной безопасности является одной из важнейших критических научно-практических проблем развития ОАЦСС [2].

В общем виде задачу обеспечения безопасности КВИ ВН на качественном уровне можно сформулировать как обеспечение сохранения принятых показателей функционирования КВ АС ВН в заданных пределах (нормированных значений) в условиях воздействия разнонаправленных угроз информационной безопасности. Основными направлениями в поиске решений обеспечения такого функционирования являются:

— определение подверженных деструктивным воздействиям элементов КВ АС ВН, нарушение режима работы которых может привести к понижению эффективности функционирования КВ АС ВН;

— анализ угроз информационной безопасности, способных привести к выводу КВ АС ВН из штатного режима работы.

Для проработки основных направлений обеспечения безопасности КВ АС ВН представляется целесообразной разработка методического обеспечения по выявлению угроз информационной безопасности.

Постоянно нарастающие темпы развития информационных технологий, превышающие скорость появления методических документов, отражающих адекватные требования и рекомендации по обеспечению безопасности информации, порождают следующие проблемы:

— нехватка квалифицированных специалистов в области защиты информации;

— необходимость наличия гибких к обеспечению безопасности информации требований, позволяющих предусмотреть отсутствующие на момент их разработки угрозы.

Для устранения указанных проблем необходимо разработать метод выявления актуальных угроз, удовлетворяющий требованиям:

— простоты выполнения;

— гибкости, позволяющей учитывать темпы развития информационных технологий.

Порядок разработки модели угроз критически важной информации военного назначения

В статье предлагается метод построения модели угроз критически важной информации военного назначения, включающий этапы:

1. Подготовки исходных данных (состав объектов защиты, модель нарушителя,состав уязвимостей КВ АС ВН);

2. Обработки исходных данных (определение важности объектов защиты, подготовка перечня потенциальных угроз и состава деструктивных воздействий, определение опасности потенциальных угроз и вероятности их реализации);

3. Определения актуальных угроз.

В общем виде порядок подготовки списка актуальных угроз представлен на рисунке 1.

1) Разработка модели нарушителя

При проведении работ по моделированию потенциального нарушителя необходимо:

— провести категоризацию потенциальных нарушителей с учетом всех стадий жизненного цикла объекта защиты;

— для всех категорий нарушителей описать их возможности, обусловленные уровнем имеющегося доступа, информированностью и технической вооруженностью средствами атак;

— рассмотреть возможность сговора между нарушителями и сделать допущение об обязательном наличии такого сговора, если возможность его существования имеет место быть;

— выделить нарушителей, которые вследствие определенных причин не способны на осуществление умышленных атак (например, администраторы безопасности и т. п.).

2) Выявление уязвимостей объектов защиты

При определении уязвимостей объектов защиты необходимо экспертным путем выявить подсистемы и элементы, состояние которых создает благоприятные условия для реализации угроз по отношению к КВ АС ВН. В состав таких уязвимостей могут входить:

— звенья аппаратного обеспечения (несертифицированные или некачественные средства связи, средства отображения и вывода информации, отчуждаемые носители информации, средства электропитания и т. п.);

— звенья программного обеспечения (базовая система ввода/вывода, операционная система, сетевые протоколы и службы, незащищенная

Рис. 1. Порядок выявления актуальных угроз безопасности КВИ ВН

информация пользователя, несертифицированные или некачественные программные продукты и т. п.);

— уязвимости в организации защиты (неконтролируемый вход в помещение с КВ АС ВН, нерегламентированные правила эксплуатации и т. п.);

— каналы технической утечки информации (акустические, визуальные, электромагнитные).

3) Подготовка перечня потенциальных угроз

Состав потенциальных угроз безопасности КВ АС ВН необходимо определить экспертным путем, используя перечень выявленных уязвимостей объектов защиты, а так же данные о составе и возможностях потенциальных нарушителей. При рассмотрении потенциальных угроз предлагается использовать предложенную Кулешовым И.А. классификацию компьютерных атак [2], банк угроз безопасности информации [3], а также методические документы, подготовленные ФСТЭК России [4] и ФСБ России [5].

4) Определение состава деструктивных воздействий

Реализация любой угрозы приводит к осуществлению определенных деструктивных воздействий на объект защиты. Для каждой потенциальной угрозы необходимо подготовить список деструктивных воздействий, к которым может привести ее реализация.

В состав основных деструктивных воздействий входят: ознакомление и копирование, модификация и уничтожение, блокирование, хищение.

5) Определение важности объектов

Под важностью объекта защиты понимается качественная характеристика, определяющая ценность объекта для обеспечения функционирования КВ АС ВН — степень важности. Для оценки степени важности необходимо рассмотреть каждый объект защиты с позиции необходимости обеспечения состояний целостности, доступности, достоверности, подконтрольности и конфиденциальности. В таблице 1 представлена градация степеней важности объекта в зависимости от возможных последствий, к которым может привести нарушение характеристик его безопасности.

При определении степени важности объекта необходимо применять следующие правила:

— градация важности объекта с позиции обеспечения его целостности, доступности, достоверности и подконтрольности определяется с учетом уровня ущерба, к которому может привести нарушение функционирования объекта, а также приемлемости затрат (временных, финансовых и т. п.) на восстановление объекта;

— градация важности объекта с позиции обеспечения его конфиденциальности определяется с учетом его влияния на функционирование объекта;

— объекты, обеспечивающие работоспособность основных программных и технических средств КВ АС ВН, имеют не меньшую важность с позиции обеспечения их безопасности, чем основные программные и технические средства КВ АС ВН.

При определении важности информации в части целостности необходимо:

— определить состав служебных файлов КВ АС ВН;

— определить допустимость их временной утраты и возможность восстановления;

— определить последствия, к которым может привести нарушение целостности файла;

— присвоить каждому служебному файлу определенную в Таблице 1 степень важности.

При определении важности информации в части доступности необходимо:

— для каждого файла определить допустимость временного его блокирования;

— для каждого файла определить последствия, к которым может привести нарушение его доступности;

— присвоить каждому файлу определенную в табл. 1 степень важности.

При определении важности информации в части конфиденциальности необходимо:

— определить перечень носителей конфиденциальной информации;

— для каждого носителя информации определить состав файлов, содержащих информацию конфиденциального характера;

— присвоить каждому файлу, содержащему конфиденциальную информацию, определенную в табл. 1 степень важности.

6) Определение опасности потенциальных угроз

Каждое *d*-го деструктивное воздействие на *o*-ый объект описывается в виде тройки коэффициентов $K_{do\alpha}$, $K_{do\beta}$, $K_{do\gamma}$, $K_{do\delta}$, $K_{do\varepsilon}$ где $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ — индексы, отражающие составляющие опасности, связанные с нарушениями целостности, доступности, достоверности, подконтрольности и конфиденциальности. Значения коэффициентов деструктивных воздействий зависят от важности объектов, на которые направлены деструктивные воздействия. Определение значений коэффициентов необходимо осуществлять в соответствии с табл. 2.

Общая опасность *d*-го деструктивного воздействия выражена коэффициентом K_{do}. Общий коэффициент деструктивного воздействия K_{do} определяется следующим соотношением:

Таблица 1

Последствия, к которым может привести нарушение безопасности объекта	Вывод о степени важности объекта
Существенные последствия	1 степень
Умеренные последствия	2 степень
Несущественные последствия	3 степень

Таблица 2

Состояние характеристик безопасности объекта	Степень важности	Деструктивные воздействия			
		Ознакомление и копирование	Блокирование	Хищение	Модификация и удаление (уничтожение)
Целостность	Первая			1	1
	Вторая			0,6	0,7
	Третья			0,2	0,3
Доступность	Первая		1	1	1
	Вторая		0,7	0,6	0,7
	Третья		0,3	0,2	0,3
Достоверность	Первая				1
	Вторая				0,7
	Третья				0,3
Подконтрольности	Первая		1	1	1
	Вторая		0,7	0,7	0,7
	Третья		0,3	0,3	0,3
Конфиденциальность	Первая	1		1	
	Вторая	0,8		0,6	
	Третья	0,1		0,2	

$$K_{do}\begin{cases}\theta_{d\alpha}K_{do\alpha}+\theta_{d\beta}K_{do\beta}+\theta_{d\gamma}K_{do\gamma}+\theta_{d\delta}K_{do\delta}+\theta_{d\varepsilon}K_{do\varepsilon},\\ \text{если } \theta_{d\alpha}K_{do\alpha}+\theta_{d\beta}K_{do\beta}+\theta_{d\gamma}K_{do\gamma}+\theta_{d\delta}K_{do\delta}+\theta_{d\varepsilon}K_{do\varepsilon}<1,\\ 1 \text{ — в противном случае.}\end{cases}$$

где $\theta_{d\alpha},\theta_{d\beta},\theta_{d\gamma},\theta_{d\delta},\theta_{d\varepsilon}$ — функции, равные 1, если в результате реализации *d*-го деструктивного воздействия нарушается целостность, доступность, достоверность, подконтрольности и конфиденциальность объекта соответственно.

Ущерб от реализации угрозы *t* по отношению к объекту *o* выражен коэффициентом ущерба D_{to}, определяемым совокупной коэффициентов K_{do} деструктивных воздействий, к которым может привести реализация угрозы. Значение коэффициента ущерба D_{to} от реализации угрозыопределяется следующим соотношением:

$$D_{to}=\begin{cases}K_{d_1o}+K_{d_2o}+K_{d_3o}+K_{d_4o},\\ \text{если } K_{d_1o}+K_{d_2o}+K_{d_3o}+K_{d_4o}<1,\\ 1-\text{в противном случае}\end{cases}$$

Опасность угрозы *t* выражается отношением ущерба D_{to}, к которому может привести ее реализация, к приемлемому ущербу D_a и определяется следующим соотношением:

$$K_{to}=\frac{D_{to}}{D_a}.$$

Уровень допустимого ущерба является уникальным для каждого отдельного объекта защиты и задается экспертным путем.В случае, когда ущерб от реализации деструктивного воздействия D_{to} превышает допустимый ущерб D_a, он принимает значение равное D_a. Вербальная интерпретация опасности угрозы представлена в таблице 3.

7) Определение вероятности реализации потенциальных угроз

Для определения вероятности реализации потенциальной угрозы необходимо для каждой угрозы иметь свою модель расчета. Для парирования сложностей, связанных с отсутствием полногоперечня математических моделей расчета вероятностей реализации угроз, необходимо принять следующее допущение — вероятность реализации угрозы в условиях отсутствия мер защиты приравнивается к единице, если данная угроза имеет место в КВ АС ВН, и к нулю, если угроза отсутствует. Таким образом, относительно каждого объекта не-

Таблица 3

Интервал показателя опасности угрозы	Вербальная интерпретация показателя
0,86–1,00	Очень высокая
0,61–0,85	Высокая
0,41–0,60	Средняя
0,21–0,40	Низкая
0,00–0,20	Очень низкая

		Вероятность реализации угрозы				
		Очень низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Коэффициент опасности угрозы	Очень низкая					+
	Низкая			+	+	+
	Средняя		+	+	+	+
	Высокая	+	+	+	+	+
	Очень высокая	+	+	+	+	+

Рис. 2. Значения показателей актуальности угрозы, при которых угроза признается актуальной

обходимо определить только вероятность наличия благоприятных условий для реализации угрозы.

Для определения вероятности наличия благоприятных условий для реализации угрозы необходимо рассмотреть все имеющееся в КВ АС ВН уязвимости на предмет возможности их использования с целью реализации конкретной угрозы. Вероятность создания таких условий оценивается экспертным путем и может принимать следующие значения:

— очень высокая;

— высокая;

— средняя;

— низкая;

— очень низкая.

8) Определение актуальности угроз

Актуальность угрозы определяется отношением ее опасности к вероятности реализации. Угроза признается актуальной, если показатель ее актуальности, представленный в вербальной интерпретации, попадает в область, отмеченную «+» на рисунке 2.

Заключение

В статье предложен подход:

1. К определению критически важной информации военного назначения

2. К определению критических автоматизированных систем военного назначения

3. К разработке модели угроз критически важной информации военного назначения, включающий:

рекомендации по разработке модели нарушителя критически важной информации;

рекомендации по подготовке списка потенциальных угроз;

метод оценки опасности деструктивных воздействий, учитывающий характеристики достоверности и подконтрольности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект Федерального закона «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Федеральная служба безопасности. 2013.

2. **Арсланов Х.А., Лихачев А.М.** Актуальные научно-практические проблемы развития ОАЦССВС РФ // Связь в вооруженных силах Российской Федерации — 2015. — С. 29–36.

3. **Кулешов И.А., Коцыняк М.А., Лаута О.С.** Безопасность современных информационно-телекоммуникационных сетей // Техника средств связи. 2018. № 2. С. 28-35.

4. http://http://bdu.fstec.ru

5. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю. 2008.

6. Методические рекомендации по разработке нормативных правовых актов, определяющих угрозы безопасности персональных данных, актуальные при обработке персональных данных в информационных системах персональных данных, эксплуатируемых при осуществлении соответствующих видов деятельности. Федеральная служба безопасности. 2015.

Б.В. Королев
кандидат технических наук, ОАО «РКК «Энергия», г. Королев Московской обл.

И.В. Фролов
ОАО «РКК «Энергия», г. Королев Московской обл.

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОТРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ МЕЖДУ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

АННОТАЦИЯ. Постановка проблемы: использование в космических оптических линиях связи диаграмм направленности излучаемой энергии шириной в несколько единиц угловых секунд требует для обеспечения их работы высокоточной навигационной информации. Традиционно разработчики аппаратуры космических оптических линий связи создают ее для работы сеансами связи. При этом вопросы обеспечения работы такой аппаратуры высокоточной навигационной информацией возлагаются на наземные средства управления и служебные бортовые системы космического аппарата. Но при такой организации работ применение космических оптических линий связи практически не приводит к повышению эффективности функционирования космических средств, определяемой оперативностью получения информации потребителем. Для данного космического эксперимента разрабатывается комплекс аппаратуры, способный как осуществлять передачу информации, так и формировать необходимые для его работы данные высокоточной автономной навигации и ориентации. Именно использование такого комплекса аппаратуры космической оптической линии связи позволит повысить эффективность функционирования космических средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптическая линия связи между космическими аппаратами, космический эксперимент, технология функционирования, навигационное обеспечение, эффективность функционирования космических средств.

Достижения последних десятилетий в развитии лазерной и электронной техники дали мощный толчок к реализации преимуществ применения оптического диапазона для линий связи в космических условиях.

Работы в этом направлении, ведущиеся в России [1–2], США [3–4], Европейских странах [5–9], Японии [10–14], вышли уже на уровень космических экспериментов.

Данный космический эксперимент (КЭ) под шифром «ЭКОЛИНС» (**Э**кспериментальная **К**осмическая **О**птическая **ЛИН**ия **С**вязи) включен в Долгосрочную программу исследований и экспериментов на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС).

Основной целью космического эксперимента является опытная отработка в натурных условиях тактико-технических и эксплуатационных характеристик космической оптической линии связи между бортом РС МКС и бортом транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс МС». Разрабатываемый для этого эксперимента комплекс аппаратуры космической оптической линии связи (КОЛС) способен как осуществлять передачу информации, так и формировать для его работы данные высокоточной автономной навигации и ориентации, которые необходимы из-за использования в космических оптических линиях связи узких диаграмм направленности излучаемой энергии, измеряемых единицами угловых секунд.

Задачами космического эксперимента являются:

во-первых — подтверждение правильности принципов построения и функционирования аппаратуры космической оптической линии связи в реальных условиях космического полета на линии связи между двумя космическими аппаратами;

во-вторых — передача информации в цифровой форме в пучке лазерного излучения по трассам «МКС — транспортный грузовой ко-

рабль» и «транспортный грузовой корабль — МКС» в условиях различной фоновой обстановки, действующих вибраций конструкции. Кроме того совершается относительное движение центров масс МКС и транспортного грузового корабля и угловое движение МКС и транспортного грузового корабля относительно собственных центров масс;

в-третьих — отработка функционирования аппаратуры космической оптической линии связи в автономном режиме в реальных условиях космического полета.

Объектом исследований в данном КЭ является технология установления и поддержания дуплексного лазерного канала передачи информации между бортом РС МКС и бортом ТГК «Прогресс МС» и передача по нему информации.

Установление лазерного канала связи между бортами РС МКС и ТГК «Прогресс МС» предполагается провести как с привлечением наземных и бортовых средств, так и в автономном режиме.

В состав аппаратуры космической оптической линии связи входят:

— терминал А аппаратуры КОЛС, устанавливаемый на борту многоцелевого лабораторного модуля РС МКС (см. рис. 1);

— терминал Б аппаратуры КОЛС, устанавливаемый на борту ТГК «Прогресс МС» (см. рис. 2).

Общий вид терминала аппаратуры КОЛС представлен на рисунке 3.

Терминалы А и Б в основном идентичны друг другу.

Отличия между ними заключаются в части:

— используемых рабочих длин волн передатчиков и приемников (приемник терминала А работает на длине волны излучения передатчика терминала Б, а приемник терминала Б — на длине волны излучения передатчика терминала А);

— исполнения и состава некоторых блоков интерфейсов с РС МКС и транспортным грузовым кораблем в силу специфики их бортовых систем;

— соединительных кабелей и средств крепления к модулю РС МКС и транспортного грузового корабля.

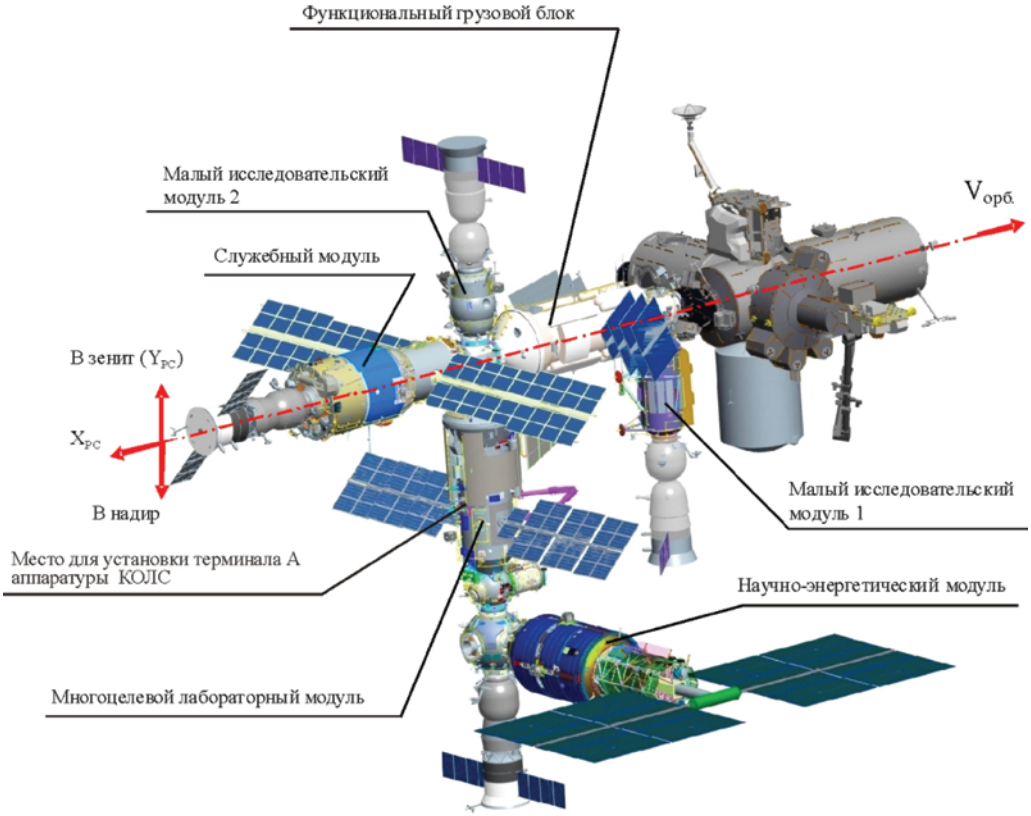

Рис. 1. РС МКС после ввода в эксплуатацию многоцелевого лабораторного модуля и научно-энергетического модуля

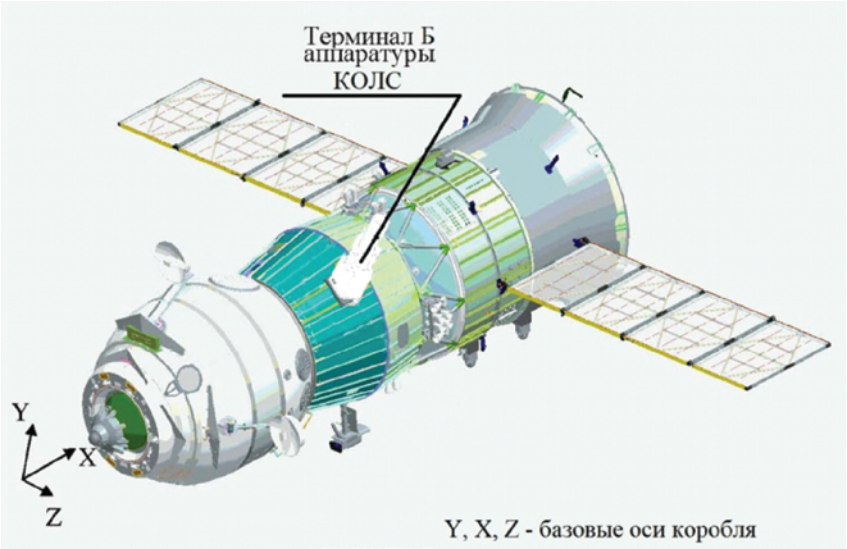

Рис. 2. Установка терминала Б на ТГК «Прогресс МС»

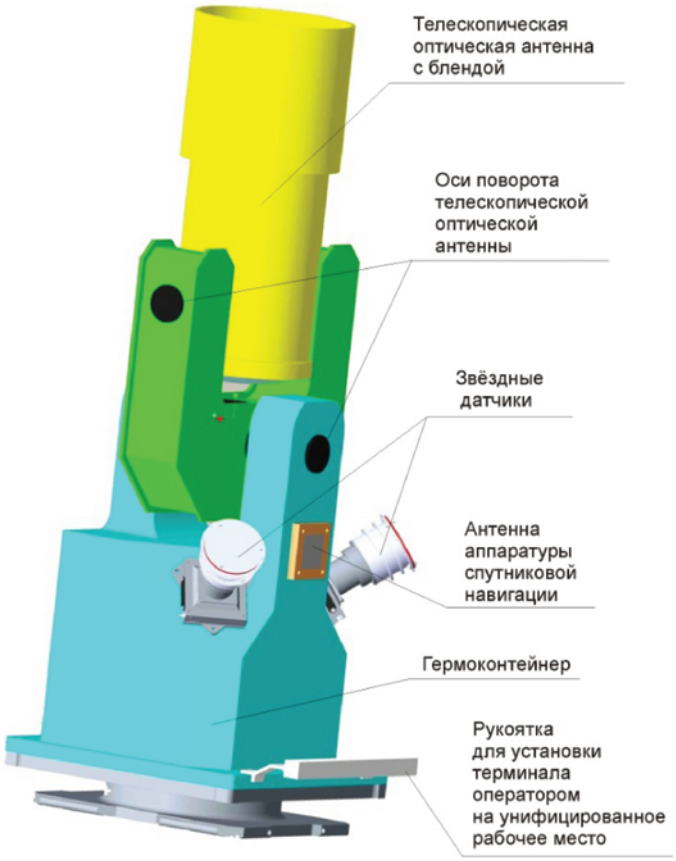

Рис. 3. Общий вид терминала аппаратуры КОЛС

В комплект аппаратуры к каждому терминалу входят также блоки для формирования передаваемой информации, регистрации принимаемой информации и оценки качества передачи информации.

