РКС

РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Том 4. Выпуск 3. 2017

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Том 4. Выпуск 3. 2017

ROCKET-SPACE DEVICE ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Учредитель:
АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»

Редакционный совет

Председатель: генеральный директор
АО «Российские космические системы»
Тюлин А.Е., член-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, к.т.н.
Заместители председателя:
Ежов С.А., д.т.н., проф.
Романов А.А., член-корр. Международной академии астронавтики, д.т.н., проф.
Нестеров Е.А.

Члены редакционного совета:

Артемьев В.Ю.
Батурин Ю.М., член-корр. РАН, д.ю.н., проф.
Блинов А.В., член-корр. Российской инженерной академии
Бугаев А.С., академик РАН, д.ф.-м.н., проф.
Жантаев Ж.Ш., академик Казахской национальной академии естественных наук, д.ф.-м.н.
Жмур В.В., д.ф-м.н., проф.
Колачевский Н.Н., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.
Кулешов А.П., академик РАН, д.т.н., проф.
Носенко Ю.И., д.т.н., проф.
Перминов А.Н., академик Международной академии астронавтики, Российской инженерной академии, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, д.т.н., проф.
Петрукович А.А., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.
Райнер Сандау, академик Международной академии астронавтики, д.т.н., адъюнкт-проф.
Ступак Г.Г., д.т.н., проф.
Чеботарев А.С., д.т.н., проф.
Чернявский Г.М., член-корр. РАН, д.т.н., проф.
Четыркин А.Н.

Редакционная коллегия

Главный редактор: заместитель генерального директора по науке АО «Российские космические системы»
Романов А.А., член-корр. Международной академии астронавтики, д.т.н., проф.
Заместитель главного редактора:
ученый секретарь АО «Российские космические системы»
Федотов С.А., к.т.н., с.н.с.

Члены редакционной коллегии:

Алексеев О.А., д.т.н., проф.
Алыбин В.Г., д.т.н.
Ахмедов Д.Ш., член-корр. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, д.т.н.
Бетанов В.В., член-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, д.т.н., проф.
Васильков А.П., д.ф.-м.н.
Ватутин В.М., д.т.н., проф.
Данилин Н.С., академик Международной и Российской инженерных академий, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, д.т.н., проф.
Жодзишский А.И., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, д.т.н.
Жуков А.А., д.т.н.
Мороз А.П., д.т.н.
Победоносцев В.А., д.т.н.
Поваляев А.А., д.т.н.
Римская О.Н., к.э.н., доцент
Романов А.А., д.т.н.
Свиридов К.Н., д.т.н., проф.
Селиванов А.С., д.т.н., проф.
Стрельников С.В., д.т.н.
Сычев А.П., к.т.н.
Токарев А.С. (техн. секретарь)
Тузиков А.В., член-корр. Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., проф.
Язерян Г.Г., к.т.н. (отв. секретарь)

Журнал выходит 4 раза в год.
Журнал включен в РИНЦ.
Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
Мнение авторов статей может не совпадать с мнением редакции.
ISSN 2409-0239
DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3
Подписной индекс 94086
в Объединенном каталоге «Пресса России».

© АО «Российские космические системы»
© ФИЗМАТЛИТ

Москва
ФИЗМАТЛИТ®
2017

Содержание

Том 4, Вып. 3, 2017

Космические навигационные системы и приборы. Радиолокация и радионавигация

Основные положения концепции развития российского сегмента международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ
Романов А. А., Кузенков А. Н., Тюлин А. Е., Куропятников А. Д., Борисов К. В., Кем О. В., Заичко В. А. 5

Статус программы КОСПАС–САРСАТ и ее будущее развитие
Студенов В. В. 16

Оценка зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ
Антонов Д. В. 24

Возможность и эффективность дополнения среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ геостационарным сегментом этой системы
Антонов Д. В., Архангельский В. А., Семин В.И., Федосеев А. В. 35

Экспериментальная оценка точности определения координат медленно подвижных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ
Антонов Д. В. 40

Радиотехника и космическая связь

Встраиваемая антенна для аварийных радиомаяков второго поколения системы КОСПАС–САРСАТ
Бойко С. Н., Исаев А. В., Косоруков Д. С., Яскин Ю. С. 46

Анализ принципов построения комплексов приема, обработки и ретрансляции информации международной системы КОСПАС–САРСАТ и перспективы их развития
Романов А. А., Кондрашов А. С., Белов Д. А., Букин С. А. 58

Системный анализ, управление космическими аппаратами, обработка информации и системы телеметрии

Использование подходов «непрерывного инжиниринга» при адаптации приемных комплексов РК-СМ-МКА для размещения на борту КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2
Романов А. А., Романов А. А., Булгаков Н. Н., Ершов А. Н., Колобаев А. С. 69

Пути повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ
Архангельский В. А., Селезнев В. В. 77

Текущее состояние и основные характеристики геостационарных спутников-ретрансляторов системы КОСПАС–САРСАТ на базе космических аппаратов «Луч-5А» и «Луч-5В»
Архангельский В. А., Дедов Н. В., Литвин А. И., Останний А. И., Семин В. И., Федосеев А. В., Новиков М. Ю., Портнягин В. А., Роскин С. М., Тестоедов Н. А. 87

Contents

Vol. 4, Iss. 3, 2017

Space Navigation Systems and Devices. Radiolocation and Radio Navigation

Basic Development Concepts of the Russian Segment of the International Search and Rescue System COSPAS–SARSAT
Romanov A. A., Kuzenkov A. N., Tyulin A. E., Kuropyatnikov A. D., Borisov K. V., Kem O. V., Zaichko V. A. 5

Status of the COSPAS–SARSAT Programme and Its Future Developments
Studenov V. V. 16

Estimation of the Service Area of the Medium Earth Orbit Local User Terminal of the COSPAS–SARSAT System
Antonov D. V. 24

Feasibility and Effectiveness of Including the Geostationary Segment into the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System
Antonov D. V., Arkhangel'skiy V. A., Semin V. I., Fedoseev A. V. 35

Experimental Evaluation of the Slow Moving Beacon Location Accuracy in the Middle Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System
Antonov D. V. 40

Radio Engineering and Space Communication

Built-in Antenna for Second Generation Emergency Radio Beacons of the COSPAS–SARSAT System
Boyko S. N., Isaev A. V., Kosorukov D. S., Yaskin Yu.S. 46

Analysis of the Concepts for Design of Complexes for Receiving, Processing and Retransmitting of Information from the International COSPAS–SARSAT System and the Prospects for Their Development
Romanov A. A., Kondrashov A. S., Belov D. A., Bukin S. A. 58

Systems Analysis, Spacecraft Control, Data Processing, and Telemetry Systems

Continuous Engineering Approaches in RK-SM-MKA Adaptation for Meteor-M No. 2-1 and 2-2 Spacecrafts
Romanov A.A., Romanov A.A., Bulgakov N. N., Ershov A. N., Kolobaev A. S. 69

Approaches to Accuracy Improvement of GNSS Independent Determination of Position Data of Emergency Radio Beacons in the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System
Arkhangel'skiy V. A., Seleznev V. V. 77

Current Status and Main Performance Characteristics of COSPAS–SARSAT Louch-5A and Louch-5V Geostationary Satellites
Arkhangel'skiy V. A., Dedov N. V., Litvin A. I., Ostanniy A. I., Semin V. I., Fedoseev A. V., Novikov M. Yu., Portnyagin V. A., Roskin S. M., Testoedov N. A. 87

Уважаемые коллеги!

В 2017 году исполняется 35 лет со дня первого спасания, осуществленного международной системой поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ. Для нас эта дата знаменательна еще и тем, что сигналы о произошедшем несчастье с экипажем маленького самолета в Канаде передал российский низкоорбитальный космический аппарат системы КОСПАС-1.

С тех пор система КОСПАС–САРСАТ существенно изменилась, космические аппараты с оборудованием системы поиска и спасания функционируют не только на низкой, но и на геостационарной орбитах. Всего за время эксплуатации системы с момента запуска было спасено более 41 000 человек.

В настоящее время Госкорпорация «Роскосмос» совместно с предприятиями промышленности, представителями Министерства транспорта и Министерства иностранных дел Российской Федерации, а также с зарубежными партнерами проводит активную политику по развитию международной программы КОСПАС–САРСАТ.

В ближайшей перспективе ожидается восполнение российской низкоорбитальной группировки — космические аппараты «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2 будут нести на борту аппаратуру системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ. В рамках текущей Федеральной космической программы планируются работы по созданию перспективной техники для размещения на борту космических аппаратов «Метеор-М», «Электро-Л», «Арктика-М», «Луч-5М». Кроме того, разрабатывается новейший комплекс наземных средств, призванный заменить технику предыдущего поколения с одновременным улучшением основных ее эксплуатационных характеристик. В рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» разрабатывается полезная нагрузка для российского сегмента перспективной среднеорбитальной системы поиска и спасания.

Необходимо вспомнить и еще одно знаменательное событие: в 2012 году с использованием аппаратуры ретрансляции аварийных сигналов КОСПАС–САРСАТ, размещенной на КА ГЛОНАСС, впервые было осуществлено спасание экипажа канадского вертолета.

В российской истории участия в международной программе КОСПАС–САРСАТ много славных моментов и серьезных достижений. Эта международная программа служит крайне благородной миссии — спасению людей. Кроме того, развитие национального сегмента КОСПАС–САРСАТ — это еще и вопрос собственной безопасности нашей страны. Нам нужно постоянно двигаться вперед и ни в коем случае не останавливаться на достигнутом.

Генеральный директор Госкорпорации «Роскосмос»
И. А. Комаров

Уважаемые коллеги!

Перед вами — специальный тематический выпуск журнала «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», посвященный 35-летию международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ, самой гуманной космической системы, работающей на благо человечества. В него вошли наиболее важные и интересные статьи, которые отражают состояние системы КОСПАС–САРСАТ и пути ее дальнейшего развития.

В статье А. А. Романова, А. Н. Кузенкова, А. Е. Тюлина и др. обсуждаются вопросы текущего статуса системы КОСПАС–САРСАТ, анализируются основные принципы предлагаемой концепции развития российского сегмента.

В статье В. В. Студенова отмечается, что с начала практической реализации в 1982 г. система КОСПАС–САРСАТ обеспечила помощь при спасении по крайней мере 41 750 человек в 11 788 инцидентах. Только в 2016 г. аварийные данные КОСПАС–САРСАТ были использованы в 885 инцидентах при спасении 2250 человек.

Статья Д. В. Антонова посвящена вопросам оценки и оптимизации зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ (СПОИ-СО). Представлены результаты математического моделирования размера зоны обслуживания в зависимости от алгоритма планирования и количества антенн, установленных на СПОИ-СО.

В статье Д. В. Антонова, В. А. Архангельского и др. проанализирована возможность дополнения 4-антенной наземной станции среднеорбитального сегмента двумя уже имеющимися каналами геостационарного сегмента. Приводятся результаты математического моделирования зоны обслуживания полученной 6-канальной станции.

Завершает обзор среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ статья Д. В. Антонова, в которой приведены экспериментальные результаты определения координат медленно подвижного аварийного радиобуя с помощью СПОИ-СО, оборудованной 4, 6 или 12 антеннами.

Рубрику «Радиотехника и космическая связь» открывает статья С. Н. Бойко, А. В. Исаева и др.; в ней предлагается перспективная конструкция антенны, встраиваемой в аварийные радиомаяки второго поколения поисково-спасательной системы КОСПАС–САРСАТ, которая обеспечивает требуемую эффективность излучения.

В статье А. А. Романова, А. С. Кондрашова и др. представлена перспективная схема реализации унифицированного бортового комплекса системы поиска и спасания, который может использоваться на космических аппаратах всех сегментов международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ.

В статье А. А. Романова, А. А. Романова и др. приводятся результаты применения подходов «непрерывного инжиниринга» при организации проведения работ по адаптации комплекса поиска и спасания на борту космического аппарата типа «Метеор-М».

Статья В. А. Архангельского и В. В. Селезнева посвящена анализу способов повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев на наземных станциях КОСПАС–САРСАТ. В статье подробно описан метод, позволяющий добиться значительного увеличения точности определения координат узкополосных аварийных радиобуев.

Завершает выпуск журнала статья В. А. Архангельского и др., в которой приведены результаты летных испытаний российских геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ, созданных на базе КА «Луч-5А» и «Луч-5В», а также результаты международных испытаний геостационарной спутниковой системы поиска и спасания на базе КА «Луч-5А».

Главный редактор журнала
«Ракетно-космическое приборостроение
и информационные системы»
А. А. Романов

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 5–15

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 629.78 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.5

Основные положения концепции развития российского сегмента международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ

А. А. Романов[1], **А. Н. Кузенков**[2], **А. Е. Тюлин**[3], **А. Д. Куропятников**[4], **К. В. Борисов**[5], **О. В. Кем**[6], **В. А. Заичко**[7]

[1]*д. т. н., профессор,* [2–4]*к. т. н.*
[1–3]*АО «Российские космические системы»*
[4]*ФГУП «Морсвязьспутник», Россия*
[5–7]*Государственная корпорация «Роскосмос», Россия*

e-mail: romanov_alal@risde.ru

Аннотация. В работе приведены основные принципы предлагаемой концепции развития российского сегмента международной спутниковой системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ. Обсуждаются вопросы текущего статуса и принципы перспективного построения системы. Сделана попытка определить стратегические направления развития российского сегмента с учетом документов стратегического планирования и планов по развитию Программы. Обсуждаются сроки и основные результаты реализации предлагаемой концепции.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, поисково-спасательные работы, российский сегмент, концепция развития

Basic Development Concepts of the Russian Segment of the International Search and Rescue System COSPAS–SARSAT

A. A. Romanov[1], **A. N. Kuzenkov**[2], **A. E. Tyulin**[3], **A. D. Kuropyatnikov**[4], **K. V. Borisov**[5], **O. V. Kem**[6], **V. A. Zaichko**[7]

[1]*doctor of engineering science, professor,* [2–4]*candidate of engineering science*
[1–3]*Joint Stock Company "Russian Space Systems"*
[4]*Federal State Unitary Enterprise "Morsviazsputnik", Russia*
[5–7]*State Corporation "Roscosmos", Russia*

e-mail: romanov_alal@risde.ru

Abstract. The paper deals with basic principles of the offered development concept of the Russian segment of the International Search and Rescue Satellite System COSPAS–SARSAT. The issues of the present status and principles of the promising building of the system are discussed. An attempt to determine strategic development trends of the Russian segment allowing for the documents of the strategic planning and the plans on Programme development is made. The terms and main results of the realization of the offered concept are given.

Keywords: COSPAS–SARSAT, search and rescue operations, Russian segment, development concept

Введение

В работе представлены основные положения предлагаемой концепции, определяющей основные направления организационной, технической и научной политики по выполнению Российской Федерацией международных обязательств в соответствии с Соглашением о международной программе КОСПАС–САРСАТ от 01.07.1988 (далее — Соглашение) [1].

Создание российского сегмента системы КОСПАС–САРСАТ регламентируется Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 26.01.1977 № 81-84 [2] и постановлением Совета Министров СССР от 12.01.1978 № 33-15 «О проведении работ по созданию совместно с США, Канадой экспериментальной спутниковой системы для определения местоположения самолетов, потерпевших аварию» [3].

Положения концептуального развития разрабатывались с учетом усилий Международной морской организации (ИМО) по учреждению Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, основанной на Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), заключенной в Лондоне 1 ноября 1974 г. [4], Международной конвенции по поиску и спасанию, заключенной в Гамбурге 27 апреля 1979 г. [6], а также обязательств Международной организации гражданской авиации (ИКАО) и Международного союза электросвязи (МСЭ) по соответствующим сферам деятельности.

В силу системного кризиса, произошедшего в Российской Федерации в конце XX в., многие аспекты создания и развития системы КОСПАС–САРСАТ отодвигались на второй план. Основные системные документы не обновлялись, тогда как система неизбежно развивалась и двигалась вперед. Поэтому назрела необходимость пересмотреть в том числе базовые системные документы, регламентирующие создание элементов системы. В работе делается попытка взглянуть на проблему создания и развития системы максимально широко, с учетом текущего состояния системы поиска и спасания.

При рассмотрении перспективных вопросов развития системы поиска и спасания необходимо учитывать положения основных системных документов стратегического планирования — Стратегический план КОСПАС–САРСАТ [7], а также План внедрения среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания 406 МГц (СССПС) (MEOSAR) [8].

Таким образом, в работе определяется понятие российского сегмента международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ, определяется текущий статус и обсуждаются основные проблемы и пути развития российского сегмента и системы КОСПАС–САРСАТ в целом.

Текущий статус системы КОСПАС–САРСАТ

Система КОСПАС–САРСАТ является международной системой поиска и спасания, создание которой определялось Соглашением [1], заключенным в Гамбурге 27 апреля 1979 г. между четырьмя странами: СССР, США, Францией и Канадой с учетом требований Международной конвенции по поиску и спасанию.

Система поиска и спасания призвана уменьшить, насколько возможно, задержку в доставке информации о чрезвычайной ситуации (ЧС) службам поиска и спасания и время, необходимое для обнаружения ЧС, поскольку эти параметры непосредственно влияют на вероятность выживания в катастрофе людей. Быстрое детектирование и определение координат ЧС также вносит свой вклад в уменьшение стоимости поисковой спасательной операции и рисков для спасателей [7].

Международная система предназначена для обеспечения передачи сообщений об аварийной ситуации на глобальной, недискриминационной и бесплатной для пользователей основе. Она функционирует в частотных диапазонах, выделенных международным союзом электросвязи (МСЭ) исключительно для оповещении о ЧС, то есть ситуаций серьезной и неизбежной угрозе безопасности человеческой жизни.

Международная система КОСПАС–САРСАТ в соответствии с [1] состоит из трех сегментов: космического, наземного и радиобуев, предназначенных для передачи аварийного радиосигнала на частотах 406 МГц, характеристики которых

Рис. 1. Принцип функционирования международной системы поиска и спасания

соответствуют требованиям Международного союза электросвязи и спецификациям КОСПАС–САРСАТ.

Космический сегмент при нормальных эксплуатационных условиях должен состоять минимум из четырех космических аппаратов. В наземный сегмент входят станции приема и обработки информации (СПОИ) для приема сигналов, переданных со спутников, и их обработки с целью определения местоположения радиобуя и координационные центры системы (КЦС) для получения выходных данных от станций приема информации и передачи сообщений о бедствии и его местоположении соответствующим спасательным службам (рис. 1).

В соответствии Соглашением СССР, а затем и Российская Федерация, обязуются поддерживать на низкой орбите две спутниковые платформы, два приемника-процессора с блоками памяти для работы с сигналами радиобуев на частоте 406 МГц и два ретранслятора. Кроме того, Российская Федерация эксплуатирует станцию приема и обработки информации от низкоорбитальных космических аппаратов, а также Международный координационно-вычислительный центр (МКВЦ) системы, передающий информацию в службы поиска и спасания. В дальнейшем к космическим и наземным средствам международной системы поиска и спасания, эксплуатируемым Российской Федерацией, будем применять обобщающий термин «российский сегмент» международной системы КОСПАС–САРСАТ.

Общее функционирование системы КОСПАС–САРСАТ основывается на фундаментальном требовании, заключающемся в возможности независимого от прочих навигационных систем определения координат ЧС в любой точке земного шара [7, 9].

В силу баллистических ограничений существенным недостатком эксплуатируемого низкоорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ (совокупность низкоорбитальных космических аппаратов и сопряженных с ними станций приема и обработки информации получила название НССПС) состоит в необходимости ожидания сеанса связи со спутником для передачи информации о ЧС и, следовательно, невозможности оповещения

спасательных служб о ЧС в режиме, близком к режиму реального времени.

В 1998 г. Совет Международной программы КОСПАС–САРСАТ решил расширить возможности системы КОСПАС–САРСАТ путем размещения ретрансляторов на геостационарных спутниках [8] в целях обнаружения сигналов радиобуев на частоте 406 МГц (далее — система ГССПС). Зоны обслуживания геостационарных спутников неподвижны относительно поверхности Земли, тем самым каждый спутник обеспечивает непрерывный охват географического района, определяемого его зоной обслуживания. Это позволяет уменьшить задержки в обнаружении, характерные для системы НССПС. С учетом высоты нахождения каждый спутник ГССПС обеспечивает охват очень большой площади (около одной трети поверхности Земли, исключая районы выше $\pm 70^{\circ}$ по широте).

Однако необходимо отметить, что система ГССПС обеспечивает информацию о местоположении, только если эта информация предоставляется из внешнего источника (то есть приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), установленного в радиобуе) и передается в сообщении радиобуя на частоте 406 МГц; препятствия, если таковые блокируют линию связи «радиобуй–КА», не могут быть устранены, поскольку спутник неподвижен по отношению к радиобую; а также энергетический потенциал линии связи радиобуй–КА–СПОИ у ГССПС существенно меньше, чем НССПС, если принять во внимание большее расстояние передачи радиосигнала.

Для преодоления указанных ограничений с учетом расширения технологических возможностей в 2000 г. Россия, США и Европейская Комиссия (ЕК) начали консультироваться с исполнительными органами КОСПАС–САРСАТ в отношении возможности установки ретранслятора сигналов радиобуев на среднеорбитальных спутниковых системах (далее называемых как созвездия СССПС) и включения оборудования СССПС в систему КОСПАС–САРСАТ [8]. Программа Российской Федерации получила наименование Поисково-спасательной системы ГЛОНАСС (SAR/GLONASS), программа СССПС в США называется Спутниковой системой аварийного оповещения (SAR/GPS) (DASS) и европейская система называется Поисково-спасательной системой Галилео (SAR/GALILEO).

В ходе первоначальных исследований были выявлены различные возможные преимущества функционирования СССПС по сравнению с существующими системами (НССПС и ГССПС), включая: почти мгновенный глобальный охват с возможностью точного независимого определения местоположения; устойчивые линии связи радиобуй–КА, высокие уровни избыточности и доступности спутника; устойчивость к наличию препятствий на линии связи радиобуй–КА за счет движения космического аппарата на орбите и большого количества космических аппаратов в перспективе; возможность обеспечения дополнительных услуг.

Таким образом, основные недостатки НССПС могут быть устранены, а эксплуатационные характеристики системы КОСПАС–САРСАТ в перспективе существенно улучшены при условии внедрения дополнительных возможностей, предлагаемых геостационарным и среднеорбитальным сегментами системы.

Основные принципы построения системы КОСПАС–САРСАТ

Система поиска и спасания имеет очень богатую историю своего существования [10–15]. Начиная с 1982 г. было спасено 41 750 человеческих жизней в 11 750 спасательных операциях. Программа КОСПАС–САРСАТ представляется уникальным явлением в сегодняшнем мире — ведь решение этой проблемы (построение одной из самых гуманных систем в истории человечества) сегодня объединяет усилия нескольких стран, зачастую разделенных политическими и идеологическими противоречиями. Именно поэтому к развитию и изменению принципов функционирования системы необходимо подходить с учетом интересов всех участников базового Соглашения. Далее приведем некоторые основополагающие принципы перспективного построения системы.

Система КОСПАС–САРСАТ должна представлять собой единую совокупность средств космического, наземного сегментов и аварийных радиобуев, модифицируемых и улучшаемых в четком соответ-

1978 г., 12 января — Постановление СМ СССР о проведении работ по созданию космической системы поиска и спасания «КОСПАС»

1982 г., 30 июня — первый запуск ИСЗ «КОСПАС-1»

1982 г., 10 сентября — первое спасение по сигналу «КОСПАС-1»

1987 г., 8 декабря — Постановление ЦК КПСС и СМ СССР о принятии системы в эксплуатацию

1988 г., 1 июля — подписано «Соглашение о международной программе КОСПАС–САРСАТ»

Статья 3. Общее описание системы.
«...космический сегмент, состоящий минимум из четырех совместно работающих спутниковых комплексов...»
Статья 5. Обязательства сторон.
Вклад сторон в космический сегмент:
«...СССР: 2 спутниковые платформы, 2 приемника-процессора, 2 ретранслятора...»,
«...США: 2 спутниковые платформы...»,
«...Франция: 2 приемника-процессора с блоками памяти...»,
«...Канада: 2 ретранслятора...»

Первое спасение Запуск ИСЗ «КОСПАС-1»

Рис. 2. История создания системы КОСПАС–САРСАТ

ствии с требованиями КОСПАС–САРСАТ под обязательным и постоянным контролем Совета системы поиска и спасания [3, 11, 12].

Космический сегмент системы КОСПАС–САРСАТ, состоящий из низкоорбитального, среднеорбитального и геостационарного элементов, должен проектироваться на взаимодополняющей основе. В среднесрочной перспективе, с учетом полного развертывания СССПС КОСПАС–САРСАТ, состав космического сегмента системы может быть пересмотрен.

Наземный сегмент должен включать наземные станции, способные эффективно функционировать и принимать информацию от космических аппаратов сопряженного космического сегмента. Координационный центр системы должен обеспечивать доведение данных о ЧС, полученных от станции приема, сопряженной с любым элементом космического сегмента КОСПАС–САРСАТ, до поисково-спасательной службы или точки контакта поиска и спасания [14].

Аварийные радиобуи должны проектироваться с учетом растущих потребностей потребителей системы поиска и спасания, а также в четком соответствии с перспективными требованиями системы КОСПАС–САРСАТ.

Система КОСПАС–САРСАТ и соответствующие национальные сегменты должны развиваться и обеспечивать должную пропускную способность с учетом роста парка действующих аварийных радиобуев [7].

Создание системы КОСПАС–САРСАТ, эффективно выполняющей поставленные задачи, возможно только при условии выполнения всеми странами-участниками Соглашения взятых на себя обязательств.

Российский вклад в международную систему должен включать как космический и наземный сегменты, так и радиобуи разного назначения. Российский сегмент системы КОСПАС–САРСАТ, как и система в целом, должны проектироваться с учетом принципов интеграционного взаимодействия космического, наземного сегментов, а также аварийных радиобуев, максимально эффективно используя ресурсы и возможности системы.

Российский сегмент системы КОСПАС–САРСАТ должен представлять собой единую совокупность средств наземного и космического базиро-

вания, которые разрабатываются и создаются Российской Федерацией в обеспечение выполнения международных обязательств программы КОСПАС–SARSAT в соответствии с Соглашением и другими нормативными документами международной системы.

Перспективное развитие системы КОСПАС–SARSAT должно обеспечить всем пользователям и потребителям гарантированный, глобальный, своевременный и безвозмездный доступ к информации о ЧС. Система КОСПАС–SARSAT должна динамично улучшать свои эксплуатационные характеристики, позволяя повышать эффективность проведения поисковых спасательных мероприятий.

Несмотря на то, что система КОСПАС–SARSAT не намеревается конкурировать с коммерческими системами, предоставляющими телекоммуникационные сервисы и услуги позиционирования, система должна непрерывно улучшать качество услуг оповещения и позиционирования для обеспечения долгосрочных требований поиска и спасания ИКАО, ММО, а также прочих пользователей и потребителей.

Кроме того, системой должны учитываться перспективные пути развития вновь создаваемых телекоммуникационных систем.