Космический эксперимент проводится после отделения транспортного грузового корабля от орбитальной станции в процессе их группового полета.

Схема проведения космического эксперимента «ЭКОЛИНС» при проведении сеанса связи в зоне видимости наземных пунктов на территории Российской Федерации представлена на рис. 4.

Схема проведения космического эксперимента «ЭКОЛИНС» при проведении сеанса связи вне зоны видимости наземных пунктов на территории Российской Федерации условно представлена на рис. 5. В этом случае вся информация об эксперименте передается по линии связи МКС с Центром управления полетом через спутник-ретранслятор.

В процессе космического эксперимента предполагается провести до 30 сеансов связи на различных расстояниях между МКС и транспортным грузовым кораблем «Прогресс МС». При этом по линии связи может передаваться целевая, служебная и иного вида информация как каждая в отдельности, так и в совокупности в различном комбинационном сочетании.

Суммарная продолжительность сеансов связи составляет не менее 10–15 часов при длительности одного сеанса 5–10 мин. на первых 10 сеансах и до 30–90 мин. на последующих.

Мощность оптических передатчиков терминалов аппаратуры КОЛС выбирается из расчета передачи цифровой информации со скоростью 1 Гбит/с на расстоянии до 45 тыс. км (между низкоорбитальным и геостационарным спутниками). Однако в процессе космического эксперимента расстояние между МКС и ТГК «Прогресс» ограничивается пределами их взаимной видимости и составляет до 4 тыс. км.

Для обеспечения энергетического потенциала линии связи адекватного максимальному расчетному расстоянию в оптическом тракте передатчика установлены ослабители сигнала. Чтобы количество ослабителей сигнала лежало в разумных пределах (например, не более трех), необходимо оговорить расстояния, на которых будут проводиться сеансы связи. В качестве таких расстояний предлагаются следующие значения: 450, 1800 и 3600 км.

Потоки информации, передаваемые в цифровом виде по дуплексной лазерной линии связи между терминалами А и Б, установленными, соответственно, на борту РС МКС и на борту ТГК «Прогресс МС», в процессе выполнения сеансов связи должны регистрироваться на регистрирующем устройстве с привязкой ко времени.

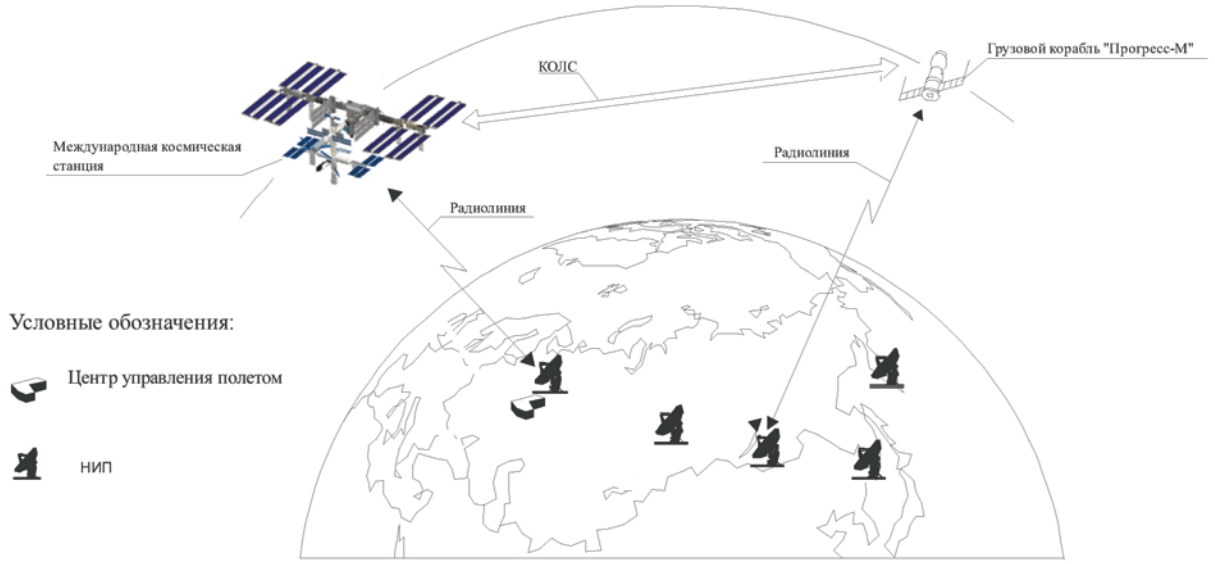

Рис. 4.

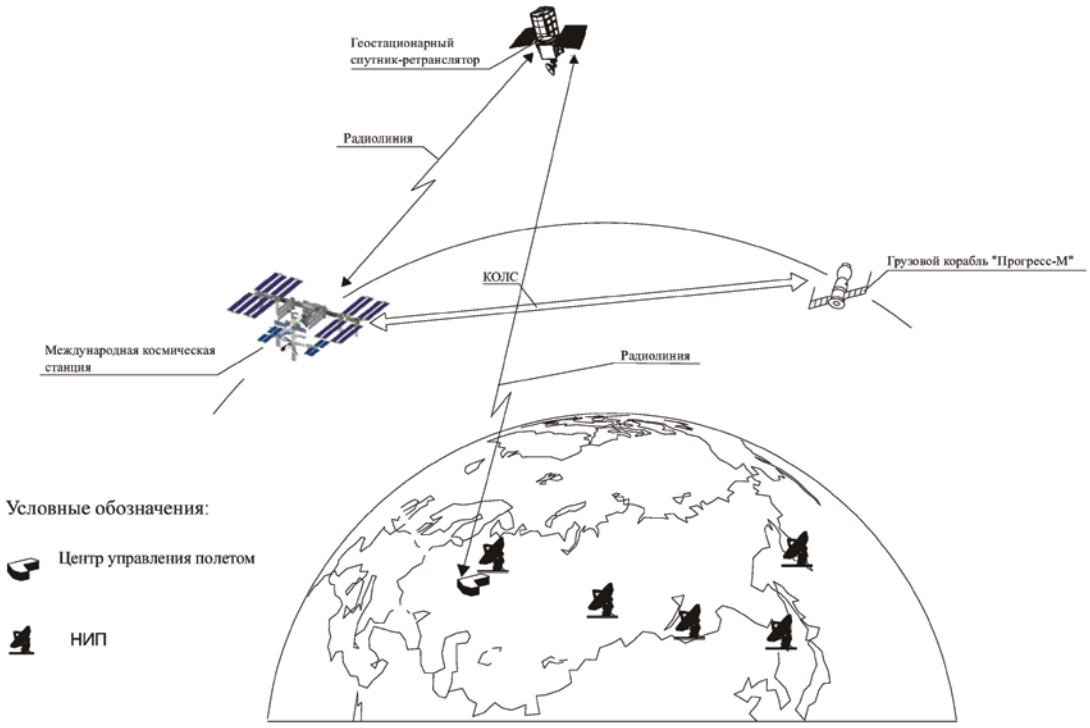

Рис. 4.

Вероятность ошибки при передаче информации не должна превышать 10^{-9}. Должна быть предусмотрена доставка телеметрической информации о качестве работы КОЛС по радиоканалу на Землю в режиме непосредственной передачи или воспроизведения предварительно запомненной информации с доведением до соответствующих служб Центра управления полетом, где она должна записываться на регистрирующих устройствах.

Одним из важных вопросов в организации линии связи между космическими аппаратами является обеспечение взаимного поиска и вхождения в связь двух терминалов аппаратуры космической оптической линии связи.

Официальные значения точностей знания ориентации строительных осей МКС и ТГК «Прогресс МС» составляют, соответственно, ±0,5° и ±1,5°.

При таких значениях точностей знания ориентации строительных осей космических аппаратов угловые размеры зоны неопределенности положения корреспондента для терминала, устанавливаемого на МКС, составят не менее 1×1°, а зоны неопределенности положения корреспондента для терминала, устанавливаемого на ТГК «Прогресс МС», составят не менее 3×3°.

С учетом значений точности установки терминалов относительно строительных осей МКС и ТГК «Прогресс» угловые размеры зон неопределенности положения корреспондентов возрастут, соответственно.

Такие большие значения зон неопределенности положения корреспондентов усложняют процесс взаимного поиска корреспондентов при вхождении в связь, приводят к увеличению времени взаимного поиска корреспондентов, требуют введения режима сканирования, весьма широкой диаграммы излучения передающего устройства.

С целью повышения точности знания ориентации в пространстве строительных осей терминала аппаратуры, уменьшения угловых размеров зон неопределенности положения корреспондентов, облегчения и ускорения взаимного поиска корреспондентов и вхождения в связь в состав аппаратуры КОЛС введены звездные датчики. Они позволяют непосредственно определять ориентацию строительных осей аппаратуры КОЛС в инерциальном пространстве с более высокой точностью.

Точности ориентации строительных осей терминалов аппаратуры КОЛС в инерциальной системе координат, обеспечиваемые звездными

датчиками разработки ОАО НПП Геофизика-Космос, составляют (3σ):

— относительно оси датчика (по крену) — 1°;

— относительно каждой из осей, нормальных оси датчика (по тангажу и рысканию) — 12–15°.

Таким образом, угловые размеры зоны неопределенности положения корреспондента для обоих терминалов аппаратуры КОЛС, с учетом привязки осей звездных датчиков к строительным осям терминала с точностью до 30°, могут составлять не более 2°.

Работа звездных датчиков осуществляется в течение всего сеанса связи.

В этом случае алгоритм процесса взаимного поиска терминалов и вхождения в связь строится следующим образом.

Подготовка к сеансу связи.

МКС постоянно ориентирована в орбитальной системе координат. Никакой ее специальной ориентации при подготовке к сеансу связи не производится.

ТГК «Прогресс МС» за 20 минут до момента начала сеанса связи переходит в режим орбитальной ориентации и поддерживает ее до окончания сеанса связи. В перерывах между сеансами связи ТГК «Прогресс» находится в режиме «закрутки» с ориентацией солнечных батарей на Солнце.

За 3 минуты до момента начала сеанса связи включаются оптические передатчики терминалов аппаратуры КОЛС на МКС и ТГК «Прогресс МС».

По данным прогноза предварительно заданных в систему управления терминалов аппаратуры КОЛС соответствующих параметров орбит, временам начала и окончания сеанса связи и режимам ориентации МКС и ТГК «Прогресс МС» системами управления терминалов рассчитываются координаты направления строительных осей аппаратуры в инерциальном пространстве и корректируются после сравнения с данными от звездных датчиков. С учетом этих данных, начиная с момента времени 3 мин. до заданного времени начала взаимного поиска корреспондентов, системой управления терминалов рассчитываются текущие координаты направления оптических осей телескопических оптических антенн (ТОА) на корреспондентов в системе координат строительных осей терминалов. В соответствии с этими текущими данными производится выставка и последующая ориентация ТОА, в процессе которой автоматически должна быть достигнута ориентация ТОА, необходимая к заданному моменту начала взаимного поиска корреспондентов.

Взаимный поиск и вхождение в связь.

Для осуществления взаимного поиска и вхождения в связь используется расфокусировка луча оптического передатчика до 3°. Данная величина расфокусировки луча при имеющейся чувствительности фотоприемных устройств канала наведения и мощности излучения оптического передатчика обеспечивает взаимный поиск терминалов и вхождение в связь на расстоянии между корреспондентами 45 тыс. км. В случае, если даже при трехминутной (по углу) расфокусировке луча оптического передатчика не происходит приема сигнала от корреспондента, предусматривается режим сканирования ТОА, что потребует и дополнительного времени на взаимный поиск корреспондентов и вхождение в связь.

В процессе сеанса связи производятся средствами аппаратуры КОЛС взаимные траекторные измерения, используемые для уточнения параметров орбит МКС и ТГК «Прогресс МС». На основании прогноза уточненных параметров орбит производится автономная подготовка аппаратуры КОЛС к последующему сеансу связи.

В результате космического эксперимента будет отработана аппаратура космической оптической линии связи, а также технология ее работы, на основе которой можно будет создавать космическую информационную инфраструктуру для обслуживания как космических аппаратов околоземных орбитальных группировок, так и экспедиций к Луне и планетам Солнечной системы, что позволит существенно повысить оперативность получения информации потребителями и, тем самым, повысить эффективность функционирования космических средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ковтун В. С., Королев Б. В., Синявский В. В., Смирнов И. В.** Космические системы связи разработки Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева // Космическая техника и технологии. 2015. № 2(9). С. 3–24.

2. **Королев Б. В.** Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потре-

бителем в процессе функционирования космических средств // Космическая техника и технологии. 2014. № 1(4). С. 39–48.

3. Space News, 2002, 1/VI, vol. 13, No. 26, p. 11.

4. Flight International, 2002, 28/V-3/VI, vol. 161, No. 4838, p. 67.

5. **Bailly M., Perez E.** The Pointing, Acquisition and Tracking system of SILEX European program: a major technological step for intersatellites optical communication, SPIE, Vol. 1417 pp.

6. Flight International, 2001, 4–10/XII, vol. 160, No. 4809, p. 27.

7. Flight International, 2002, 1–7/I, vol. 161, No. 4812, p. 19.

8. Spaceflight, 2002, I, vol. 44, No. 1, p. 12.

9. Aviation Week and Space Technology, 2001, 26/XI, vol. 155, No. 22, p. 27.

10. **Shiratama K., Mase I., Shimizu M.** (NEC Corporation), Nakagawa K., Yamamoto A. (National Space Development Agency of Japan), Challenge to the optical inter-satellite communications. Proceedings of the AIAA/ESA Workshop on International Cooperation in Satellite Communications, Noordwijk, the Netherlands, 27–29 March 1995 (ESA SP 372, pp. 317–323, September 1995).

11. **Araki K., Toyoda M., Toyochima M.** et al., Results of satellite communications experiment — 3. Laser communications experiment–, CRL Review, Vol. 44, No. 1, pp. 209–223, March 1997.

12. Internet: http://www.nasda.go.jp/projects/sat/oicets.

13. JEM: Japanese Experiment Module. NASDA booklet. Tsukuba Space Center, 2000, 16 p.

14. Press Release Archives NASDA, September 16, 2003, Communication Experiment Using Optical Inter-Orbit Communication Equipment Aboard OICETS.

А.С. Ломакова
ПАО «Интелтех»

С.В. Русин
кандидат технических наук, ПАО «Интелтех»

Ю.В. Савенкова
ПАО «Интелтех»

ВОЗМОЖНОСТИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ АНТЕННЫ ПРИВОДНОЙ РАДИОСТАНЦИИ

АННОТАЦИЯ. В статье анализируется влияние габаритов антенны приводной радиостанции на ее КПД и величину предельно достижимой полосы согласования с передатчиком. Приведены результаты расчета параметров миниатюрной конформной антенны. Сделан вывод о возможности и целесообразности разработки и использования миниатюрной антенны в составе радионавигационного комплекса авианесущего корабля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: габариты, добротность, полоса согласования, КПД.

Приводная радиостанция авианесущего корабля традиционно оборудуется Т-образной антенной, которую устанавливают между мачтами корабля, или антенной «Наклонный луч», для которой также используется мачта в качестве опоры. Обе антенны имеют большие габариты и ухудшают радиолокационную заметность корабля. На кораблях, построенных по технологии «Стелс» установка подобных антенн невозможна. Менее эффективная антенна «Кольцо» может быть размещена на корме с внешней стороны борта. Плоское полотно антенны «Кольцо» расположено горизонтально и менее заметно для радиолокационных средств. Но из-за низкого расположения антенны над водой резко сокращается расстояние прямой видимости между кораблем и летательным аппаратом и, кроме того, антенна подвержена обледенению и непосредственному воздействию морской воды. Размещение такой антенны на уровне палубных надстроек невозможно, так как полотно антенны окажет экранирующее действие на другие радиотехнические системы. Альтернативой этим антеннам могла бы стать малогабаритная конформная антенна, интегрированная в конструкцию корабля, или, по крайней мере, органично вписанная в профиль корабля и удовлетворяющая требованиям технологии «Стелс».

При уменьшении габаритов антенны уменьшается полоса согласования с передатчиком. Увеличить полосу согласования можно уменьшив КПД антенны. А уменьшение КПД антенны уменьшает дальность действия приводной радиостанции. Три важных параметра антенны: габариты, полоса согласования и КПД тесно связаны, улучшение одного из этих параметров может быть достигнуто за счет ухудшения двух других. При проектировании конформной антенны необходимо предварительно оценить, можно ли в заданных габаритах достичь удовлетворительных параметров антенны. Авторами выполнен анализ предельно достижимых электрических параметров антенны заданного объема.

Приводная радиостанция мощностью $P_1 = 400$ Вт является элементом радионавигационного комплекса, предназначенного для вывода самолета на аэродром посадки, обеспечения предпосадочного маневра и выполнения захода на посадку. Кроме приводной радиостанции, в состав комплекса входит бортовой автоматический радиокомпас, который находится на борту летательного аппарата. Радионавигационный комплекс должен обеспечивать полеты по трассам на высоте 1 км на дальностях 150 км.

Диапазон рабочих частот: 190 ... 1750 кГц. Режим работы: телефонный, незатухающие колебания. Ширина полосы приемника радиокомпаса составляет около 0,6 кГц, тогда как сигнал приводной радиостанции занимает полосу частот около 2 кГц. Мощность сигнала (P_2) на входе приемника должна быть в 10 раз больше мощности шума.

Будем полагать, что для размещения антенны приводной радиостанции на корабле предоставлено небольшое место размером 0,5×2, 2×3, 4 м, расположенное на высоте 4 м от морской поверхности. Следует рассчитать предельно достижимые параметры передающей антенны заданного объема, и оценить возможности антенны по обеспечению требуемых характеристик радионавигационного комплекса.

Также предусмотрим, что на трассе «корабль — летательный аппарат» имеется два разнородных участка: сухопутный и морской. Один из этих участков может быть значительно больше другого. Почва на сухопутном участке может быть различной влажности: от очень сухой до очень влажной, а вода на морском участке может быть слабой или средней солености, а также может быть покрыта сплошным льдом.

При нормальной рефракции самолет на высоте 1 км будет находиться в зоне полутени. Поэтому множитель ослабления вычислен по формуле Фока [1]:

$$F = 2\sqrt{\pi x}\left|\sum_{s=1}^{\infty}\frac{e^{ixt_s}}{t_s+q^2}\cdot\frac{h_2(t_s+y_1)}{h_2(t_s)}\cdot\frac{h_2(t_s+y_2)}{h_2(t_s)}\right|, \quad (1)$$

где $x = \frac{r}{L}$ — относительное расстояние,

$y_1 = \frac{h_1}{H}$, $y_2 = \frac{h_2}{H}$ — относительные высоты антенн,

$L = \left(\frac{\lambda a^2}{\pi}\right)^{1/3}$, м — масштаб расстояний,

$H = \frac{1}{2}\left(\frac{a\lambda^2}{\pi^2}\right)^{1/3}$, м — масштаб высот,

$q = i\sqrt[3]{\frac{\pi a}{\lambda}}\cdot\frac{1}{\sqrt{\varepsilon - i60\lambda\sigma}}$ — параметр, учитывающий полупроводящие свойства поверхности Земли,

$h_2(t) = \sqrt{\frac{\pi}{3}}\cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}t^{1/2}H_{1/3}^{(2)}\left[\frac{2}{3}t^{3/2}\right]$ — функция Эйри, выраженная через функцию Ханкеля второго рода порядка 1/3,

t_s — корни уравнения $h_2'(t) - qh_2(t) = 0$.

В диапазоне 190 ... 1750 кГц достаточно ограничится пятью членами ряда (1) [2].

Напряженность поля естественных и промышленных помех на крайних частотах диапазона в полосе приема найдена по графикам, в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.372–10 (10/2009) «Радиошум» [3], а мощность шума на входе приемника рассчитана с учетом коэффициента направленного действия (КНД) (D_2 = 3) антенны авиационного радиокомпаса [4].

Антенна приводной радиостанции — это ненаправленная или слабонаправленная антенна ($D_1 \approx 1$). Из уравнения радиопередачи [4] можно найти минимально допустимый КПД (η_1) передающего антенно-фидерного тракта, при котором будет обеспечиваться 10-кратное превышение мощности сигнала над мощностью помех:

$$P_{\text{д}} = P_1 D_1 D_2 \eta_1 \eta_2 \zeta_{\text{с}} \zeta_{\text{п}} \left(\frac{\lambda F}{4\pi r}\right)^2, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{с}}, \zeta_{\text{п}} \le 1$ — коэффициенты согласования по сопротивлению передающей антенны с линией передачи и по поляризации приемной антенны с принимаемым сигналом, η_2 — КПД приемного антенного тракта, r — расстояние между корреспондентами.

По найденной величине минимально допустимого КПД можно найти полосу согласования антенны, помещенной в отведенный объем.

Добротность идеальной (без потерь) антенны вписанной в сферу радиуса «а» определяется выражением [5]:

$$Q_1 = \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}\right], \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Известно, также, что добротность антенны без потерь:

$$Q_0 = \frac{X}{2R_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где X — реактивная часть импеданса, R_{Σ} — сопротивление излучения.

Двойка в знаменателе введена для учета трансформированного к антенне выходного сопротивления передатчика (по условию согласования).

Добротность антенны с потерями, равна:

$$Q = \frac{X}{2\left(R_{\Pi} + R_{\Sigma}\right)}, \quad (5)$$

где R_{Π} — сопротивление потерь.

Известно также, что КПД антенны:

$$\text{КПД} = \frac{R_{\Sigma}}{\left(R_{\Pi} + R_{\Sigma}\right)}. \quad (6)$$

Отсюда следует еще одно выражение для КПД

$$\text{КПД} = \frac{Q}{Q_0}. \quad (7)$$

Полоса согласования ($2\Delta f$) зависит от добротности Q антенны:

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}, \quad (8)$$

где f_0 — центральная частота полосы согласования.

По изложенной методике вычислены минимально допустимый КПД (η_{min}) и предельно постижимая полоса согласования антенны, габариты которой не превышают размеров выделенного для нее места. Минимально допустимый КПД антенны вычислен при различных условиях эксплуатации радионавигационного комплекса: в условиях умеренных помех (днем) и сильных помех (ночью), на трассах со значительным преобладанием морской поверхности или сухопутного участка с почвой различной влажности.

Результаты расчетов полосы согласования ($2\Delta f$) на крайних частотах рабочего диапазона (f_1 = 190 кГц, f_2 = 1750 кГц) приведены в табл. 1 и 2.

Из результатов расчетов следует, что места выделенного для размещения антенны приводной радиостанции будет недостаточно. Антенна в заданных габаритах может обеспечить работу радионавигационного комплекса в условиях умеренного уровня помех (днем). В условиях высокого уровня помех (ночью) на верхней частоте рабочего диапазона и при преобладании на трассе сухой почвы или почвы

Таблица 1

Полоса согласования в условиях невысокого уровня помех (днем)

Среда	Параметры почвы		$f1$		$f2$	
	ε	σ	η_{min}	$2\Delta f$	η_{min}	$2\Delta f$
Морская вода слабой солености	80	1	$1.56 \cdot 10^{-5}$	$6.37 \cdot 10^{-3}$	$8.94 \cdot 10^{-8}$	$7.96 \cdot 10^{9}$
Влажная почва	30	10^{-2}	$5.08 \cdot 10^{-6}$	$1.96 \cdot 10^{-4}$	$9.01 \cdot 10^{-5}$	$7.9 \cdot 10^{6}$
Почва средней влажности	15	10^{-3}	$1.67 \cdot 10^{-4}$	594.78	$3.33 \cdot 10^{-3}$	$2.14 \cdot 10^{5}$
Сухая почва	7	$3 \cdot 10^{-4}$	$2.92 \cdot 10^{-3}$	34.041	0.019	$3.78 \cdot 10^{4}$

Таблица 2

Полоса согласования в условиях высокого уровня помех (ночью)

Среда	Параметры почвы		$f1$		$f2$	
	ε	σ	η_{min}	$2\Delta f$	η_{min}	$2\Delta f$
Морская вода слабой солености	80	1	0.017	5.75	$5.59 \cdot 10^{-5}$	$1.27 \cdot 10^{7}$
Влажная почва	30	10^{-2}	$5.63 \cdot 10^{-3}$	17.66	0.056	$1.26 \cdot 10^{4}$
Почва средней влажности	15	10^{-3}	0.185	0.537	2.082	341.78
Сухая почва	7	$3 \cdot 10^{-4}$	3.236	0.031	11.79	60.332

средней влажности требуется большая мощность излучения. В соответствии с постановкой задачи такая мощность излучения достигается нереализуемо высоким КПД антенны. При высоком КПД невозможно обеспечить требуемую полосу согласования с передатчиком (2 кГц). По расчетам полоса согласования составляет всего лишь 60 Гц или 341,78 Гц, соответственно (табл. 2).

Выводы. При анализе предельно достижимых параметров малогабаритной антенны приводной станции найдено, что в заданных по условию задачи габаритах (0,5×2,2×3,4 м) невозможно реализовать параметры антенны, которые обеспечили бы требуемую дальность приводной станции в условиях сильных помех на трассах с сухой почвой и почвой средней влажности.

Для обеспечения требуемых параметров следует увеличить размеры места предназначенного для размещения антенны и повторить анализ с учетом наихудших условий функционирования радионавигационного комплекса.

Из результатов расчетов следует также, что миниатюризация антенны приводной радиостанции не только желательна, но и возможна. Для этого вполне достаточно небольшого объема на палубной надстройке корабля.

Полученные результаты подтверждены результатами трассовых испытаний макетного образца малогабаритной антенны емкостного типа, которая имеет такие же размеры, какие указаны в исходных данных для расчетов. Макетный образец разработан, изготовлен и испытан ОАО«Научно-производственное предприятие «Авиационная и Морская Электроника» (ОАО «НПП «АМЭ», Санкт-Петербург).

Такой анализ электрических параметров малогабаритных конформных антенн может применяться на этапе проектирования радиотехнических комплексов интегрированных в конструкцию корабля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фок В. А.** Поле от вертикального и горизонтального диполя, приподнятого над поверхностью Земли. // «ЖЭТф»,Т. 19, 1949, № 10, 916 с.

2. **Долуханов М. П.** Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М.: Связь, 1972. — 336 с.

3. Рекомендацией МСЭ-R P.372–10 (10/2009) «Радиошум».

4. **Серков В. П.** Распространение радиоволн и антенные устройства. Л.: ВАС, 1981. 468 с.

5. **McLean J. S.** A re-examination of the fundamental limits on the radiation *Q* of the electrically small antennas // IEEE Trans. Antennas and Prop. — 1996. — Vol. 44, № 5. — P. 672–676.

С.А. Осипенко
кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

А.А. Масалкин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Д.А. Павлов
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

А.А. Слинько
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПОИСКА ИНТЕРВАЛОВ ПОСТОЯНСТВА СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

АННОТАЦИЯ. Использование кластеров малых космических аппаратов является главной тенденцией развития космических технологий. Особенностью функционирования подобных систем является динамика функционально-топологической структуры, что делает невозможным применение стандартных методов и способов решения широкого спектра задач автоматизированного управления. Частично разрешить данную проблему можно, решив задачу поиска интервалов постоянства структуры кластеров малых космических аппаратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малый космический аппарат, кластер малых космических аппаратов, баллистический прогноз, интервалы постоянства структуры, информационный обмен.

Введение

В последнее время активно разрабатываются и апробируются технологии применения кластеров малых космических аппаратов (КА) для решения практических задач в различных отраслях народного хозяйства и военного дела. Основными преимуществами использования малых КА (МКА) перед крупными является возможность развертывания большего количества орбитальных средств с меньшим или равным расходом ресурсов. Это приводит к улучшению целевых показателей по оперативности наблюдения за процессами, происходящими на поверхности Земли, возможности более эффективного наблюдения за быстропротекающими процессами, а также повышение надежности наблюдения при параллельно функционирующих КА кластера.

Кластер МКА (КМКА) представляет собой совокупность разнородных КА, объединенных для выполнения единой целевой задачи. Спецификой функционирования любого кластера, преимущественно обусловленной изменением положения КА, входящих в его состав, друг относительно друга и наземных пунктов (НП) приема-передачи информации (пунктов управления КА) с течением времени, является структурная динамика системы информационного обмена (СИО). Другими особенностями структурной динамики СИО КМКА являются: динамическое таргетирование объектов зондирования (ОЗ); динамическое перераспределение радиоресурса каналов космической связи; динамика расхода и поступления электроэнергии; жесткие временные и иные ограничения. Таким образом, становится невозможным применение стандартных (классических) подходов при решении задач управления структурной динамикой СИО КМКА, таких как оценивание информационно-технологических возможностей системы, выработка оптимального управления системой на всем интервале планирова-

ния управления, а также при решении других задач [1].

Существующие подходы к управлению структурной динамикой СИО КМКА зачастую апеллируют к имитационному моделированию, к рассмотрению частных сторон функционирования СИО КМКА и выявлению лишь интересующих общих характеристик в целом. В условиях существующих реалий такой подход не является перспективным в вопросах эффективного управления СИО КМКА, т. к. главным образом не отвечает на вопросы — как оптимально (рационально) распределять информационные потоки, где, когда и сколько информации получать, хранить, обрабатывать и отправлять потребителю в динамически изменяющихся условиях. В связи с этим актуальность приобретают задачи планирования информационного обмена (ИО) КМКА, базирующиеся на моделях и методах математического программирования и оптимального управления.

В общем виде указанная задача планирования ИО КМКА относится к классу линейных неоднородных дифференциальных динамических моделей и имеет ряд специфических черт, которые отличают их от классических задач теории оптимального управления сложными динамическими системами [2–5]. Следовательно, непосредственное применение методов и алгоритмов, разработанных для решения подобных задач оптимального управления с непрерывными и непрерывно дифференцируемыми функциями, встречает трудности теоретического и прикладного (алгоритмического) характера.

Частично разрешить указанную проблему представляется возможным, найдя множество временных интервалов, на которых связи между МКА и НП остаются постоянными — ***интервалы постоянства структуры*** [6–8].

Постановка задачи

Для формальной постановки решаемой задачи воспользуемся теоретико-множественным подходом. Выделим в качестве основных следующие множества. Множество МКА, входящих в кластер

$$A = \left\{ a_i \mid i \in N = \overline{1,n} \right\}, \qquad (1)$$

где a_i — МКА, N — множество индексов МКА.

Каждый МКА из состава кластера характеризуется совокупностью параметров

$$a_i \equiv \left\langle \Psi_i, \Theta_i \right\rangle, \qquad (2)$$

где Ψ_i — параметры движения i-го спутника; Θ_i — вектор параметров бортовой аппаратуры (БА) приема-передачи данных (ППД).

Далее в качестве параметров движения будем принимать начальные условия (координаты и проекции скоростей в начальный момент времени t_0) в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) [12]:

$$\Psi_i = \mathrm{col}\left(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}, V_{x0i}, V_{y0i}, V_{z0i} \right), \qquad (3)$$

где x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} — координаты i-го КА в момент времени t_0; $V_{x0i}, V_{y0i}, V_{z0i}$ — проекции скорости i-го КА в момент времени t_0.

Для решения задачи поиска интервалов постоянства структуры КМКА необходимо знать максимальную дальность, на которую может быть осуществлена передача сигнала от p-го МКА до r-го МКА ($p, r \in N$) — дальность каналов «космос — космос». Так как дальность определяется не только мощностью передающей аппаратуры, но и чувствительностью принимающей, то дальность передачи информации является функцией параметров БА ППД двух МКА

$$l_{pr} = f\left(\Theta_p, \Theta_r \right). \qquad (4)$$

Для канала связи «космос — Земля» также учитывается конусный угол ППД от нормали к земной поверхности — β_i.

Также в процессе информационного обмена участвуют НП, задаваемые множеством

$$B = \left\{ b_j \mid j \in M = \overline{n+1,m} \right\}, \qquad (5)$$

где b_j — НП ППД; M — множество индексов НП.

Каждый НП характеризуется положением на поверхности Земли, которое задается парой географических координат

$$b_j \equiv \left\langle \lambda_j, \psi_j \right\rangle, \qquad (6)$$

где λ_j, ψ_j — географические долгота и широта НП соответственно.

Поиск интервалов постоянства структуры осуществляется на конечном временном интер-

вале $T=\left(t_0,t_f\right]$. Структура КМКА в момент времени $t\in T$ задается квадратной матрицей размерности $m\times m$

$$X\left(t\right)=\left\|x_{sq}\left(t\right)\right\|_{m\times m}, \qquad (7)$$

где s,q — индексы элементов матрицы, $s,q\in N\bigcup M=\overline{1,m}$, элементы которой являются булевыми переменными

$$x_{sq}\left(t\right)=\begin{cases}1,\text{если } s\text{-й КА}\left(\text{или НП}\right)\\ \text{может обмениваться данными}\\ \text{с } q\text{-м КА(НП) в момент времени } t,\\ 0,\text{в противном случае.}\end{cases} \qquad (8)$$

Результатом решения рассматриваемой задачи будет являться множество интервалов постоянства структуры КМКА

$$Z=\left\{(t_l^{\text{н}},t_l^{\text{к}}]\,|\,l\in L, X\left(t\right)=\text{const},\forall t\in(t_l^{\text{н}},t_l^{\text{к}}]\right\}, \qquad (9)$$

где $t_l^{\text{н}},t_l^{\text{к}}$ — времена соответственно начала и конца l-го интервала постоянства структуры; L — множество индексов интервала постоянства структуры; $X\left(t\right)=\text{const}$ — постоянная структура КМКА на интервале $\forall t\in(t_l^{\text{н}},t_l^{\text{к}}]$.

Решение задачи

Будем считать, что начальные условия движения КА (3), параметры БА ППД (4) и координаты НП (6) заданы. По имеющимся данным представляется возможным определить матрицу структуры КМКА (8) в любой момент времени $t\in T$. Структуру матрицы можно разбить на четыре блока (10), каждый из которых соответствует возможному варианту передачи данных: «космос — космос», «космос — Земля», «Земля — космос», «Земля — Земля».

$$X\left(t\right)=\left\|x_{sq}\left(t\right)\right\|=\begin{Vmatrix}X_{\text{к-к}}\left(t\right) & X_{\text{к-з}}\left(t\right)\\ X_{\text{з-к}}\left(t\right) & X_{\text{з-з}}\left(t\right)\end{Vmatrix}. \qquad (10)$$

Расчет элементов, образующих каждый блок, можно проводить с использованием нижеприведенных алгоритмов. При этом следует отметить, что положение каждого МКА в момент времени t определяется вектором, состоящим из шести компонент

$$\Psi_i\left(t\right)=\text{col}\left(x_i\left(t\right),y_i\left(t\right),z_i\left(t\right),V_{xi}\left(t\right),V_{yi}\left(t\right),V_{zi}\left(t\right)\right).$$

Значения компонент данного вектора получаются численным интегрированием системы дифференциальных уравнений (11), которые позволяют учесть всю совокупность сил, воздействующих на аппарат в процессе орбитального полета. Причем на низкоорбитальные круговые КА наиболее существенное влияние оказывают следующие силы: сила земного притяжения, возмущения, обусловленные несферичностью гравитационного поля планеты, и воздействия со стороны атмосферы [8–11].

$$\begin{cases}\dot{x}=V_x,\\ \dot{y}=V_y,\\ \dot{z}=V_z,\\ \dfrac{dV_x}{dt}=-\mu^*x+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^*x_0^*\rho^2(1-5z_0^{*2})+f_x,\\ \dfrac{dV_y}{dt}=-\mu^*y+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^*y_0^*\rho^2(1-5z_0^{*2})+f_y,\\ \dfrac{dV_z}{dt}=-\mu^*z+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^*z_0^*\rho^2(3-5z_0^{*2})+f_z,\end{cases} \qquad (11)$$

где f_x,f_y,f_z — ускорения, обусловленные торможением атмосферы, км/с^2; C_{20} — коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям, $C_{20}=-1082{,}62575\cdot10^{-6}$;

$$\mu^*=\frac{\mu}{r_0^2},\ x^*=\frac{x}{r_0},\ y^*=\frac{y}{r_0},\ z^*=\frac{z}{r_0},\qquad \rho=\frac{a}{r_0},\ r_0=\sqrt{x^2+y^2+z^2}. \qquad (12)$$

Здесь μ — константа гравитационного поля Земли (μ = 398600,4418 км^3/с^2); a — экваториальный радиус Земли (a = 6378,136 км).

Рассмотрим более подробно алгоритмы расчета элементов для каждого блока матрицы.

Блок «космос — космос» $X_{\text{к-к}}\left(t\right)=\left\|x_{sq}\left(t\right)\right\|$, $s,q\in N$. Для обеспечения устойчивой передачи информации с s-го МКА на q-й МКА должно выполняться два условия (рис. 1):

1) расстояние между МКА должны быть меньше или равно максимальной дальности канала «космос-космос»

$$R(s,q,t) \le l_{sq}, \quad (13)$$

где $R(s,q,t)$ — функция расстояния между s-м и q-м МКА. При известных положениях МКА, полученных в результате численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (11) расстояние определяется соотношением

$$R(s,q,t) = \sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2}. \quad (14)$$

2) Аппараты должны находиться в зоне прямой видимости, т. е. их линия визирования не должна перекрываться Землей. Для проведения соответствующих расчетов примем модель Земли в виде шара с радиусом $R_З$ = 6371 км, центр которого $O_З$ совпадает с началом отсчета АГЭСК.

Параметрическое уравнение отрезка, соединяющего центры масс (ЦМ) МКА, примет вид

$$\begin{cases} x = x_s(1-p) + x_q p \\ y = y_s(1-p) + y_q p, \\ z = z_s(1-p) + z_q p \end{cases} \quad (15)$$

а уравнение земной поверхности с учетом вышеприведенных допущений

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_З^2 \quad (16)$$

Подставляя (15) в (16), получим квадратное уравнение, не разрешенное относительно параметра p. Если данное уравнение не имеет корней, то значит линия визирования МКА не пересекает земную сферу. В остальных случаях следует проанализировать значения корней уравнения — p_1 и p_2. Если $p_1 \in [0;1]$ или $p_2 \in [0;1]$, то ЛВ перекрывается, в противном случае — нет.

Блок «космос — Земля» $X_{К\text{-}З}(t) = \left\| x_{sq}(t) \right\|$, $s \in N, q \in M$. Для обеспечения устойчивой передачи информации с s-го МКА на q-й НП необходимо, чтобы НП находился в зоне ППД. Модель зоны представляет собой конус, вершина, которого совпадает с ЦМ МКА, а ось направлена по линии отвеса, соединяющей ЦМ МКА и центр Земли (рис. 2).

При таком подходе определить возможность передачи данных с s-го МКА на q-й НП можно, сравнив размер зоны ППД на земной поверхности с расстоянием между подспутниковой точкой (ПСТ) МКА и НП. Данное действие предполагает выполнение нескольких шагов предлагаемого алгоритма:

Шаг 1) определение положения s-го МКА в гринвичской системе координат (ГСК) [12]

$$\begin{cases} x_Г = x\cos S(t) + y\sin S(t), \\ y_Г = y\cos S(t) - y\sin S(t), \\ z_Г = z. \end{cases} \quad (17)$$

Здесь $S(t)$ — звездное время на меридиане Гринвича в момент времени t,

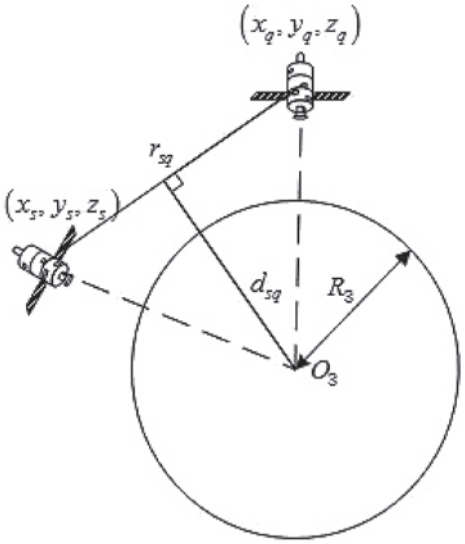

Рис. 1.Информационный обмен между МКА

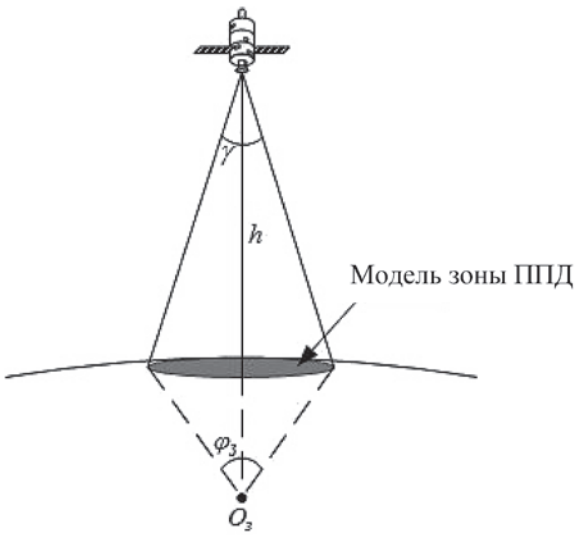

Рис. 2. Модель зоны ПДД при передаче информации с МКА на НП

$$S(t) = S(t_0) + \omega_З (t - t_0), \qquad (18)$$

где $S(t_0)$ — звездное время на меридиане Гринвича в некоторый начальный момент времени, выраженное в градусной мере; $\omega_З$ — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси, $\omega_З = \frac{2\pi}{T_{зв}}$ ($T_{зв}$ — звездные сутки, $T_{зв} = 86164$ с).