Стратегические направления развития КОСПАС–SARSAT

С учетом стратегического плана развития системы КОСПАС–SARSAT [7] и прогнозируемых потребностей основных потребителей системы необходимо определить стратегические направления перспективной деятельности. Необходимо приложить усилия для решения вопросов в различных областях развития системы.

Технологическая модернизация космического и наземного элементов российского сегмента системы КОСПАС–SARSAT

Выполнение международных обязательств Российской Федерацией в части поддержания и восполнения при необходимости (два космических аппарата с аппаратурой поиска и спасания на борту) низкоорбитальной космической группировки системы КОСПАС–SARSAT на низкой орбите в краткосрочной и среднесрочной перспективе является критически важной задачей, которая в ближайшей перспективе должна быть решена. В 2017 г. ожидается запуск двух КА — «Метеор-М» №2-1 и №2-2 — с размещенной аппаратурой поиска и спасания на борту.

С учетом развития космических элементов необходимо обеспечить модернизацию, создание и развертывание сопряженных наземных элементов.

Для успешного функционирования российского сегмента НССПС необходимо провести модернизацию станций приема и обработки информации низкоорбитального сегмента для работы с бортовой аппаратурой нового поколения.

Кроме того, необходимо развернуть наземные станции геостационарного сегмента КОСПАС–SARSAT последнего поколения, разработанные в Российской Федерации в рамках Федеральной космической программы на 2006–2015 гг.

В настоящее время КОСПАС–SARSAT прикладывает большие усилия для скорейшего внедрения среднеорбитальной системы поиска и спасания, развертывание которой предполагает значительные расширения возможностей по сравнению с существующими сегментами за счет использования большого количества навигационных аппаратов ГЛОНАСС/GPS/GALILEO в качестве носителей ретрансляторов сигналов аварийных радиобуев.

Одна из приоритетных задач текущего развития российского сегмента и системы поиска и спасания в целом — разработка и развертывание полезных нагрузок и наземных станций среднеорбитального сегмента КОСПАС–SARSAT нового поколения, реализующих все требования системы КОСПАС–SARSAT, в том числе по точности определения координат для любого типа аварийных радиобуев.

Необходимо отметить, что в текущих программах (ФЦП «ГЛОНАСС») до 2025 г. предусмотрено создание минимум восьми бортовых полезных нагрузок поиска и спасания для размещения на борту среднеорбитальных КА.

В соответствии с планами по развитию российского космического сегмента КОСПАС–SARSAT

в целом необходимо обеспечить разработку и создание максимально унифицированной бортовой аппаратуры ретрансляции аварийных сигналов для размещения на борту низкоорбитальных, среднеорбитальных и геостационарных КА системы КОСПАС–САРСАТ нового поколения.

Одной из принципиально новых возможностей среднеорбитальной системы является функция квитирования, то есть обеспечение обратного канала с радиобуем, позволяющего подтвердить факт получения сигнала о бедствии и начале спасательной операции. Для обеспечения указанной функции необходимо разработать и развернуть в Российской Федерации соответствующую наземную инфраструктуру, позволяющую закладывать «квитанции» на борт космических аппаратов и далее передавать их потребителям.

Появление дополнительных функций и подсистем в рамках российского сегмента приводит к необходимости модернизации российского координационного центра системы КОСПАС–САРСАТ, взаимодействующего с подсистемой квитирования и интегрирующего информацию от станций приема нового поколения низкоорбитального, среднеобритального и геостационарного сегментов.

Совершенствование нормативно-правовой базы КОСПАС–САРСАТ

Нормативная база КОСПАС–САРСАТ

В настоящее время назрела серьезная необходимость пересмотра нормативно-правовой базы в системе КОСПАС–САРСАТ не только на уровне Совета системы, но и на государственном уровне в Российской Федерации.

В Российской Федерации разрабатываются и в среднесрочной перспективе готовятся к запуску ретрансляторы системы КОСПАС–САРСАТ на космических аппаратах системы «Арктика-М», которые будут запущены на высокоэллиптическую орбиту Земли.

В составе международной системы КОСПАС–САРСАТ не регламентировано использование космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах, нет соответствующих регламентов и стандартов использования информации, отсутствует наземная инфраструктура.

Для полноценного использования разработанного оборудования требуется подготовка и выпуск соответствующей документации системы КОСПАС–САРСАТ на уровне Совета системы поиска и спасания.

Для ускорения ввода указанной аппаратуры в систему КОСПАС–САРСАТ предлагается рассмотреть возможность комиссования (т. е. ввода в систему) космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах в рамках геостационарного сегмента системы, поскольку ретрансляторы КОСПАС–САРСАТ, размещаемые на высокоэллиптических и геостационарных (геосинхронных) космических аппаратах, абсолютно идентичны. Такой шаг позволит значительно упростить количество и сроки выполнения соответствующих процедур по вводу в эксплуатацию ретрансляторов.

Нормативная документация государственного уровня Российской Федерации

Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о создании российского сегмента КОСПАС–САРСАТ принято в 1978 г. (Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 26.01.1977 № 81-84 и постановление Совета Министров СССР от 12.01.1978 № 33-15 «О проведении работ по созданию совместно с США, Канадой экспериментальной спутниковой системы для определения местоположения самолетов, потерпевших аварию»). Оно не учитывает современных реалий развития организационной структуры космической отрасли в стране и системы КОСПАС–САРСАТ.

Необходимо подготовить и выпустить постановление Правительства Российской Федерации, регламентирующее модернизацию и поддержание существующих (низкоорбитального и геостационарного) и создание новых элементов (среднеорбитального) российского сегмента КОСПАС–САРСАТ.

Согласно требованиям документов системы КОСПАС–САРСАТ [8] необходимо на государственном уровне определить организацию-провайдера (поставщика) элементов космического сегмента в Российской Федерации. Основными задачами организации-провайдера (поставщика) космического сегмента является организация постоянной эксплуатации всех элементов космического сегмента

КОСПАС–САРСАТ в части ответственности Российской Федерации и обеспечение непрерывного предоставления эфемеридной информации космических аппаратов в наземный сегмент КОСПАС–САРСАТ.

Учитывая изменения в организационной структуре управления отраслью, в целях повышения эффективности и обеспечения безусловного выполнения международных обязательств Российской Федерации в области системы поиска и спасания необходимо регламентировать и создать институт генерального конструктора российского сегмента системы КОСПАС–САРСАТ.

В 2000 г. Советом КОСПАС–САРСАТ было принято решение об использовании в составе системы персональных радиобуев. В настоящее время в 12 странах уже приняты соответствующие законы, позволяющие гражданам использовать соответствующее оборудование в случае ЧС.

В Российской Федерации в 2016 г. были сделаны первые шаги к внедрению персональных радиобуев КОСПАС–САРСАТ. Было принято решение ГКРЧ о возможности их применения с учетом текущих частотных распределений.

Тем не менее в краткосрочной перспективе необходимо выпустить полный пакет нормативных актов, определяющих применение персональных радиобуев в Российской Федерации, а также устанавливающих точки контакта для передачи информации и порядок проведения поисковых спасательных мероприятий по сигналам подобных устройств.

Появление указанной нормативной базы позволит обеспечить существенное развитие системы поиска и спасания для персонального использования, в том числе и для возможного применения на автомобильном транспорте в рамках системы экстренного реагирования при авариях «ЭРА–ГЛОНАСС».

Развитие критических технологий

Для устойчивого развития российского сегмента системы поиска и спасания, а также в интересах обеспечения технологической независимости Российской Федерации при разработке подобных систем необходимо обеспечить разработку следующих технологий в различных сегментах.

Развитие космического сегмента требует разработки унифицированной бортовой аппаратуры КОСПАС–САРСАТ для всех сегментов, включая бортовые приемники-процессоры нового поколения, обеспечивающие прием и обработку сигнала радиобуев с более высокой точностью. Кроме того, востребованы технологии создания бортовых ретрансляторов сигналов радиобуев КОСПАС–САРСАТ с учетом наличия обратного канала.

Для наземного сегмента необходимо обеспечить создание технологии обработки информации и расчета местоположения ЧС с повышенной точностью, технологии системы квитирования, технологии создания антенн станций приема информации с использованием антенных решеток, технологии создания виртуальных антенных систем станций приема информации (технологии использования распределенных антенных систем в рамках единой наземной инфраструктуры обработки информации), а также технологии радиофотоники как элементов антенных систем наземных станций обработки информации.

Для улучшения характеристик аварийных радиобуев системы КОСПАС–САРСАТ необходимо развивать технологии создания аккумуляторных батарей повышенной емкости, технологии эффективного кодирования и передачи информации, элементов ближнего привода перспективных радиобуев морского базирования.

Ожидаемые результаты реализации Концепции

Реализация предлагаемой концепции развития российского сегмента системы КОСПАС–САРСАТ позволит:

— выполнить международные обязательства Российской Федерации по поддержанию космического сегмента системы КОСПАС–САРСАТ, устранив угрозу существенной деградации возможностей системы за счет критического уменьшения количества эксплуатируемых космических аппаратов;

— провести модернизацию технических средств и оборудования КОСПАС–САРСАТ, обеспечив

возможность создания новой техники наземного, морского и космического базирований;

— выработать порядок применения персональных радиобуев на территории Российской Федерации, следовательно, повысить эффективность использования системы КОСПАС–САРСАТ на территории Российской Федерации;

— повысить эффективность проведения поисковых спасательных операций, в том числе за счет снижения времени, требующегося на определение координат и улучшения точности определения местоположения произошедшего ЧС;

— повысить уровень безопасности мореплавания и воздушного движения на территории Российской Федерации, а также уровень эффективности государственного управления в условиях ЧС.

Для оценки эффективности реализации Концепции предполагается создание системы показателей и целевых индикаторов, которые должны включать требования, устанавливаемые государством, на основе запросов пользователей (соответствующих спасательных служб) системы КОСПАС–САРСАТ.

Основными государственными показателями российского космического сегмента системы КОСПАС–САРСАТ должны быть:

— обеспечение национальных интересов в области информационной поддержки проведения поисковых спасательных операций;

— эффективность системы КОСПАС–САРСАТ;

— доступность системы КОСПАС–САРСАТ;

— информационное обеспечение мероприятий по повышению безопасности автомобильного, воздушного и морского движения;

— общая интеграционная совместимость оборудования, элементов и сегментов системы КОСПАС–САРСАТ.

Показатели на уровне системы КОСПАС–САРСАТ должны разрабатываться с учетом требований внутренних стандартов и нормативных документов системы, стандартов и требований ММО, ИКАО, отражать качество работы ее сегментов, элементов и/или подсистем, степень их консолидации, эффективность взаимодействия, уровень технического оснащения и соответствия принятым стандартам.

Сроки и этапы реализации Концепции

Основными направлениями деятельности по созданию и развитию российского сегмента системы КОСПАС–САРСАТ являются:

— в краткосрочном плане (до 2018 г.):
разработка, изготовление и запуск двух космических аппаратов на низкую орбиту Земли в целях обеспечения безусловного выполнения международных обязательств Российской Федерации, в соответствии с Соглашением; поддержание функционирования геостационарного сегмента; модернизация российской части наземного сегмента КОСПАС–САРСАТ; проведение и ввод в КОСПАС–САРСАТ перспективной станции приема и обработки информации от космических аппаратов среднеорбитального сегмента;

— в среднесрочном плане (до 2022 г.):
разработка нового поколения максимально унифицированных полезных нагрузок для формирования низкоорбитального, среднеорбитального и геостационарного элементов космического сегмента КОСПАС–САРСАТ; поддержание функционирования низкоорбитального и геостационарного элементов космического сегмента; частичное развертывание среднеорбитального космического сегмента; разработка и развертывание координационного центра системы, поддерживающего новые элементы космического сегмента КОСПАС–САРСАТ, включая систему квитирования;

— в долгосрочном плане (до 2030 г.):
окончание жизненного цикла низкоорбитального элемента космического сегмента системы КОСПАС–САРСАТ, полное развертывание и ввод в эксплуатацию СССПС КОСПАС–САРСАТ. Создание и ввод в систему станций приема и обработки информации на базе единой или «виртуальной» антенной системы. Полноценное внедрение в КОСПАС–САРСАТ буев II поколения с учетом обеспечения обратного канала.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что в Российской Федерации предпринимаются значительные усилия по развитию российского сегмента

международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ.

Несмотря на то что в последнее время был несколько снижен темп развертывания элементов российского сегмента международной системы КОСПАС–САРСАТ, новые образцы бортового и наземного оборудования создавались в рамках Федеральной космической программы на 2006–2015 гг., а также в рамках специализированных программ Министерства транспорта Российской Федерации. Кроме того, формирование перспективного научно-технического задела предусмотрено действующими Федеральными целевыми программами.

Развитие информационных и производственных технологий в Российской Федерации предоставляет возможность существенно модернизировать и создать аппаратуру нового поколения наземного и космического базирования системы КОСПАС–САРСАТ.

Для обеспечения устойчивого развития российского сегмента системы КОСПАС–САРСАТ и системы поиска и спасания в целом необходимо обеспечить безусловное развертывание и ввод в эксплуатацию СССПС, поскольку указанное направление объявлено стратегическим в международной программе.

В свою очередь развертывание и поддержание СССПС потребует освоения и внедрения ряда критических технологий, которые позволят производить аппаратуру наземного и космического сегментов, а также компоненты аварийных радиобуев, соответствующих мировому уровню.

В долгосрочной перспективе необходимо рассмотреть возможность совместного развития КОСПАС–САРСАТ с космическими сегментами систем автоматической идентификации (АИС) и зависимого наблюдения (АЗН) морских и воздушных судов, учитывая бурное развитие космических систем, расширяющих традиционные возможности систем мониторинга подвижных объектов.

Системное развитие российского сегмента КОСПАС–САРСАТ возможно только при условии обеспечения непрерывного финансирования разработки и создания его перспективных элементов и на настоящее время предусмотрено в рамках Федеральной космической программы на 2016–2025 гг., ФЦП «ГЛОНАСС», а также в рамках специализированных программ Министерства транспорта Российской Федерации.

Список литературы

1. Документ C/S P.001R // Электрон. Дан. Канада, 1988. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int/
2. Меморандум о взаимопонимании. Л.: 1979. 19 с.
3. *Балашов А. И.*, *Зурабов Ю. Г.*, *Пчеляков Л. С. и др.* Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / Под ред. В. С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1984. 376 с.
4. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74), 1974. М.: ЦРИА Морфлот, 1982. 543 с.
5. Эксплуатационное соглашение о Международной организации морской спутниковой связи (ИНМАРСАТ) от 03.09.1976 // Электрон. Дан. Англия, 1976. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.referent.ru/1/13592/
6. Международная конвенция по поиску и спасанию на море, 1979. М.: ЦРИА Морфлот, 1982. 62 с.
7. Документ C/S P.016 // Электрон. Дан. Канада, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int/
8. Документ C/S R.012 // Электрон. Дан. Канада, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int/
9. Документ C/S P.011 // Электрон. Дан. Канада, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int/
10. The History And Experience Of The International COSPAS–SARSAT Programme For Search And Rescue. International Astronautical Federation, 2016. 222 p.
11. *Урличич Ю. М.*, *Макаров Ю. Ф.*, *Селиванов А. С.*, *Никушкин И. В.*, *Рогальский В. И.*, *Зурабов Ю. Г.* История создания и перспективы развития международной космической системы поиска и определения местоположения терпящих бедствие судов и самолетов КОСПАС–САРСАТ // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 12–15.

12. *Урличич Ю.М.*, *Макаров Ю.Ф.*, *Селиванов А.С.*, *Никушкин И.В.*, *Рогальский В.И.*, *Архангельский В.А.*, *Зурабов Ю.Г.* Принцип действия и основные характеристики системы КОСПАС // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 15–20.

13. *Архангельский В.А.*, *Семин В.И.* Программно-математическое обеспечение российских станций приема и обработки информации системы КОСПАС–САРСАТ // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 20–23.

14. *Семин В.И.*, *Дедов Н.В.*, *Федосеев А.В.*, *Тарасов К.В.* Настоящее и будущее космической системы поиска и спасания. Геостационарный сегмент // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 25–29.

15. *Ступак Г.Г.*, *Никушкин И.В.*, *Суринов А.С.*, *Рогальский В.И.*, *Косенко В.Е.* Анализ состояния и перспектив развития российского среднеорбитального сегмента международной космической системы КОСПАС–САРСАТ // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 29–34.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 16–23

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 629.78 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.16

Статус программы КОСПАС–САРСАТ и ее будущее развитие

В. В. Студенов

к.т.н.
Секретариат КОСПАС–САРСАТ, Монреаль, Канада

e-mail: vladislav.studenov@gmail.com

Аннотация. Запуск первого спутника КОСПАС-1 35 лет тому назад открыл новую эру спасения людей, когда своевременное и точное определение координат морского, авиационного или какого-либо другого вида бедствия стало возможным с помощью космических аппаратов.

Проект спутниковой системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ был запущен в 1979 г. четырьмя странами: СССР, Канадой, Францией и США. И в начале XXI в. этот проект продолжает оставаться уникальной моделью международного сотрудничества 43 государств и организаций, которые обеспечивают предоставление средств спутниковой связи бесплатно для конечного пользователя, находящегося в бедствии в любой точке земного шара.

Успех в предоставлении аварийной информации поисково-спасательным (ПС) службам не заставил себя долго ждать, как только первый спутник КОСПАС-1 оказался на орбите Земли 30 июня 1982 г.: 10 сентября 1982 г. уже были спасены три гражданина Канады.

В настоящее время активно внедряемая среднеорбитальная спутниковая система поиска и спасания (СССПС = MEOSAR) рассматривается в качестве замены существующей низкоорбитальной системы НССПС. В 1998 г. в программу была введена геостационарная система ГССПС, а в 2009 г. была завершена работа подсистемы НССПС на частоте 121,5 МГц. Реализация системы СССПС должна будет гарантировать программе КОСПАС–САРСАТ продолжение ее успешной деятельности в обозримом будущем, при этом предусматривая улучшение эксплуатационных параметров системы, включая точность определения координат аварийного радиобуя.

В работе приводится текущий статус программы КОСПАС–САРСАТ, а также рассматриваются основные перспективы ее развития.

Ключевые слова: система КОСПАС–САРСАТ, НССПС, ГССПС, СССПС, КЦС, СПОИ, радиобуй

Status of the COSPAS–SARSAT Programme and Its Future Developments

V. V. Studenov

candidate of engineering science
Cospas–Sarsat Secretariat, Montreal, Canada

e-mail: vladislav.studenov@gmail.com

Abstract. The first Cospas-1 satellite launch 35 years ago opened a new era of rescue of people in distress when timely and exact determination of coordinates of sea, aviation or any other accident became possible by means of a spacecraft.

The project of a satellite system for search and rescue Cospas–Sarsat was started in 1979 by four countries: the USSR, Canada, France, and the USA. At the beginning of the twenty first century, this project continues to remain a unique model of the international cooperation of 43 states and organizations, which provide means of satellite communication free of charge for the end user in distress in every spot on the globe.

Today, the Medium Earth Orbit Search and Rescue (MEOSAR) satellite system for distress alerting and positioning is beginning to operate and will eventually serve as replacement of the existing LEOSAR system. As a reminder, 1998 was marked (after several years of testing) to strengthen the LEOSAR system with the introduction of the GEOSAR geostationary satellite system. The realization of the MEOSAR system will guarantee that the Cospas–Sarsat Programme will continue its successful activities in the near future, providing improvements to the operational parameters of the System, including the accuracy of determination of the coordinates of an emergency radio beacon.

The status and major avenues of the Program development are considered in this paper.

Keywords: Cospas–Sarsat System, LEOSAR, GEOSAR, MEOSAR, MCC, LUT, radio beacon

Введение

Начало практической реализации международной спутниковой системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ было положено запуском первого советского спутника КОСПАС-1 в 1982 г. За прошедшие 35 лет с использованием Системы КОСПАС–САРСАТ было спасено более 44 тысяч человек, из них более 1600 человек из стран бывшего СССР и России. Это выдающееся достижение получило большое признание среди мирового сообщества пользователей авиационным и морским транспортом, а также индивидуальных пользователей на суше [1].

Как один из лидеров системы КОСПАС–САРСАТ и одна из сторон Соглашения о международной программе КОСПАС–САРСАТ, Россия приняла на себя ответственность и обязательства бывшего СССР за участие в Программе, включая обязательства по запуску и эксплуатации спутников, установке станций приема и обработки информации, а также созданию и эксплуатации центра системы КОСПАС, обеспечивающего обработку и маршрутизацию аварийных данных.

Участники программы КОСПАС–САРСАТ выражают огромную признательность АО «Российские космические системы» (бывшему НИИ космического приборостроения) за создание системы КОСПАС, поддержание ее в эксплуатационном состоянии и совершенствование в течение последних 35 лет.

Основную концепцию и другую основополагающую информацию о системе КОСПАС–САРСАТ можно найти на трех рабочих языках программы (английском, французском и русском) [2].

1. Миссия КОСПАС–САРСАТ

Программа КОСПАС–САРСАТ оказывает содействие службам поиска и спасания во всем мире путем своевременного предоставления мировому сообществу на недискриминационной основе точных и надежных данных о бедствии и его местоположении.

Цель системы КОСПАС–САРСАТ состоит в снижении, насколько это возможно, задержки в предоставлении аварийных сообщений службам поиска и спасания и времени на местоопределение бедствия и оказание помощи, что напрямую влияет на вероятность выживания человека на море и на суше.

Для достижения этой цели участники КОСПАС–САРСАТ вводят в эксплуатацию, поддерживают, координируют и эксплуатируют спутниковую систему, которая способна обнаруживать аварийные сигналы от радиобуев, соответствующих спецификациям и стандартам, а также определять их местоположение в любой точке земного шара. Данные о бедствии и его местоположении передаются участниками КОСПАС–САРСАТ в соответствующие службы поиска и спасания.

КОСПАС–САРСАТ сотрудничает с Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), Международной морской организацией (ИМО), Международным союзом электросвязи (МСЭ) и другими международными организациями с целью обеспечения соответствия услуг КОСПАС–САРСАТ по предоставлению данных о бедствии с потребностями, стандартами и соответствующими рекомендациями мирового сообщества.

2. Последние решения Совета КОСПАС–САРСАТ

В состав Совета КОСПАС–САРСАТ входят по одному представителю от каждой из четырех сторон Соглашения о международной программе КОСПАС–САРСАТ (ICSPA), а именно России, Канады, Франции и США. Совет собирается по крайней мере один раз в год, чтобы выполнить соответствующие задачи и скоординировать действия сторон, но для выполнения своих функций он может встречаться по мере необходимости и чаще. Решения Совета принимаются единогласно представителями сторон.

На закрытых заседаниях Совета присутствуют только стороны и рассматриваются прежде всего вопросы деятельности секретариата и управления программой, включая отношения с потенциальными участниками, пользователями системы, производителями и международными организациями.

Совет также собирается по крайней мере один раз в год на открытом заседании, во время

которого ассоциированные страны и организации (участники КОСПАС–САРСАТ) могут обсуждать любую проблему, имеющую отношение к администрированию программы и управлению системой, которые представляют интерес для участников КОСПАС–САРСАТ. К этим вопросам относятся общие затраты программы, эксплуатация системы и ее развитие, отчет и рекомендации Объединенного комитета (органа программы, помогающего в подготовке решений Совета) и отношения с международными организациями.

На закрытых и открытых заседаниях 57-й сессии Совета КОСПАС–САРСАТ (1–8 декабря 2016 г.) ключевые решения касались начала маршрутизации аварийных данных среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС = MEOSAR) на стадии ранней эксплуатационной готовности (РЭГ = EOC), а также продвижение по разработке спецификаций для радиобуев второго поколения [3].

2.1. Среднеорбитальная спутниковая система поиска и спасания (СССПС = MEOSAR)

СССПС создается на базе группировок навигационных спутников ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Европейский Союз) и GPS (США).

Начавшаяся фаза ранней эксплуатационной готовности (РЭГ) уже разрешает использование операционных данных системы СССПС. В период РЭГ развивающаяся система СССПС позволит улучшить эксплуатационные параметры системы, включая точность определения координат аварийного радиобуя, в дополнение к существующим низкоорбитальной спутниковой системе поиска и спасания (НССПС) и геостационарной спутниковой системе поиска и спасания (ГССПС), а поисково-спасательным службам (ПС = SAR) — ознакомиться с системой СССПС до завершения ее фазы демонстрации и оценки (ДИО = D&E). К настоящему моменту комиссионные испытания в рамках системы СССПС прошли два координационных центра системы (КЦС = MCC) во Франции и США, а также семь станций приема и обработки информации (СПОИ = LUT) в Испании, на Кипре, в Норвегии, США, Турции и во Франции. Кроме того, в настоящее время на этапе РЭГ система СССПС пока еще не обеспечивает глобальное покрытие и не полностью отвечает ожидаемым требованиям к ее производительности, в особенности в отношении параметра точности.

57-я сессия Совета отметила, что были согласованы все критерии, которые позволяют начать фазу ранней эксплуатационной готовности (РЭГ) системы СССПС [4], и было объявлено начало этой фазы. Письмом уведомлены все заинтересованные стороны. Фаза РЭГ началась 13 декабря 2016 г.

Каждая последующая фаза после РЭГ (то есть начальная эксплуатационная готовность (НЭГ = = IOC) и полная эксплуатационная готовность (ПЭГ = FOC)) предусматривает улучшение эксплуатационных параметров системы.

На конечной стадии фазы НЭГ все оборудование наземного сегмента системы СССПС будет соответствовать требованиям по производительности без каких-либо ограничений.

На стадии ПЭГ у системы СССПС будут уже достаточные ресурсы космического сегмента и возможность предоставления глобального обслуживания.

Переход к фазам НЭГ и ПЭГ ожидается в течение последующих нескольких лет. На рис. 1 представлен предварительный график внедрения системы СССПС.

В результате полного внедрения системы СССПС с годами предполагается вывод из эксплуатации существующей системы НССПС.

2.2. Радиобуи второго поколения

Радиобуи второго поколения будут способствовать улучшению эксплуатационных параметров системы, удовлетворяя новым, более жестким требованиям по вероятности обнаружения радиобуя, точности определения его местоположения и емкости системы.

Радиобуи второго поколения предполагают также реализацию услуги обратной связи (RLS), предлагаемой некоторыми Глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС = GNSS), при которой аварийному радиобую посылается уведомление после того, как он был обнаружен системой КОСПАС–САРСАТ.