Шаг 2) расчет ПСТ МКА осуществляется по формулам:

$$\begin{cases} \sin\psi_{ПСТ} = \frac{z_Г}{r}, \psi \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right], \\ \sin\lambda_{ПСТ} = \frac{y_Г}{\sqrt{x_Г^2 + y_Г^2}}, \\ \cos\lambda_{ПСТ} = \frac{x_Г}{\sqrt{x_Г^2 + y_Г^2}}, \lambda \in [0, 2\pi], \\ r = \sqrt{x_Г^2 + y_Г^2 + z_Г^2}. \end{cases} \qquad (19)$$

Шаг 3) определение размеров зоны ППД [13]

$$d = 2R_З \left[\arcsin\left(\frac{R_З + h}{R_З} \sin\beta \right) - \beta \right], \qquad (20)$$

Шаг 4) расчет расстояния от ПСТ МКА до НП по поверхности сферы [13]

$$l = R\Big[\arccos\Big(\sin\psi_{ПСТ}\sin\psi_{ЦО} + \\ + \cos\psi_{ПСТ}\cos\psi_{ЦО}\cos(\lambda_{ЦО} - \lambda_{ПСТ})\Big)\Big], \qquad (21)$$

Шаг 5) анализ полученных результатов. Если выполняется условие

$$l \le d, \qquad (22)$$

то передача информации с s-го МКА на q-й НП возможна, а соответствующий элемент матрицы $x_{sq}(t) = 1$.

Блок «Земля — космос» $X_{к\text{-}з}(t) = \|x_{sq}(t)\|$, $s \in M, q \in N$. Вычисления для элементов матрицы блока «Земля-космос» выполняются аналогично предыдущему блоку.

Блок «Земля — Земля» $X_{к\text{-}з}(t) = \|x_{sq}(t)\|$, $s \in M, q \in M$. Значения элементов данного блока постоянны во времени, так как относительное положение наземных объектов не меняется с течением времени. В большинстве случаев задаются в качестве исходных данных.

Для поиска очередного l-го интервала постоянства структуры необходимо выполнить следующую последовательность действий с использованием вышеописанных алгоритмов построения $X(t)$:

Шаг 1) для некоторого момента времени $t_l^н$, соответствующего времени начала l-го интервала постоянства структуры, построить матрицу структуры $X(t_l^н)$;

Шаг 2) построить матрицы структуры для последующих моментов времени $t_k = t_l^н + k\Delta t$, где Δt — дискрет времени, значение которого выбирается из соображений обеспечения требуемой точности вычислительного процесса, $k = 1, 2, \ldots$ — целые положительные числа;

Шаг 3) критерием окончания процесса построения матрицы l-го интервала является выполнение условия $X(t_k) \ne X(t_l^н)$, а время окончания l-го интервала постоянства структуры будет равно $t_l^к = t_{k-1}$.

Заключение

Найденные с использованием предложенного алгоритма интервалы постоянства структуры могут быть использованы в качестве исходных для решения широкого спектра задач в процессе автоматизированного управления космическими системами различного назначения, функционирование которых характеризуется динамикой функционально-топологической структуры. В случае необходимости модели зон ППД могут быть уточнены для учета всей совокупности факторов, оказывающих воздействие на функционирование БА ППД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сологуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В.** Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования земли // Информационно-управляющие системы. — 2013. — Выпуск №1(62). — С. 16–26.

2. **Беллман Р.** Динамическое программирование / Р. Беллман. — М.: Иностранная литература, 1960. — 400 с.

3. **Беллман Р.** Процессы регулирования с адаптацией / Р. Беллман. — М.: Наука, 1964. — 359 с.

4. **Понтрягин Л. С.** Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. — М.: Физматгиз, 1961. — 391 с.

5. **Моисеев Н. Н.** Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, 1975. — 528 с.

6. **Москвин Б. В., Михайлов Е. П., Павлов А. Н., Соколов Б. В.** Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов // Известия Вузов. Приборостроение. — 2006. — Том №49, №11. — С. 8–12.

7. **Павлов А. Н.** Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Труды СПИИРАН. — 2013. — Выпуск № 5. — С. 143–168.

8. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, И.И. Делий, Е.А. Новиков; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. — СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. — 609 с.

9. Колодяжный В.В. Методический подход к определению временных параметров нахождения наземных объектов в зоне наблюдения искусственных спутников земли / В.В. Колодяжный, А.А. Посудевский, А.Н. Пальцев // Новости науки и технологий. — 2014. — Выпуск № 3–4. С. 61–67.

10. **Балк М. Б.** Элементы динамики космического полета / М.Б. Балк. — М.: Наука, 1965. — 338 с.

11. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли: ГОСТ Р 25645.166–2004. — Введ. 01.01.05. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 29 с.

12. ГОСТ Р 51794–2008 Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек — М. : Стандартинформ, 2009. — 19 с.

13. **Степанов Н. Н.** Сферическая тригонометрия / Н.Н. Степанов. — Л.: ОГИЗ, 1948. — 154 с.

Д.А. Павлов
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

А.А. Масалкин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

И.В. Чащин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

А.А. Слинько
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ. Использование кластеров малых космических аппаратов является главной тенденцией развития технологий дистанционного зондирования Земли. При этом особое внимание уделяется задаче оценивания результативности кластера. Решение указанной задачи целесообразно проводить на основе баллистического прогноза движения центра масс космического аппарата и построения их зоны обзора. При таком подходе под производительностью кластера малых космических аппаратов будет пониматься отношение количества разведанных объектов зондирования к их общему количеству с учетом степеней их важности для потребителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космический аппарат, кластер малых космических аппаратов, дистанционное зондирование Земли, баллистический прогноз, оценивание результативности.

Введение

Задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возникают в широком спектре предметных областей: мониторинг окружающей среды, поиск движущихся объектов, контроль состояния технических объектов и сооружений, наблюдение за объектами в околоземном пространстве (ОКП) и т. п. К основным недостаткам процесса ДЗЗ, выполняемого одиночными космическим аппаратом (КА) следует отнести малую оперативность слежения за быстротекущими процессами, происходящими на поверхности Земли, и недостаточную надежность. Поэтому наиболее современной тенденцией является совместное использование совокупности КА в составе орбитальных группировок (ОГ) для решения задач ДЗЗ. Данные КА оснащаются бортовой аппаратурой (БА) наблюдения, работающей в различных спектрах распространения электромагнитных волн. [1]

Следует отметить, что на этапах проектирования космических систем наблюдения (КСН) и в процессе управления ими, возникает задача оценивания их результативности. Под результативностью в работах отечественных ученных [2] принимается свойство целенаправленного процесса, характеризующего степень достижения цели, стоящего перед системой. Основной целью применения ОГ КА ДЗЗ является сбор сведений об объектах зондирования (ОЗ), обработка полученных данных и передача сведений конечному потребителю. Спецификой КСН является структурная изменчивость (особенно для ОГ, построенных на основе низкоорбитальных круговых КА), которая выражается в пространственном изменении положения КА ДЗЗ и ОЗ друг относительно друга, что накладывает ограничения на периодичность обзора и полноту решаемой задачи. Данная особенность приводит к тому, что за ограниченный интервал времени

не все ОЗ, представляющие интерес для потребителя, попадут в зону видимости ОГ ДЗЗ, и, следовательно, потребитель получит не полную информации. Учитывая вышесказанное, целесообразно в качестве результативности ОГ КА ДЗЗ выбирать показатель, характеризующий полноту информации, представленной потребителю с учетом ее важности. Решение задачи оценивания результативности ОГ КА ДЗЗ может применяться как на этапе проектирования системы, так и на этапе эксплуатации, для оценивания качества управленческих решений.

Постановка задачи

Для получение информации о некоторой совокупности ОЗ, представляющих интерес для потребителя, создается ОГ ДЗЗ, описываемая множеством

$$A = \left\{ a_i \mid i \in N = \overline{1,n} \right\}, \qquad (1)$$

где a_i — конкретный КА, N — множество индексов КА.

Каждый КА из состава ОГ характеризуется совокупностью параметров:

$$a_i \equiv \left\langle \Psi_i, \Theta_i \right\rangle, \qquad (2)$$

где Ψ_i — параметры движения КА a_i, Θ_i — вектор параметров БА a_i КА. Далее в качестве параметров движения центра масс (ЦМ) КА будем принимать начальные условия (координаты и проекции скорости в начальный момент времени t_0) в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) [2]:

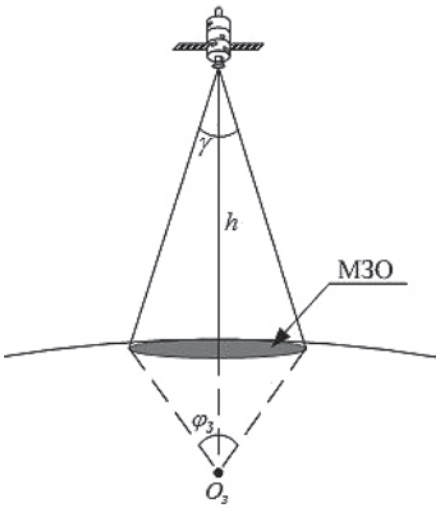

Рис. 1. Мгновенная зона обзора КА ДЗЗ

$$\Psi_i = \left(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}, V_{x0i}, V_{y0i}, V_{z0i} \right). \qquad (3)$$

Для КА ДЗЗ одним из наиболее важных параметров БА является γ — угол обзора специальной БА, определяющей мгновенную зону видимости (МЗО) КА на поверхности Земли [3] (рис. 1):

Результативность функционирования ОГ КА ДЗЗ на некотором временном интервале оценивания $T_{\text{оц}} = \left(t_0, t_f \right]$, где t_0 — начальный момент интервала оценивания, а t_f — конечный, с точки зрения объема информации, доставленной конечному потребителю, определяется количеством разведанных (т. е. информация, о которых была получена в результате ДЗЗ) ОЗ:

$$B'\left(T_{\text{оц}}\right) = \left\{ b_l \mid l \in L\left(T_{\text{оц}}\right) \right\} \subseteq B = \\ = \left\{ b_j \mid j \in M = \overline{1,m} \right\}, \qquad (4)$$

где $B'\left(T_{\text{оц}}\right)$ — множество разведанных ОЗ на временном интервале $T_{\text{оц}}$; B — множество ОЗ, представляющих интерес для потребителя; $L(T_{\text{оц}})$ — множество индексов разведанных ОЗ; M — множество индексов ОЗ; m — количество ОЗ, представляющих интерес для потребителя.

Каждый j-й ОЗ характеризуется совокупностью параметров:

$$b_j \equiv \left\langle \varphi_j, \Lambda_j \right\rangle, \qquad (5)$$

где φ_j — относительная важность j-го ОЗ; Λ_j — вектор (совокупность) параметров, характеризующих положение ОЗ на поверхности Земли.

Отметим, что структура вектора Λ_j может разниться в зависимости от формы ОЗ. (рис. 2*а*) Например, для точечного ОЗ (ТОЗ), линейные размеры которого несопоставимо малы с размерами МЗО КА, положение на поверхности Земли может определяться с помощью пары географических координат — долготы λ_j и широты ψ_j:

$$\Lambda_j = \left(\lambda_j, \psi_j \right). \qquad (6)$$

Для объектов, имеющих прямоугольную форму (рис. 2*б*):

$$\Lambda_j = \left(\lambda_{\text{ц}j}, \psi_{\text{ц}j}, \Delta\lambda_j, \Delta\psi_j \right), \qquad (7)$$

где $\lambda_{\text{ц}j}, \psi_{\text{ц}j}$ — географическая долгота и широта центра прямоугольного НО; $\Delta\lambda_j, \Delta\psi_j$ — про-

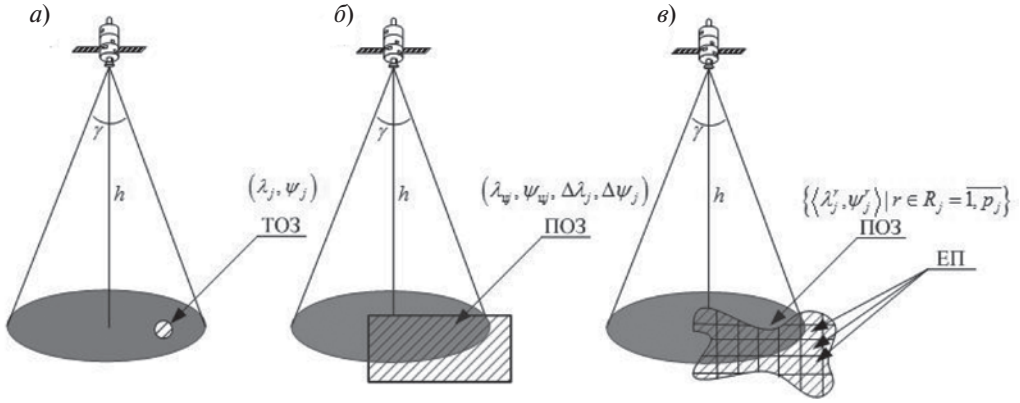

Рис. 2. Особенности наблюдения площадных и точечных объектов

тяженность объекта по долготе и широте, выраженная в градусной мере.

Если площадной ОЗ (ПОЗ) имеет произвольную геометрическую форму (рис. 2*в*), то представляется целесообразным разбить его на множество «единичных» площадей (ЕП) — множество участков земной поверхности, размеры которых несопоставимо малы с МЗО КА ДЗЗ. Тогда

$$\Lambda_j = \left\{ \left\langle \lambda_j^r, \psi_j^r \right\rangle | r \in R_j = \overline{1, p_j} \right\}, \qquad (8)$$

где λ_j^r, ψ_j^r — географические долгота и широта центра r-й ЕП, образующей j-й ПОЗ; r — индекс ЕП; R_j — множество индексов ЕП, образующих ПОЗ b_j; p_j — количество ЕП, образующих ПОЗ b_j.

Далее будем считать, что, если центр ЕП попал в некоторый момент времени $t_k \in T_{\text{оц}}$ в МЗО КА ДЗЗ, то КА «наблюдает» всю ЕП. Размер единичных площадей определяется, исходя из требований, предъявляемых к точности оценки.

Очевидно, что алгоритмы оценивания результативности ОГ ДЗЗ для ситуаций, когда интерес для потребителя представляют только ТОЗ, или только ПОЗ, или их комбинация, будут отличаться. В данной ситуации целесообразно все множество ОЗ разбить на два непересекающихся подножества:

$$B = \left\{ b_j \mid j \in M = \overline{1, m} \right\} = B^{\text{ТОЗ}} \cup B^{\text{ПОЗ}}, \qquad (9)$$

где $B_{\text{ТОЗ}} = \left\{ b_j \mid j \in M_{\text{ТОЗ}} \right\}$, $M_{\text{ТОЗ}}$ — множество индексов ТОЗ, $B_{\text{ПОЗ}} = \left\{ b_j \mid j \in M_{\text{ПОЗ}} \right\}$, $M_{\text{ПОЗ}}$ — множество индексов ПОЗ.

Необходимо ввести показатель результативности функционирования ОГ КА ДЗЗ. На временном интервале $T_{\text{оц}}$ для ТОЗ данный показатель будет определяться как отношение количества разведанных ТОЗ к общему количеству ТНО с учетом коэффициентов их важности для потребителя:

$$J_{\text{ПОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right) = \frac{\sum\limits_{l \in L_{\text{ПОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right)} \varphi_l}{\sum\limits_{j \in M_{\text{ПОЗ}}} \varphi_j}, \qquad (10)$$

где $L_{\text{ТОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right)$ — множество индексов ТОЗ разведанных всей группировкой КА на временном интервале $T_{\text{оц}}$.

При оценивании результативности системы при съемке ПОЗ важно учитывать, какая доля его площади попала в МЗО всех КА ДЗЗ, образующих ОГ, в каждый момент времени $t \in T_{\text{оц}}$. Назовем долю его площади, попавшую в зону видимости КА ДЗЗ степенью наблюдаемости j-го ПОЗ, оцениваемую как отношение наблюдаемых ЕП j-го ПНО к общему количеству ЕП, образующих j-й ПНО:

$$\delta_j\left(T_{\text{оц}}\right) = \frac{s_j(T_{\text{оц}})}{R} \in [0,1], \qquad (11)$$

где $s_j(T_{\text{оц}})$ — количество ЕП j-го ПОЗ, разведанных ОГ за интервал оценивания $T_{\text{оц}}$.

Будем говорить, что, если $\delta_j\left(T_{\text{оц}}\right) = 0$ — объект полностью ненаблюдаем, $0 < \delta_j\left(T_{\text{оц}}\right) < 1$ — частично наблюдаем, $\delta_j\left(T_{\text{оц}}\right) = 1$ — полностью наблюдаем. Тогда для ПНО показатель результативности будет иметь вид:

$$J_{\text{ПОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right)=\frac{\sum\limits_{l\in M_{\text{ПОЗ}}}\varphi_l\delta_l\left(T_{\text{оц}}\right)S_l}{\sum\limits_{j\in M_{\text{ПОЗ}}}\varphi_j S_j}, \qquad (12)$$

где S_l, S_j — площадь соответствующих ОЗ.

Для ситуаций, когда интерес для потребителя представляют как ТОЗ, так и ПОЗ, показатель результативности ОГ КА ДЗЗ с использованием аддитивной свертки Лагранжа будет иметь вид:

$$J\left(T_{\text{оц}}\right)=\varepsilon_{\text{ТОЗ}}\frac{\sum\limits_{l\in L_{\text{ТОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right)}\left[\varphi_l\right]}{\sum\limits_{j\in M_{\text{ТОЗ}}}\left[\varphi_j\right]}+$$

$$+\varepsilon_{\text{ПОЗ}}\frac{\sum\limits_{j\in M_{\text{ПОЗ}}}\left[\varphi_j\delta_j\left(T_{\text{оц}}\right)S_j\right]}{\sum\limits_{j\in M_{\text{ПОЗ}}}\left[\varphi_j S_j\right]}, \qquad (13)$$

где $\varepsilon_{\text{ТОЗ}},\varepsilon_{\text{ПОЗ}}$ — коэффициенты свертки. Отметим, что $J\left(T_{\text{оц}}\right)\in[0,1]$, если $J\left(T_{\text{оц}}\right)=0$ — потребитель не получил информацию ни об одном ОЗ, если $0<J\left(T_{\text{оц}}\right)<1$ — потребитель получил информацию о части ОЗ, если $J\left(T_{\text{оц}}\right)=1$ — потребителю была представлена информация об всех ОЗ.

Алгоритм вычисления показателя результативности ДЗЗ

Будем считать, что множество ОЗ $B=\left\{b_j \mid j\in M=\overline{1,m}\right\}$ задано потребителем, т. е. нам известна информация по каждому ОЗ $\left\langle\varphi_j,\Lambda_j\right\rangle$. Тогда задача сводится к построению множества индексов разведанных ТОЗ — $L_{\text{ТОЗ}}\left(T_{\text{оц}}\right)$ и поиску значений степени наблюдаемости для каждого ПОЗ — $\delta_j, j\in M_{\text{ПОЗ}}$. Множество разведанных ТОЗ получается как объединение множеств ТОЗ разведанных каждым КА:

$$B'\left(T_{\text{оц}}\right)=\bigcup_{i\in N}B_i'\left(T_{\text{оц}}\right), \qquad (14)$$

где B_i' — множество ТОЗ, разведанных i-м КА.

Требуемые данные могут быть получены на основе баллистического прогноза движения ЦМ каждого КА $a_i\in A$ и построения МЗО в моменты времени

$$t_k=\left[t_0+k\Delta t\right]\in T_{\text{оц}}, \qquad (15)$$

где Δt — дискрет времени. Значение дискрета Δt выбирается из соображений обеспечения требуемой точности оценивания показателя результативности;

$$k\in K=\overline{1,\left(\frac{t_f-t_0}{\Delta t}-1\right)}$$ — номер дискрета.

Алгоритм решения задачи можно представить в виде.

Шаг 1. Определяются координаты подспутниковой точки (ПСТ) i-го КА в момент времени t_k в три шага:

а) Определяется положение КА в АГЭСК в момент времени t_k численным интегрированием системы дифференциальных уравнений одним из методов семейства Рунге-Кутты [3]:

$$\begin{cases}\dot{x}=V_x,\\ \dot{y}=V_y,\\ \dot{z}=V_z,\\ \dfrac{dV_x}{dt}=-\mu^* x+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^* x_0^*\rho^2(1-5z_0^{*2})+f_x,\\ \dfrac{dV_y}{dt}=-\mu^* y+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^* y_0^*\rho^2(1-5z_0^{*2})+f_y,\\ \dfrac{dV_z}{dt}=-\mu^* z+\dfrac{3}{2}C_{20}\mu^* z_0^*\rho^2(3-5z_0^{*2})+f_z,\end{cases} \qquad (16)$$

где f_x, f_y, f_z — ускорения, обусловленные торможением атмосферы, км/с^2; C_{20} — коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям, $C_{20}=-1082{,}62575\cdot10^{-6}$.

$$\mu^*=\frac{\mu}{r_0^2}, x^*=\frac{x}{r_0}, y^*=\frac{y}{r_0}, z^*=\frac{z}{r_0},$$
$$\rho=\frac{a}{r_0}, r_0=\sqrt{x^2+y^2+z^2}. \qquad (17)$$

Здесь μ — константа гравитационного поля Земли, $\mu=398600{,}4418$ км^3/с^2; a — экваториальный радиус Земли, $a=6378{,}136$ км;

б) Определяется положение КА в гринвической системе координат (ГСК). Перевод из АГЭСК в ГСК осуществляется по формулам [4]:

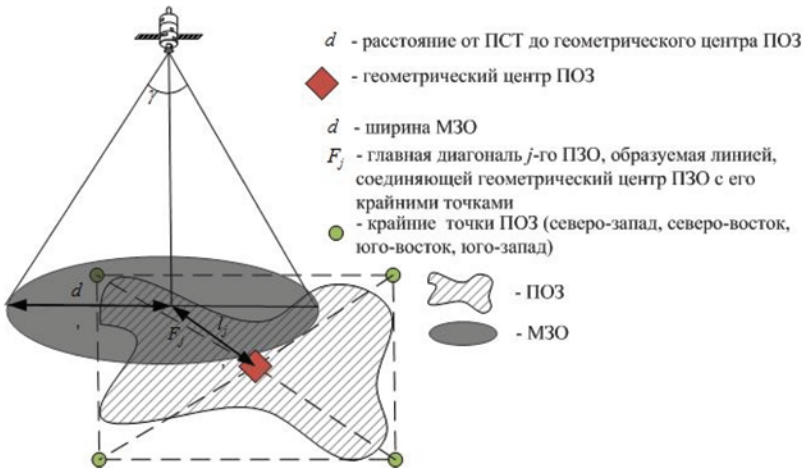

Рис. 3. Условие для расчета степени наблюдаемости *j*-го ПОЗ

$$\begin{cases} x_Г = x\cos S(t_k) + y\sin S(t_k), \\ y_Г = y\cos S(t_k) - y\sin S(t_k), \\ z_Г = z, \\ \dot{x}_Г = \dot{x}\cos S(t_k) + \dot{y}\sin S(t_k) + \omega_З y_Г, \\ \dot{y}_Г = \dot{y}\cos S(t_k) - \dot{x}\sin S(t_k) - \omega_З x_Г, \\ \dot{z}_Г = \dot{z}. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь $S(t_k)$ — звездное время на меридиане Гринвича в момент времени t_k [6],

$$S(t_k) = S(t_0) + \omega_З(t_k - t_0), \quad (19)$$

где $S(t_0)$ — звездное время на меридиане Гринвича в некоторый начальный момент времени, выраженное в градусной мере;

в) Ищутся координаты подспутниковой точки (ПСТ) $\langle \lambda_{ПСТ}, \psi_{ПСТ} \rangle$, высота КА над поверхностью Земли *h* и ширина МЗО *d* [4]:

$$\begin{cases} \sin\psi_{ПСТ} = \dfrac{z_Г}{r}, \ \psi_{ПСТ} \in \left[-\dfrac{\pi}{2}; \dfrac{\pi}{2}\right], \\ \sin\lambda_{ПСТ} = \dfrac{y_Г}{\sqrt{x_Г^2 + y_Г^2}}, \\ \cos\lambda_{ПСТ} = \dfrac{x_Г}{\sqrt{x_Г^2 + y_Г^2}}, \ \lambda_{ПСТ} \in [0, 2\pi], \\ r = \sqrt{x_Г^2 + y_Г^2 + z_Г^2}, \ h = r - R_З. \end{cases} \quad (20)$$

$$d = 2R\left[\arcsin\left(\frac{R+h}{R}\sin\beta\right) - \beta\right], \quad (21)$$

где $R_З$ — радиус Земли, $R_З = 6371$ км.

Шаг 2. Если *j*-й ОЗ является точечным, то переходим на шаг 3, в противном случае на шаг 4.

Шаг 3. Определяется расстояние от ПСТ до ТОЗ [5]:

$$l = R_З\left[\arccos\left(\sin\psi_{ПСТ}\sin\psi_j + \cos\psi_{ПСТ}\cos\psi_j\cos(\lambda_j - \lambda_{ПСТ})\right)\right]. \quad (22)$$

Если выполняется условие попадания j-го ТОЗ в МЗО *i*-го КА

$$l \le d, \quad (23)$$

то

$$B_i'(T_{ОЦ}) = B_i'(T_{ОЦ}) \cup b_j \quad (24)$$

Шаг 4. Анализируем необходимость просчетов для *j*-го ПОЗ (25) (рис. 3):

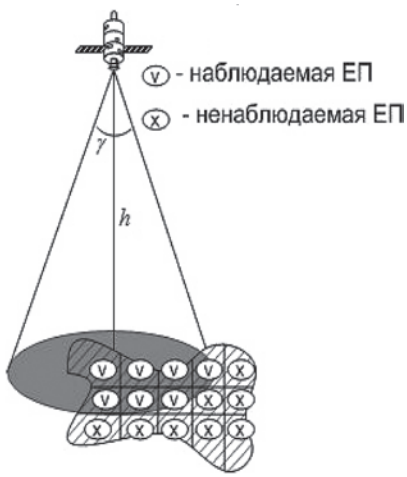

Рис. 4. К расчету степени наблюдаемости ПОЗ

$$l_j \le F_j \qquad (25)$$

Если условие (25) выполняется, то повторяем шаг 5 для каждой *r*-й ЕП *j*-го ПОЗ, $r \in R_j$.

Шаг 5. Анализируем попадание *r*-й ЕП *j*-го ПОЗ в МЗО КА (рис. 4):

$$l_r = R_З\left[\arccos\left(\sin\psi_{ПСТ}\sin\psi_r + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \cos\psi_{ПСТ}\cos\psi_r\cos\left(\lambda_r - \lambda_{ПСТ}\right)\right)\right]. \qquad (26)$$

$$l_r \le d. \qquad (27)$$

Шаг 6. Шаги 1–2 повторяем для всех ОЗ, КА и моментов времени.

Заключение

В результате выполнения алгоритма сформированы множество индексов разведанных ТОЗ — $L_{ТОЗ}\left(T_{оц}\right)$ и множество значений степеней наблюдаемости ПОЗ — $\left\{\delta_j \mid j \in M_{ПОЗ}\right\}$. Подставляя полученные значения в формулу (13) определяем значения показателя результативности ОГ КА ДЗЗ.

Данный алгоритм целесообразно использовать на этапах проектирования космических систем наблюдения и во время эксплуатации в контуре автоматизированного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гетман М., Раскин А.** Военный космос: без грифа «секретно». — М.: Фонд содействия авиации «Русские витязи», 2008. — 464 с.

2. **Петухов Г. Б.** Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Методология, методы, модели. — МО СССР, 1989. — 660 с.

3. **Балк М. Б.** Элементы динамики космического полета / М. Б. Балк. — М.: Наука, 1965. — 338 с.

4. ГОСТ Р 51794–2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. — М.: Стандартинформ, 2009. — 19 с.

5. **Степанов Н. Н.** Сферическая тригонометрия / Н. Н. Степанов. — Л.: ОГИЗ, 1948. — 154 с.

6. **Гиенко Е. Г.** Геодезическая астрономия: учеб. пособие / Е. Г. Гиенко, В.Ф. Канушин. — Новосибирск: СГГА, 2003. — 35 с.

А.И. Саруханян
ПАО «Интелтех»

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУППИРОВКОЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены перспективы использования нейронных сетей для решения множества задач управления группировкой автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выполняющих различные задачи в известных, частично-известных и неизвестных областях подводного пространства. Рассмотрены подходы для выполнения задач группировкой в условиях отсутствия заранее заданных алгоритмов поведения как группы АНПА, так и отдельных ее членов. Для распределения задач между АНПА рассматриваются методы взаимодействия между членами группы и варианты выбора наилучшего кандидата под решения каждой отдельной задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АНПА, группа АНПА, нейронные сети, взаимодействие группировки АНПА, решение подводных задач

Введение

За последние десятки лет во многих странах, занимающих лидирующие положения в области морских технологий, создано более 10 тысяч необитаемых подводных аппаратов для решения различного рода задач. За это время данные аппараты продемонстрировали свою эффективность при выполнении многих видов работ. Например, обзорно-поисковые работы, геологоразведочные работы, обеспечение подледных работ, мониторинг водной среды, патрулирование, поиск и уничтожение мин. За это время было предложено немало решений в области построения и управления группой АНПА. Однако все они рассчитаны на ограниченный набор задач и решений, алгоритм которых заранее известен и доступен. В данной статье предложен вариант построения и управления группой АНПА с использованием нейронных сетей, что позволит изменять алгоритм поведения группы, ее построение и выбор наилучшего решения для выполнения задачи при изменяющихся входных параметрах системы.

Использование нейронных сетей при программировании АНПА

Искусственная нейронная сеть (ИНС) — математическая модель, а также ее программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма.

Искусственный нейрон является более упрощенным видом биологического нейрона, имитируя его свойства в первом приближении. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый с которых является выходом другого нейрона. Каждый вход множится на соответствующий вес, аналогичный синоптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона.

Чтобы понять, где нужно, а где не нужно использовать нейронные сети, давайте сначала разделим все возможные задачи на следующие 3 типа:

К первому типу задач относятся такие задачи, алгоритм и правила решения задач которых известны заранее, и для решения такой задачи требуется просто написать программу. К таким задачам относятся создание игр, сайтов, решений уравнений и т. д. Возможно, процесс написания такой программы окажется долгий и трудоемкий, но тут важен только тот факт, что алгоритм ее решения заранее известен. Ко второй группе относятся те задачи, для решения которых правила и алгоритмы не до конца изучены.

Рис. 1

Представим, что есть какая-то часто повторяющаяся ситуация, и в зависимости от ее поведения, частоты итерации или других критериев пытаются вывести какие-то обобщенные законы. Третий тип задачи предоставляет из себя такие задачи, для решения которых алгоритмы и правила отсутствуют. Например, распознавание рисунков, прогнозирование роста или падения курса валют. Именно для решения такого типа задач могут использоваться нейронные сети.

Рассмотрим на простом примере, как работает нейронная сеть. Предположим, что мы хотим научить нашу программу распознавать букву «А». Для этого нам необходимо взять самые разные шрифты и размеры этой буквы, так же можно добавить искажения. Затем начинаем процесс «прогона» различных интерпретаций буквы «А» через нашу нейронную сеть. После прохождения буквы несколько тысяч раз через нейронную сеть, она начинает выдавать правильные результаты. То есть нейронная сеть начинает понимать различные варианты буквы, после этого можно считать такую нейронную сеть обученной и применять ее на практике для идентификации данной буквы.

Классификация задач, выполняемых группой АНПА

Рассмотрим основные задачи, стоящие перед группой АНПА

В качестве метода решения задач предлагается алгоритм, позволяющий использовать «опыт» накопленной базы знаний для перераспределения и перепланирования задач группы АНПА. Это позволит выбрать наилучшего кандидата из группировки для каждой определенной задачи,

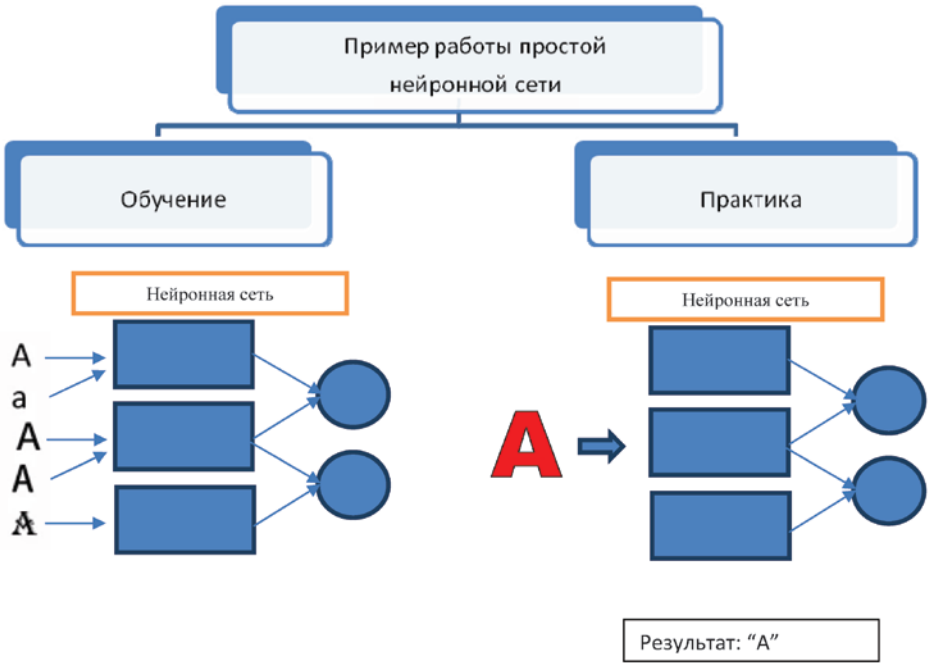

Рис. 2

а также обеспечит выполнение задачи даже в случае возникновения проблем у выполняющего миссию аппарата путем его замены на другого члена группы при надобности.

Перед выполнением задачи предполагается, что группа будет учитывать технические возможности и накопленные знания не только всей группы, но и каждого участника в частности. Учитывая все эти данные, лидер группы будет выбирать подходящего участника группы и структуру построения группы АНПА при выполнении миссии.

Рис. 3

Заключение

У нейронных сетей много важных свойств, но ключевое из них — это способность к обучению. Обучение нейронной сети в первую очередь заключается в изменении «силы» синоптических связей между нейронами. Правильно обученные нейронные сети с высокой степенью вероятности будут принимать верные решения при различного рода задачах. Это позволит решить основную проблему, которая стоит перед автономными необитаемыми аппаратами. Они смогут правильно идентифицировать различные объекты, в том числе те, которые будут видеть впервые. Главным преимуществом при использовании такого рода группы АНПА будет возможность выполнять различного рода задачи автономно, т. е. при возникновении различных ситуаций или появления новых переменных в алгоритмах группа продолжит автономно выполнять свою задачу без выхода на связь с корабельными или береговыми станциями.

На сегодняшний день нейронные сети являются одним из приоритетных направлений исследований в области искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Д. А.Тархов.** Нейронные сети. Модели и алгоритмы. (Справочник.) М., Радиотехника, 2005.

2. **С. Хайкин.** Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М., «Вильямс», 2006.

3. **В. А. Головко.** Нейронные сети: обучение, организация и применение. М., ИПРЖР, 2001.

4. **Battiti, R.,** «First and second order methods for learning: Between steepest descent and Newton's method,» *Neural Computation,* vol. 4, no. 2, pp. 141–166, 1992.

5. **Агеев М. Д., Касаткин Б. А., Киселев Л. В.** и др. Автоматические подводные аппараты. JL: Судостроение, 1981. —223 с.

6. **Адрианов А. В., Тарасов В. Г.** Методология мониторинга морского биоразнообразия (региональный и локальный уровни) // Научные основы сохранения биоразнообразия Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2006. — С. 10–29.

7. **Бабак, Л. Н.** О применении необитаемых подводных аппаратов для исследования водных экосистем / Л. Н. Бабак, В. И. Дулепов, Н. Н. Лелюх, Ю. В. Ваулин, А. Ф. Щербатюк // Подводные технологии. — Владивосток: Дальнаука, 2005. № 1 – С. 59–68.

8. **Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев.** Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Проблемы интеллектуального управления сб. статей. — С. 34–43

В.И. Талагаев
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор АВН, ПАО «Интелтех»

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СВЯЗИ И ОБМЕНА ДАННЫМИ ВМФ В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

АННОТАЦИЯ: В работе отражены взгляды на дальнейшее совершенствование автоматизированной системы связи и обмена данными ВМФ и разработку аппаратно-программных средств защиты системы от радиоэлектронного подавления. Приведены обобщенные алгоритмы управления ресурсами системы в условиях массированного подавления радиоканалов преднамеренными помехами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Автоматизированная система связи и обмена данными, радиоэлектронное подавление, установление факта преднамеренного помехового воздействия на радиоканалы, план и процессы управления первичной и вторичной сетями системы в условиях преднамеренных помех.

Особенностью автоматизированной системы связи (АСС) и обмена данными ВМФ является использование для обмена информацией береговых командных пунктов (БКП) с подводными лодками (ПЛ) и надводными кораблями (НК) только радиоканалов (РК), т. е. общей со средствами радиоэлектронного подавления (РЭП) эвентуального противника среды распространения сигналов.

Создаваемые противником в РК АСС преднамеренные (заградительные, прицельные и имитационные) помехи снижают ее пропускную способность и вводят в систему ложную информацию, вносящую ошибки в процесс управления силами и оружием.

Разработка комплекса организационно-технических мер, направленных на снижение дестабилизирующего воздействия помех одна из главных задач радиоэлектронной защиты (РЭЗ) АСС ВМФ от РЭП.

Решение проблемы РЭЗ АСС связано, во-первых, с использованием аппаратных методов и средств повышения скрытности и помехозащищенности РК, входящих в АСС, и во-вторых, с оптимизацией управления системой и автоматизированными комплексами связи (АКС) ПЛ и НК в условиях РЭППервое направление РЭЗ основывается на применении в АСС скрытных быстродействующих и сверхбыстродействующих РК, РК с шумоподобными сигналами и с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, многочастотные РК, РК с помехоустойчивым кодированием и обратной связью, а также на использовании оптимальных методов обработки сигналов в приемниках /1, 2/.

Второе направление предполагает наличие в АСС программно-технических средств РЭЗ, обеспечивающих сбор, обработку и выдачу в систему управления АСС данных о преднамеренных помехах в РК, необходимых для внесения изменений в процесс управления системой (перераспределение потока сообщений и каналов, характера использования РК, их переход в помехозащищенный режим и др.) /3/. Особое значение программно-технические средства РЭЗ приобретают в высокоавтоматизированных системах связи.

В АСС действие преднамеренных помех проявляется в виде неисправности оборудования или дестабилизирующих явлений на трассах распространения сигналов, что требует незамедлительного установления факта их наличия /4/ и изменения плана управления системой связи /5, 6/. В связи с этим представляет интерес разработка алгоритмов управления АСС в условиях РЭП и определения характера взаимодействия программно-технических средств РЭЗ с системой управления АСС.

Функции любой системы управления связью состоят в определении и анализе состояния системы связи и принятии решений о выдаче команд по изменению в объекте управления /3/. Задача управления АСС может быть разделена на две: управление при изменении объема и ха-

рактера распределения информационных потоков в нормальных условиях и управление при нарушении нормальной работы — огневом и радиоэлектронном поражении элементов АСС (узлов связи и коммутации, РС), в том числе поражении РК преднамеренными помехами. В соответствии с этим система управления АСС может быть разделена на системы управления первичной и вторичной сетями. Назначением системы управления первичной сетью является обеспечение коммутации каналов (в том числе радиоканалов внутри направления «берег-море») на всей сети и поддержание их работоспособности и требуемого качества.

Система управления вторичной сетью создается для перераспределения информационных потоков внутри этой сети с целью их пропуска в условиях изменения объемов и направлений этих потоков. Взаимодействие систем управления первичной и вторичной сетью состоит в том, что система управления первичной сетью обеспечивает перераспределение каналов между различными вторичными сетями и введение резервных каналов первичной сети для обслуживания потоков сообщений вторичной сети в периоды ее перегрузки, или поражения.

Принятия решений о выдаче команд по изменению плана управления первичной и вторичной сетями АСС представляет собой процесс формирования управляющих воздействий по использованию ресурсов системы, к которым относятся услуги, технологии транспортировки, маршруты и каналы связи. Задачи управления информационным обменом в АСС могут быть сгруппированы по видам ресурсов системы: управление доступом к каналам связи, управление технологией транспортировки сообщений, управление маршрутом и управление каналами связи.

Для формального описания процесса управления АСС введем понятие плана управления — полного набора значений управляющих переменных, регламентирующих использование ресурсов системы для обслуживания сообщений различных классов /5/.