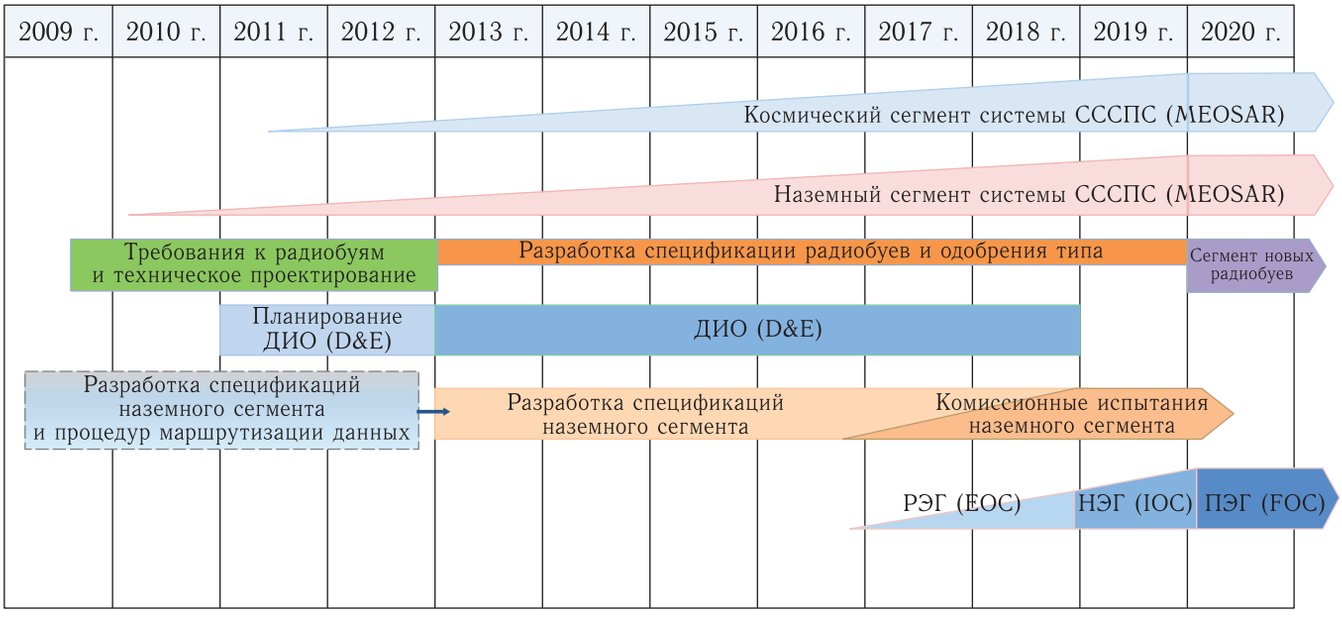


Рис. 1. Предварительный график внедрения системы СССПС (MEOSAR)

2.3. Секретариат КОСПАС–САРСАТ

Секретариат КОСПАС–САРСАТ — это административный орган международной программы КОСПАС–САРСАТ, миссия которого состоит в оказании помощи Совету в реализации всех его функций по управлению программой, включая проведение заседаний, административную поддержку, ведение документации системы и осуществление международных связей.

Сотрудники секретариата обеспечивают техническую и эксплуатационную поддержку и экспертизу для стран-участниц/организаций, а также пользователей по таким вопросам, как статус Системы, спецификации и рабочие характеристики Системы, одобрение типа аварийных радиобуев, регистрация радиобуев, работа космического и наземного сегментов и маршрутизация аварийных данных.

3. Участники программы КОСПАС–САРСАТ

Общее число участников программы КОСПАС–САРСАТ после присоединения Малайзии в декабре 2016 г. достигло 43, среди которых 4 стороны, обеспечивающие космический сегмент, 28 государств, обеспечивающих наземный сегмент, 2 государства — оператора наземного сегмента и 9 государств — пользователей программы [5].

4. Основная статистика функционирования системы КОСПАС–САРСАТ

В 2015 г. (обработка статистики 2016 г. еще не закончена) аварийные данные КОСПАС–САРСАТ были использованы в 718 инцидентах (в 2014 г. — 685), при этом были спасены 2185 человек (в 2014 г. — 2354). С сентября 1982 г. по декабрь 2015 г. система КОСПАС–САРСАТ обеспечила помощь при спасении по крайней мере 41 750 человек в 11 788 инцидентах. Предварительные результаты показывают, что в 2016 г. аварийные данные КОСПАС–САРСАТ были использованы примерно в 885 инцидентах при спасении 2250 человек.

Рис. 2 показывает число ПС операций и число спасенных при использовании аварийных данных КОСПАС–САРСАТ за период с января 1994 г. по декабрь 2015 г. [5].

Как составная часть системы управления качеством [6] и для удовлетворения стратегического

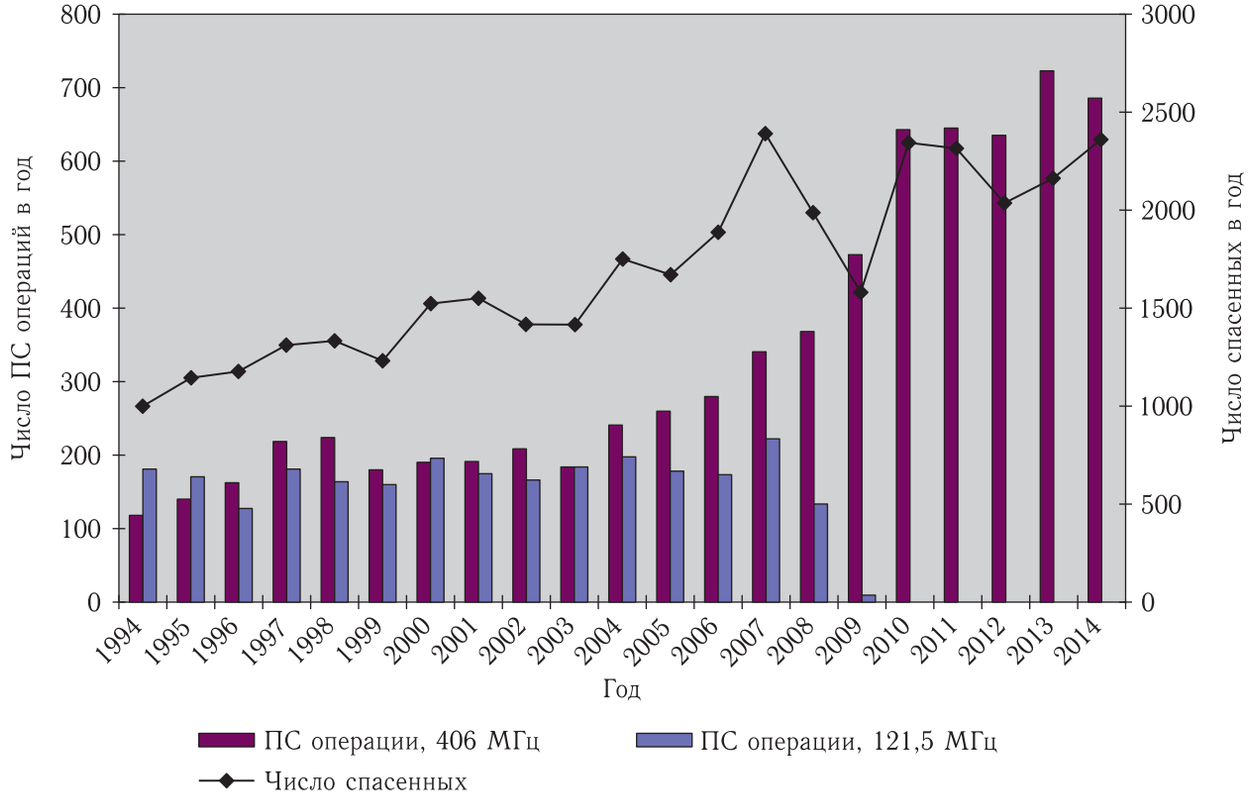


Рис. 2. Число ПС операций и число спасенных при использовании аварийных данных КОСПАС–САРСАТ (январь 1994 г.–декабрь 2015 г.)

плана КОСПАС–САРСАТ [7] был разработан ряд критериев качества работы системы. На рис. 3 отображено ежегодное общее число поисково-спасательных операций (ПС) при участии аварийных данных КОСПАС–САРСАТ и число ПС операций, при которых КОСПАС–САРСАТ был единственным источником аварийной информации (1990–2015 гг.).

Разработана следующая классификация для аварийных данных КОСПАС–САРСАТ, которая определяется поисково-спасательными службами:

• только КОСПАС–САРСАТ (Only Alert — КОСПАС–САРСАТ был единственным источником информации о данном бедствии);

• КОСПАС–САРСАТ первый (First Alert — поисково-спасательные службы получили и использовали о данном бедствии первый сигнал от КОСПАС–САРСАТ);

• поддержка КОСПАС–САРСАТ (Supporting Data — данные КОСПАС–САРСАТ были использованы наряду с другими источниками информации о бедствии);

• КОСПАС–САРСАТ не использован (Data Not Used in SAR — КОСПАС–САРСАТ предоставил аварийные данные, но по разным причинам они не были использованы поисково-спасательными службами).

5. Радиобуи 406 МГц

Информация, полученная из 177 национальных администраций, указывает, что почти 2 млн радиобуев находилось в эксплуатации в конце 2015 г.

По оценкам секретариата КОСПАС–САРСАТ, в конце 2015 г. число радиобуев в мире с протоколом местоположения (location protocol (LP)) достигло 54,2 % всего имеющегося парка радиобуев.

С 2009 г. КОСПАС–САРСАТ стал ежегодно оценивать процент зарегистрированных радиобуев от числа обнаруженных активированных радиобуев. Эти данные приведены в таблице.

Общая же оценка уровня регистрации всего имеющегося парка всех типов радиобуев (не только

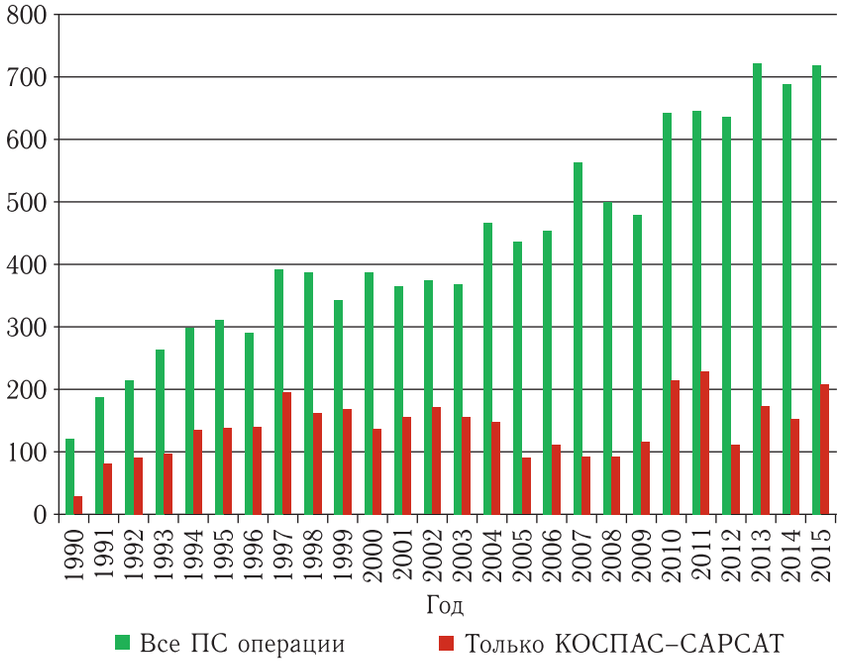


Рис. 3. Ежегодное общее число ПС операций при участии аварийных данных КОСПАС–САРСАТ и число ПС операций, когда КОСПАС–САРСАТ был единственным источником аварийной информации (1990–2015 гг.)

Таблица. Процент обнаруженных активированных радиобуев, которые были зарегистрированы (2011–2015 гг.)

Год	АРБ (EPIRB)		АРМ (ELT)		ПРБ (PLB)	
	Число зарегистрированных радиобуев/Число сработавших радиобуев	%	Число зарегистрированных радиобуев/Число сработавших радиобуев	%	Число зарегистрированных радиобуев/Число сработавших радиобуев	%
2011	4,879/6,264	77,9	6,631/10,102	65,6	699/909	76,9
2012	5,383/6,699	80,4	6,616/10,056	65,8	952/1,242	76,6
2013	5,362/7,126	75,2	6,997/10,867	63,4	1,135/1,611	70,4
2014	4,933/6,414	76,9	7,007/10,451	67,0	1,179/1,582	74,5
2015	5,672/7,412	76,5	7,606/11,276	67,4	1,363/1,907	71,5

обнаруженных активированных радиобуев) за период с 2011 по 2015 гг. была такова: 2011 — 77,8 %, 2012 — 78,4 %, 2013 — 78,4 %, 2014 — 77,8 %, 2015 — 75,9 %.

Общеизвестно, что в случае регистрации радиобуя в национальной базе радиобуев или международной базе МБДР (IBRD) поисково-спасательные службы имеют возможность дополнительно к координатам бедствия получить информацию об объекте бедствия и его возможном маршруте передвижения, что существенно облегчает и ускоряет принятие ответных мер на сигнал бедствия.

Существующие положения по радиобуям в различных странах можно найти в документе [7].

КОСПАС–САРСАТ поддерживает МБДР [8], к которой организован свободный доступ для пользователей, не имеющих национальных баз данных. Позволяя пользователям радиобуев зарегистрировать свои радиобуи в МБДР, администрации помогают упростить надлежащую регистрацию радио-

буев их владельцами и предотвращают административные расходы и неудобства для их правительств.

Администрации могут также загружать свои национальные регистрационные данные радиобуев в МБДР для гарантии круглосуточной доступности к ним других служб ПС при наличии информации об активации радиобуев в зоне их ПС ответственности.

На начало 2017 г. в МБДР было зарегистрировано 67 237 радиобуев от примерно 140 национальных администраций. В среднем в месяц более 325 раз поисково-спасательные службы обращаются в МБДР для получения информации о зарегистрированных радиобуях.

6. Системы НССПС (LEOSAR) и ГССПС (GEOSAR)

На 1 апреля 2017 г. пять космических аппаратов системы НССПС находились в эксплуатации: «Sarsat-7», «Sarsat-10», «Sarsat-11», «Sarsat-12» и «Sarsat-13». Запланированные запуски аппаратов НССПС включают: четыре российских «Метеора-М» с ПС нагрузками КОСПАС на борту. Запуски «Метеора-М» № 2–1, «Метеора-М» № 2–2, «Метеора-М» № 2–3 и «Метеора-М» № 2–4 запланированы во 2-м квартале 2017 г., 4-м квартале 2017 г., а также в 2020 и 2021 гг. Спутники серии «Метеор-М» № 2 рассчитаны на работу на орбите не меньше чем на пять лет. По программе США в отношении системы НССПС планируется финансирование выделенного спутника НССПС, который будет запущен не ранее 2021 г.

Также на 1 апреля 2017 г. в работе находились пять аппаратов системы ГССПС: «GOES-13» и «GOES-15» (США), «INSAT-3D» (Индия), «MSG-2» и «MSG-3» (EUMETSAT).

Российские ПС нагрузки на аппаратах «Электро-Л» № 1, «Электро-Л» № 2, «Луч-5А» и «Луч-5В» проходят тестовые испытания.

Наземный сегмент систем НССПС и ГССПС включает на сегодня 30 координационных центров системы (КЦС), 53 станции приема и обработки информации (НИОСПОИ) в системе НССПС и 21 станцию приема и обработки информации (ГЕОСПОИ) в системе ГССПС.

7. Направления перспективного развития программы КОСПАС–САРСАТ

7.1. ИКАО: ГАССБ (глобальная авиационная система связи при бедствии) = GADSS и АРМ(DT) (аварийный передатчик-указатель положения для отслеживания бедствия в полете) = ELT(DT)

В ответ на недавние авиационные инциденты ИКАО начала реализацию Глобальной авиационной системы связи при бедствии (ГАССБ = = GADSS) с целью повышения эффективности глобального поиска и спасания. Предполагается, что маршрутизация аварийных данных КОСПАС–САРСАТ от АРМ(DT) = ELT(DT) (аварийного передатчика-указателя положения для отслеживания бедствия в полете будет, как и прежде, выполняться непосредственно в СКЦ.

Однако будут применяться дополнительные требования: («тревоги» должны немедленно поставляться в спасательно-координационные центры (СКЦ), а «данные об отслеживании бедствия» должны быть доступны для участвующих сторон (сервисные отделения воздушного движения (ATSU), операторы авиакомпаний, следственные органы и т. д.).

Приложения 11 и 12 к Конвенции ИКАО, которые описывают доставку «аварийных сообщений» в спасательно-координационные центры (СКЦ = RCC), не изменились. Однако Приложение 6, согласовывающееся с ГАССБ, претерпело изменения в том, чтобы оператор авиакомпании предоставлял доступные данные автономного отслеживания бедствия (ADT), как минимум в сервисные отделения воздушного движения (ATSU) и СКЦ.

Приложение 6 также дает возможность операторам авиакомпаний позволить третьим лицам, например КОСПАС–САРСАТ или другим поставщикам, выполнять эту функцию по своей схеме.

По этой причине КОСПАС–САРСАТ рассматривает разработку средств для ATSU получать доступ к данным об отслеживании бедствия, при этом продолжая посылать аварийные данные непосредственно в СКЦ.

Крайний срок ИКАО по готовности АРМ(DT) — 1 января 2021 г. С точки зрения КОСПАС–САРСАТ, готовность документации по АРМ(DT) — 1 января 2019 г.

Считается предпочтительным, чтобы единственным хранилищем всех данных ADT (данные автономного отслеживания бедствия) стал КОСПАС-САРСАТ.

7.2. ГМССБ (глобальная морская система связи при бедствии) = GMDCC (ИМО)

Система КОСПАС–САРСАТ является составной частью системы ГМССБ (ИМО). Принимая во внимание запрос 3-й сессии (2016 г.) подкомитета ИМО по навигации, связи и поиску и спасанию (NCSR) о возможности распределения цифровых аварийных данных системы ГМССБ в дополнение к маршрутизации в существующей наземной сети КОСПАС–САРСАТ данных от аварийных радиобуев 406 МГц, КОСПАС–САРСАТ проводит анализ и оценку данного предложения.

Заключение

Разработка и внедрение в практику принципиально нового метода поиска и спасания потерпевших бедствие людей через спутниковую Систему КОСПАС–САРСАТ стали знаковым явлением конца XX в.

Инициаторами создания данной международной организации стали бывший СССР, США, Франция и Канада. Сейчас организация объединяет 43 государства, а предоставляет аварийную информацию о местоположении бедствия на недискриминационной основе и бесплатно любому конечному пользователю без всякого исключения. Одно лишь условие — в наличии должен быть аварийный радиобуй (морской, или авиационный, или персональный) для подачи сигнала бедствия. Радиобуй нужно зарегистрировать, чтобы знать владельца. Всего же в мире уже более 2 млн радиобуев КОСПАС–САРСАТ, работающих на частоте 406 МГц.

С момента создания при использовании данных глобальной системы поиска и спасания были спасены более 1600 наших граждан (сначала СССР, а потом России). А всего в мире к настоящему моменту система предоставила аварийную информацию о местоположении бедствия для спасения более 44 тыс. человек при проведении более 12,6 тыс. поисково-спасательных операций.

Настойчивое совершенствование и продвижение системы КОСПАС–САРСАТ происходит с внедрением сегодня системы СССПС. Согласованы параметры совместимости трех созвездий системы: НССПС, ГССПС и СССПС. По завершении фазы ПЭГ системы СССПС ее космический и наземный сегменты будут гарантировать выполнение требований глобального покрытия, производительности и точности. Точно так же технические требования для радиобуев 406 МГц второго поколения позволят обеспечить дальнейшее совершенствование системы КОСПАС–САРСАТ.

Список литературы

1. The History and Experience of the International Cospas-Sarsat Programme for Satellite-Aided Search and Rescue / D. Levesque, J. King, W. Ruark, C. Gal, W. Carney, V. Studenov. International Astronautical Federation, 2016. 222 p.
2. Сайт программы КОСПАС–САРСАТ // Электрон. Дан. Канада, 2017. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int/en/
3. CSC-57/OPN Summary Record, December 2016. Paris, France, 2016.
4. JC-30 Report, October 2016. Montreal, Canada, 2016.
5. Документ Cospas-Sarsat System Data No. 42 — Rev. 1 // Электрон. Дан. Канада, 2016. Заглавие с экрана. Режим доступа: https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/SD42-DEC16-Rev.1%20(RU).pdf
6. Документ C/S R.007 007 // Электрон. Дан. Канада, 2016. Заглавие с экрана. Режим доступа: https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/CS-R007-DEC-2016.pdf
7. Документ C/S S.007 // Электрон. Дан. Канада, 2016. Заглавие с экрана. Режим доступа: https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/S7JAN31.17-bis.pdf
8. Сайт МБДР // Электрон. Дан. Канада, 2017. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.406registration.com/

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 24–34

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 621.396 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.24

Оценка зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ

Д. В. Антонов

АО «Российские космические системы»

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Аннотация. В данной работе впервые предложен алгоритм выбора спутников-ретрансляторов, который итерационным способом оптимизирует зону обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального (СПОИ-СО) сегмента КОСПАС–САРСАТ.

Проанализирована эффективность имеющихся на данный момент 4- и 6-антенных СПОИ-СО при работе с неподвижными и медленно подвижными АРБ. Показана невозможность 4-антенных СПОИ-СО определять координаты медленно подвижных аварийных буев (АРБ) с заданным качеством, в то время как 6-антенный СПОИ-СО способен удовлетворять требованиям по точности среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС) как для неподвижных, так и для медленно подвижных АРБ.

Представлены результаты математического моделирования величины зоны обслуживания в зависимости от алгоритма планирования и количества антенн, установленных на СПОИ-СО с учетом медленно подвижных АРБ. Полученные результаты призваны определить минимальное количество антенн, требуемое для покрытия желаемой площади обслуживания. Отмечено, что нужное количество антенн можно получить либо установкой их на СПОИ-СО, либо с помощью обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии их скоординированной работы.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, СССПС, СПОИ-СО, зона обслуживания, алгоритм выбора спутников-ретрансляторов

Estimation of the Service Area of the Medium Earth Orbit Local User Terminal of the COSPAS–SARSAT System

D. V. Antonov

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Abstract. This article for the first time presents a tracking schedule algorithm that iterationally optimizes the service area of the Medium Earth Orbit Local User Terminal (MEOLUT).

The mathematical simulation performance results of the existing MEOLUTs with four and six antennas when they detect a fixed and slow moving beacon are presented. It is shown that the MEOLUT with four antennas cannot locate slow moving beacons with the required accuracy while the MEOLUT with six antennas is capable of meeting requirements working with fixed and slow moving beacons.

A mathematical simulation of the MEOLUT service area depending on the number of antennas at the MEOLUT and a tracking schedule algorithm are presented. These results are to determine the minimum number of antennas that allow one to reach the desirable service area. It is noticed that this number of antennas can be obtained either by installing antennas or by the process of the measurements exchange with the nearest MEOLUTs.

Keywords: COSPAS–SARSAT, MEOSAR, MEOLUT, service area, tracking schedule algorithm

Введение

Важнейшей характеристикой станции приема и обработки информации среднеорбитального (СПОИ-СО) сегмента КОСПАС–САРСАТ является зона обслуживания — область поверхности Земли, в которой СПОИ-СО способна удовлетворять требованиям, описанным в [1].

При фиксированных точностях измерений времен прихода сигнала аварийного радиобуя (АРБ) на спутники-ретрансляторы (TOA — Time Of Arrival) и его частот (FOA — Frequency Of Arrival) размер зоны обслуживания зависит от алгоритма выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн СПОИ-СО, количества антенн на СПОИ-СО и алгоритма определения координат АРБ.

В предположении нормального распределения ошибок измерений TOA и FOA алгоритм определения координат, описанный в [5], является оптимальным. Таким образом, размер зоны обслуживания можно увеличить за счет увеличения количества информационно-измерительных комплексов и оптимизацией алгоритма планирования выбора спутников-ретрансляторов.

Так как значительную часть стоимости СПОИ-СО составляет стоимость информационно-измерительных комплексов, входящих в нее, то одним из приоритетных является вопрос о минимальном количестве антенн, необходимом для достижения желаемой зоны покрытия СПОИ-СО. На данный момент в литературе не встречается исследований, направленных на решение указанной задачи. Также не представлены исследования оценки зоны обслуживания для уже существующих 4- и 6-антенных СПОИ-СО с учетом наличия медленно подвижных радиобуев.

Таким образом, в рамках настоящей работы будет проведен анализ размера зоны обслуживания уже существующих СПОИ-СО, а также будет исследован размер зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от количества антенн и алгоритма планирования наведения антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы.

Обзор алгоритмов планирования

В [2] приводится ссылка на два алгоритма выбора спутников для наведения на них антенн СПОИ-СО.

Первый из этих алгоритмов является эвристическим и предлагает выбирать спутники-ретрансляторы с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО. Достоинством этого метода являются его простота и быстрота расчета. К недостаткам стоит отнести отсутствие оптимизации при выборе спутников-ретрансляторов.

Второй алгоритм предлагает полный перебор всех возможных наборов спутников-ретрансляторов. Для каждого набора в круге с центром в месте расположения СПОИ-СО и радиусом 2000 км вычисляется средний геометрический фактор в предположении о неподвижности АРБ (расчет геометрического фактора приведен в [1]). Для наведения антенн СПОИ-СО выбирается тот набор спутников-ретрансляторов, который имеет наилучший средний геометрический фактор. К достоинствам алгоритма следует отнести наличие оптимизации при выборе набора спутников-ретрансляторов. Недостатки — потенциально большая трудоемкость полного перебора, отсутствие учета медленно подвижных АРБ, а также то, что в процессе выбора комбинации спутников не проверятся, в какой части зоны ответственности СПОИ-СО выполняются заданные требования. На рис. 1 приведен пример, когда наилучшая средняя точность не является правильным критерием выбора спутников-ретрансляторов. В этом примере средняя точность в зоне обслуживания в первом случае — 2,1 км, однако не во всей зоне ответственности выполняется требование по точности независимого решения. Во втором случае средняя точность составляет 3 км, но при этом требования по точности независимого решения выполняются во всей зоне ответственности. Кроме того, фиксация радиуса круга для оптимизации (2000 км) не представляется рациональной, особенно при большом количестве антенн на СПОИ-СО.

С учетом перечисленных недостатков автором был разработан специальный алгоритм, позволяющий оптимизировать зону обслуживания СПОИ-СО.