Сообщения входящего в систему информационного потока с точки зрения управления могут быть разделены на К классов (сигналы боевого управления, информации по освещению обстановки, целеуказаний, сигналов управления оружием и др.), характеризующихся одинаковыми требованиями к качеству обслуживания. Удобной формой представления плана управления является совокупность матриц управления для каждой из перечисленных задач управления АСС

$$U = \{M1,\ M2,\ M3,\ M4\},$$

где U — план управления АСС, $M1$ — матрица ограничения доступа, $M2$ — матрица обслуживания, $M3$ — матрица маршрутов, $M4$ — матрица распределения каналов связи.

План управления может быть представлен простыми и стохастическими матрицами. В простой матрице управления элемент m_r^k указывает порядковый номер ресурса r для обслуживания сообщения k-го класса. В стохастической матрице элемент m_r^k определяет вероятность выбора ресурса r, причем $\sum_{r \equiv y} m_r^k = 1$, где y — множество управляемых ресурсов.

Поскольку сообщения на вход АСС в периоды повышенной военной опасности могут поступать случайным образом в разное время с различной интенсивностью и воздействие средств РЭП на РК системы также будет носить вероятностный характер для составления плана управления АСС целесообразно использовать стохастические матрицы управления.

Матрица ограничения доступа $M1$ регламентирует предоставление услуг по передаче информации для входящих потоков сообщений различных классов, т. е. определяет ограничения на ввод сообщений в систему, ограничения объема трафика (нагрузки), равномерное распределение связных ресурсов (РК) и приоритетность обслуживания сообщений различных видов и категорий срочности и секретности

$$M1 = \left\| m1_n^{kij} \right\|,\ k = \overline{1, K};\ i, j = \overline{1, N}\ ,$$

где m_n^{kij} — вероятность приема заявки на передачу сообщения k-го класса из узла i в узел j (из ЦУС ВМФ в узлы связи флотов); N — число узлов в системе.

Управление на уровне доступа в систему обеспечивает ограничение объема трафика для наиболее полного использования пропускной способности.

Матрица обслуживания $M2$ определяет выбор технологии транспортировки (способов формализации и адресования) для доставки

каждого принятого к обслуживанию сообщения, т. е. разделение входящего потока сообщений на технологические

$$M2 = \left\| m2_r^{kij} \right\|,\ r = \overline{1,R};\ i,j = \overline{1,N},$$

где $m2_r^{kij}$ — вероятность выбора *r*-й технологии для доставки сообщения в параметрами *kij, R* — число реализованных технологий транспортировки информации.

Матрица маршрутов *M*3 регламентирует выбор маршрута (пути) при передаче сообщения от узла источника сообщений к узлу получателю, т. е. определяет выбор пути для обеспечения равномерной загрузки центров коммутации и РС

$$M3 = \left\| m3_x^{kij} \right\|,\ x = \overline{1,Z};\ i,j = \overline{1,N},$$

где $m3_x^{kij}$ — вероятность выбора маршрута *x* для передачи сообщения с параметрами *kij*, *Z* — число возможных маршрутов.

В децентрализованной АСС задача маршрутизации распределяется по связным процессорам узлов системы и решается каждым из них автономно. При этом в центрах коммутации в соответствии с матрицей *M*3 вырабатывается таблица маршрутизации, определяющая направление передачи.

Матрица распределения каналов *M*4 определяет распределение каналов передачи между технологиями транспортировки

$$M4 = \left\| m4_z^r \right\|,\ z = \overline{1,Z};\ r = \overline{1,R},$$

где $m4_z^r$ — вероятность использования канала *Z* для *r*-й технологии, *Z* — число каналов связи. При этом $Z = Z_1 + Z_2$, где Z_1 — число каналов береговой части системы (проводные радиорелейные и др.), а Z_2 _ количество радиоканалов в направлении «БКП — НК, ПЛ».

Физическая структура систем управления первичной и вторичной сетями АСС определяется реализацией логических элементов в аппаратных средствах (логические модули) и в ЭВМ узлов связи и коммутации АСС и АКС НК и ПЛ. При этом можно выделить четыре типа процессов управления, выполняемых ЭВМ, условно обозначенных A, B, C и D. Блок-схема алгоритмов A, B, C и D — процессов и их взаимосвязи показаны на рисунке.

A — процессы, соответствуют уровню принятия решений по потоку сообщений, а B — процессы — уровню принятия решений по каждому отдельному сообщению потока. По мере необходимости A — процессы обращаются к распределенной базе данных, где содержится информационное отображение первичной и вторичной сетей АСС и откуда берутся данные для расчета плана управления *U*.

В базе данных имеется модель действующей системы РЭП, которая так же учитывается при расчете плана обслуживания. Корректировка модели РЭП производится по мере поступления от систем освещения обстановки сведений о появлении средств РЭП (например самолета постановщика помех) в зоне действия получателей информации.

Рассчитанный план управления *U* заносится в таблицы управления узлов коммутации и связи АСС откуда считываются B — процессом при обслуживании каждого требования на ресурсы системы. Реализация любой из задач управления АСС предполагает наличие в системе управления кроме функций принятия решений о выдаче команд на изменения в первичной и вторичной сетях АСС функций сбора информации о состоянии объекта управления (нагрузке, исправности и наличию преднамеренных помех и др.) и контроля исполнения (о изменении плана управления и доставки).

Для реализации этих функций служат C и D — процессы. C — процессы могут быть стандартизированы для всех задач управления и выделены в службу сетеметрии. Для отражения текущего состояния системы связи организуется распределенная база данных информационного отображения. Алгоритм, реализующий C — процесс в узле связи и коммутации, корректирует соответствующий компонент базы данных и использованием информации о текущем состоянии этого узла и информации из служебных сообщений адресованных *i* — ому узлу. D — процессы соответствуют уровню принятия решений о наличии и параметрах преднамеренных помех в РК первичной сети АСС «БКП — НК, ПЛ» и реализуются в программно — технических средствах РЭЗ, размещаемых в постах РЭЗ НК и ПЛ и приемных центров узлов связи. Посты РЭЗ, являясь основной частью службы отображения состояния АСС, предназначены для выработки текущих данных о помехах в РК первичной сети АСС. Текущие данные о помехах считываются C — про-

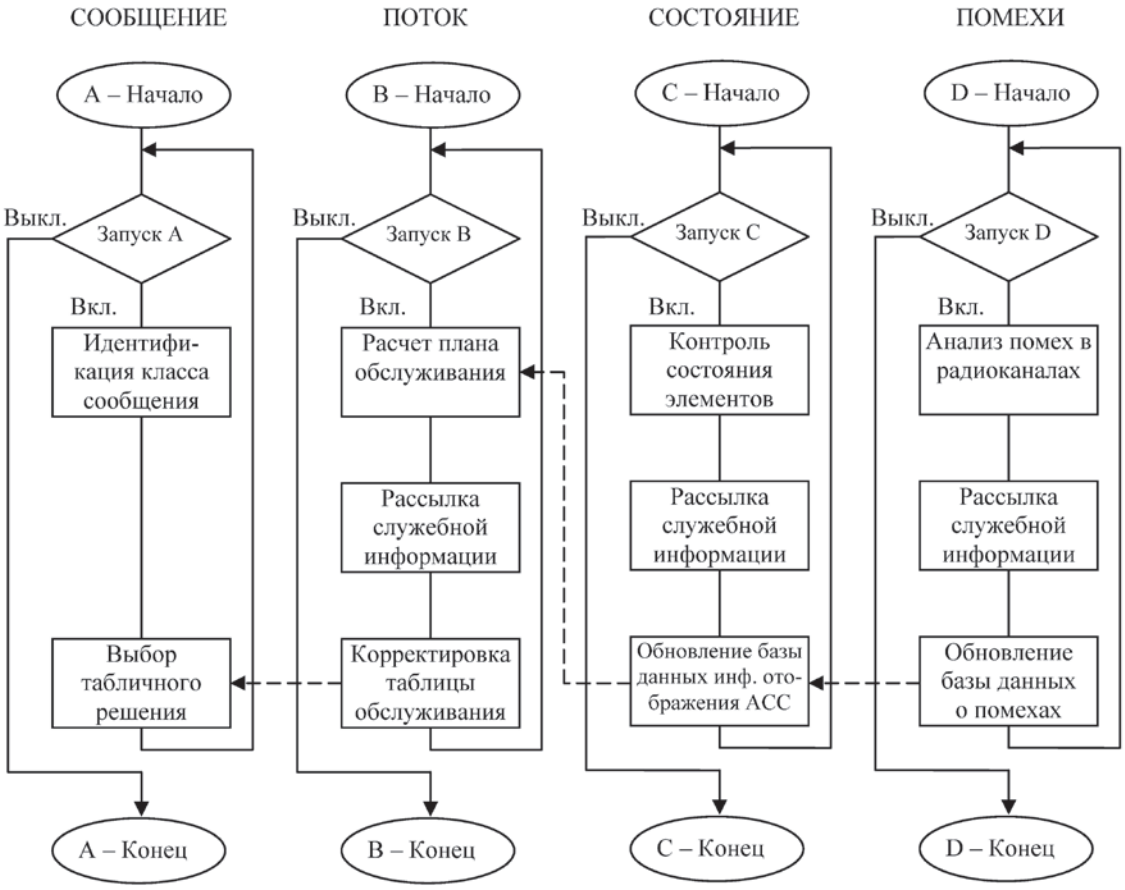

Рис. Блок-схема алгоритмов управления АСС в условиях РЭП

цессами и участвуют в корректировке базы данных *i*-го узла связи и коммутации АСС.

Поскольку элементы АСС рассредоточены в пространстве для сбора информации о состоянии первичной и вторичной сетей и обмена командами управления необходимо иметь служебную сеть связи системы управления. Береговая часть такой сети может быть организована как с использованием информационных каналов АСС, так и с помощью специальных каналов служебной связи. Ввиду ограниченности связных ресурсов (РС) НК и ПЛ для обеспечения обмена информацией при реализации C и D — процессов могут быть использованы информационные РК, т. е. передача с НК и ПЛ данных о помехах и передача команд о изменении плана использования РК АКС должна производиться по информационным каналам, например СБД.

Возможен другой вариант организации сбора данных о помехах действующих на РК АКС НК и ПЛ, при котором посты РЭЗ размещаются в районах приближенных к районам их действия, например на приемных центрах зональных узлов связи. При этом данные о помехах поступают в систему управления АСС по служебным каналам связи, а команды управления АКС НК и ПЛ передаются по информационным РК связи с НК и ПЛ.

Таким образом, одним из главных направлений совершенствования действующей АСС и обмена данными ВМФ наряду с применением помехозащищенных и скрытных РК является создание аппаратно-программной подсистемы РЭЗ АСС, оптимизирующей управление первичной сетью системы в условиях преднамеренных помех. Подсистема РЭЗ реализует функции сбора, обработки и выдачи в службу информационного отображения состояния АСС текущих данных о преднамеренных помехах в РК. Важной задачей при создании подсистемы РЭЗ АСС ВМФ является разработка методов и создание средств установления фактов преднамеренного помехового воздействия на РК системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Защита от радиопомех. Под. Ред. М.В. Максимова. — М.: Сов.радио,1876.

2. **Сикарев А. А., Фалько А. И.** Оптимальный прием дискретных сообщений. — М.: Связь, 1978.

3. **Талагаев В. И., Ихсанов Ф. И.** Защита информационного обмена в автоматизированной системе связи ВМФ от радиоэлектронного подавления. ТНТ сборник 34 НИИ ВМФ, вып. (102), 1987.

4. **Талагаев В. И., Кезлинг А. Г.** Способ контроля состояния дискретного радиоканала, Патент на изобретение (справка на патент № 2003235С1), 1993.

5. **Давыдов Г. Б.** Информация и сети связи. — М.: «Наука», 1984.

6. **Талагаев В. И.** Устойчивость системы морской радиосвязи. Указатель поступлений информационных материалов, ЦИВТИ МО СССР, вып. 6(33), 1991.

И. В. Труфанов
кандидат технических наук, доцент, АО «НИИ ТП», г. Москва

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ РАЗДЕЛИМОСТИ КЛАССОВ ОБЪЕКТОВ И ФОНА

АННОТАЦИЯ. Постановка проблемы: дешифрирование объектов наблюдения по нескольким цифровым изображениям с целью повышения достоверности и сокращения времени требует разработки и реализации методики и алгоритма синтеза единого изображения по критерию максимальной разделимости объектов и фона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: случайное поле яркости, ковариационная матрица вектора изображений, собственные числа, алгоритм синтеза, совместная плотность распределения.

В настоящее время летательные аппараты дистанционного зондирования Земли оснащаются средствами добывания видовой информации в различных спектральных диапазонах. Для сокращения времени дешифрирования необходимо автоматически синтезировать единое изображение на основе исходных разноспектральных сигналов. Визуальное качество синтезированного изображения должно обеспечить максимум разделимости объектов и фона для последующей обработки.

Изображение объекта рассматривается как реализация случайного процесса. Имеется несколько изображений объекта наблюдения. Каждое изображение представляет собой реализацию случайного поля яркости. Имеется множество реализаций, отличающихся друг от друга условиями фотографирования, маскировкой объекта, спектральным диапазоном фотографирования, временем фотографирования и т. д. Случайное поле яркости показано на рис. 1.

Алгоритмы синтеза единого изображения, сохраняющие различие между классами, суммируют изображения с весовыми коэффициентами $\{C_i\}$, вектор которых

$$C = \left[C_1, C_2, C_3, \ldots, C_{N_i}\right]^T$$

определяется из уравнения

$$(R - \lambda_{\max} E)C = 0\,, \qquad (1)$$

где N — число исходных изображений; R — ковариационная матрица вектора исходных изображений

$$f_{\langle N \rangle}(n_x, n_y) = \\ = \left[f_1(n_x, n_y), f_2(n_x, n_y), \ldots, f_N(n_x, n_y)\right]^T, \qquad (2)$$

$\lambda_{\max}$ — максимальное собственное число матрицы R.

На рис. 1 показана функция $f_i(n_x, n_y)$.

Физическую сущность метода проиллюстрируем на примере. Пусть имеются две случайные величины f_1, f_2. Величина f_1 распределена на прямой яркости X; f_2 — распределена на прямой яркости Y. Ставится задача: найти линейное отображение $g = C_1 f_1 + C_2 f_2$ множеств X и Y на множество L так, чтобы разность вероятностей

$$P\{x_1 < f_1 < x_2;\ \ y_1 < f_2 < y_2\} - P\{l_1 < g < l_2\}$$

была минимальной. Здесь

$$\forall x_1, x_2 \in X;\ \ y_1, y_2 \in Y;\ \ l_1, l_2 \in L;\ \ C_1, C_2 \text{ —}$$

числа (коэффициенты суммирования).

Отметим, что в аналогичной постановке решается задача синтеза, когда имеется не две, а более случайных величин.

В случае нормального распределения величин f_1, f_2 справедливость формулы (1) для определения коэффициентов C_1, C_2 следует из рисунка 2, где представлена совместная плотность распределения вероятностей $P_{f_1 f_2}(X, Y)$.

Кривые равной вероятности (поперечные сечения плотности) есть эллипсы с диаметрами,

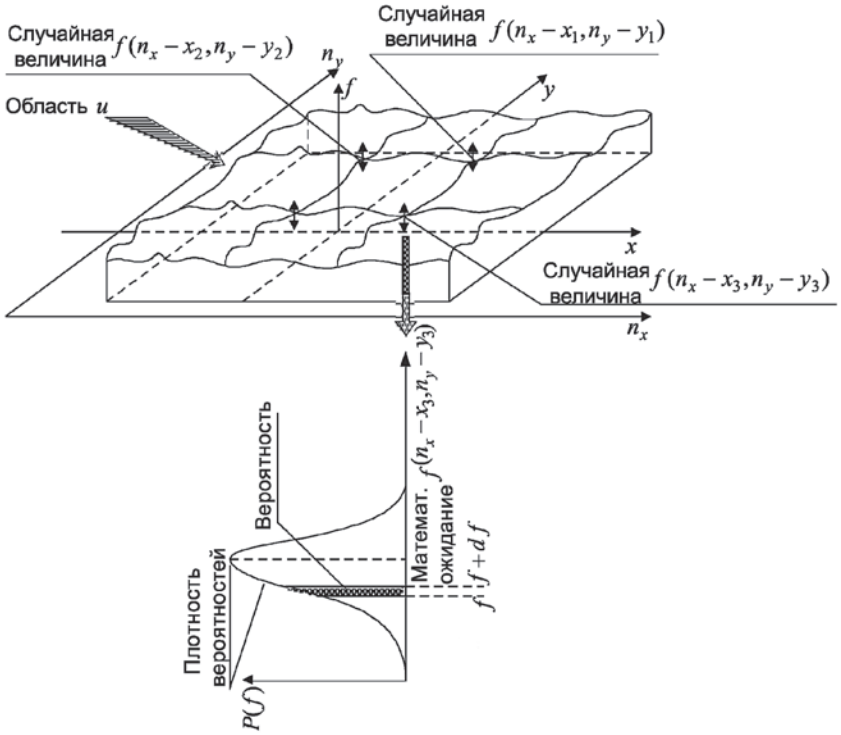

Рис. 1. Случайное поле яркости

пропорциональными квадратному корню из собственных чисел ковариационной матрицы вектора $\left[f_1, f_2\right]^T$. Из постановки задачи следует, что нужно найти продольное сечение плотности $P_{f_1 f_2}(X,Y)$ такое, чтобы разность площади этого сечения и объема под $P_{f_1 f_2}(X,Y)$ была минимальной.

Из рисунка 2 очевидно, что такое сечение должно проходить через бóльшую ось эллипса, соответствующую $\lambda_{\max} = \lambda_1$ — максимальному собственному числу ковариационной матрицы вектора $\left[f_1, f_2\right]^T$. Координаты C_1, C_2 (направляющие косинусы) этой оси прямо пропорциональны координатам собственного вектора, соответствующего $\lambda_{\max}$.

Таким образом, в примере для вычисления C_1, C_2 необходимо использовать уравнение (1). Более общее доказательство оптимальности алгоритмов синтеза при максимальном сохранении вероятностей распределения суммируемых случайных величин приведено в [1].

Процедуру синтеза можно рассматривать с позиции повышения степени разделимости классов объектов на получившемся изображении [2]. Усложняя приведенный выше пример, предположим, что случайная величина f_1 имеет двухмодальное распределение на X, величина f_2 имеет двухмодальное распределение на Y. Такая ситуация соответствует рисунку 3.

Предположим, что в качестве реализации случайной величины f_1 рассматривается изображение с объектами, представленное на рисунке 3 *а*, а на рисунках 3 *б* и 3 *в* представлены реализации яркости f_2 с теми же объектами дешифрирования, но полученное в другом диапазоне спектра электромагнитного излучения. Рядом с изображениями приведены их гистограммы.

Двухкоординатная плотность распределения вероятностей $P_{f_1 f_2}(X,Y)$ представлена на рис. 4.

Задача линейного синтеза, обеспечивающего максимум разделимости, сводится к поиску сечения, показанного на рис. 4.

Исходные изображения $f_1(n_x, n_y)$, $f_2(n_x, n_y)$ рассматриваются в некоторой области u, включающей только пару классов: объект и фон. Понятие «объект» охватывает несколько однотипных объектов наблюдения, например, самолетов или автомобилей. В результате синтеза единого изображения необходимо разделить эти объекты (выделить их изображения относительно фона).

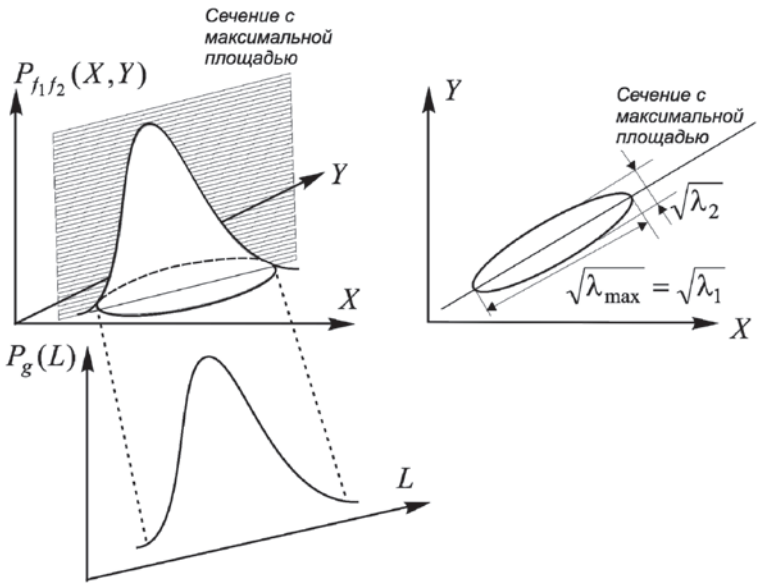

Рис. 2. Совместная плотность распределения $P_{f_1 f_2}(X,Y)$ двух изображений f_1, f_2 и ее одномерная проекция $P_g(L)$

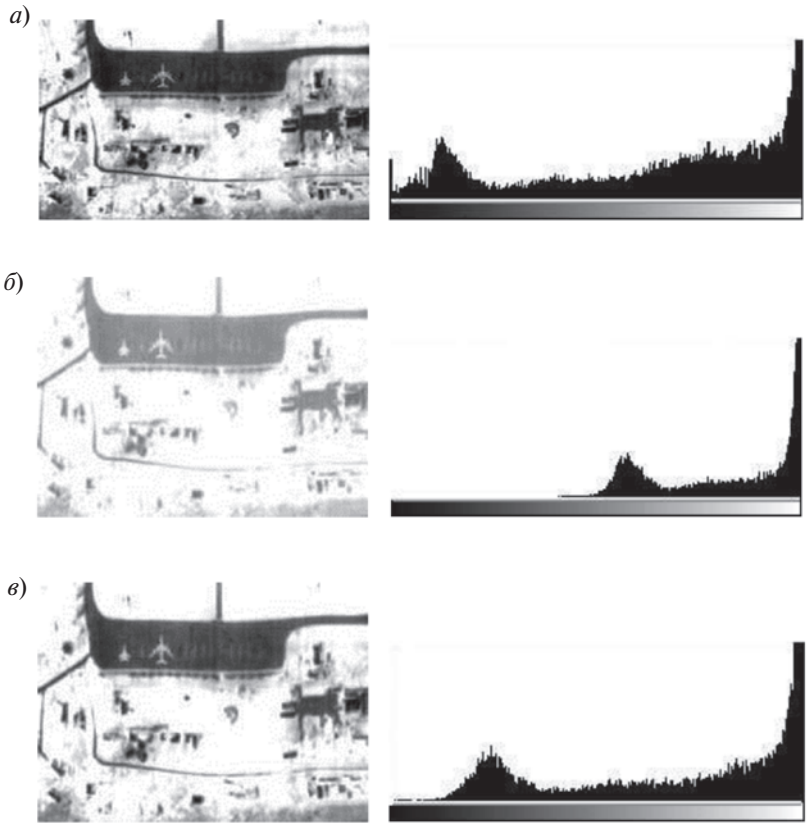

Рис. 3. Пример изображений сцен и их гистограммы:
а — синтезированное изображение по изображениям *б* и *в*

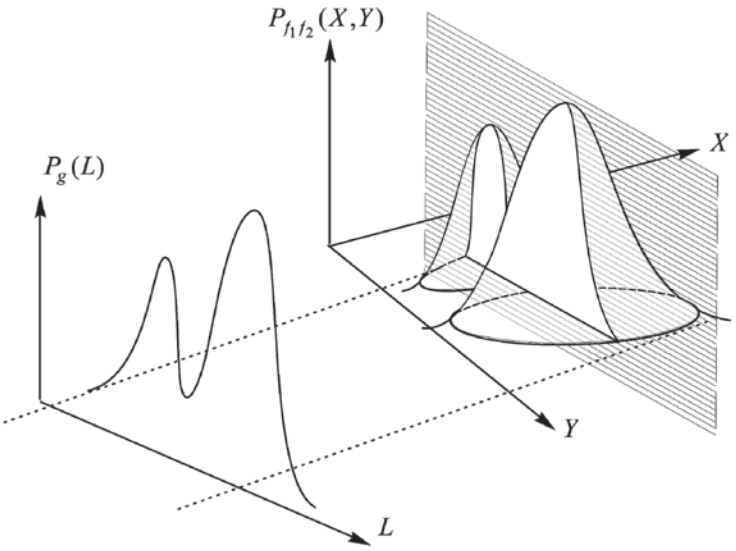

Рис. 4. Двухмодальная плотность изображения объекта и фона и ее сечение

Таким образом, плотность распределения яркости реальных изображений не подчиняется нормальному закону (см. рис. 3), поэтому задача ее формализации является сложной. Невозможно точно описать ковариационную матрицу вектора исходных изображений R (см.(1)). Вместо решения уравнения (1) для выделения максимума информации предложен и реализован численный алгоритм поиска сечения двумерной гистограммы [2] (см. рис. 4). Гистограмма является оценкой плотности распределения. Изображения, составляющие вектор (2) суммируются последовательно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Айвозянс З. А., Бежаева З. Н., Староверов О. В.** Классификация многомерных наблюдений. — М. : Статистика, 1974. — 204 с.

2. **Труфанов И. В., Бадыль Д. С.** Разработка алгоритма синтеза единого изображения объектов воздушной разведки на основе многоспектральных сигналов. // Материалы 23 НТК ВНО, Иркутский ВАИИ, 2000. С. 22–24.

И. В. Чащин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

А. А. Масалкин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

АННОТАЦИЯ. Для оценивания результативности функционирования орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используется аналитическое и имитационное моделирование. Результатом моделирования является эффект применения указанной ОГ, выраженной некоторой количественной величиной. Исходными данными для моделирования должны являться орбитальная структура орбитальной группировки, параметры бортовой аппаратуры космических аппаратов и формализованные требования к качеству функционирования исследуемой орбитальной группировки. В процессе моделирования следует учесть, что функционирование системы проходит в условиях наличия возмущающих воздействий. При данном подходе комплексной характеристикой качества целенаправленного процесса дистанционного зондирования Земли может служить только вероятность достижения цели мониторинга. Подробно рассмотрены аспекты целевого функционирования орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в процессах мониторинга тревожных ситуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космический аппарат, кластер малых космических аппаратов, дистанционное зондирование Земли, баллистический прогноз, оценивание результативности

Введение

Для оценивания результативности функционирования орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используется аналитическое и имитационное моделирование. Результатом моделирования является эффект применения указанной ОГ, выраженной количественно величиной $J(h)$. На основе известных требований, предъявляемых к процессу мониторинга Земли [1], $J_{тр}$ представляется возможным сделать вывод об результативности функционирования ОГ КА ДЗЗ. Отметим, что величины $J(h)$ и $J_{тр}$ включают в себя множество частных показателей и каждому из них можно сопоставить вектор или точку в n-мерном пространстве. При этом для большинства практических задач можно полагать, что значения показателей, определяющих цель — $J_{тр}$, являются фиксированными, а реальный результат — $J(h)$ будет зависеть от варьируемых параметров h, характеризующих выбираемую стратегию мониторинга. Типичной является ситуация, когда на характеристики, параметры, условия функционирования орбитальных КА ДЗЗ в ходе мониторинга воздействует совокупность случайных факторов (неблагоприятных воздействий). Как следствие этого, комплексной характеристикой качества такого целенаправленного процесса может служить только вероятность достижения цели мониторинга — P:

$$P = \widehat{P}\left(J_i\left(h\right) \in \left\{J_{тр i}\right\}\right), i = \overline{1,n}, \qquad (1)$$

где символ «^» указывается на случайность результатов мониторинга по $J_i(h)$ частному показателю эффективности, $J_{тр i}$ — множество требуемых значений i-го частного показателя эффективности.

К основным показателям результативности процесса дистанционного зондирования Земли можно отнести:

1. Вероятность обнаружения тревожных ситуаций на стационарных и подвижных контролируемых объектах за отведенное время.

2. Вероятность информационного обеспечения аварийно-спасательных работ с заданной периодичностью дистанционного зондирования Земли.

3. Пространственное разрешение.

4. Точность геопривязки данных дистанционного зондирования Земли.

5. Оперативность обнаружения тревожных ситуаций и выдача сигнала об их возникновении.

6. Периодичность контроля обстановки на опасных объектах и зонах их информационного обеспечения.

7. Периодичность контроля обстановки в областях тревожных ситуаций и зонах их информационного обеспечения.

Показатели могут быть получены в результате обработки статистических данных, применения моделей баллистического обеспечения полетов КА (показатели 5–7), использования имитационного моделирования (показатели 1, 2), анализа ТТХ ОГ ДЗЗ и специального математического обеспечения обработки спутниковой информации (показатели 3, 4).

Постановка задачи

Тревожные ситуации обладают, как правило, двумя типами неопределенности: по времени и по положению. В связи с выбором параметров орбит КА, обеспечивающих глобальный обзор всей поверхности Земли, оценка вероятности обнаружения тревожных ситуаций на контролируемых объектах может быть осуществлена только по случайному времени ее возникновения. При заданном требовании по оперативности обнаружения тревожных ситуаций и выдачи сигнала об их возникновении — $\Delta t_0^{\text{зад}}$ могут иметь место два случая:

$$\begin{aligned} &1)\, \Delta t_{\text{п}} < \Delta t_0^{\text{зад}}; \\ &2)\, \Delta t_{\text{п}} > \Delta t_0^{\text{зад}}. \end{aligned} \tag{2}$$

В первом случае вероятность обнаружения тревожных ситуаций определяется зависимостью:

$$P = P\left(\Delta t_{\text{п}}^{\text{зад}}\right) = P\left(\Delta t_{\text{п}} < \Delta t_0^{\text{зад}}\right) = \frac{\Delta t_0^{\text{зад}}}{\Delta t_{\text{п}}} P\ , \tag{3}$$

где $P_{\text{в}}$ — вероятность успешных операций передачи информации с КА до пункта ее приема, обработки и выдачи сигнала о возникновении тревожных ситуаций.

Во втором случае эта же вероятность может быть оценена по формуле:

$$\begin{aligned} P &= P\left(\Delta t_{\text{п}} \geq \Delta t_0^{\text{зад}}\right) = \\ &= \left(1-\left(1-P_{\text{в}}\right)\right)^m P_0\left(\Delta t - m\Delta t_0^{\text{зад}}\right), \end{aligned} \tag{4}$$

где $m = E\left[\dfrac{\Delta t_{\text{п}}}{\Delta t_0^{\text{зад}}}\right]$ — число интервалов оперативности обнаружения тревожных ситуаций и выдачи сигнала о их возникновении в интервале периодичности контроля обстановки на опасных объектах и в зонах их информационного обеспечения; $E[\cdot]$ — оператор выделения ближайшего положительного целого числа, меньшего заданного.

Оценка вероятности обнаружения тревожных ситуаций ОГ ДЗ, для которых выполняется ситуация первого случая, задается выражением:

$$P_1^*\left(\Delta t_0^{\text{зад}}\right) = 1 - \prod_{l=1}^{L_1}\left(1 - P\left(\Delta t_0^{\text{зад}}\right)\right), \tag{5}$$

где L_1 — число КА, для которых $\Delta t_{\text{п}} < \Delta t_0^{\text{зад}}$.

Оценка вероятности обнаружения тревожных ситуаций ОГ ДЗ, для которых выполняется ситуация второго случая, определяется зависимостью

$$P_2^*\left(\Delta t_0^{\text{зад}}\right) = 1 - \prod_{l=1}^{L_2}\left(1 - P\right), \tag{6}$$

где L_2 — число КА, для которых $\Delta t_{\text{п}} > \Delta t_0^{\text{зад}}$.

В качестве оценки рассматриваемой вероятности по всей ОГ ДЗ принимается

$$J = P^* = \max\left\{P_1^*\left(\Delta t_0^{\text{зад}}\right), P_2^*\left(\Delta t_0^{\text{зад}}\right)\right\}. \tag{7}$$

Орбиты КА однозначно задаются шестью параметрами. Поэтому при оценивании условий обслуживания необходимо знать кеплеровские элементы каждого КА, образующего ОГ ДЗЗ:

$$\vec{q} = \left(\Omega, i, \omega, e, p, \tau\right)^T,$$

где Ω — прямое восхождение восходящего узла орбиты; i — наклонение орбиты; ω — аргумент широты перигея орбиты; e — эксцентриситет орбиты; p — фокальный параметр орбиты; τ — время прохождения перигея орбиты.

Для формирования новой ОГ КА ДЗЗ или управления орбитальным построением существующей возможно использование новых и резервных КА. Их множества параметров орбит можно описать следующим образом

$$U_q^{\text{ф}} = U_\Omega^{\text{ф}} \bigcup U_i^{\text{ф}} \bigcup U_\omega^{\text{ф}} \bigcup U_e^{\text{ф}} \bigcup U_p^{\text{ф}} \bigcup U_\tau^{\text{ф}}, \quad (8)$$

где $U_\Omega^{\text{ф}}, U_i^{\text{ф}}, U_\omega^{\text{ф}}, U_e^{\text{ф}}, U_p^{\text{ф}}, U_\tau^{\text{ф}}$ — множество параметров (кеплеровских элементов) орбит функционирующих и резервных КА, которые в значительной степени будут зависеть от энергетического ресурса на борту КА. После перенацеливании на новый участок земной поверхности время его активного существования должно быть не меньше заданного. На множестве параметров орбит функционирующих и резервных КА которые обеспечивали значение функционала не меньше заданного при минимизации расхода энергетических ресурсов

$$J \geq J_{\text{треб}}, \Delta V \to \min. \quad (9)$$

Если перенацеливаемый КА предназначен для функционирования в составе группировки КА — выбор новой орбиты может производиться исходя из максимизации эффективности выполнения стоящей перед группировкой целевой задачи:

$$J \to \max, U_i^{\text{н}} \in U_q^{\text{ф}}, \quad (10)$$

где $U_i^{\text{н}}$ — параметры орбиты перенацеленного КА.

Результаты решения сформулированных задач (8)–(10) в значительной степени зависят от корректности выбора вида функционала (5)–(7) при решении КА конкретной целевой задачи, а также от определения множества допустимых параметров орбит функционирующих и резервных КА (8). Множество допустимых параметров орбит строится исходя из потребительских качеств решения целевой задачи. Поэтому при синтезе новой орбиты в каждом конкретном случае необходимо уделять особое внимание правильности множества допустимых параметров орбит.

Решение задачи

Анализ современных достижений в теории автоматизированного управления сложными военно-техническими системами и теории принятия решений позволяет сформулировать подход к решению задачи оценивания эффективности функционирования ОГ КА ДЗЗ.

Каждому элементу из множества допустимых параметров орбиты (8) сопоставим булевую переменную

$$X = \left\{ x_r \mid r \in R = \overline{1, p} \right\}, \quad (11)$$

где p — количество допустимых орбит КА, образующих ОГ.

Тогда

$$x_r = \begin{cases} 1, \text{ если данная орбита выбрана,} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (12)$$

Каждый КА, находящейся на r-й орбите, вносит определенный вклад в эффективность функционирования группировки, выражаемый количественно величиной δ_r. Отметим, что величина δ_r численно равна эффективности ОГ, если бы она состояла из одного КА, функционирующего на r-й орбите.

В общем случае ОГ КА ДЗЗ состоит из многих КА, тогда целевая функция — показатель эффективности ее функционирования, определяется как

$$J = f(x_r, \delta_r), \; r \in R = \overline{1, p} \quad (13)$$

В общем случае функция (13) является нелинейной функцией. Значение ее может быть получено на основе имитационного моделирования движения центра масс КА и знания характеристик его бортовой аппаратуры.

Заключение

Основным результатом моделирования функционирования ОГ КА ДЗЗ в условиях неблагоприятных воздействий является оценка ее эффективности. Условие функционирования в условиях наличия возмущающей среды накладывают ограничения на вид показателя эффективности. В данной ситуации показателем эффективности ОГ КА ДЗЗ может быть только случайная величина, характеризующая вероятность выполнения группировкой целевой задачи. Оценка показателя может быть получена путем решения задачи нелинейного булевого программирования.

В. Н. Будко
кандидат педагогических наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

А. С. Чернецкая
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Е. В. Баранова
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛИНГВООРИЕНТИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ВОЕННОЙ ИГРЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ СВЯЗИ

АННОТАЦИЯ. Представлен вариант системы общего прикладного программного обеспечения лингвоориентированной компьютерной военной игры. Раскрыт состав, а также задачи и функции каждой из ее подсистем: хранения и каталогизации вводных; обмена сообщениями; информационно-справочной и поддержки принятия решения; поддержки разработки и представления решения; дистанционного управления и контроля рабочих мест обучаемых; учета оценки знаний и компьютерной геоинформационной подсистемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: языковая подготовка, компьютерная военная игра, телекоммуникационный проект, общее прикладное программное обеспечение,

Введение

В настоящее время высшая школа вынуждена как никогда чутко реагировать на происходящие в обществе процессы и своевременно вносить изменения в существующую систему образования. Переход на образовательные программы нового поколения, в том числе и в военных вузах, предполагает концептуально новые подходы к формированию содержания образования, к дидактическим методам и технологиям контроля качества и результативности обучения, новым способам организации и оптимизации учебного процесса.

Практика последних лет показывает, что наиболее полному решению проблемы оптимизации организации учебной деятельности в обучении иностранным языкам (ИЯ) способствуют телекоммуникационные проекты [1–3] в силу таких их дидактических свойств как простота использования и доступность, эффективность организации информационного пространства, интерактивность и мультимедийность, надежность и безопасность.

Существенная модернизация учебно-материальной базы военных вузов, произошедшая в последние годы, а также активное и повсеместное внедрение компьютерных технологий в практику изучения ИЯ позволила шире применять метод телекоммуникационных проектов и в языковой подготовке военнослужащих [4–6]. Анализ проведения олимпиад по ИЯ с курсантами и слушателями магистратуры военно-технических вузов, а также опыт участия команды Военной академии связи во всеармейских и международных лингвистических конференциях показывает правильность выдвигаемых предположений о необходимости внедрения в учебный процесс подготовки специалистов связи такого вида телекоммуникационных проектов как лингвоориентированная компьютерная военная игра (ЛКВИ) [7–9].

Состав общего прикладного программного обеспечения ЛКВИ

Опираясь на представленные в [7–9] обоснование применения ЛКВИ, а также концептуаль-

ную модель использования ее общего прикладного программного обеспечения (ОППО) для качественного внедрения данного нового вида учебных занятий в систему языковой подготовки военно-технического вуза, одной из задач преподавательского и инженерно-технического состава кафедры следует считать задачу дальнейшего совершенствования компьютерных форм подготовки через развитие основных видов обеспечения (*программного*, *технического*, *лингвистического*, *информационного* и *методического*) языковой подготовки специалистов связи [10].

Вариант состава общего прикладного программного обеспечения ЛКВИ приведен на рис. 1, где показаны такие основные подсистемы ОППО как:

подсистема обмена сообщениями;

подсистема хранения и каталогизации вводных;

информационно-справочная подсистема;

геоинформационная подсистема (ГИС);

подсистема поддержки разработки и представления решения;

подсистема дистанционного управления и контроля автоматизированных рабочих мест (АРМ) обучаемых;

подсистема учета оценки знаний.

Характеристика подсистем общего прикладного программного обеспечения компьютерной военной игры в подготовке специалистов связи

Подсистема обмена сообщения

Задачей подсистемы обмена сообщениями является обеспечение информационного взаимодействия между субъектами и объектами компьютерной военной игры. При этом она предназначена для выполнения следующих *функций*:

обеспечение обмена сообщениями между руководителем и участниками в режиме почтового обмена, близкого к реальному режиму времени;

хранение и каталогизация вводных (частных задач ЛКВИ);

автоматическая (ручная) рассылка вводных на автоматизированные рабочие места (АРМ) обучаемых;

хранение результатов решения частных задач обучаемыми в виде файловых объектов в едином информационном контейнере сервера обмена.

В качестве основы может быть использована технология информационного взаимодействия на базе MSEXCHANGESERVER на сервере и клиентских модулей MSOUTLOOK на АРМ участников компьютерной военной игры.

Рис. 1. Состав подсистем прикладного программного обеспечения ЛКВИ (*Вариант*)

Информационно-справочная подсистема поддержки принятия решения

Задачей информационно-справочной подсистемы (ИСП) поддержки принятия решения является обеспечение качества и, как следствие, обоснованности принимаемых обучаемыми (лицом принимающим решение — ЛПР) решений на основе оперативного доступа к банку фактографических и документальных данных в электронном и бумажном видах. К ее *функциям* можно отнести: хранение электронных версий бумажных носителей оперативно-технической и справочной информации; каталогизация и классификация объектов, отражающих процессы и явления предметной области; доставка на рабочие места обучаемых (ЛПР) справочного контента.

На наш взгляд, технология ЛКВИ не должна исключать применения бумажных носителей информации различного назначения: электронных учебников и учебных пособий, словарей, глоссариев, различных справочных и учетных документов руководящих документов, документов по оперативно-технической службе, составляющих в настоящее время основу практического информационного обеспечения деятельности лиц по управлению связью. Этого требуют и вопросы обеспечения защиты электронного обеспечения от сбоев и иного нарушения работы программного комплекса.

Электронная форма информационного обеспечения позволяет вовлечь в процесс оценки обстановки и принятия решения весь спектр разработанного методического и справочного материала в самом различном виде (например, см. рис. 2). Кроме того, электронная форма хранения и обработки такого рода информации позволяет оперативно получать доступ пользователей к ресурсам в любой точке перспективной распределенной системы информационной поддержки в масштабе вуза. Начальной и уже достаточно хорошо зарекомендовавшей себя формой хранения документов явились различные информационно-справочные системы на основе обеспечения оперативного доступа к электронным копиям бумажных документов.

Исходя из этого, разработана и апробирована система классификации и кодирования информационных объектов различного вида. Обеспечено хранение данных в файловой структуре сервера. В качестве системы управления банком данных выбрана технология систем управления базами данным (СУБД) MSACCESS, позволяющая на основе метаданных об объектах эффективно обеспечивать пользователей сервисами поиска и отображения информации.