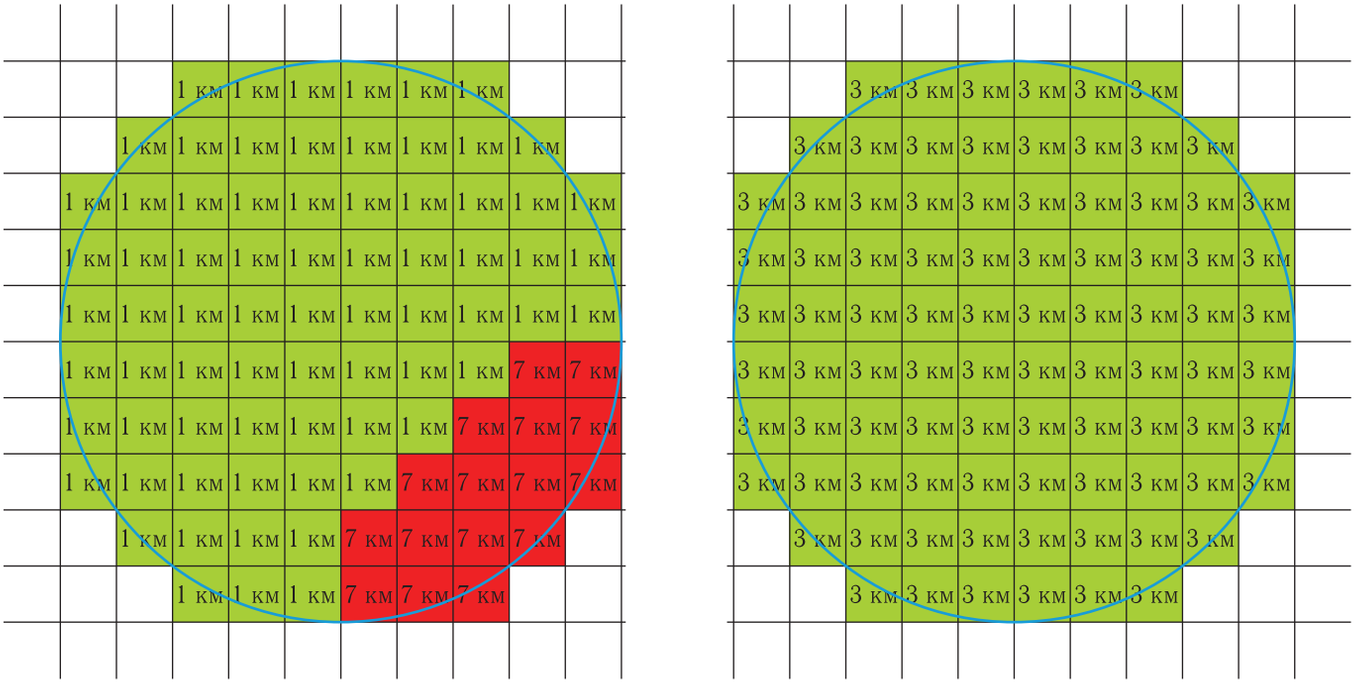


Рис. 1. Пример неправильного выбора комбинации спутников по критерию наилучшей средней точности

Алгоритм планирования, позволяющий оценить зону обслуживания СПОИ-СО

Зона обслуживания M-антенного СПОИ-СО аппроксимируется кругом с радиусом R. Требуется составить расписание слежения антенн СПОИ-СО за спутниками-ретрансляторами, обеспечивающий как можно больший радиус зоны обслуживания $R_{\max}$.

Такой круг наибольшего радиуса находится итерационным способом. На i-й итерации рассматривается круг радиусом R_i. Внутри этого круга имитируется работа равноудаленных друг от друга АРБ.

Затем на каждый j-й анализируемый момент времени производится полный перебор всех возможных комбинаций M из N_j видимых на данный момент спутников-ретрансляторов. Для каждого анализируемого АРБ в круге радиусом R_i при каждой рассматриваемой комбинации из M спутников вычисляется вероятность определения координат каждого АРБ с ошибкой не более 5 км (формулы для вычисления представлены в [1]) и выбирается созвездие, обеспечивающее наибольшее количество мысленных АРБ в круге радиусом R_i, у которых такая вероятность составляет не менее 0,95.

Если есть несколько созвездий, для которых все анализируемые АРБ в круге радиусом R_i удовлетворяют этому условию, то выбирается любое из этих созвездий. Например, это можно сделать по критерию наилучшей средней точности (формулы расчета теоретической точности приведены в [4]) или наименьшего количества перевода антенн со спутника на спутник. Таким образом, выбираются созвездия на весь анализируемый интервал времени.

Затем для каждого имитируемого АРБ и для каждого набора спутников на j-й момент времени вычисляется вероятность определения координат и вероятность определения координат с точностью не хуже 5 км. Осредненные значения этих вероятностей за весь рассматриваемый интервал времени будут соответственно P_1 и P_2. Если для этих вероятностей выполняются условия

$$\begin{cases} P_1 \geqslant 0{,}98 \\ P_2 \geqslant 0{,}95 \times P_1, \end{cases} \tag{1}$$

то эта точка включается в зону обслуживания СПОИ-СО. Если условия (1) выполняются для

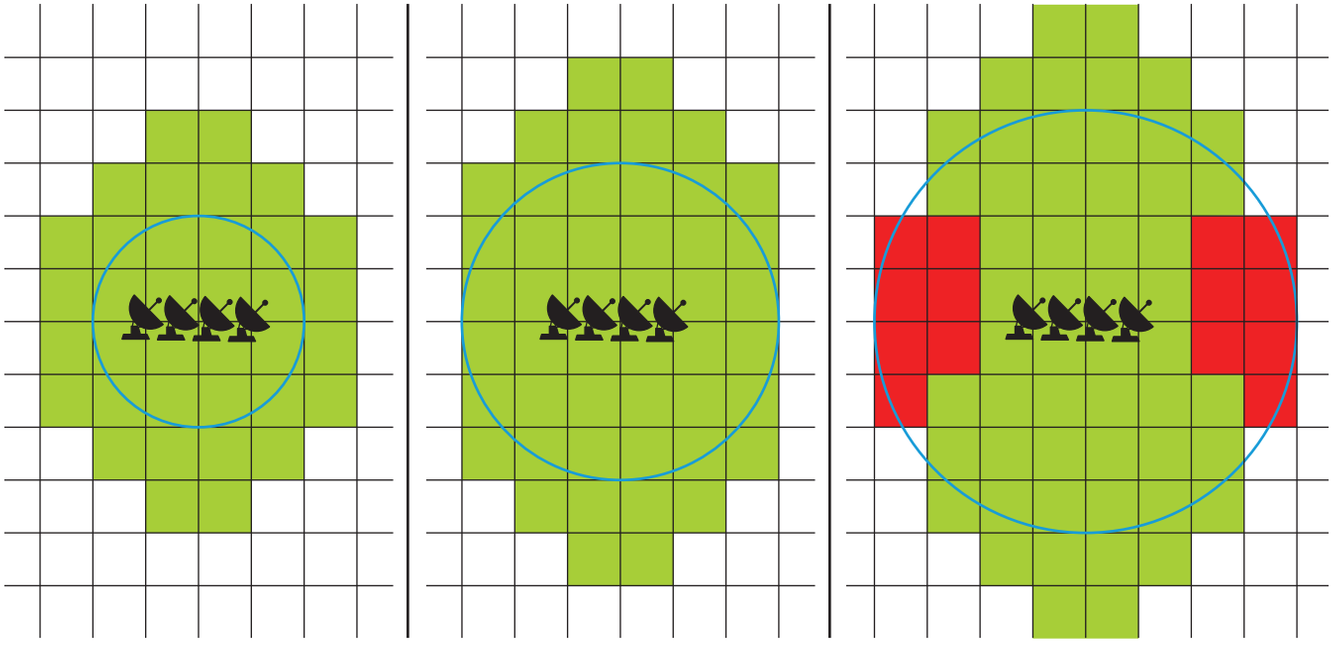


Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма на разных итерациях для СПОИ-СО, оборудованной 4 антеннами

всех имитируемых буев в круге R_i, то проделывается следующая итерация алгоритма с радиусом зоны обслуживания $R_{i+1} = R_i + \Delta R$. Если для какого-то АРБ из круга радиусом R_i не выполняются условия (1), то кругом наибольшего радиуса $R_{\max}$ будет R_{i-1}.

В предлагаемом алгоритме на каждый момент времени выбирается комбинация спутников по критерию наибольшей одномоментной зоны покрытия внутри круга радиусом R_i, однако могут быть рассмотрены и другие критерии. Далее в статье будут показаны результаты работы этого алгоритма, где на каждый момент времени будет выбираться комбинация спутников по критерию наилучшего среднего геометрического фактора с учетом наличия медленно подвижных буев.

Таким образом, в результате выполнения этого алгоритма будет получено как расписание КА для наведения на них антенн, так и оценка зоны обслуживания. На рис. 2 приведен пример работы алгоритма на разных итерациях подбора зоны обслуживания для оптимизации в ней работы СПОИ-СО. Синий круг на каждой итерации — зона для оптимизации. Зеленым цветом обозначена зона обслуживания СПОИ-СО на каждой итерации, красным цветом — зона, которая должна входить в зону обслуживания, однако требования СССПС в ней не выполняются. В данном примере на левом рисунке зона для оптимизации слишком мала, а на правом — слишком велика. Таким образом, зоной обслуживания будет зона, показанная на среднем рисунке.

Оценка величины зоны обслуживания существующих на данный момент СПОИ-СО

Для проверки возможности СПОИ-СО выполнения требований СССПС, оценки точности независимых решений и величины зоны обслуживания, а также оценки влияния медленно подвижных АРБ (скорость не превышает 5 м/с, особенности решения навигационной задачи в случае медленно подвижного АРБ можно найти в [5]) был проведен ряд моделирований. Общие для всех моделирований параметры представлены в табл. 1.

Так как на данный момент все станции СПОИ-СО имеют 4 или 6 антенн, то анализ зоны обслуживания СПОИ-СО именно таких конфигураций заслуживает внимания в первую очередь. В качестве местоположения моделируемой

Таблица 1. Параметры моделирования зоны обслуживания СПОИ-СО

Параметр	Критерий/Значение
Минимальный угол слежения СПОИ-СО за спутником, °	5
Количество излученных посылок АРБ	13
Время после получения первой посылки, после которого производится решение, мин	10
Длительность моделирования, дни	10
Шаг по времени, мин	15
Количество спутников для решения навигационной задачи	Не менее 3
σTOA	25 мкс (значение взято из [1])
σFOA	0,2 Гц (значение взято из [1])
Зависимость процента принятых посылок от угла места по линии АРБ-КА	70 % для углов места 5–75° для S-диапазона 70 % для углов места 5–83° для L-диапазона Только 9 первых посылок из 13 (1–9) считаются принятыми
Космический сегмент	Предполагаемый состав группировки на 2020 г. — 56 спутников

СПОИ-СО был выбран г. Кейптаун (ЮАР). Такой выбор обусловлен наличием в непосредственной близости как обширных водных акваторий, так и суши, что делает удобным сравнение характеристик производительности СПОИ-СО при работе по неподвижным и медленно подвижным АРБ. Все АРБ, находящиеся на суше, считались неподвижными, все АРБ, находящиеся на воде, — медленно подвижными под действием качки, ветра и течений.

При работе с подвижными АРБ (на море) по измерениям разностей FOA требуется определять 5 параметров: долготу, широту и 3 компонента скорости (АРБ может иметь как горизонтальную скорость вследствие течения и ветра, так и вертикальную составляющую за счет качки). Поэтому 4-антенные СПОИ-СО при работе по медленно подвижным АРБ не могут использовать измерения FOA и для таких АРБ местоположение вычисляется только по измерениям TOA. При работе по неподвижным АРБ (на суше) при наличии измерений от 3 и более КА использовались измерения TOA и FOA.

На рис. 3 показаны результаты моделирования для 4-антенной СПОИ-СО.

Расписание составлялось по описанному в предыдущем разделе алгоритму. Проведенное моделирование показало, что требуемая точность 5 км в 95 % случаев не была достигнута на море ни в какой зоне, точность 5,5–10 км была достигнута в зоне 1500–2000 км. На суше точность составила 2–4 км в зоне около 2000 км.

Также моделирование было проведено для 6-антенной СПОИ-СО. При определении координат АРБ использовались измерения TOA и FOA как по неподвижным, так и по медленно подвижным буям. На рис. 4 приведены результаты проведенного моделирования зоны обслуживания для 6-антенной СПОИ-СО. На море точность 3–5 км была достигнута в радиусе 3000 км. На суше точность составила 2–4 км, причем радиус зоны обслуживания превысил 4000 км.

Таким образом, 6-антенная СПОИ-СО, в отличие от 4-антенной, способна выполнять требования СССПС как при работе с неподвижными АРБ, так и при работе по медленно подвижными АРБ. При работе с неподвижными АРБ радиус зоны обслуживания 6-антенной СПОИ-СО более чем 2 раза превышает радиус зоны обслуживания 4-антенной

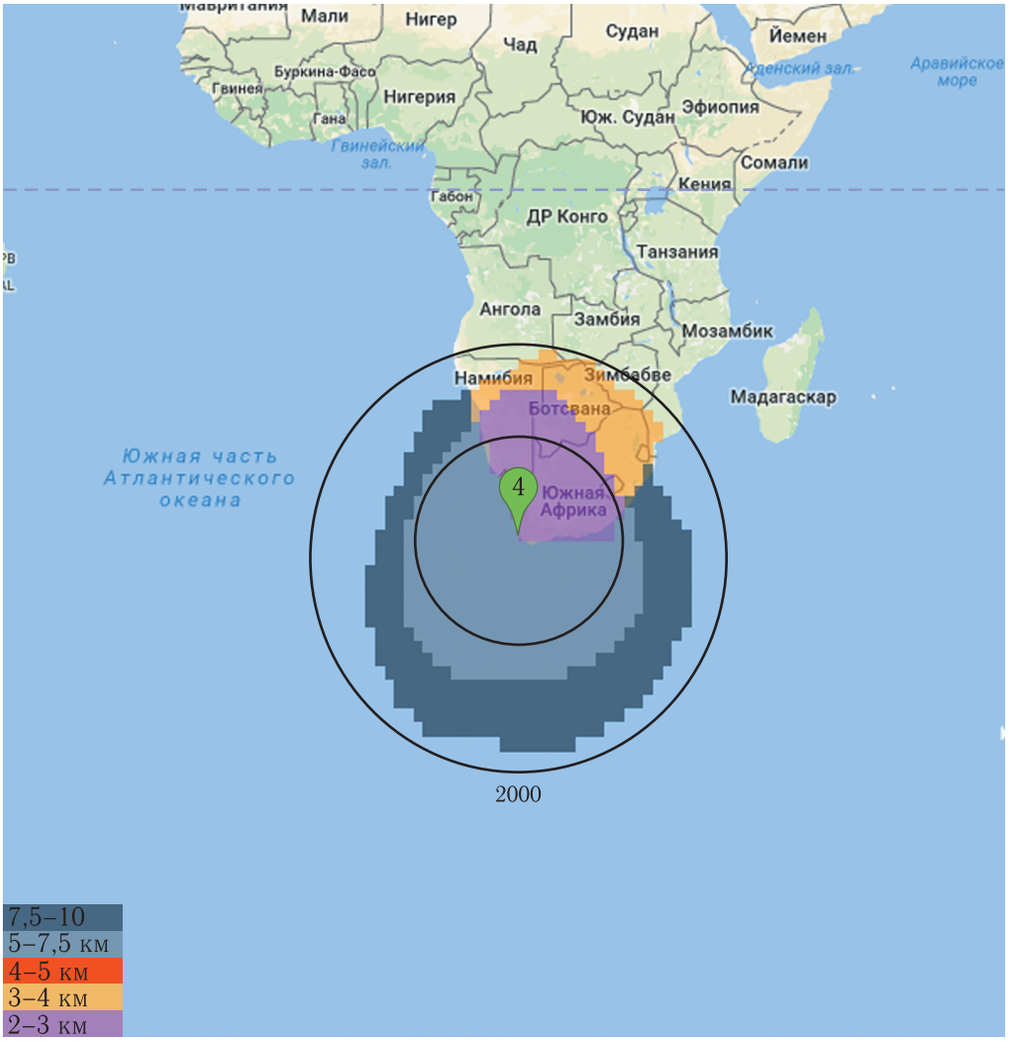


Рис. 3. Зона обслуживания 4-антенной СПОИ-СО в г. Кейптауне (желтая и фиолетовая зоны)

СПОИ-СО (по площади зоны обслуживания более чем в 4 раза). Это приводит к важному выводу о низкой эффективности 4-антенных СПОИ-СО и невозможности их работы с требуемым качеством с медленно подвижным АРБ.

Моделирование зоны обслуживания в зависимости от алгоритма планирования и количества антенн на СПОИ-СО

Как отмечалось выше, величину зоны обслуживания СПОИ-СО можно увеличить за счет оптимизации алгоритма выбора спутников, для наведения на них антенн СПОИ-СО и за счет увеличения количества антенн на СПОИ-СО. С целью оценки величины зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от этих параметров было проведено математическое моделирование. При этом были использованы следующие алгоритмы выбора КА для наведения на них антенн СПОИ-СО.

- Алгоритм № 1 — алгоритм с выбором спутников-ретрансляторов с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО.
- Алгоритм № 2 — алгоритм с полным перебором наборов спутников и выбором того набора, который предоставляет наилучшую одномоментную среднюю точность в зоне обслуживания. Зона обслуживания аппроксимируется кругом наибольшего

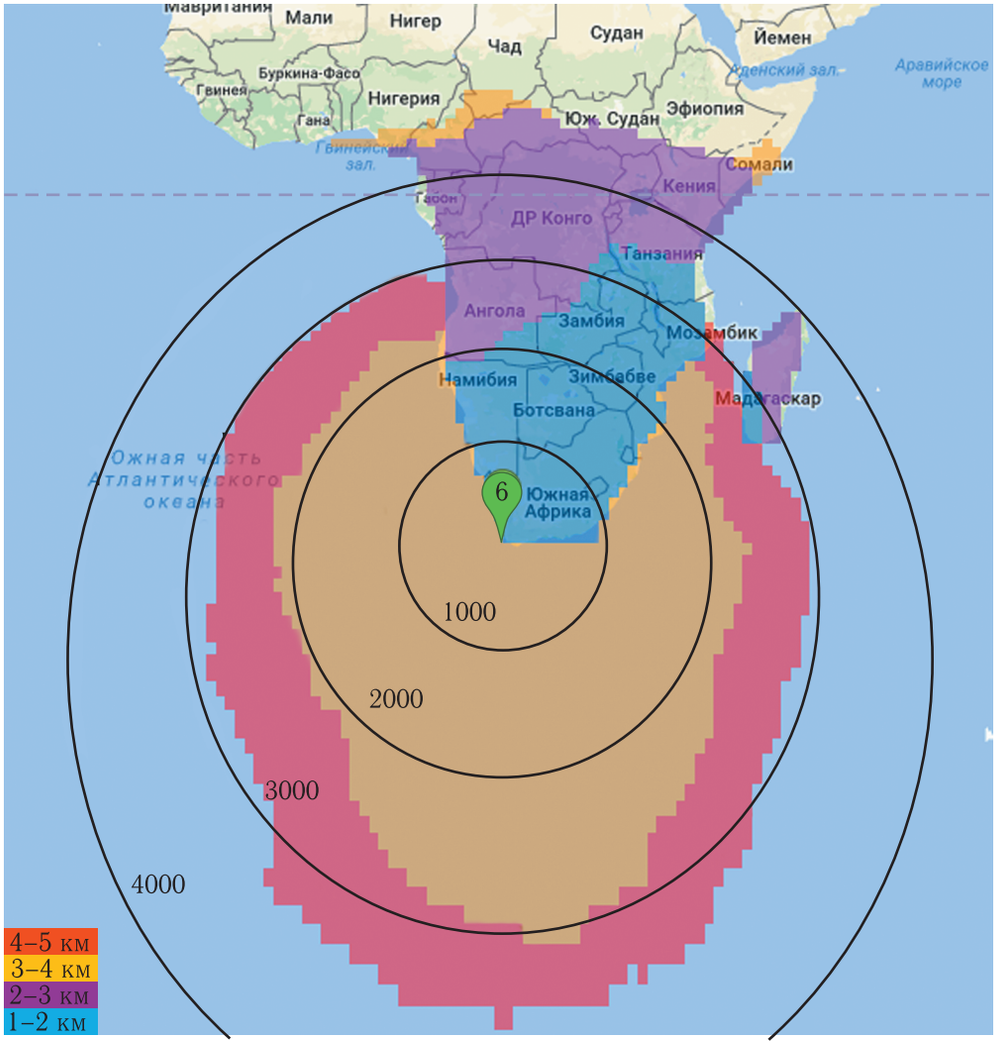


Рис. 4. Зона обслуживания 6-антенной СПОИ-СО в г. Кейптауне

радиуса обслуживания, его радиус находится итерационно.

• Алгоритм № 3 — алгоритм с полным перебором наборов спутников и выбором того набора, который предоставляет наибольшую одномоментную площадь внутри зоны обслуживания. Зона обслуживания аппроксимируется кругом наибольшего радиуса обслуживания, его радиус находится итерационно.

На рис. 5–8 показаны результаты проведенного моделирования. В зависимости от количества антенн для каждого алгоритма на рис. 5 показана величина зоны обслуживания (в % от земной поверхности), а на рис. 6 — величина радиуса круга, эквивалентного по площади зоне обслуживания СПОИ-СО.

Как видно из рис. 5 и 6, при количестве антенн, меньшем или равном 7, использование алгоритма № 1 приводит к нулевой зоне обслуживания. При 8 антеннах зона обслуживания более чем в 2 раза уступает зоне обслуживания, полученной по алгоритмам № 2 и № 3. При дальнейшем увеличении количества антенн разница в результатах работы этих алгоритмов уменьшается, но все же алгоритмы № 2 и № 3 всегда обеспечивают бóльшую зону обслуживания, чем алгоритм № 1.

Алгоритм № 3 дает выигрыш в зоне обслуживания (до 10% от площади зоны обслуживания) относительно алгоритма № 2 при количестве антенн, меньшем или равном 10, однако при дальнейшем увеличении количества антенн оба алго-

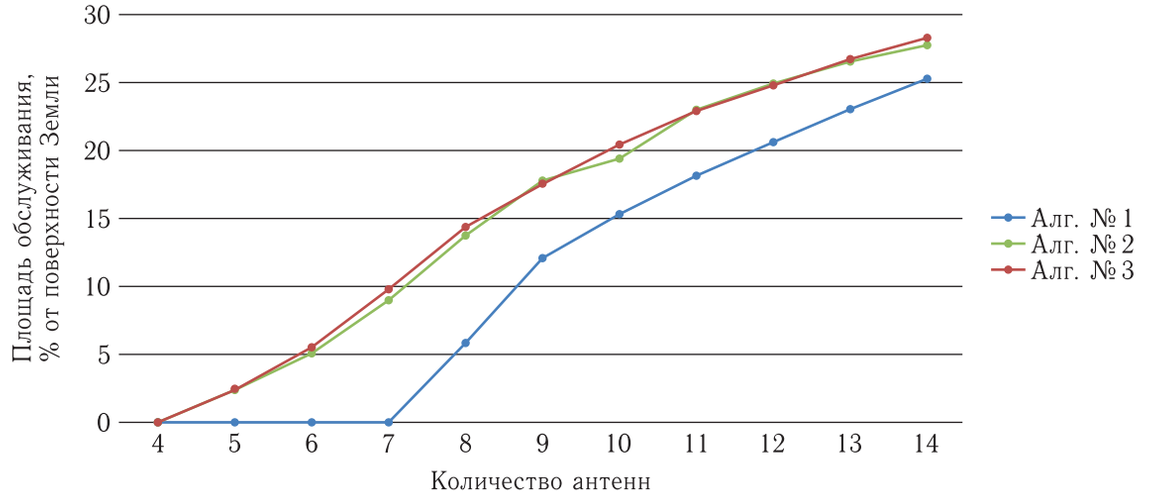


Рис. 5. Зависимость величины площади обслуживания СПОИ-СО от количества антенн в предположении, что все АРБ — подвижны

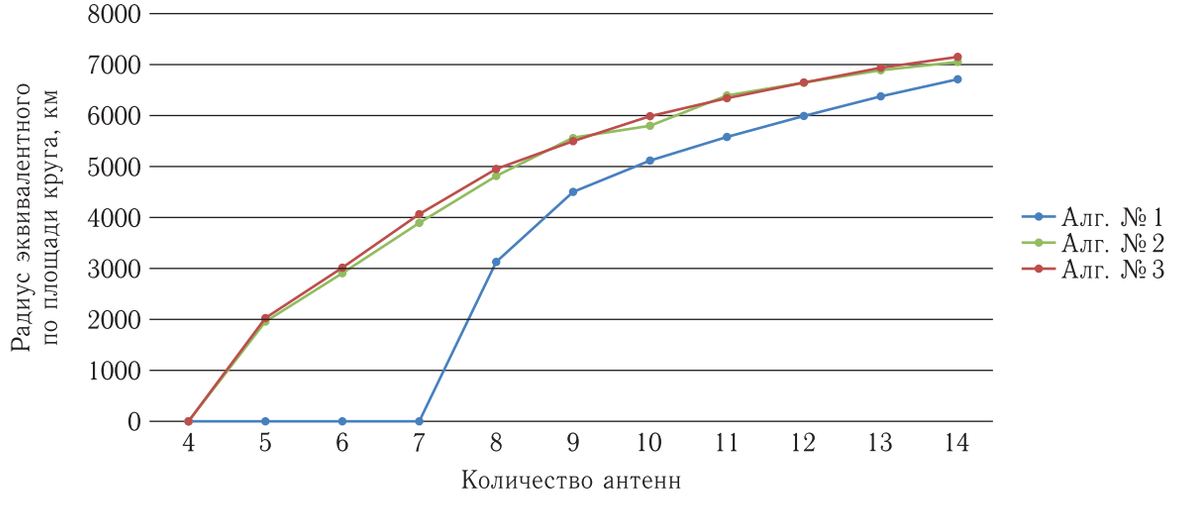


Рис. 6. Зависимость радиуса круга, эквивалентного по площади зоне обслуживания СПОИ-СО, от количества антенн в предположении, что все АРБ — подвижны

ритма предоставляют одинаковую по величине зону обслуживания.

На рис. 7 представлен график зависимости средней точности в зоне обслуживания в зависимости от количества антенн для каждого алгоритма планирования. Из этого графика видно, что алгоритм № 2 предоставляет несколько лучшую среднюю точность (до 15 % от требуемой точности) по сравнению с алгоритмом № 3.

На рис. 8 представлен график зависимости эффективности (площадь, приходящаяся на одну антенну) использования антенн СПОИ-СО для каждого алгоритма в зависимости от количества антенн.

Как видно из этих рисунков, существующие на сегодняшний день 6-антенные СПОИ-СО способны выполнять требования СССПС как для подвижных, так и для медленно подвижных буев (в круге радиуса около 3000 км), однако установка 6 антенн на СПОИ-СО не является эффективной. Если принять величину зоны обслуживания 6-антенного СПОИ-СО за единицу измерения, то добавление всего одной антенны увеличивает зону обслуживания на 78 %, двух антенн — на 162 %, трех антенн — на 220 %. Остальные значения приведены в табл. 2. При дальнейшем увеличении антенн эффективность их использования будет снижаться.

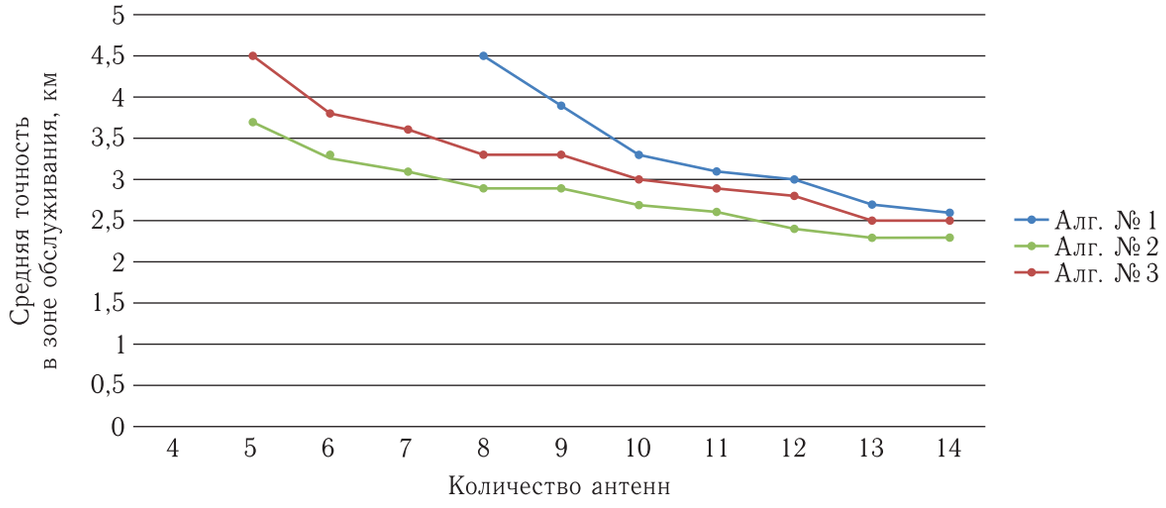


Рис. 7. Средняя точность в зоне обслуживания в предположении, что все АРБ — подвижны

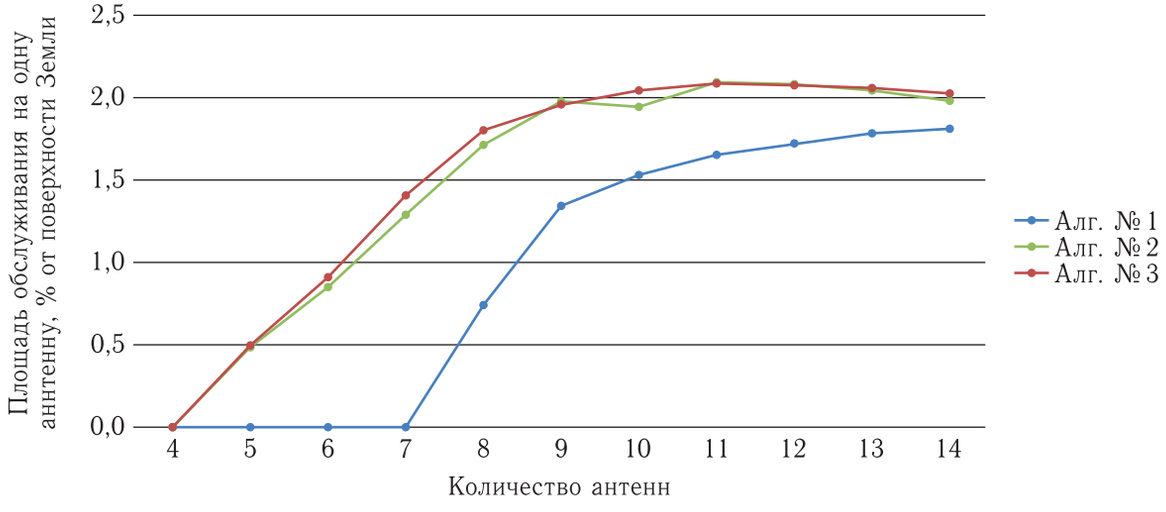


Рис. 8. Эффективность использования антенн СПОИ-СО в предположении, что все АРБ — подвижны

Количество антенн, устанавливаемое на СПОИ-СО, напрямую зависит от желаемой зоны обслуживания. Приведенные выше графики призваны оценить нужное количество антенн и дать оценку получаемой зоны обслуживания. При этом требуемое количество антенн может быть достигнуто как за счет установки антенн на СПОИ-СО, так и за счет обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии их скоординированной работы.

Однако желаемая зона обслуживания может отличаться от круга, точность измерения времен и частот также может не совпадать с приведенными в [1] значениями, также будут отличаться географические координаты СПОИ-СО и космический сегмент. На практике для каждой конкретной СПОИ-СО, зная ее параметры и желаемую зону обслуживания, следует проводить отдельные моделирования.

Выводы

В данной работе проведен анализ размера зоны обслуживания СПОИ-СО с различным количеством антенн при использовании различных

Таблица 2. Увеличение зоны обслуживания при добавлении антенн к 6-антенной СПОИ-СО

Количество антенн, добавляемых к 6-антенной СПОИ-СО	Получающееся количество антенн на СПОИ-СО	Увеличение зоны обслуживаний в % относительно площади обслуживания 6-антенной СПОИ-СО
+1	7	+78 %
+2	8	+162 %
+3	9	+220 %
+4	10	+271 %
+5	11	+316 %
+6	12	+351 %
+7	13	+385 %
+8	14	+415 %

алгоритмов выбора спутников для наведения на них антенн СПОИ-СО с учетом наличия медленно подвижных буев.

Проведен анализ двух имеющихся алгоритмов выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн СПОИ-СО, приведены их достоинства и недостатки. Среди недостатков следует особо выделить отсутствие учета наличия медленно подвижных буев и отсутствие оптимизации зоны обслуживания СПОИ-СО.

Предложен новый алгоритм планирования, обеспечивающий итерационную оптимизацию зоны обслуживания СПОИ-СО и учитывающий наличие медленно подвижных АРБ.

Выполнено математическое моделирование зоны обслуживания для конфигураций СПОИ-СО, существующих на данных момент (4 или 6 антенн). Это моделирование показало низкую эффективность 4-антенных СПОИ-СО и невозможность работы по медленно подвижным АРБ, в то время как 6-антенная СПОИ-СО продемонстрировала возможность выполнения требований как по неподвижным (в радиусе около 4500 км), так и по подвижным АРБ (в радиусе около 3000 км).

Проведен анализ зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от количества антенн и трех алгоритмов планирования:

- алгоритм 1 — алгоритм с выбором КА с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО;
- алгоритм 2 — алгоритм с выбором набора спутников, обеспечивающим одномоментный наилучший геометрический фактор в круге максимального радиуса. Круг максимального радиуса находится итерационным способом;
- алгоритм 3 — алгоритм с выбором набора спутников, обеспечивающим одномоментную наибольшую зону обслуживания в круге максимального радиуса. Круг максимального радиуса находится итерационным способом.

По результатам моделирования алгоритм № 1 предоставляет зону обслуживания меньше, чем алгоритмы № 2 и № 3, что наиболее выражено при малом количестве антенн. При 12 и более антеннах проигрыш алгоритма № 1 составляет менее 20 % от зоны обслуживания.

Алгоритмы № 2 и № 3 приводят во многом к сходным результатам. При количестве антенн, меньшем 10, алгоритм № 3 дает некоторый выигрыш в зоне обслуживания (до 10 % от величины площади обслуживания), в то время как алгоритм № 2 приводит к выигрышу по средней точности в зоне обслуживания (до 15 % от требуемой точности).

Показано, что в автономном режиме наибольшей удельной эффективности (на одну антенну) СПОИ-СО достигает при установленных на ней 9–11 антеннах. Если принять величину зоны обслуживания 6-антенной СПОИ-СО за единицу измерения, то добавление всего одной антенны увеличивает зону обслуживания на 78 %, двух антенн — на 162 %, трех антенн — на 220 %.

Приведенные моделирования призваны дать оценку минимального количество антенн, требуемого для обеспечения покрытия обслуживания с заданными характеристиками в желаемой зоне покрытия. Отмечено, что нужное количество антенн может быть достигнуто за счет установки их на СПОИ-СО либо за счет обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии координирования их работы.

Список литературы

1. COSPAS–SARSAT MEOLUT performance specification and design guidelines // C/S T.019, Issue 1, December 2015.

2. Canada/France/Russia/USA. EXPERTS WORKING GROUP ON MEOSAR FOC GLOBAL COVERAGE // CSC-57, Париж, 2017. http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf. Дата обращения: 05.06.2017.

3. *Антонов Д. В.* Оптимальное планирование наведения на КА наземных антенн среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 4. С. 17–22.

4. *Антонов Д. В.*, *Федосеев А. В.* Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.

5. *Антонов Д. В*, *Архангельский В. А.*, *Белоглазова Н. Ю.* Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 35–39

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 621.396.7 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.35

Возможность и эффективность дополнения среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ геостационарным сегментом этой системы

Д. В. Антонов, В. А. Архангельский[1], В. И. Семин, А. В. Федосеев

[1]*к. т. н.*

АО «Российские космические системы»

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Аннотация. В данной статье приводится обоснование необходимости измерений частоты сигнала аварийного радиобуя (АРБ), ретранслированного минимум через 6 спутников-ретрансляторов для точного определения координат медленно подвижных (до 5 м/с) АРБ в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ. Показывается возможность дополнения 4-антенной наземной станции среднеорбитального сегмента двумя уже имеющимися каналами геостационарного сегмента для получения требуемого количества измерений. Описываются необходимые программно-аппаратные доработки, приводятся результаты математического моделирования зоны обслуживания полученной 6-канальной станции.

Ключевые слова: СССПС, СПОИ-СО, СПИАБ, зона обслуживания, медленно двигающиеся АРБ, навигационная задача

Feasibility and Effectiveness of Including the Geostationary Segment into the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System

D. V. Antonov, V. A. Arkhangel'skiy[1], V. I. Semin, A. V. Fedoseev

[1]*candidate of engineering science*

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Abstract. This article describes necessity of having frequency measurements obtained through at least six satellites to locate slow moving beacons (velocity < 5 m/s) with the required accuracy in the Medium Earth orbit segment of COSPAS–SARSAT. The feasibility of adding two geostationary channels to the Medium Earth Orbit Location User Terminal (MEOLUT) with four antennas to achieve the required accuracy for slow moving beacons is shown. The necessary revision of hardware and software are described, the results of the mathematical simulation of the coverage area of the resulting LUT with six antennas are provided.

Keywords: MEOSAR, MEOLUT, GEOLUT, coverage area, slow moving beacon, location processing

Введение

Координаты аварийных радиобуев (АРБ) в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–SARSAT определяются по измерениям времен прихода сигнала АРБ на спутники-ретрансляторы (это время имеет обозначение *TOA*) и их частот (*FOA*). Сигналы АРБ ретранслируются на наземные станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента (СПОИ-СО), где и происходит измерение величин *TOA* и *FOA*, а затем определяются координаты излучившего сигнал АРБ.

Теоретические и экспериментальные исследования [1, 2] показали, что высокой точности определения координат АРБ можно достичь, решая навигационную задачу по измерениям *FOA* высокой точности (с.к.о. 0,04–0,08 Гц). При этом ошибки такого определения будут меньше 1–2 км, с вероятностью $\geqslant 95\,\%$, что лучше требуемой точности (5 км с вероятностью 95 % [3]) в 2,5–5 раз.

Для получения такой точности решения навигационных задач необходимо использовать не менее трех спутников-ретрансляторов при определении координат неподвижного радиобуя и в общем случае не менее шести спутников-ретрансляторов, расположенных не менее чем в трех разных орбитальных плоскостях, для определения координат АРБ, движущихся под влиянием течений, ветров и морской качки [1].

Во время проектирования российских СПОИ-СО по соображениям экономии затрат было принято решение о создании четырехканальной станции, способной принимать сигналы только от четырех спутников-ретрансляторов. Для обеспечения приема сигналов АРБ как минимум от 6 КА предполагалось использовать обмен измерениями с другими (российским и зарубежными) СПОИ-СО.

На сегодняшний день первая российская СПОИ-СО, расположенная в г. Москве и находящаяся после изготовления в 2013 г. на этапе отработки, по результатам международных испытаний «Демонстрация и оценка» СССПС на фазе II показала высокие, соответствующие проектным точностные характеристики при определении координат неподвижных радиобуев [2]. Достигнутые точностные характеристики оказались лучше требований в 2,5–5 раз и значительно (более чем в 5 раз) лучше, чем точности, полученные всеми другими зарубежными СПОИ-СО.

При определении координат морских буев, находящихся в движении, ввиду отсутствия необходимого количества измерений от разных КА использовались только измерения TOA, что привело к значительному ухудшению точности. Ошибки определения достигали 10–15 км и даже больше.

Низкая точность определения координат морских АРБ на московской СПОИ-СО, как следует из вышеизложенного, объясняются недостаточным количеством спутников-ретрансляторов, сигналы от которых одновременно может принимать эта СПОИ-СО (только 4 вместо необходимых 6).

Обмен измерениями с зарубежными СПОИ-СО для получения необходимого количества измерений и точного измерения координат движущихся АРБ гораздо менее эффективен ввиду низкой точности измерения *FOA* на них. Кроме того, обмен измерениями с зарубежными СПОИ-СО не является надежным источником данных, так как согласно спецификациям КОСПАС–SARSAT он является опциональной функцией и не обязателен к исполнению [3].

Решение навигационной задачи с помощью измерений от среднеорбитального и геостационарного сегментов

В данной статье предлагается новый способ решения задачи определения координат движущихся буев с требуемой точностью. Суть этого способа заключается в том, что при решении навигационной задачи на СПОИ-СО кроме измерений, полученных от четырех каналов этой СПОИ-СО, дополнительно используются еще и измерения сигналов АРБ, ретранслированные геостационарными ИСЗ, оснащенными ретрансляторами КОСПАС–SARSAT, и принятые станциями приема информации аварийных буев (СПИАБ). Хотя измерения *FOA* от геостационарных КА не могут непосредственно помочь определить координаты АРБ (т. к. геостационарный КА практически

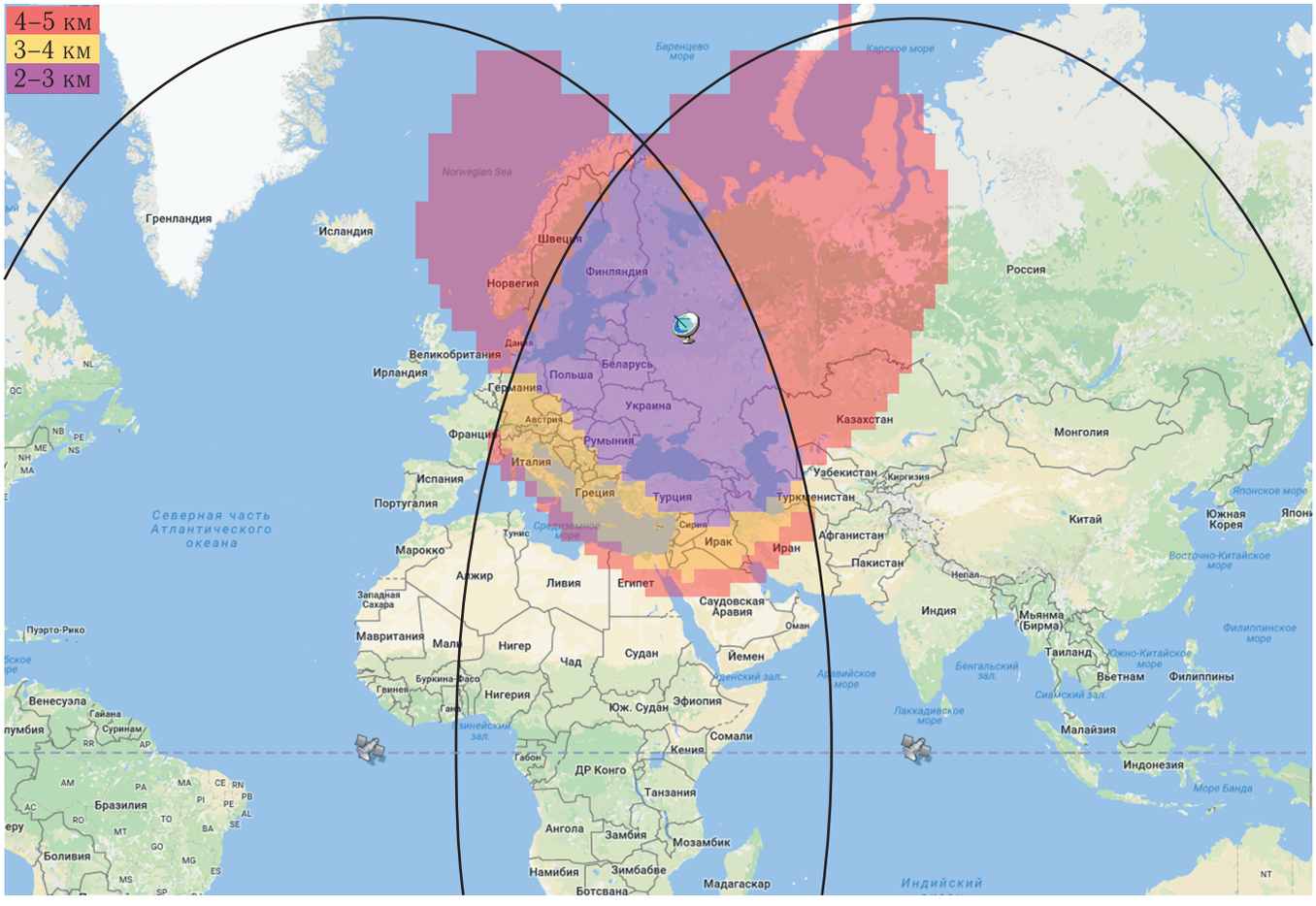


Рис. 1. Зона обслуживания 4-антенной СПОИ-СО, дополненной двумя геостационарными каналами, при работе с медленно подвижными АРБ

неподвижен относительно Земли и движение КА не вызывает значительного доплеровского сдвига частоты), они помогают определить скорость АРБ, поскольку именно скорость АРБ в этом случае вызывает доплеровское смещение частоты. Таким образом, при решении навигационной задачи по измерениям *FOA* для определения 6 неизвестных параметров (долготы, широты, 3 компонентов скорости и неизвестной частоты излучения) требуются как минимум 3 измерения от среднеорбитальных КА и еще как минимум 3 измерения от среднеорбитальных или геостационарных КА.

В аппаратурной части такое решение требует затрат только на дооснащение СПИАБ аппаратурой измерения частоты и времени прихода сигналов от геостационарного КА.

Для проверки целесообразности использования измерений от геостационарных спутников-ретрансляторов было проведено компьютерное моделирование, в котором 4-антенная московская СПОИ-СО использовала измерения от двух станций СПИАБ, принимавших данные с геостационарных КА «Электро-Л» № 1 (14,5 з. д.) и КА «Электро-Л» № 2 (76,0 в. д.). Результаты этого моделирования показаны на рис. 1.

Цветными областями на рисунке отмечена получившаяся зона облуживания, разным цветам соответствуют разные точности определения координат, значками спутников отмечены КА «Электро-Л» № 1 и КА «Электро-Л» № 2, черными линиями отмечена зона радиовидимости этих аппаратов, антенной — СПОИ-СО и 2 станции СПИАБ, расположенные в г. Москве.

Доработки СПИАБ и СПОИ-СО, необходимые для реализации и отработки предлагаемого способа

В предыдущем разделе показана эффективность дополнения измерений, полученных московской СПОИ-СО с четырьмя антеннами, измерениями сигналов АРБ, ретранслированных как минимум двумя геостационарными КА. Для реализации этого решения на данный момент имеются почти все сложные и дорогие средства:

– геостационарные КА «Электро-Л»:

- № 1 — будет переведен в точку стояния 14,5° з. д.;
- № 2 — находящийся в точке стояния 76° в. д.;
- № 3 — будет выведен на орбиту в точку стояния 165° в. д.;

– геостационарные КА «Луч-5»:

- «Луч-5А» — находящийся на орбите в точке стояния 167° в. д.;
- «Луч-5В» — находящийся на орбите в точке стояния 95° в. д.

Все эти КА имеют ретрансляторы сигналов АРБ КОСПАС–САРСАТ;

– московская станция приема информации аварийных буев (СПИАБ), введенная в эксплуатацию в составе российского геостационарного сегмента системы КОСПАС–САРСАТ в 2013 г. и успешно выполняющая свои функции совместно с КА «Электро-Л» № 1;

– еще 4 СПИАБ, установленные в городах Москве, Железногорске и Хабаровске (2 комплекта) для работы с КА «Электро-Л» № 2, «Электро-Л» № 3, «Луч-5А» и «Луч-5В».

Для реализации предлагаемого способа эти СПИАБ должны быть доработаны для того, чтобы они могли производить измерения *FOA* и *TOA*. Реализовать такую доработку можно без сложной доработки аппаратуры и программ СПИАБ, однако потребуется дооснащение приемниками, используемыми в СПОИ-СО (АЦПРМ-СО) и малонаправленными антеннами для приема сигналов от навигационных спутников специальным «навигационным» (вторым) каналом этих приемников, а также проведением необходимой доработки программного обеспечения.

Кроме перечисленных доработок, для реализации предлагаемого способа повышения точности определения координат движущихся буев необходимо решить еще две технические задачи:

- оперативное измерение и учет при обработке мгновенных значений частот гетеродинов (опорных генераторов) ретрансляторов сигналов АРБ на геостационарных КА;
- достаточно точное знание параметров орбит геостационарных КА в реальном масштабе времени.

Для проверки возможности разрешения этих задач был проделан эксперимент. Посылки АРБ, полученные с московского СПИАБ следящим за геостационарным КА «Электро-Л» № 1, были откалиброваны по французскому орбитографическому буе (номер буя 9C634E2AB509240), обладающему высокой стабильностью частоты излучаемого сигнала и времени излучения. После калибровки были проанализированы измерения *FOA* буя с номером BBBF0DEE6437320, находящегося в г. Гонконге. Как описано в [1], анализ целесообразно производить по разностям измерений от двух КА. На рис. 2 показан пример ошибок разностей измерений частоты (с учтенным доплеровским смещением частоты, вызванным движением КА) от спутников-ретрансляторов «Электро-Л» № 1 и GPS № 12 (среднее значение составило 0,043 Гц, с. к. о. — 0,118 Гц).

Таким образом, проведенный эксперимент показывает принципиальную возможность использования измерений от геостационарных спутников-ретрансляторов для решения навигационной задачи для медленно подвижных АРБ в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ.

Выводы

Одним из путей повышения точности определения координат подвижных АРБ в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ является использование дополнительных измерений частоты (*FOA*) аварийного радиобуя, получаемых станциями СПИАБ от геостационарных спутников КА «Электро-Л» № 2, «Электро-Л» № 3, «Луч-5А»

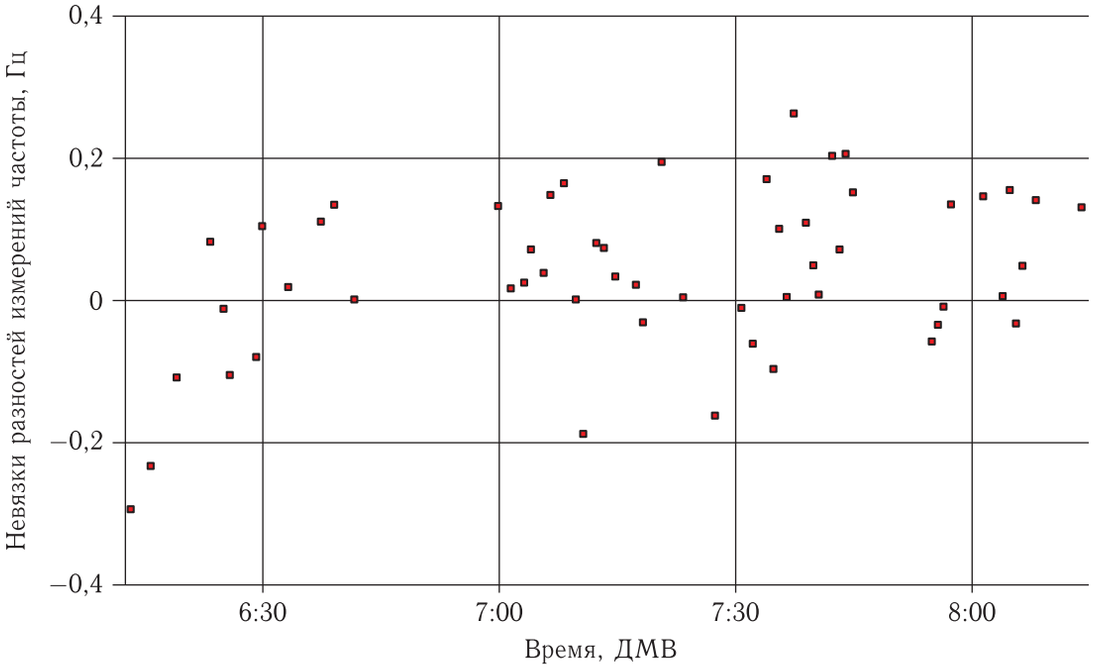


Рис. 2. Невязки разностей измерений *FOA* от «Электро-Л» № 1 и GPS № 12, 22.10.2015

и «Луч-5В». Такой способ может позволить без больших материальных затрат использовать материально технический задел российских геостационарных станций для повышения точности определения координат и расширения зоны обслуживания аварийных радиобуев российского среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ.

Список литературы

1. *Антонов Д. В*, *Архангельский В. А*., *Белоглазова Н. Ю*. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
2. *Антонов Д. В*., *Федосеев А. В*. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
3. COSPAS–SARSAT MEOLUT performance specification and design guidelines // C/S T.019, Issue 1, December 2015.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 40–45

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 621.396.7 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.40

Экспериментальная оценка точности определения координат медленно подвижных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ

Д. В. Антонов

АО «Российские космические системы»

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Аннотация. В настоящее время в рамках программы КОСПАС–САРСАТ осуществляется экспериментальная фаза «Демонстрации и оценки», предназначенная для определения основных эксплуатационных характеристик разворачиваемой среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания.

В статье приведены экспериментальные результаты определения координат медленно подвижного аварийного радиобуя (АРБ) с помощью станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента (СПОИ-СО) системы КОСПАС–САРСАТ, оборудованной 4, 6 или 12 антеннами.

Приведенные результаты подтверждают сделанные ранее теоретические выкладки и результаты численного моделирования, согласно которым СПОИ-СО, оборудованная 4 антеннами, не может определять координаты медленно подвижных АРБ с требуемой точностью 5 км в 95 % случаев, в то время как измерений от 6 спутников-ретрансляторов (у СПОИ-СО должно быть не менее 6 антенн) достаточно для выполнения требований по точности независимого определения координат медленно подвижных АРБ.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, СССПС, СПОИ-СО, «Демонстрация и оценка», навигационная задача, экспериментальная оценка, подвижные АРБ

Experimental Evaluation of the Slow Moving Beacon Location Accuracy in the Middle Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System

D. V. Antonov

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Abstract. The COSPAS–SARSAT "Demonstration and Evaluation" phase is being performed. Its purpose is to determine the maintenance characteristics of the Middle Earth Orbit Search and Rescue System (MEOSAR) being developed at present.

This article shows the experimental results of a slow moving EPIRB obtained at the Middle Earth Orbit Location User Terminal (MEOLUT) equipped with 4, 6, and 12 antennas.

These results match the theoretical conclusions and mathematical simulations made earlier: the MEOLUT with four antennas cannot locate slow moving beacons with the specified quality (5 km in 95 %). Meanwhile, the measurements from six satellites (MEOLUT should have at least six antennas) are sufficient to meet the accuracy requirements for slow moving beacons.

Keywords: COSPAS–SARSAT, MEOSAR, MEOLUT, Demonstration and Evaluation, locating, experimental results, moving EPIRBs

Введение

Как было показано в [1], при использовании измерений частоты для независимого от ГНСС определения координат на станции приема и обработки информации в среднеобитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ, в отличие от низкоорбитального сегмента, наличие даже небольшой скорости у АРБ может приводить к большим и непредсказуемым ошибкам, если эта скорость не учитывается. Как правило, АРБ имеет собственную скорость, находясь на водной поверхности под действием течений и ветра, при этом его скорость не превышает 5 м/с. В дальнейшем под подвижными будут подразумеваться АРБ, которые перемещаются со скоростью не более чем 5 м/с (18 км/ч).