Доступ к фактографическому банку данных реализуется средствами технологии WWW на основе WEB-сервера и клиентского программного обеспечения. Гипертекстовый сервис, на наш взгляд, более качественно решает задачу доставки справочного контента до рабочих мест участников, тогда как, система управления ба-

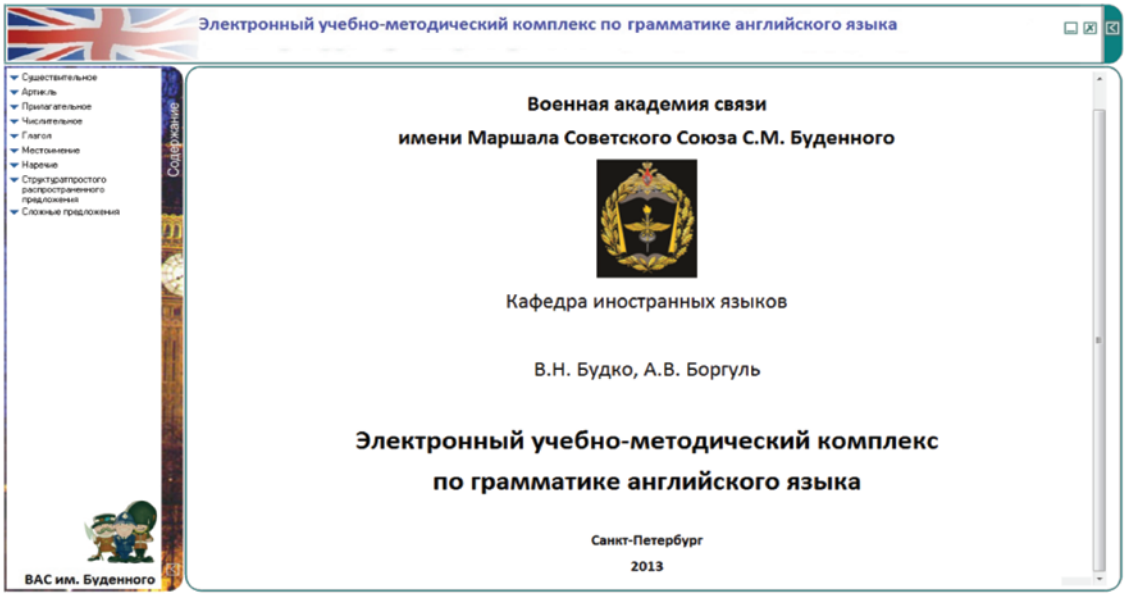

Рис. 2. Компьютерная форма Электронного учебно-методического комплекса дисциплины

зой данных эффективнее решает задачи кодирования, каталогизации и описания метаданных объектов.

Подсистема поддержки разработки и представления решения

Подсистема поддержки разработки и представления решения обучаемым в ходе ЛКВИ в своем составе должна иметь инструментальные средства разработки графических документов и средства презентационной графики.

Данная подсистема имеет *задачей* обеспечение участников игры эффективными средствами разработки и презентации решений по вводным игрового цикла, а в качестве *функций* можно определить следующие:

обеспечение оперативной разработки графических документов на основе конструирования с помощью базы шаблонов основных условно-графических обозначений (УГО) и других моделей предметной области;

централизованное управление базой данных (БД) шаблонов, распространение их на рабочие места обучаемых;

обеспечение представления решения в виде презентации с управляемым режимом просмотра слайдов.

В качестве средства реализации выбрано общее прикладное программное обеспечения графического представления информации MSVISIO. Данный продукт получил широкое распространение в органах управления связью и военных вузах для разработки различных документов по связи в виде схем, требующих применение специфичных УГО и других графических моделей. В этом отношении кафедра ИЯ активно сотрудничает со специальными кафедрами Военной академии связи. На рис. 3 представлены инструментальные шаблоны, применение которых является основной парадигмой оперативной разработки графических моделей процессов управления связью. Графические средства презентации позволяют повысить наглядность доклада обучаемого в совокупности с компьютерной геоинформационной подсистемой.

Как известно, основу принятия решений на конкретном оперативно-тактическом фоне составляют умения и навыки обучаемых в работе с графической моделью района ведения боевых действий, т. е. картой. В этом направлении накоплен опыт применения в штабах электронных карт местности на базе современных геоинформационных систем (ГИС).

Компьютерная геоинформационная подсистема

Задачей компьютерной геоинформационной подсистемы является обеспечение качества принятия решений в условиях конкретной тактической обстановки района ведения боевых действий, а ее *функциями* можно выделить как:

предоставление инструментария по отображению обстановки на цифровой карте местности;

обеспечение вычислений и расчетов при принятии решения;

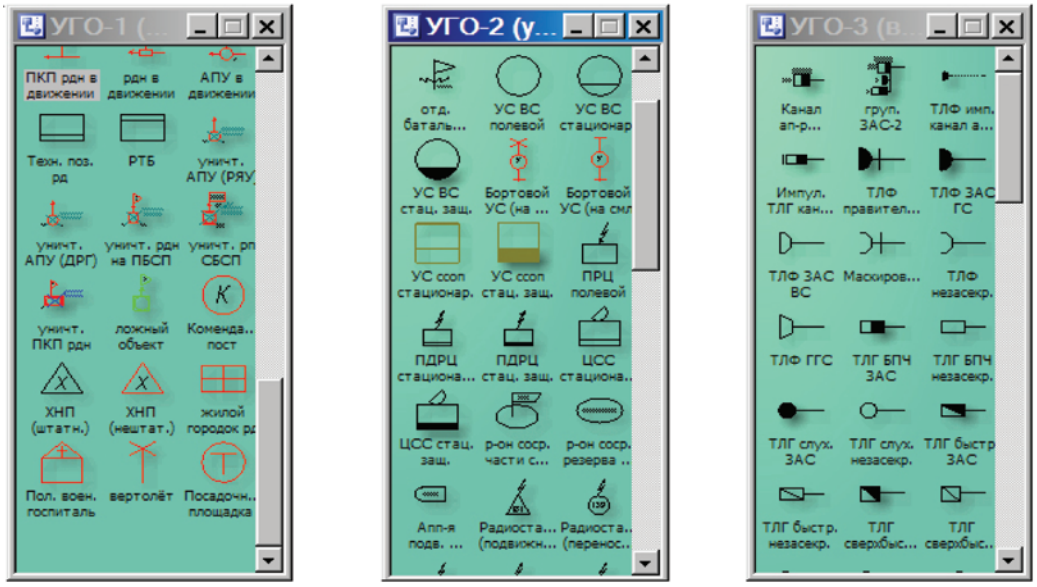

Рис. 3. Наборы шаблонов конструирования графических моделей презентаций

динамическая визуализация изменений оперативной обстановки и обстановки по связи;

расчет профилей радиотрасс и оценка зон радиовидимости.

Подсистема дистанционного управленияи контроля АРМ обучаемых

Как показывает анализ, программные средства данного назначения и класса в коммерческом исполнении нашли широкое применение при разрешении противоречия, связанного с возможным дистанцированием педагога от процессов решения задач обучаемыми с помощью современных инфотелекоммуникационных технологий. А также активно используются сетевыми администраторами для контроля АРМ пользователей локальных (корпоративных) сетей.

Задачей подсистемы дистанционного управления и контроля АРМ обучаемых является включение всех рабочих мест в единую централизованную систему управления со стороны руководителя, а к ее *функциям* можно отнести:

обеспечение дистанционного контроля и управления действиями обучаемых с рабочего места руководителя;

трансляция экрана АРМ докладчика по вводной на все рабочие места и средства коллективного отображения;

оказание при необходимости оперативной помощи обучаемым при применении программного обеспечения непосредственно с рабочего места руководителя;

блокировка экранов обучаемых для привлечения внимания в случае организации методических пауз или иной необходимости.

В процессе военной игры для управления рабочими местами руководителем может быть использовано активно применяемое в сетевых структурах программное обеспечение SynchronEyes.

Вариант использования подсистемы дистанционного управления и контроля рабочих мест в Программно-техническом комплексе автоматизированного планирования действий войск (сил) и обеспечения оперативной и боевой подготовки «Спектр-7Э» приведен на рис. 4.

Подсистема учета оценки знаний

Поскольку компьютерная военная игра — вид учебного занятия, то в состав его ОППО должна быть включена подсистема учета оценки знаний.

Задачей данной подсистемы должно стать обеспечение принципа соревновательности на основе учета, анализа и визуализации результатов деятельности обучаемых в процессе игры, а *функциями*:

централизованный учет и контроль уровня подготовки обучаемых;

наглядная визуализация результатов оценок, полученных обучаемыми лично и в составе расчета;

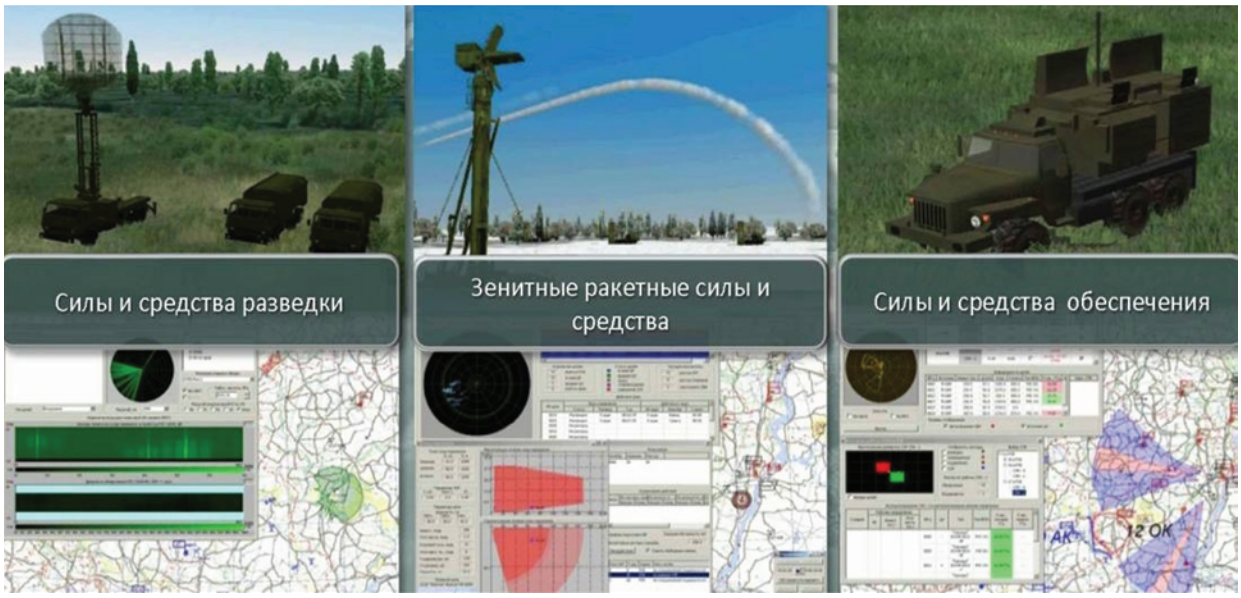

Рис. 4. Вариант использования подсистемы дистанционного управления и контроля рабочих мест в Программно-техническом комплексе автоматизированного планирования действий войск (сил) и обеспечения оперативной и боевой подготовки «Спектр-7Э»

поддержка балльной системы оценки знаний и умений;

наглядная презентация достижения результатов по основным этапам игры.

В рассматриваемом варианте проведения компьютерной военной игры оценку по каждому этапу выставляет руководитель с дальнейшей регистрацией в электронном журнале. Развитие автоматизированной системы оценки знаний предполагается в рамках следующей формы КВИ, основанной на автоматизации всего игрового цикла.

Специализированное прикладное программное обеспечение ЛКВИ

Раскрыв существо концептуальной модели применения ОППО [9, 10] и дав характеристику ее основных подсистем нельзя не остановиться на важном в любой учебной дисциплине, основанной на новых информационных технологиях (НИТ), специализированном прикладном программном обеспечении (СППО). Именно СППО, разработанное под каждый вид занятия, представляет наибольший интерес при обеспечении индивидуализации и дифференциации обучения ИЯ [4, 11, 12], а также выстраивании траектории подготовки специалистов связи в зависимости от их специальности и специализации. В состав СППО кафедры ИЯ, используемого на занятии ЛКВИ, должны войти:

электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) кафедры ИЯ;

электронная библиотека кафедры;

видеотека кафедры;

банк динамических слайдов по дисциплинам кафедры;

компьютерная военная игра;

автоматизированная тестирующая обучающая система [13, 14].

Каждый из перечисленных разделов СППО постоянно пополняется и совершенствуется всем преподавательским, инженерно-техническим составом кафедры, заведующими учебными кабинетами. Остановимся на разработке такой разновидности СППО как электронный учебник.

Сложность подготовки СППО под КВИ по каждой учебной дисциплине, теме занятия и выполнению конкретной вводной (перечня вводных) состоит в том, что необходимо осуществить тщательный подбор учебных программ и программных комплексов (перечень используемых специальных программ на КВИ может достигать до нескольких десятков), а учитывая тот факт, что учебное отделение обучаемых, как правило, разбивается на несколько групп должностных лиц, или каждый обучаемый выполняет функционал конкретного лица принимающего решение (ЛПР), моделируя работу штаба или отдела связи, число необходимого СППО многократно возрастает. Данный факт требует привлечения к созданию СППО профессиональных разработчиков и предприятий промышленности.

В настоящее время на рынке программно-аппаратных комплексов для учебных целей ВС РФ хорошо зарекомендовала себя такая компания как ОАО НПО «Русские базовые информационные технологии» (РусБИТех) тесно взаимодействующая с ведущими вузами МО РФ. На рис. 4 приведен пример интерфейса ее продукции — Программно-технический комплекс автоматизированного планирования действий войск (сил) и обеспечения оперативной и боевой подготовки «Спектр-7Э». Однако, на сегодняшний день пока еще мало разрабатывается лингвоориентированных программных продуктов, а также программ, моделирующих работу должностных лиц по связи, которые возможно использовать для наполнения игрового цикла КВИ по направлении подготовки «Телекоммуникации» и внедрять в учебный процесс вуза и войск при подготовке специалистов связи. Одним из вариантов использования СППО в качестве информационно-справочной подсистемы ЛКВИ может стать Электронный учебно-методический комплекс кафедры ИЯ, в состав которого входят электронные учебники, учебные пособия, глоссарии и обучающие программы по преподаваемым дисциплинам кафедры [13–17].

Техническое обеспечение компьютерной военной игры

Проведение лингвоориентированной компьютерной военной игры по кафедре иностранных языков планируется на базе формируемых в настоящее время на кафедре учебных кабинетов с возможностями Имитационного центра моделирования практических занятий. В их состав должны войти:

АРМ руководителя ЛКВИ, преподавателя (-лей);

АРМы курсантов (слушателей) с возможностью доступа к учебным и информационно-справочным материалам по дисциплинам кафедры;

сервер;

настенная плазменная панель;

документ-камера;

Smart-доска в комплекте с мультимедиапроектором;

мультимедиапроектор с переносным экраном;

сканер; сетевой принтер; коммутатор;

головные гарнитуры (микрофон-телефон);

аудиторная аудиосистема;

источники бесперебойного питания, сетевые фильтры;

система часофикации аудитории;

кондиционер;

лазерные указки;

На рабочих местах обучаемых необходимо развернуть АРМы должностных лиц (по замыслу игры) с соответствующей подборкой документов.

Информационное обеспечения компьютерной военной игры

Информационное обеспечение ЛКВИ может включать большое количество дидактических материалов в соответствии с учебной дисциплиной, выбранной темой и замыслом проведения занятия. К составу информационного обеспечения игрового цикла КВИ можно отнести:

исходную обстановку (общую и частную на каждый этап игры);

действия сторон на каждом этапе игры;

перечень должностных лиц (сторон) ЛКВИ (состав сил и средств сторон);

перечень (банк) задач (вводных) каждого этапа игры, должностного лица;

шаблоны документов по организации связи;

шаблоны презентационных докладов должностных лиц;

критерии оценки по решениям задач и вводных;

стенды аудитории и справочные материалы на столешницах и в папках;

интранет ресурсы ЛКВИ и др.

Методическое обеспечение компьютерной военной игры

К методическому обеспечению ЛКВИ можно отнести:

календарный план подготовки ЛКВИ;

замысел ЛКВИ с оформлением пояснительной записки;

план проведения инструкторско-методического занятия по подготовке и проведению ЛКВИ с преподавательским составом и обучающимися;

план проведения ЛКВИ (для руководителя занятия и его помощников);

методические разработки для руководителя, его помощников и обучающихся по рабочим местам;

план наращивания обстановки;

таблица сигналов управления ЛКВИ;

руководящие документы;

бирки на столы и бэйджи с указанием должностей участников ЛКВИ;

список распределения обучающихся в группе по должностям на ЛКВИ;

классный журнал и др.

Заключение. Постоянное увеличение объема информации, рост требований к уровню языковой подготовки офицера на фоне дефицита учебного времени не оставляют педагогам иного выхода, кроме интенсификации процесса обучения, широкого внедрения более эффективных методов и технологий.

С каждым годом компьютерные формы обучения непрерывно совершенствуются и развиваются [18]. Компьютерные учения (игры, тренировки) являются новыми формами оперативной подготовки войск, внедрение которых позволит повысить ее эффективность на основе имитационного моделирования современных операций и создания фона непрерывно меняющейся обстановки, которую из-за ряда причин объективного характера (политических, экономических, экологических и др.) нельзя обеспечить в реальных условиях мирного времени.

Предложенная концепция внедрения в учебный процесс военно-технического вуза лингвоориентированной компьютерной военной игры позволит повысить уровень языковой подготовки офицеров Вооруженных Сил Российской Федерации. Однако, при внедрении данного вида занятия в современную высшую школу в контексте дальнейшей информатизации военного образования необходимо проведение педагогического экспериментирования для выявления практических рекомендаций в методику проведения этого сложного вида занятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Будко В. Н.** Телекоммуникационные проекты в практике преподавания иностранного языка в вузе // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. 2011. Т. 2. № 124. С. 51–54.

2. **Будко В. Н.** Телекоммуникационные проекты в развитии коммуникативной компетенции//Инфокоммуникационные технологии. 2006. Т.4. №4. С. 82–86.

3. **Будко В. Н.** Телекоммуникационные проекты в обучении иностранному языку // Школьные технологии. 2008. № 5. С. 91–94.

4. **Полат Е.С., Бухаркина М.Ю.** и др. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования / Под ред. Е.С. Полат. — М.: Академия, 2005. — 272 с.

5. **Будко В. Н., Будко П. А.** Образовательные компетенции как фактор формирования готовности выпускника школы к обучению в вузе // Наука. Инновации. Технологии. 2008. № 4. С. 116–123.

6. **Будко В. Н.** Формирование готовности учащихся профильной школы к обучению в вузе средствами языковой подготовки. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. пед. наук. / Астраханский гос. университет. Астрахань, 2008.

7. **Будко В. Н.** Роль и место лингвоориентированной компьютерной военной игры в языковой подготовке курсантов военного вуза. / В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды научно-практической конференции. (Военной академии связи, Санкт-Петербург, 9 февраля 2016 г.) — Санкт-Петербург: Изд. Наукоемкие технологии, 2016. — С. 155–159.

8. **Будко В. Н., Баранова Е. В.** Лингвоориентированная компьютерная военная игра в языковой подготовке курсантов военного вуза // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. № 2. 2016. С. 142–147.

9. **Будко В. Н.** Концептуальная модель применения прикладного программного обеспечения лингвоориентированной компьютерной военной игры. / В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды научно-практической конференции. (Военной академии связи, Санкт-Петербург, 9 февраля 2016 г.) — Санкт-Петербург: Изд. Наукоемкие технологии, 2016. — С. 149–154.

10. **Будко В. Н., Чернецкая А. С.** Модель применения прикладного программного обеспечения лингвоориентированной компьютерной военной игры для подготовки специалистов связи. // Техника средств связи. 2018. № 3. С. 99-105.

11. **Будко В. Н., Будко П. А.** Качество образования: как его достичь? // Наука. Инновации. Технологии. 2010. № 2. С. 72–76.

12. **Потапова Р. К.** Новые информационные технологии и лингвистика. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 320 с.

13. **Будко В. Н., Мишин Д. Ю., Трегубова Т. А.** Тестирующий программный комплекс готовности студентов и школьников к обучению в вузе. // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 167–169.

14. **Будко В. Н., Чернецкая А.С., Баранова Е. В.** Реализация диагностических тестов в процессе изучения иностранных языков. В сборнике: Science XXI century Proceedings of materials the international scientific conference. 2015. С. 415–426.

15. **Будко В. Н., Будко П. А., Тимошенко Л. И.** Глоссарий англоязычных терминов по информационным технологиям. Учебное пособие. — Ставрополь: ООО «Бюро новостей», 2015. — 180 с.

16. **Будко В. Н., Будко П. А., Тимошенко Л. И.** Глоссарий англоязычных терминов по ЭВМ и периферийным устройствам. Учебное пособие. — Ставрополь: СКФУ, 2015–167 с.

17. **Будко В. Н., Будко П. А.** Глоссарий англоязычных терминов по вычислительным сетям и сетевым технологиям. Учебное пособие. — Ставрополь: ООО «Бюро новостей», 2015. — 170 с.

18. **Будко П. А., Будко В. Н., Виноградeнко А. М., Тимошенко Л. И.** Активизация образовательного процесса путем внедрения компьютерных средств и информационных технологий обучения. Ставрополь: СВИС РВ, 2010. — 140 с..

ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№4 (144). 2018

Компьютерная верстка *Е. А. Типцовой*
Дизайн обложки: Шаутин Д.А.
Поддержка сетевой версии журнала: Лебедев Д.В.

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

Подписано в печать 29.11.2018. Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 18,75. Тираж 70. Заказ 2168.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного Издательством Политехнического университета,
в Типографии Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.