Так как именно морские АРБ составляют большую часть парка всех радиобуев [2] и, кроме того, в перспективе ожидается внедрение нового типа авиационных буев, активируемых в полете (ELT-DT), проблема подвижных АРБ приобретает огромное значение для среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС).

В [1] показывается, что независимое определение координат подвижных АРБ по измерениям частот принятых сигналов (*FOA* — frequency of arrival) возможно при наличии измерений не менее чем от 6 спутников-ретрансляторов, принятых от одной и той же посылки АРБ. При решении навигационной задачи по измерениям времен прихода сигналов (*TOA* — time of arrival) требуются измерения от одной и той же посылки АРБ, принятой не менее чем через 3 спутника-ретранслятора.

При достижимых точностях измерений *TOA* (с. к. о. = 25 мкс) и *FOA* (с. к. о. = 0,08–0,20 Гц) на СПОИ-СО точность определения координат по измерениям *TOA* оказывается значительно ниже, чем при использовании измерений *FOA* [1]. Как показало математическое моделирование, результаты которого приведены в [3], СПОИ-СО, оборудованная 4 антеннами, не способна определять координаты подвижных АРБ по измерениям *TOA* с требуемой точностью 5 км в 95 % случаев ни в какой зоне, в то время как СПОИ-СО, оснащенная 6 антеннами, способна определять координаты как неподвижных, так и подвижных АРБ.

На данный момент в рамках международных испытаний «Демонстрация и оценка» СССПС экспериментальная проверка способности СПОИ-СО определять координаты АРБ с требуемой точностью была проведена только для неподвижных АРБ, находящихся на суше. Данная статья приводит результаты эксперимента по определению координат подвижного АРБ, который должен показать экспериментальное подтверждение или опровержение результатов теоретических исследований.

Описание эксперимента

Морской АРБ (номер 2065E84560FFBFF) был установлен на борту судна, перемещавшегося между 4 портами неподалеку от Бодо (Норвегия). АРБ был активирован с 3 по 6 мая 2016 г. Трасса этого АРБ, построенная по данным АИС, представлена на рис. 1. Измерения *TOA*/*FOA* были получены несколькими станциями СПОИ-СО, включая московскую СПОИ-СО и СПОИ-СО Европейского Союза (ЕС).

После завершения отправки посылок АРБ ЕС предоставил измерения СПОИ-СО вместе с высокоточными данными АИС о положении судна для проведения анализа возможности определять координаты подвижных АРБ с требуемой точностью.

На рис. 2, взятом из [2], представлены результаты по точности независимых решений в зависимости от собственной скорости АРБ, полученных на СПОИ-СО ЕС, а также с помощью низкоорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ. Зеленой линией на рисунке обозначена требуемая точность 5 км, число над точками означает количество решений с заданной скоростью. При определении координат АРБ считалось, что он неподвижен. Как видно, с увеличением скорости АРБ ошибка определения координат быстро растет, достигая величины десятков и сотен километров, при этом на точность решений, полученных с помощью низкоорбитального сегмента, собственная скорость АРБ влияет значительно меньше.

Чтобы оценить возможность СПОИ-СО с различным количеством антенн определять координаты подвижных АРБ, на основе измерений, полученных на 4-антенной СПОИ-СО в г. Москве

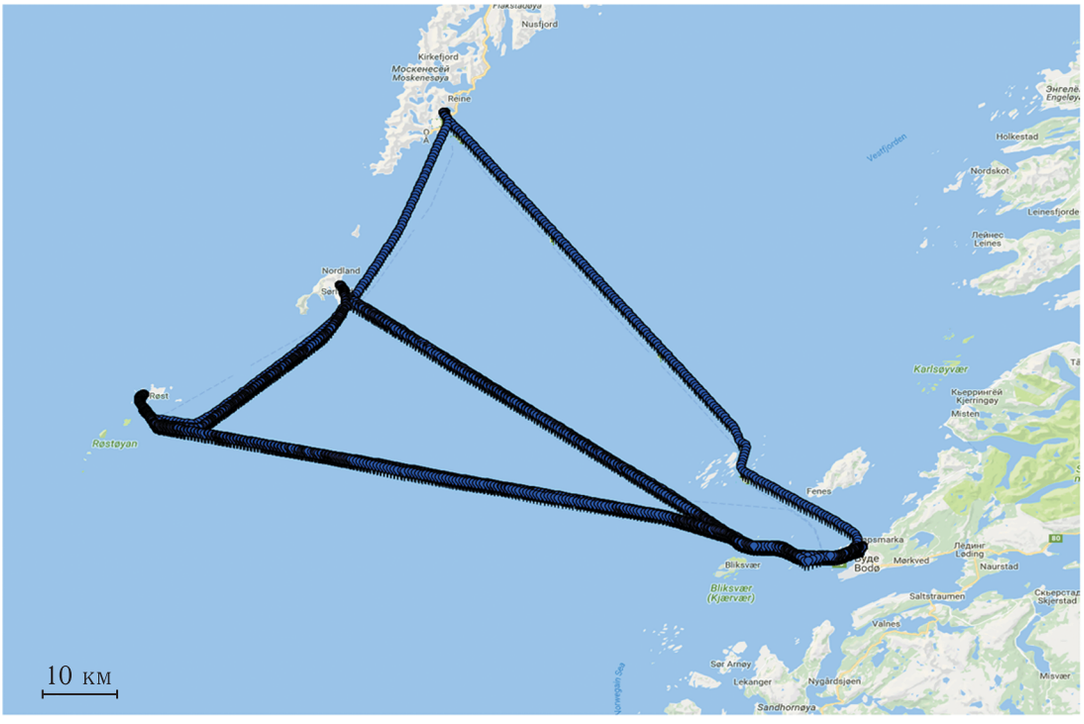


Рис. 1. Трасса АРБ, установленного на судне

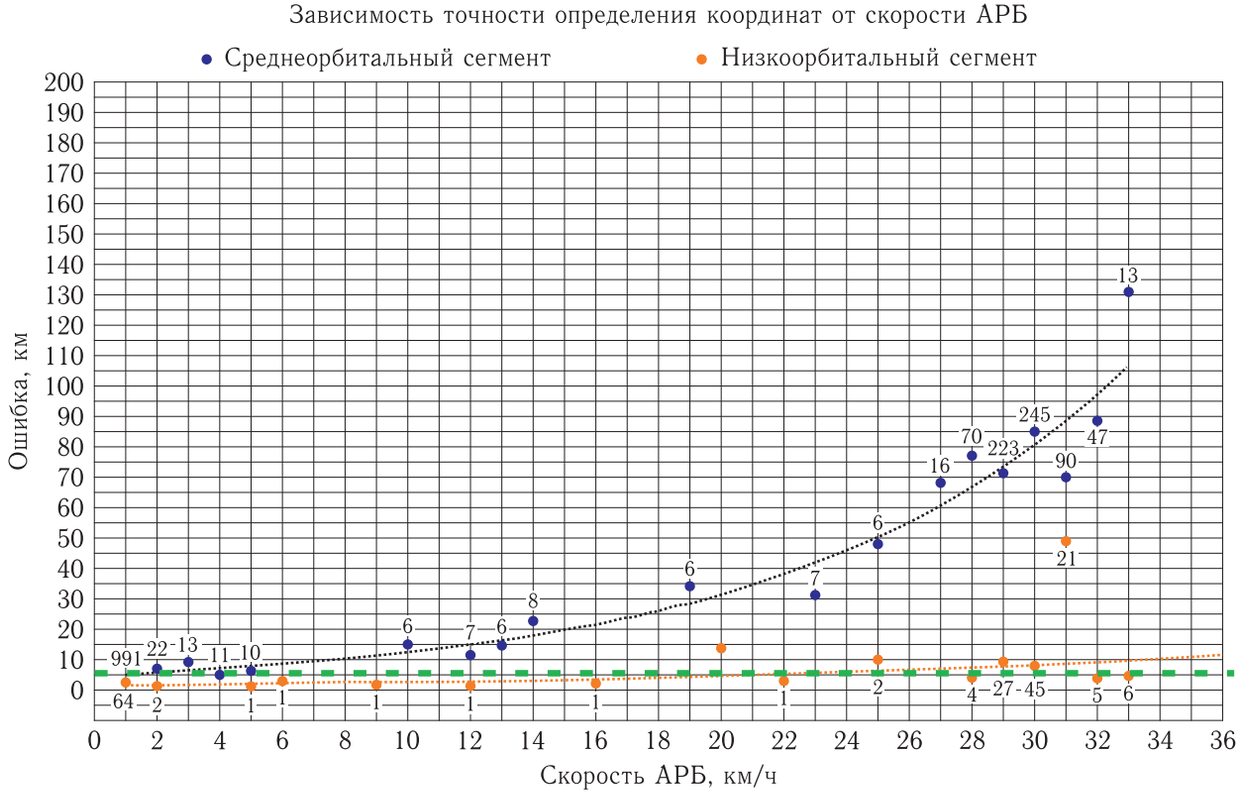


Рис. 2. Результаты определения координат подвижного АРБ с помощью СПОИ-СО ЕС (синие точки), а также с помощью низкоорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ (красные точки)

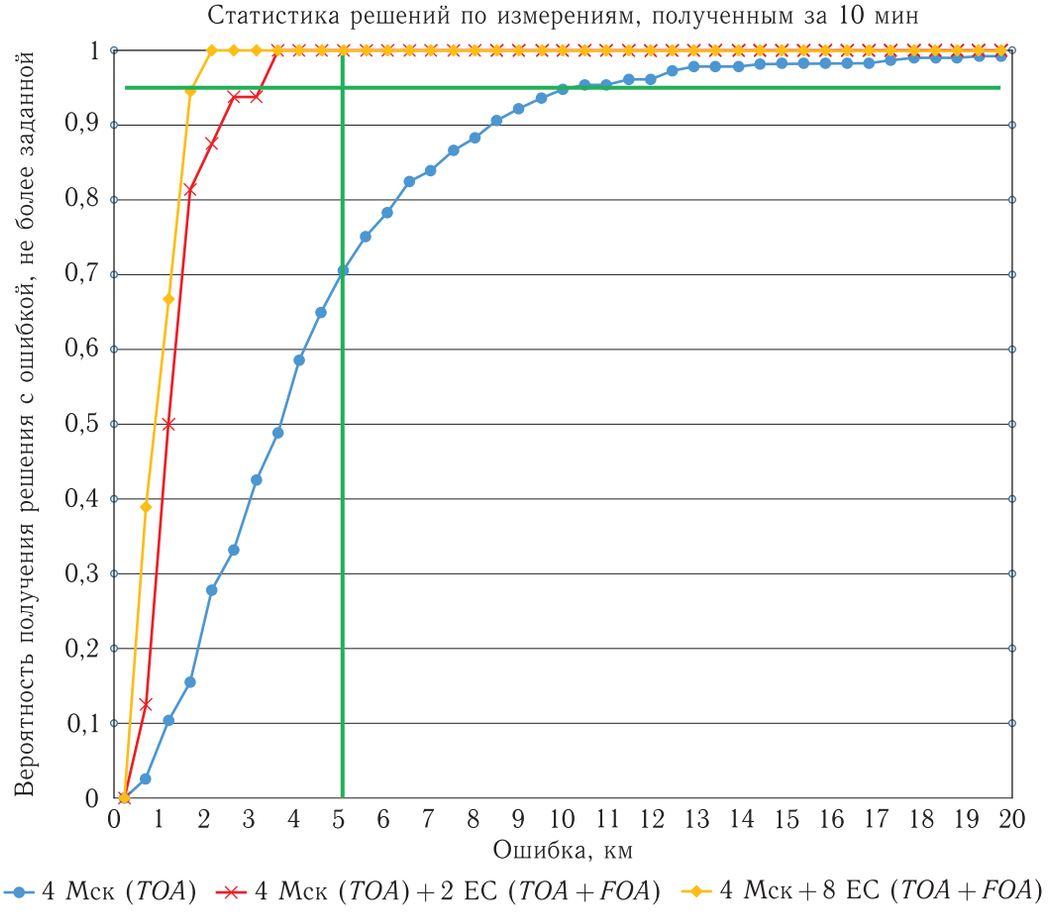


Рис. 3. График вероятности получения решения с ошибкой, не более заданной. Зелеными линиями показаны требуемые точность и вероятность независимого решения

и 12-антенной СПОИ-СО ЕС, были воспроизведены следующие сценарии.

- **Сценарий 1.** СПОИ-СО состоял из 4 антенн, для определения координат были использованы только измерения *TOA*. В качестве входных данных были взяты данные московской СПОИ-СО. В статистику попали только решения, полученные по измерениям от 4 космических аппаратов.
- **Сценарий 2.** Рассматривалась работа виртуальной СПОИ-СО, состоящей из 6 антенн. В качестве входных данных были взяты измерения московской СПОИ-СО (4 антенны) и данные СПОИ-СО ЕС (2 антенны). Координаты АРБ определялись по измерениям *TOA*/*FOA*. В статистику попали только решения, полученные по измерениям от 6 КА.
- **Сценарий 3.** Рассматривалась работа виртуальной СПОИ-СО, состоящей из 12 антенн. В качестве входных данных использовались данные *TOA*/*FOA* от 4 антенн московской СПОИ-СО и 8 антенн СПОИ-СО ЕС. В результате по одной излученной посылке АРБ было принято 6–11 измерений.

Точности измерений были приняты следующими: $\sigma_{TOA} = 25$ мкс, $\sigma_{FOA} = 0{,}08$ Гц (Москва), 0,20 Гц (ЕС).

При решении навигационной задачи по данным *TOA* был рассмотрен весь период излучения посылок (с 2016.05.03. 11:00 по 2016.05.06. 12:50 UTC). При решении по измерениям *TOA*/*FOA* был использован более короткий интервал (с 2016.05.06 03:00 по 2016.05.06 06:00 UTC). Выбор таких интервалов связан с наличием большого количества аномальных измерений *FOA*

Рис. 4. Решения, полученные в разных сценариях, на карте. Голубые маркеры — сценарий 1 (4 антенны), красные маркеры — сценарий 2 (6 антенн), желтые маркеры — сценарий 3 (12 антенн). Маленькие синие маркеры — трасса судна на анализируемый период времени

Таблица. Статистика определения координат медленно подвижного АРБ

				Решения по посылкам, полученным за 10 мин			
№ сценария	Количество антенн	Использованные данные	Количество КА в решении	Количество решений	Средний теоретический показатель точности (95 %), км	Разброс показателя точности (95 %)	Получившаяся ошибка в 95 % случаев
1	4	Москва (4)	4	360	11,33	5,80–28,96	10,13
2	6	Москва (4) + ЕС (2)(*TOA* + *FOA*)	6	16	3,37	2,47–6,85	3,00
3	12	Москва (4) + ЕС (8)(*TOA* + *FOA*)	6–11	18	1,28	0,90–2,12	1,78

в данных ЕС, на выбранном трехчасовом интервале аномальных значений не было.

Координаты АРБ определялись по измерениям, полученным за 10-минутный интервал, при этом решения были отнесены к середине 10-минутного интервала (это было сделано для того, чтобы минимизировать ошибку из-за изменения положения АРБ).

Результаты эксперимента

Результаты определения координат подвижного АРБ в зависимости от сценария приведены на рис. 3–4 и в таблице.

Как и ожидалось, ошибка определения координат подвижного АРБ по измерениям *TOA*

4-антенной СПОИ-СО оказалась хуже требуемых 5 км и составила около 10 км.

6- и 12-антенные СПОИ-СО выполнили требования по точности независимого определения координат. 12-антенная СПОИ-СО при этом показала значительный запас по точности (примерно в 3 раза). Следует отметить, если бы точность измерения *FOA* всех измерений была бы 0,08 Гц (как на московской СПОИ-СО), то точность определения координат оказалась бы еще лучше.

Выводы

По результатам проведенного эксперимента впервые была показана возможность СПОИ-СО определять координаты медленно подвижных АРБ с требуемой точностью, при этом было достаточно измерений *TOA*/*FOA* от 6 спутников-ретрансляторов. Точность определения координат, полученная на 4-антенной СПОИ-СО, оказалась хуже требуемой примерно в 2 раза.

Проведенный эксперимент по определению координат медленно подвижного АРБ показал соответствие со сделанными ранее теоретическими выкладками и математическими моделированиями.

Список литературы

1. *Антонов Д.В*, *Архангельский В.А.*, *Белоглазова Н.Ю*. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.

2. Origin: C/S Secretariat. Results of the Survey of 406-MHz Beacon Production in 2015, and the Secretariat's Population Forecast to Year 2025. Интернет источник http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/153/CSC-57-OPN-0407.pdf, дата обращения 04.04.2017.

3. *Антонов Д.В*. Оценка зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 3. С. 24–34.

4. Origin: Norway/Spain. Slow-moving beacon location accuracy. LEOSAR-MEOSAR comparison // Интернет источник http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/151/JC-30-Inf-29.pdf, дата обращения 04.04.2017.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 46–57

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.396.67 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.46

Встраиваемая антенна для аварийных радиомаяков второго поколения системы КОСПАС–САРСАТ

С. Н. Бойко[1], **А. В. Исаев, Д. С. Косоруков, Ю. С. Яскин**[2]

[1]*к. ф.-м. н.,* [2]*к. т. н.*
Филиал ОАО «ОРКК»–«НИИКП», Россия

e-mail: bosnik2012@yandex.ru, djspice91@mail.ru

Аннотация. Предложена встраиваемая в аварийные радиомаяки второго поколения поисково-спасательной системы КОСПАС–САРСАТ антенна, состоящая из элемента Гюйгенса в виде совмещенных укороченной рамки (петли) и диполя. Формирование диаграммы направленности в форме кардиоиды достигнуто за счет особого возбуждения диполя и петли. Разработана инженерная методика проектирования антенны и приведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Характеристики антенны удовлетворяют требованиям КОСПАС–САРСАТ к радиобуям второго поколения на частоте 406 МГц. Дан пример применения разработанной антенны в персональном аварийном радиомаяке с расположением ее с внутренней стороны боковой стенки корпуса с габаритами $200 \times 75 \times 45$ мм. Основные преимущества данной антенны — простота в изготовлении, защищенность от внешних механических воздействий и низкая стоимость.

Ключевые слова: дипольно-петлевые антенны, кардиоидная диаграмма направленности, полусферическая диаграмма направленности, встроенные антенны

Built-in Antenna for Second Generation Emergency Radio Beacons of the COSPAS–SARSAT System

S. N. Boyko[1], **A. V. Isaev, D. S. Kosorukov, Yu. S. Yaskin**[2]

[1]*candidate of physics and mathematics,* [2]*candidate of engineering science*
A branch of "ORKK"–"NII KP", Russia

e-mail: bosnik2012@yandex.ru, djspice91@mail.ru

Abstract. A built-in antenna for distress beacons of the second generation for search and rescue COSPAS–SARSAT system that consists of a Huygens element in the form of a combined half-wave frame (loop) and dipole is proposed. The formation of the radiation pattern in the cardioid form is achieved by specific excitation of the dipole and loop. An engineering design methodology of the antennas is developed and the comparison of the results of numerical simulation with experimental data is presented. The performance of the antenna meets the requirements of COSPAS–SARSAT to the second generation beacons on a frequency of 406 MHz. An example of application of the developed antenna in the personal distress beacon with its placing on the inner side of the side wall of the frame with the dimensions of $200 \times 75 \times 45$ mm is given. The main advantages of this antenna are easy manufacture, protection from external mechanical effects, and low cost.

Keywords: dipole-loop antennas, cardioid pattern, hemispherical radiation pattern, built-in antennas

Введение

Для возможности оповещения о бедствии и местоположении персональных радиобуев и радиомаяков, установленных на судах и самолетах, в случае аварийных ситуаций в 1977 г. была создана международная поисково-спасательная система КОСПАС–SARSAT. До настоящего времени система строилась на базе низкоорбитальной группировки спутников и основным типом антенн для передачи сигнала на спутник на частоте 406 МГц был монополь. Основное направление развития системы КОСПАС–SARSAT в настоящее время — создание космического сегмента на базе группировки среднеорбитальных спутников MEOSAR с целью создания равномерного покрытия всей видимой полусферы неба в любой точке земного шара, что позволит обеспечить непрерывный пространственно-временной мониторинг зоны поиска активированных радиомаяков. Как следствие, основным требованием к антеннам радиомаяков второго поколения является формирование полусферической (кардиоидной) диаграммы направленности (ДН) с линейной или круговой поляризациями, максимум которой направлен в зенит.

Проектирование антенн с кардиоидной формой ДН для персональных радиомаяков оказывается достаточно сложной задачей, поскольку сами радиомаяки должны иметь малые габариты и массу. Экспертная группа комитета КОСПАС–SARSAT рассмотрела известные типы антенн (спиральные, микрополосковые, планарные F-антенны и L-антенны) с полусферической формой диаграммы направленности и пришла к неутешительному выводу о неприменимости этих антенн в персональных радиомаяках второго поколения: либо габариты и масса превышают допустимые пределы, либо эффективность излучения недостаточна. Таким образом, не было найдено варианта реализации антенны, применимого в персональных радиомаяках второго поколения.

Поиск решения данной непростой проблемы сотрудниками филиала ОАО «ОРКК»–«НИИ КП» привел к конструктивному варианту встроенной антенны для радиомаяков второго поколения, имеющей приемлемые размеры, массу и ДН в форме кардиоиды. Такой результат достигнут благодаря совмещению дипольной и укороченной рамочной антенн, что является практической реализацией элемента Гюйгенса.

В статье приведен алгоритм расчета дипольно-рамочной антенны с кардиоидной формой диаграммы направленности, подробно описаны этапы ее проектирования, а также дано сравнение результатов компьютерного моделирования с измеренными характеристиками макета антенны на частоте 406 МГц.

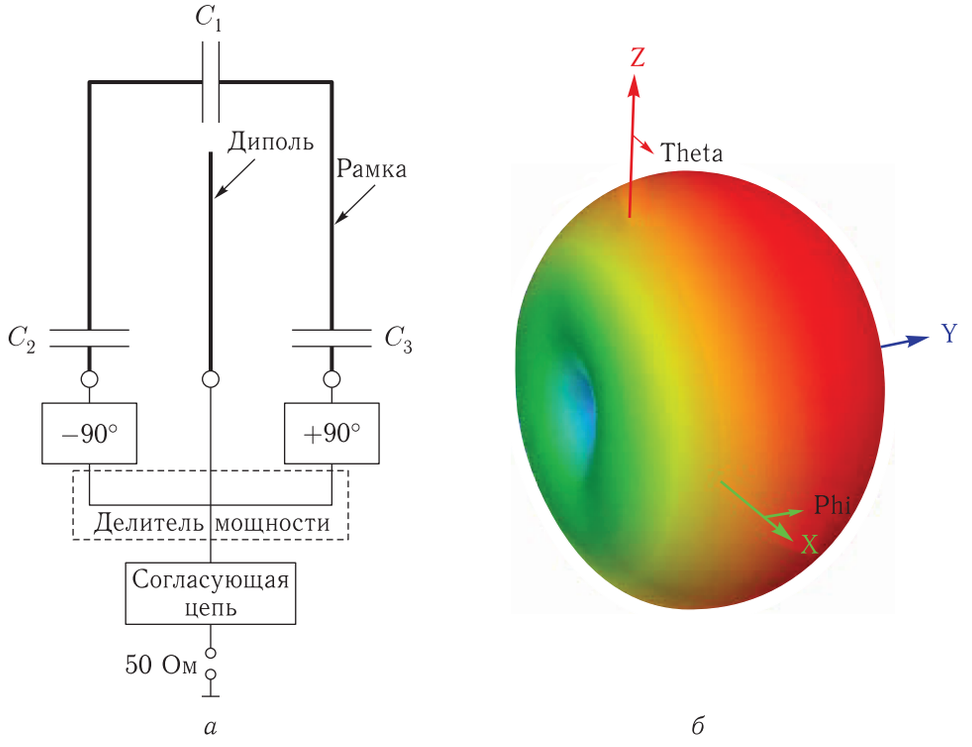
Алгоритм расчета встраиваемой антенны для радиомаяков второго поколения

Идея формирования сферической диаграммы направленности в виде элемента Гюйгенса была описана во многих монографиях, например в [1]. Элемент Гюйгенса — это элементарный источник однонаправленного излучения, образованный ортогональными синфазными электрическим и магнитным диполями. Поле элемента Гюйгенса в дальней зоне представляет собой сферическую волну, а ДН не зависит от угла φ, и в любой плоскости $\varphi = \mathrm{const}$ определяется выражением $F(\theta) = 1 + \cos\theta$.

Базовый вариант реализации такой антенны, имеющей рамочную антенну с периметром, равным длине волны λ в свободном пространстве, неприменим в радиомаяках второго поколения из-за больших габаритов.

В статье [2] изложены теоретические основы формирования диаграммы направленности кардиоидного типа парой диполь–рамка при условии, что размеры всех излучателей намного меньше длины волны. В работе [3] предложен вариант исполнения антенны для мобильной связи с ДН в форме кардиоиды, которая является сочетанием несимметричного диполя и электрически малой рамки, запитанной в квадратуре относительно диполя (каждое плечо). Однако в [3] материал освещен достаточно кратко, как следствие отсутствует методика расчета дипольно-рамочной антенны с полуволновой рамкой. Авторы данной статьи попытались восполнить этот пробел.

Конструктивное исполнение этой антенны было взято нами за основу, в которую внесены изменения, необходимые в данном конкретном применении.



а *б*

Рис. 1. Принципиальная схема антенны *(а)* и форма диаграммы направленности дипольно-рамочной антенны *(б)*

Принципиальная схема построения антенны показана на рис. 1, *а*. Укороченная рамка периметром $\lambda/2$ содержит три емкости, одна из которых включена в центре рамки, а две другие — в начале двух ее ветвей. Включение емкости C_1 в пучности напряжения позволяет укоротить рамку с периметром, равным длине волны λ, до рамки с периметром, равным половине длины волны [4], однако входной импеданс такой рамки на рабочей частоте будет носить индуктивный характер. Компенсировать индуктивную составляющую входного импеданса призваны емкости C_2 и C_3, включенные на входе рамки. Рамочный излучатель в таком виде практически представляет собой запитываемый током полуволновый диполь с емкостной нагрузкой, свернутый в рамку.

В статье [3] отмечено, что для формирования сферической диаграммы направленности антенны, размеры всех излучателей которой много меньше длины волны, необходимо соблюдение следующих условий:

1) центры излучения диполя и рамки должны совпадать, в то время как взаимное влияние между излучателями должно быть сведено к минимуму;

2) мощности, излучаемые диполем и рамкой, должны быть равны между собой;

3) токи, протекающие в диполе и рамке, должны иметь разность фаз 90°.

При соблюдении этих условий антенна будет иметь диаграмму направленности в форме кардиоиды с максимумом излучения в направлении ветви рамки, запитываемой с фазой +90° относительно диполя, и минимумом в обратном направлении (рис. 1, *б*).

Антенна состоит из нескольких элементов, а ее расчет и проектирование — комплексная задача, которую необходимо разбить на несколько этапов. Мы использовали следующий алгоритм проектирования такой антенны.

Шаг 1. Проводится отдельно расчет несимметричного диполя на печатной плате.

Шаг 2. Проводится отдельно расчет полуволновой рамки на печатной плате.

Шаг 3. Проектируется микрополосковый делитель мощности с нагрузками в выходных плечах, равными расчетным сопротивлениям излучения диполя и рамки, при условии равенства мощностей сигналов, поступающих в рамку и диполь.

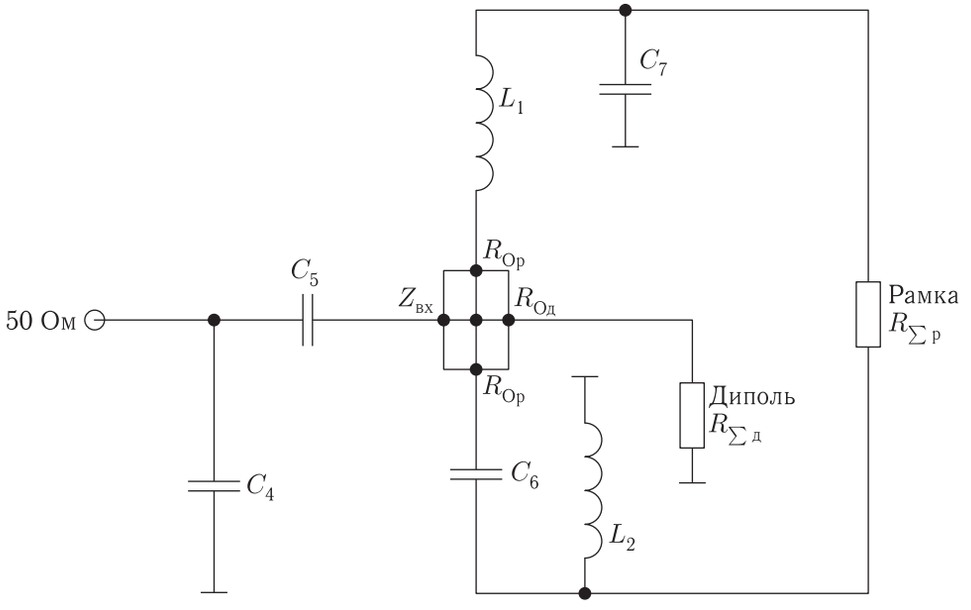


Рис. 2. Электрическая схема дипольно-рамочной антенны

Шаг 4. Проводится расчет симметрирующего трансформатора на сосредоточенных элементах.

Шаг 5. Проводится расчет антенны в сборе.

Шаг 6. Проводится расчет цепи согласования антенны.

Шаг 7. Проводится оптимизация взаимного расположения антенны и приемо-передающей платы радиомаяка с целью минимизации влияния последней на форму ДН.

Электрическая схема совмещенной антенны приведена на рис. 2. На схеме показано, что диполь подключается непосредственно к делителю мощности, а плечи рамки запитаны со сдвигом фаз $\pm 90°$ относительно диполя через симметрирующий трансформатор, образованный парами сосредоточенных элементов: L_1, C_7 и C_6, L_2. При этом плечи рамки оказываются запитанными противофазно друг относительно друга. Емкостная Г-секция согласует входной импеданс антенны с 50-омным трактом.

На первом этапе проектирования антенны должны быть рассчитаны размеры несимметричного диполя, состоящего из четвертьволнового излучателя и соосной с ним земляной поверхности (противовеса), которые расположены на одной стороне печатной платы (рис. 3). При этом излучатель размещается строго по продольной оси платы. На этой же стороне платы расположен делитель мощности.

На следующем этапе проектируется рамка на рабочую частоту 406 МГц. Рамочная антенна выполняется в виде полоски на обратной стороне печатной платы по ее внешнему контуру таким образом, чтобы излучатель диполя был расположен внутри рамки на ее оси (рис. 3), что обусловлено первым условием формирования ДН кардиоидного типа, приведенным выше. Периметр рамки является конструктивным параметром, который определяется в основном длиной излучателя диполя и шириной платы, диктуемой также первым условием формирования ДН кардиоидного типа.

Значения емкостей C_1, C_2, C_3 рассчитываются методом длинной линии, примененным к эквивалентной электрической схеме рамочной антенны на резонансной частоте (рис. 4, *а*).

Рамочная антенна заменяется длинной линией из двух проводящих полосок шириной w, разнесенных на расстояние a, которая нагружена на конце на емкость C_1 и сопротивление излучения $R_{\sum P}$. Пересчет нагрузки к входу рамки производится при помощи формулы преобразования сопротивлений вдоль линии передачи [5]:

$$\dot{z}(b) = z_B \frac{\dot{z}_н + j z_B \operatorname{tg} \beta l}{z_B + j \dot{z}_н \operatorname{tg} \beta l}, \qquad (1)$$

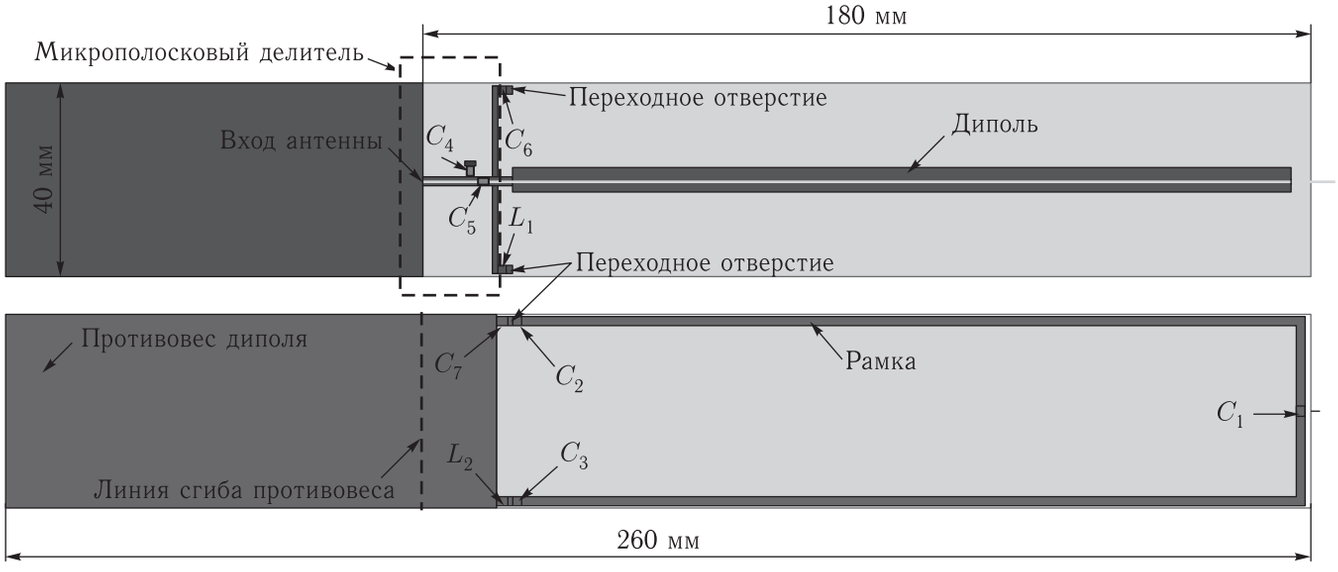
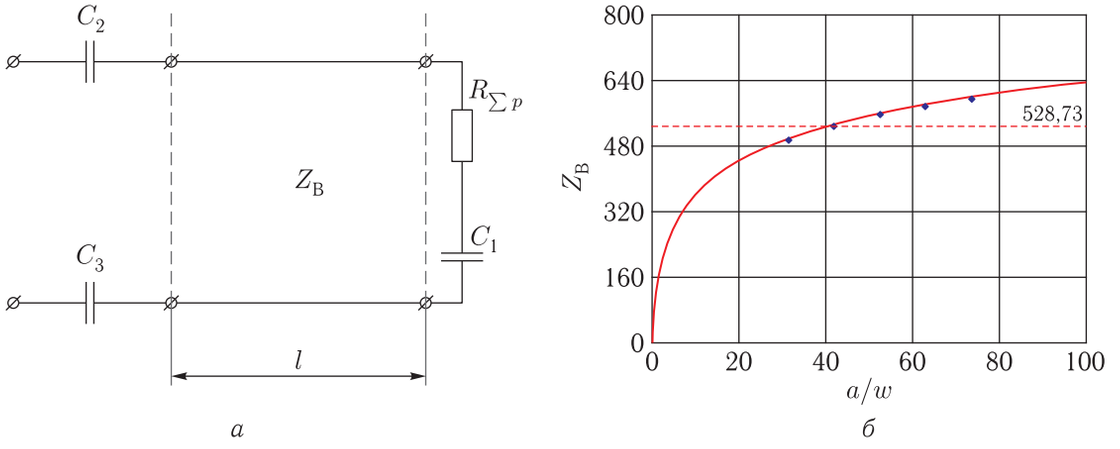


Рис. 3. Топология антенны: верхняя и нижняя стороны платы



а *б*

Рис. 4. Эквивалентная схема рамочной антенны (*а*), зависимость z_B от a/w (*б*)

где z_B — волновое сопротивление линии передачи, $\dot{z}_н = R_{\sum p} - \frac{j}{\omega C_1}$ — комплексное сопротивление нагрузки, l — длина линии передачи, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число свободного пространства.

Сопротивление излучения рамки $R_{\sum p}$ находится по формуле [6]:

$$R_{\sum p} = 197 \cdot (\Pi_p/\lambda)^4, \qquad (2)$$

где Π_p — периметр рамки.

Волновое сопротивление линии передачи может быть определено из выражения для z_B двухпроводной проволочной линии передачи [5]:

$$z_B = 276 \lg\left(a/d + \sqrt{1 + (a/d)^2}\right), \qquad (3)$$

где d — диаметр проволоки при допущении, что ширина проводящей полоски w равняется удвоенному значению d, т. е.

$$w = 2d. \qquad (4)$$

Соотношение (4) определено эмпирическим путем, а именно путем сравнения значений z_B, рассчитанных по формуле (3), со значениями, полученными при строгом электродинамическом расчете.

Зависимость волнового сопротивления двухпроводной линии передачи z_B от величины a/w приведена на рис. 4, *б* (сплошной линией дан график $z_B(a/w)$, рассчитанный по формулам (3), (4), точками нанесены значения z_B, полученные при расчете в программном пакете HFSS15 для ширины полоски $w = 1{,}9$ мм и ряда значений расстояния между полосками $a = \{28; 38; 48; 58; 68\}$ мм). Видно, что расчет по формуле (3) при допущении (4) полностью согласуется со значениями волнового сопротивления, полученными при строгом электродинамическом расчете.

После пересчета $\dot{z}_{\text{н}}$ к входу рамки по формуле (1) номиналы элементов C_1, C_2, C_3 находятся из условия равенства нулю мнимых частей суммарного сопротивления рамки:

$$\operatorname{Im}\{\dot{z}(b)\} + \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_3} = 0. \qquad (5)$$

При равенстве элементов $C_2 = C_3 = C$ уравнение имеет два неизвестных параметра — C_1 и C. Это свидетельствует о том, что номинал одного из элементов может быть задан, а второй ищется из решения уравнения (5). На рис. 5 дан график зависимости C в функции от C_1, который был получен путем численного решения уравнения (5). Этот график может быть использован для выбора пары согласующих емкостей $\{C_1, C\}$.

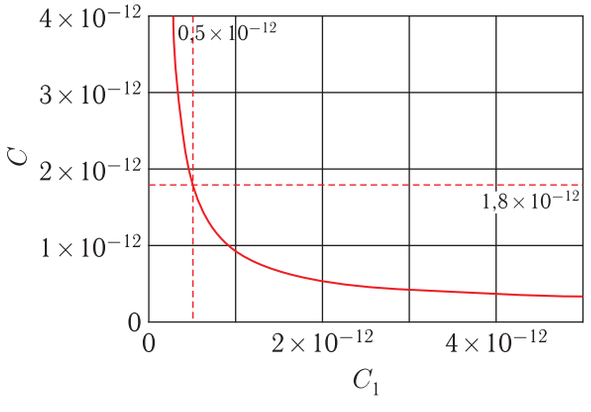


Рис. 5. Расчетная зависимость C от C_1

Расчет делителя мощности проводится из условия равенства мощностей, излучаемых рамкой и диполем (второе условие формирования ДН кардиоидного типа):

$$P_{\sum \text{р}} = P_{\sum \text{д}},$$
$$\text{или} \quad I^2_{a_\text{р}} \cdot R_{\sum \text{р}} = I^2_{a_\text{д}} \cdot R_{\sum \text{д}}, \qquad (6)$$

где $I_{a_\text{д}}$ и $I_{a_\text{р}}$ — эффективные значения тока диполя и рамки в точках подключения.

Сопротивление излучения рамки $R_{\sum \text{р}}$ задается ранее приведенной формулой (2), а сопротивление излучения диполя равно [1]

$$R_{\sum \text{д}} = 80\pi^2 \cdot (l_{\text{д}}/\lambda)^2, \qquad (7)$$

где $l_{\text{д}}$ — длина диполя.

Учитывая (2), (7) и (6), получаем формулу для соотношения токов в точках подключения дипольной и рамочной антенн:

$$\frac{I_{a_\text{д}}}{I_{a_\text{р}}} = \sqrt{\frac{R_{\sum \text{р}}}{R_{\sum \text{д}}}}. \qquad (8)$$

При проектировании делителя мощности используется соотношение для мощностей. Так как подводимые мощности пропорциональны квадрату тока, выражение для отношения входных мощностей имеет вид

$$m = \frac{P_{\text{вх_д}}}{P_{\text{вх_р}}} = \left(\frac{I_{a_\text{д}}}{I_{a_\text{р}}}\right)^2 = \frac{R_{\sum \text{р}}}{R_{\sum \text{д}}}. \qquad (9)$$

Согласование плеч рамки с портами 2 и 3 делителя выполняется с помощью симметрирующего трансформатора, плечи которого по существу являются фильтром высокой частоты (ФВЧ) и фильтром низкой частоты (ФНЧ), которые помимо функции фазосдвигающих цепей играют также роль трансформаторов сопротивлений [5].

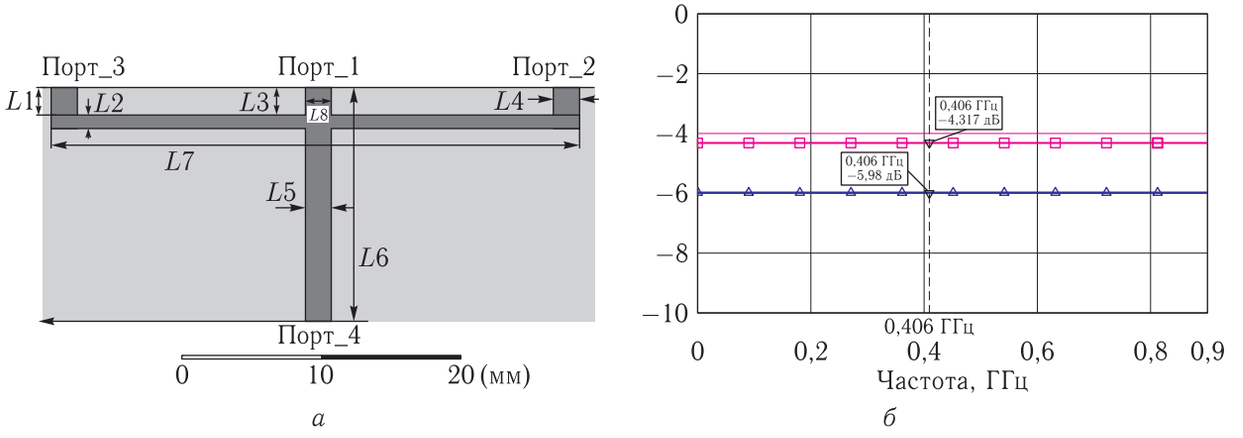
Характеристический импеданс $Z_{\text{П}}$ отрезка длинной линии, эквивалентной звеньям фильтров ФНЧ и ФВЧ, обеспечивающий трансформацию сопротивления нагрузки R к входному сопротивлению $R_{0\text{р}}$ равен [7]:

$$Z_{\text{П}} = \sqrt{2R_{0\text{р}}\frac{R}{2}} = \sqrt{R_{0\text{р}}R} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (10)$$

Кроме того, должно выполняться условие:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \qquad (11)$$

где f_0 — центральная частота рабочего диапазона.



а *б*

Рис. 6. Топология микрополоскового делителя мощности (*а*), зависимости модулей коэффициентов передачи от частоты (*б*)

Из соотношений (12) и (13) получаем формулы для расчета L- и C-элементов, входящих в состав симметрирующего трансформатора:

$$L_1 = L_2 = \frac{Z_{\text{П}}}{2\pi f_0}, \tag{12}$$

$$C_6 = C_7 = \frac{1}{2\pi f_0 Z_{\text{П}}}. \tag{13}$$

При равенстве номиналов L- и C-элементов в плечах симметрирующего трансформатора ФВЧ задает сдвиг фазы $-90°$, а ФНЧ сдвигает фазу на $+90°$. Таким образом, третье условие формирования полусферической (кардиоидной) диаграммы направленности выполняется автоматически.

Расчет дипольно-рамочной антенны

В качестве материала антенной платы был выбран стеклотекстолит FR-4 толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 4{,}4$. По расчету, выполненному с помощью программного пакета HFSS15, длина несимметричного вибратора с резонансной частотой 406 МГц для ширины полоски 5 мм составила 162 мм при размерах противовеса (100×40) мм^2. С учетом длины несимметричного диполя расчетный периметр рамки составил $\Pi_{\text{р}} = 366$ мм при ширине рамки $a = 38$ мм и длине рамки $l = 164$ мм. В итоге общие размеры антенной платы с учетом противовеса составили 260 мм (длина) $\times$ 40 мм (ширина).

Для выбранной ширины полоска рамки $w = 1{,}9$ мм при $a = 38$ мм расчетное значение волнового сопротивления рамки, рассчитанное по формулам (3), (4), составило $z_B = 528{,}73$ Ом.

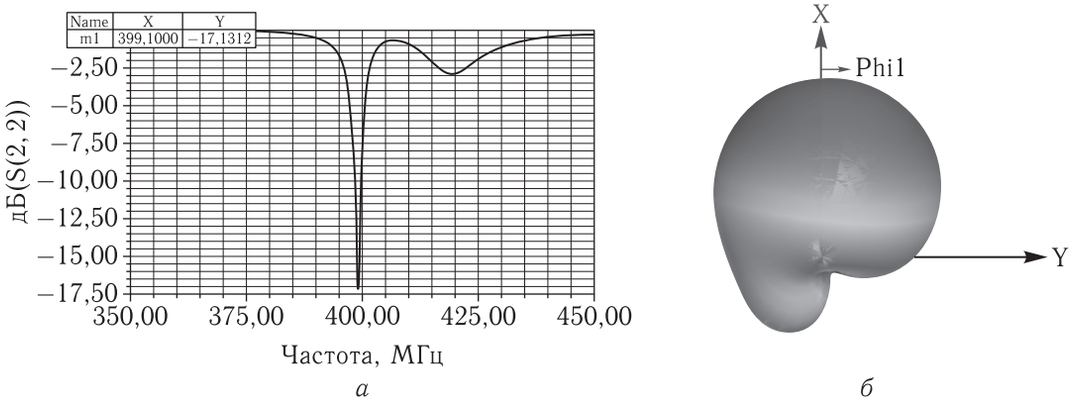
Для приведенных выше размеров несимметричного диполя и рамки по формулам (2), (7) и (9) были вычислены значения сопротивлений излучения и коэффициента деления мощности: $R_{\sum \text{д}} = 37{,}5$ Ом, $R_{\sum \text{р}} = 12$ Ом, $m = 0{,}32$. В итоге делитель мощности должен разделять входную мощность в следующих соотношениях:

$$P_{\text{вх_Д}} = 0{,}25 \cdot P_{\text{вх}},$$
$$P_{\text{вх_р1}} = P_{\text{вх_р2}} = 0{,}375 \cdot P_{\text{вх}},$$

где $P_{\text{вх_р1}}$, $P_{\text{вх_р2}}$ — мощности, поступающие в каждое плечо рамки.

Делитель мощности выполняется на микрополосковых линиях. Его топология показана на рис. 6, *а*. Рамка подключена к делителю мощности через отрезки идентичных микрополосковых линий, а диполь — непосредственно к точке ответвления делителя мощности. Нагрузками трех выходов делителя служат сопротивления излучения рамки $R_{\sum \text{р}}$ (по половине на каждый выход делителя, подключаемый к плечу рамки) и диполя $R_{\sum \text{д}}$.

Критериями синтеза делителя мощности были условия (10), (11), а именно модуль коэффициента передачи между входом делителя (порт 4) и местом подключения диполя (порт 1) $|s_{14}| = -6$ дБ; модули коэффициента передачи между



а *б*

Рис. 7. Расчетные характеристики антенны: *а* — модуль коэффициента отражения на входе антенны, *б* — диаграмма направленности на резонансной частоте

входом делителя и местами подключения ветвей рамки (порты 2 и 3) $|s_{24}| = |s_{34}| = -4{,}3$ дБ. Требуемое разделение мощности достигалось путем подбора ширины L_2 и длины L_7 двух идентичных микрополосковых линий в плечах делителя мощности. В результате синтеза были получены следующие значения ширины и длины промежуточных линий передачи: $L_2 = 0{,}01$ мм, $L_7 = 38$ мм.

Из-за технической невозможности выполнить плечи делителя шириной 0,01 мм величину L_2 решено было увеличить до физически реализуемой величины, равной 0,5 мм. При такой топологии выходное сопротивление порта 1 получается $R_{0д} = 200$ Ом, а выходные сопротивления портов 2 и 3 составляют $R_{0р} = 72{,}5$ Ом каждое. При этих значениях сопротивлений нагрузок обеспечивается необходимое деление мощности (расчетные зависимости модулей коэффициента передачи от частоты показаны на рис. 6, *б*), но при этом возникает необходимость согласования сопротивлений излучения диполя и рамки с приведенными выше сопротивлениями выходов (портов) делителя мощности.

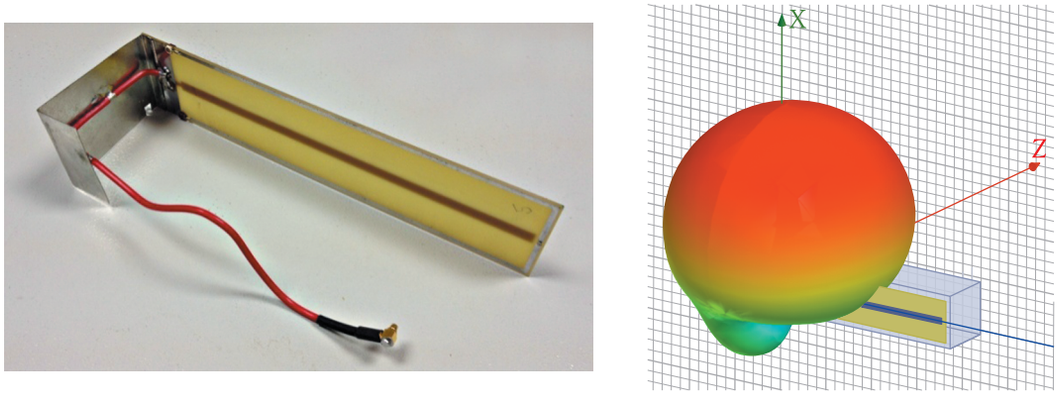
Согласование диполя с портом 1 делителя было достигнуто путем введения ступенчатого перехода шириной $L_8 = 2$ мм и длиной $L_3 = 4$ мм.

Согласование рамки с портами 2 и 3 делителя мощности осуществляется с помощью согласующе-симметрирующего трансформатора. Номиналы сосредоточенных элементов трансформатора рамки рассчитаны по формулам (10)–(13) для сопротивления нагрузки $R = R_{\sum р}/2 = 6$ Ом, вычисленного по формуле (1) входного сопротивления рамки $R_{0р} = 72{,}5$ Ом и составили: $L_1 = L_2 = 4{,}7$ нГн, $C_6 = C_7 = 32{,}6$ пФ.

Расчет входного импеданса антенны в сборе (диполь + рамка с симметрирующим трансформатором + делитель мощности) проводился в программном пакете HFSS15. Расчетное значение входного импеданса составило $z_{вх} = 8 + j6$ Ом. Поскольку входной импеданс имеет низкое значение активной составляющей и отличное от нуля значение индуктивной составляющей, для согласования входа антенны с 50-омным трактом необходим согласующий трансформатор. В нашем случае он был реализован в виде Г-образной цепи согласования, состоящей из последовательной и параллельной емкостей. Расчет этих емкостей был проведен по методике, изложенной в [8, 9]. В итоге значения емкостей составили: $C_4 = 15$ пФ, $C_5 = 7{,}5$ пФ.

Расчетные модуль коэффициента отражения $|s_{11}|$ на входе антенны и ее диаграмма направленности показаны на рис. 7, *а* и 7, *б* соответственно. Модуль коэффициента отражения на резонансной частоте равен $-17{,}1$ дБ, что соответствует входному КСВН = 1,1. Значение $K_у$ антенны в максимуме ДН составило 2,8 дБ. Из рис. 7, *б* видно, что в нижней части диаграммы присутствует небольшое паразитное излучение, которое связано с наличием противовеса антенны, нежелательного для рамочного излучателя.

На этом процесс проектирования антенны можно было бы считать завершенным, однако полученный продольный размер антенны (260 мм) явно большой и не позволяет вписать ее в габариты персонального радиомаяка. Поэтому для встраивания



а *б*

Рис. 8. Макет дипольно-рамочной антенны (*а*), форма ДН при рабочем положении антенны (*б*)

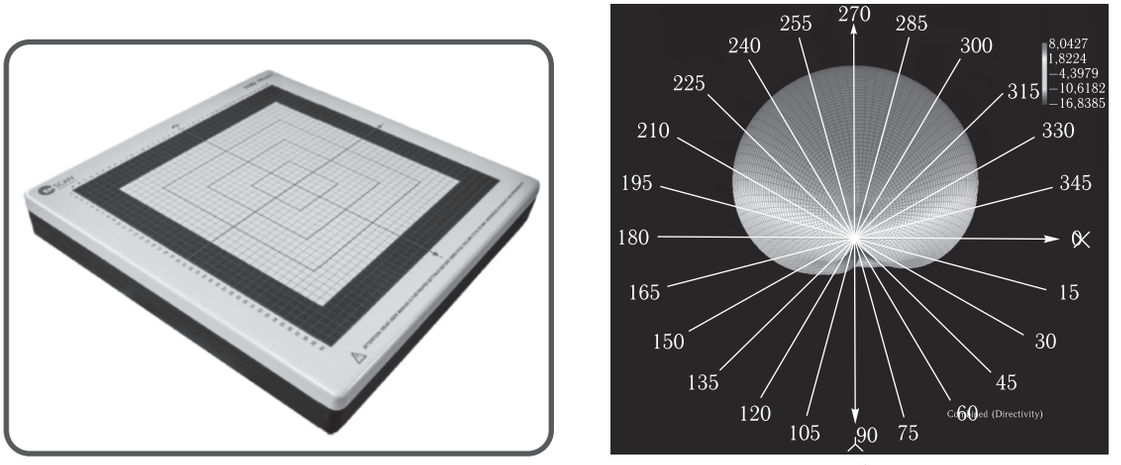
антенны в корпус радиомаяка противовес диполя был согнут под углом 90° к плате таким образом, чтобы продольный размер самой платы с топологией антенны не превышал 180 мм (линия сгиба показана на рис. 3). При моделировании было определено, что при такой конфигурации противовеса изменения формы диаграммы направленности незначительны и могут быть компенсированы путем небольшого изменения емкостей C_6, C_7 в цепях согласования рамки.

Результаты измерений макетного образца антенны и сравнение с расчетными данными

Для проверки предложенной методики проектирования дипольно-рамочной антенны был изготовлен ее макет, состоящий из антенной платы и соединенного с ней противовеса. Плата антенны была выполнена на материале FR-4 ($\varepsilon_r = 4{,}4$) толщиной 1 мм, противовес был изготовлен из луженой жести толщиной 0,2 мм. Топология антенной платы выполнена согласно расчетам, проведенным по вышеописанному алгоритму. Согласующие конденсаторы C_1, C_2, C_3 были выбраны по графику рис. 5 равными: $C_2 = C_3 = 1{,}8$ пФ, $C_1 = 0{,}5$ пФ (пунктирные маркеры на рис. 5). Возможны и другие варианты выбора C_1, C_2, C_3 по графику рис. 5, например: $C_1 = 0{,}25$ пФ, $C_2 = C_3 = 3$ пФ или $C_1 = 1$ пФ, $C_2 = C_3 = 0{,}9$ пФ. Конденсаторы в симметрирующем трансформаторе взяты переменными для точной подстройки разности фаз в плечах рамки. Фотография макета антенны приведена на рис. 8, *а*, расчетная трехмерная ДН при рабочем положении антенны изображена на рис. 8, *б*. Дополнительный (второй) изгиб противовеса антенны под углом 90° обусловлен необходимостью встраивания антенны в спроектированный корпус персонального радиомаяка второго поколения. Антенны при этом располагаются по трем узким сторонам прямоугольника с размерами $(180 \times 65 \times 40)$ мм^3.

Окончательная проверка и настройка антенны проводилась по форме ДН с помощью сканера RFxpertRFX2 фирмы EMSCAN, который позволяет определить форму диаграммы направленности антенны в режиме реального времени непосредственно на рабочем месте [10]. Данный прибор измеряет ближнее поле антенны и пересчитывает его в поле в дальней зоне с отображением ДН в трехмерном виде с достаточной для настройки антенны точностью. Совмещенная антенна помещалась на рабочую поверхность сканера плоскостью платы (противовесом вверх), затем небольшой подстройкой емкостей C_6, C_7 в симметрирующем трансформаторе добивались кардиоидной формы ДН. Фотография сканера и измеренная на нем диаграмма направленности антенны представлены на рис. 9, *а* и 9, *б* соответственно. Затем КСВН и ДН настроенного с помощью сканера макета антенны измерялись в дальней зоне в условиях безэховой камеры.

Измеренная зависимость КСВН на входе антенны от частоты представлена на рис. 10.



а *б*

Рис. 9. Фотография сканера RFxpertRFX2 (*а*) и вид ДН дипольно-рамочной антенны, измеренной на сканере (*б*)

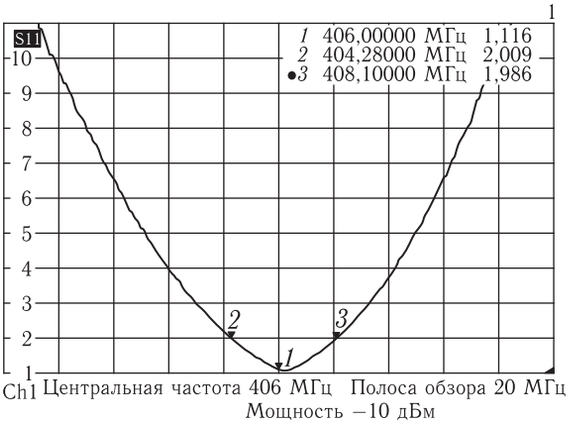


Рис. 10. Экспериментальная частотная зависимость КСВН на входе антенны

Из рисунка следует, что на рабочей частоте 406 МГц значение КСВН = 1,1, что полностью совпадает с расчетным значением. ДН антенны в верхней полусфере при $\varphi = 0°$ и 90°, измеренные в безэховой камере, показаны на рис. 11, *а* и 11, *б* соответственно. Также на этих рисунках штриховой линией показаны результаты расчета ДН в программном пакете HFSS15. Измеренное значение K_y в максимуме ДН составляет 2,5 дБ, а расчетное значение равно 2,8 дБ. Из вышеприведенного анализа видно, что достигнуто хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Следует отметить, что, по требованиям стандарта КОСПАС–САРСАТ, на радиобуи второго поколения в 90 % диаграммы направленности K_y антенны должен находиться в пределах от −7 до +4 дБ в диапазоне углов места от 15° до 90°. Полученные экспериментальные значения $K_y(\theta)$ удовлетворяют этому требованию: значения K_y изменяются в интервале от −6 дБ до +2,5 дБ в заданном диапазоне углов (см. рис. 11).

При размещении антенны внутри радиомаяка ее плата была расположена вдоль одной из его длинных боковых стенок, а противовес — вдоль смежной короткой боковой стенки, с небольшим заходом на противоположную длинную стенку (рис. 12).

Поскольку в радиомаяке перпендикулярно плате антенны располагается плата приемопередатчика, необходимо было выяснить ее влияние на характеристики антенны. Поэтому с помощью компьютерного моделирования и экспериментов было определено наилучшее для работы антенны положение платы приемопередатчика относительно платы антенны, при котором форма ДН сохраняется (рис. 8, *б*).

Дипольно-рамочная антенна обладает рядом преимуществ как встраиваемая антенна. Во-первых, из-за отсутствия излучения в нижнюю полусферу она позволяет уменьшить негативное влияние подстилающей поверхности на форму ДН. Во-вторых, она защищена от внешних механических воздействий корпусом радиомаяка. В-третьих, имеет простую технологию изготовления и низкую стоимость.

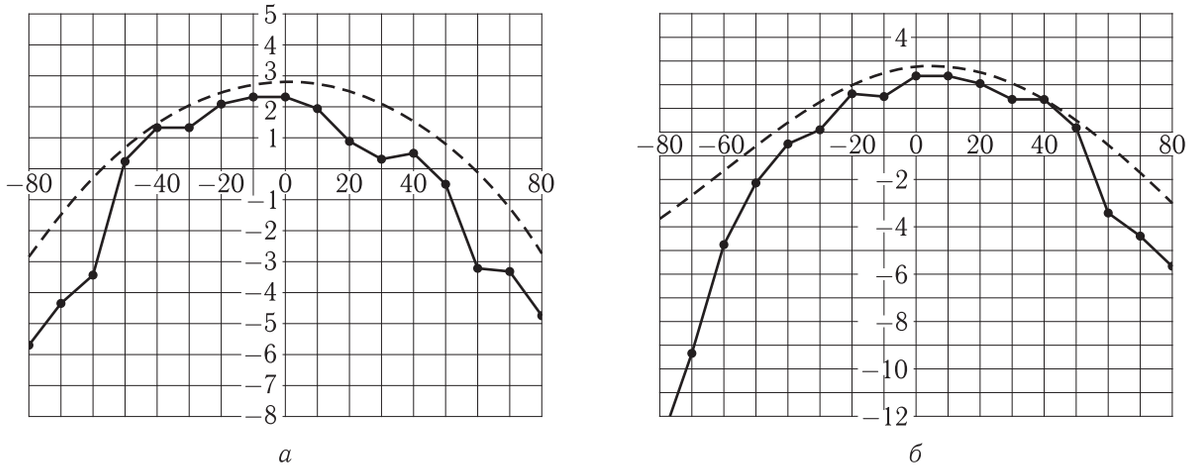


Рис. 11. Измеренные в условиях БЭК (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) ДН антенны: *а* — при $\varphi = 0°$, *б* — при $\varphi = 90°$

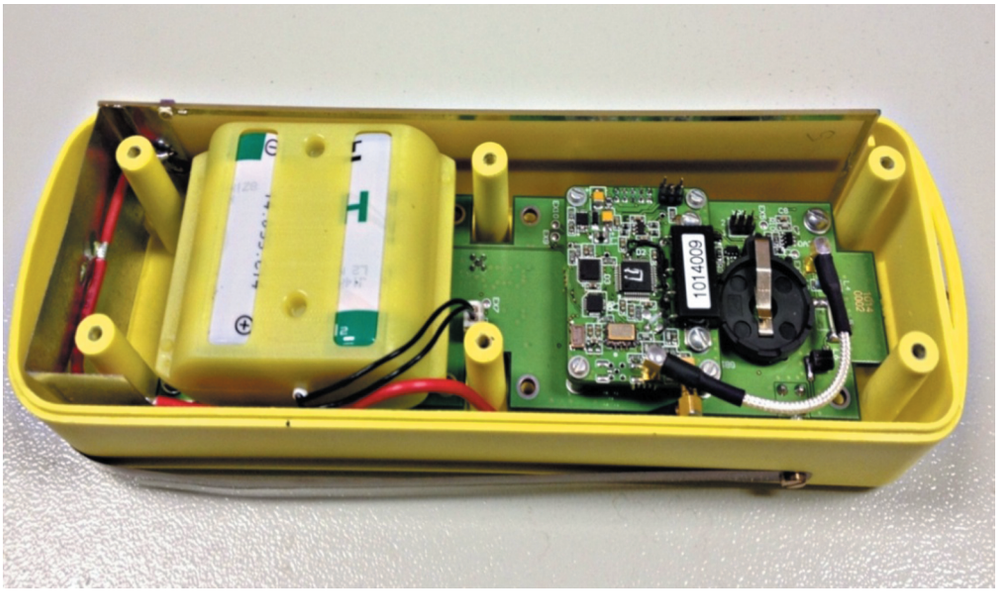


Рис. 12. Дипольно-рамочная антенна в корпусе радиомаяка

Заключение

В данной статье:

- предложена дипольно-рамочная антенна для применения в персональном спасательном радиомаяке КОСПАС–САРСАТ нового (второго) поколения;
- приведено подробное описание этапов проектирования такой антенны и предложена инженерная методика ее расчета;
- расчетно-экспериментальным путем получен входной коэффициент стоячей волны антенны КСВ = 1,1 и полусферическая ДН антенны на частоте 406 МГц с $К_у = 2{,}5$ дБ;
- путем изменения конфигурации противовеса антенна вписана в радиомаяк с габаритами (200 × × 75 × 45) мм^3;
- учтен фактор влияния платы передатчика на форму ДН антенны. Выбрано ее наилучшее положение в корпусе радиомаяка.

Список литературы

1. *Фрадин А.З.* Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977.
2. *Vendik O.G., Pakhomov I.A.* Electric- and magnetic-field strengths in the Fresnel zone of a microradiator formed by an electric and a magnetic dipole // Technical Physics, 2005, vol. 50, No. 11. P. 1479–1484.
3. *Turalchuk P.A., Kholodnyak D.V., Vendik O.G.* Novel Low-Profile Antenna with Hemispherical Coverage Suitable for Wireless and Mobile Communications // 2008 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 17–18 March 2008, Loughborough, UK. P. 337–340.
4. *Туркин Н.* Электрически укороченная рамочная антенна // Радио, 2002, № 12. С. 58.
5. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
6. *Ротхаммель К.* Энциклопедия антенн. М.: ДМК-Пресс, 2011.
7. *Жексенов М.А., Петров А.С.* Схемы на LC-элементах, предназначенные для возбуждения турникетных излучателей, состоящих из трех электрических и трех магнитных диполей // Радиотехника и электроника, 2014, т. 59, № 4, С. 317–321.
8. *Петров А.С., Ковалева М.В.* Согласование входного импеданса короткого монополя с волновым сопротивлением тракта при помощи Г-звена, состоящего из индуктивностей с конечной добротностью // Радиотехника и электроника, 2012, т. 57, № 4. С. 418–421.
9. *Петров А.С., Ковалева М.В.* Согласование комплексного сопротивления с фидерным трактом при помощи Г-звеньев, состоящих из реактивных LC-элементов с конечной добротностью // Радиотехника и электроника, 2012, т. 57, № 6. С. 624–631.
10. http://www.emscan.com

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 58–68

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 629.78 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.58

Анализ принципов построения комплексов приема, обработки и ретрансляции информации международной системы КОСПАС–САРСАТ и перспективы их развития

А. А. Романов[1], **А. С. Кондрашов**[2], **Д. А. Белов, С. А. Букин**

[1]*д. т. н., профессор,* [2]*к. т. н.*
АО «Российские космические системы»

e-mail: romanov_alal@risde.ru, kondrashov_as@risde.ru

Аннотация. В настоящей работе представлено краткое описание принципов функционирования различных бортовых комплексов системы поиска и спасания, размещаемых на низкоорбитальных, среднеорбитальных, высокоэллиптических и геостационарных космических аппаратах.

Проведен анализ базовых технических характеристик существующих бортовых комплексов различных сегментов, в результате которого показано, что с учетом особенностей функционирования аппаратуры можно сформировать обобщенные требования к бортовой аппаратуре, удовлетворяющие требованиям международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ.

Представлена перспективная схема реализации унифицированного комплекса, который за счет минимальной реконфигурации может использоваться на космических аппаратах всех сегментов международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, среднеорбитальная система поиска и спасания, геостационарная система поиска и спасания, унифицированный бортовой комплекс (on-board unified SAR complex)

Analysis of the Concepts for Design of Complexes for Receiving, Processing and Retransmitting of Information from the International COSPAS–SARSAT System and the Prospects for Their Development

A. A. Romanov[1], **A. S. Kondrashov**[2], **D. A. Belov, S. A. Bukin**

[1]*doctor of engineering science, professor,* [2]*candidate of engineering science*
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: romanov_alal@risde.ru, kondrashov_as@risde.ru

Abstract. This paper describes the operation principles of various search and rescue onboard systems installed on spacecrafts deployed in the low, medium, highly elliptical and geostationary orbits.

An analysis of the basic technical characteristics of the existing airborne complexes of various segments has been carried out. It has been shown that it is possible to form generalized requirements for on-board equipment that meet the requirements of the international search and rescue system COSPAS–SARSAT, taking into account the performance features of the equipment.

A possible future design of a unified complex is presented, which, with a minimal reconfiguration, can be used in the spacecraft of all the segments of the international search and rescue system COSPAS–SARSAT.

Keywords: COSPAS–SARSAT, medium-orbit search and rescue system, geostationary search and rescue system, on-board unified SAR complex

Введение

Международная система поиска и спасания КОСПАС–SARSAT успешно развивается с конца 80-х гг. XX века, когда было подписано базовое Соглашение сторон (СССР, США, Франции и Канады), регламентирующее взаимные обязательства [1]. Система, в соответствии с [1], включала в себя космический сегмент, состоящий минимум из 4 низкоорбитальных космических аппаратов, которые должны принимать и обрабатывать сигнал от аварийных радиобуев и передавать его на наземные станции.

Впоследствии система поиска и спасания была модернизирована. Так, сначала в ее состав были включены космические аппараты на геостационарной орбите (1998 г.) как дополнение к низкоорбитальному сегменту, ретранслирующие посылки от радиобуев на наземные станции без обработки сигнала на борту. В 2000 г. были начаты консультации и принято решение о начале разработки принципиально новой (среднеорбитальной) системы поиска и спасания, которая в перспективе должна заменить низкоорбитальную. В конце 2016 г. было принято решение о начале фазы ранней эксплуатационной готовности среднеорбитальной системы поиска и спасания, предваряющей ее окончательный ввод в эксплуатацию, который в соответствии с текущими планами развития намечен на 2020 г.

Среднеорбитальная система поиска и спасания в теории сочетает преимущества низкоорбитальной системы (возможность независимого определения координат радиобуя — геостационарная система лишена этой возможности), одновременно устраняя ее недостатки: сервис ретрансляции аварийного сигнала становится доступным потребителю практически в реальном времени, поскольку отпадает необходимость в ожидании сеанса связи с космическим аппаратом.

Последовательные модификации и расширение количества сегментов системы поиска и спасания КОСПАС–SARSAT, по сути, привели к фактическому созданию нескольких различных типов бортовой аппаратуры, которая, за исключением низкоорбитального сегмента, выполняет одинаковую задачу — ретрансляцию сигнала от аварийного буя, находящегося в зоне видимости космического аппарата, на наземную станцию.

В настоящее время функция передачи сигналов системы поиска и спасания реализуется на низкоорбитальных космических аппаратах типа «Метеор-М» (аппаратура РК-СМ-МКА), геостационарных космических аппаратах типа «Электро-Л» (канал 8 БРТК) и типа «Луч» (канал КОСПАС–SARSAT РССПД), перспективных высокоэллиптических космических аппаратах типа «Арктика-М» (канал КОСПАС–SARSAT БРТК) (комплекс находится на стадии наземной отработки), а также среднеорбитальных космических аппаратах ГЛОНАСС-К различных поколений (БРКС, БРКС-К2 и перспективная БРКС-К2-М).

В рамках настоящей работы анализируются технические характеристики аппаратуры системы поиска и спасания и предлагается перспективный путь развития указанных комплексов — унификация бортовой аппаратуры для всех сегментов системы КОСПАС–SARSAT, учитывая необходимость дополнительной обработки сигналов на борту низкоорбитальных космических аппаратов.

Описание и принцип функционирования бортовой аппаратуры систем КОСПАС–SARSAT различных космических сегментов

Ниже представлено краткое описание использующихся в текущей конфигурации системы космических комплексов.

Комплекс РК-СМ-МКА

Комплекс РК-СМ-МКА предназначен для размещения на низкоорбитальных космических аппаратах и в соответствии с последними решениями ГК «Роскосмос» будет установлен на борту КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2.

Аналогично комплексам РК-СМ [2–4] более современное изделие РК-СМ-МКА предназначено

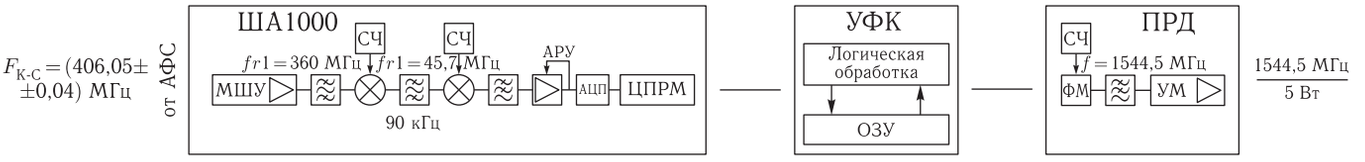


Рис. 1. Функциональная схема комплекса РК-СМ-МКА:

СЧ — синтезатор частоты;
АФС — антенно-фидерная система;
МШУ — малошумящий усилитель;
АРУ — автоматическая регулировка усиления;
ЦПРМ — цифровой приемник;
АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
УФК — устройство формирования и записи кадра;
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство;
ФМ — фазовый модулятор;
УМ — усилитель мощности;
ПРД — передатчик

для приема сигналов аварийных радиобуев системы КОСПАС–САРСАТ на частоте 406 МГц, измерения доплеровского смещения частоты посылки с одновременной регистрацией времени начала приема сообщения, выделения информационной части сообщения, а также формирования информационного кадра с последующей передачей на наземную станцию.

Основные принципы функционирования комплекса представлены на рис. 1 [2].

От антенно-фидерной системы (АФС) сигнал радиобуя системы КОСПАС–САРСАТ в диапазоне частот 406,01–406,09 МГц попадает в линейную часть приемника, где происходит двойное понижение частоты (ПЧ1 — 46,05 МГц и ПЧ2 — 35 кГц, где ПЧ — промежуточная частота). На первой промежуточной частоте (ПЧ1) осуществляется формирование рабочей полосы сигнала 90 кГц. На выходе линейной части приемника сигнал на второй промежуточной частоте (ПЧ2) преобразуется в цифровую форму и поступает в цифровую часть приемника.

В цифровой части приемника реализованы алгоритмы определения сигналов аварийных радиобуев, выделение информации, а также измерение доплеровского смещения частоты и времени посылки. Полученная информация поступает в устройство формирования и записи кадра (УФК), где формируется информационный пакет для выдачи данных в передатчик комплекса (ПРД). В ПРД осуществляется фазовая модуляция на частоту несущей 1544,5 МГц и усиление до значения 5 ± 1 Вт. В УФК также осуществляется запись в оперативную память до 2000 посылок радиобуев.

Канал КОСПАС–САРСАТ из состава БРТК КА «Электро-Л»

На рис. 2 представлена упрощенная функциональная схема канала 8, выполняющего функцию ретрансляции сигналов системы КОСПАС–САРСАТ [5].

В БРТК КА «Электро-Л» [5, 6] канал К8 (КОСПАС–САРСАТ) объединен с каналами К6 и К7 по входу. Для всех трех каналов (К6, К7, К8) МШУ является общим. Каналы К7 и К8 имеют общий конвертер КВР-0,4, осуществляющий первое преобразование частоты. МШУ имеет широкую полосу приема, поскольку обеспечивает прием сигналов на частотах 402 МГц (канал К7), 406,05 МГц (канал К8) и 465 МГц (канал К6). Конструктивно МШУ выполнен в виде отдельного прибора с внешним питанием (+15 В), но без выноса МШУ к АФУ. В КВР-0,4 осуществляется предварительная частотная селекция и первое преобразование частоты «вниз». Так, сигнал канала К8 переносится на частоту 26,05 МГц и без узкополосной фильтрации поступает на прибор ФОС8. В приборе ФОС8 осуществляется выбор частотной селекции по внешним командам:

- $F_{ном}$ — 26,05 МГц, $2\Delta F$ — 120 кГц;
- $F_{ном}$ — 26,025 МГц, $2\Delta F$ — 30 кГц.

Сформированный таким образом спектр сигнала смещается в область низких частот (на центральную частоту 50 или 25 кГц) и в качестве

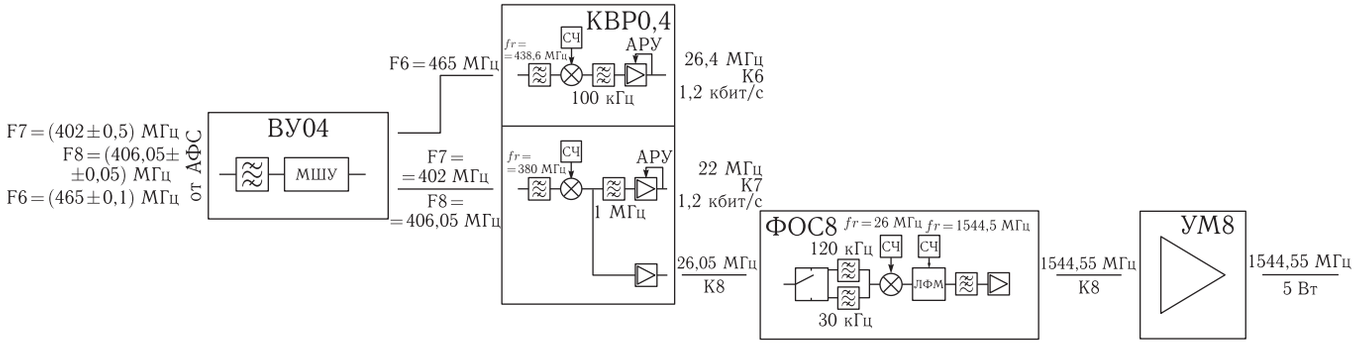


Рис. 2. Укрупненная функциональная схема канала КОСПАС–САРСАТ БРТК «Электро-Л»:

ВУ04 — входное устройство диапазона 0,4 ГГц;
КВР0,4 — понижающий конвертер из диапазона 0,4 ГГц в диапазон 20 МГц, ФОС8 — формирователь ответного сигнала канала 8;
УМ8 — усилитель мощности 8 канала;
ЛФМ — линейный фазовый модулятор;
F6 — входная частота канала К6 — 465,0 ± 0,05 МГц;
F7 — входная частота канала К7 — 402,0 ± 0,5 МГц;
F8 — входная частота канала К8 — 406,05 ± 0,05 МГц;
К6 — канал 6 — канал ретрансляции данных с платформ сбора данных (ПСД), полученных через низкоорбитальные спутники;
К7 — канал 7 — канал прямой ретрансляции системы сбора и передачи данных (ССПД);
К8 — канал 8 — канал КОСПАС–САРСАТ

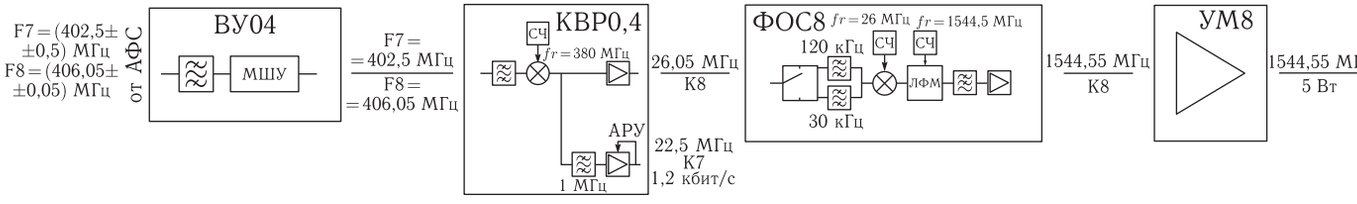


Рис. 3. Укрупненная функциональная схема канала КОСПАС–САРСАТ БРТК «Арктика-М»

модулирующего сигнала поступает на ЛФМ с несущей частотой 1544,5 МГц. С учетом индекса модуляции доля полезного сигнала в спектре не превышает 20 %. Сформированный сигнал поступает на УМ, где усиливается до 5 Вт и выдается на АФУ.

Канал КОСПАС–САРСАТ из состава перспективного БРТК КА «Арктика-М»

Аппаратура в части канала ретрансляции информации поиска и спасания (БРТК-ВЭ) КА «Арктика-М» является логической модернизацией БРТК КА «Электро-Л» и предназначена для размещения на высокоэллиптическом КА. На рис. 3 представлена укрупненная структурная схема БРТК «Арктика-М» в части канала ретрансляции КОСПАС–САРСАТ.

Основным отличием аппаратуры БРТК-ВЭ от ретранслятора БРТК, размещенного на КА типа «Электро-Л», является отсутствие канала К6. Кроме того, центральная частота приема, передачи и промежуточная частота канала К7 (ССПД) смещены на 500 кГц «вверх». Однако эти отличия не повлияли на функциональную схему работы канала КОСПАС–САРСАТ БРТК-ВЭ, повторяющую схему К8 БРТК КА «Электро-Л». Так, сохранены все приборы, входящие в тракт канала, и в целях унификации оставлен неизменным широкополосный МШУ, несмотря на избыточность полосы пропускания. Таким образом, принцип работы канала К8, приведенный в предыдущем разделе, также аналогичен и для канала КОСПАС–САРСАТ БРТК «Арктика-М».

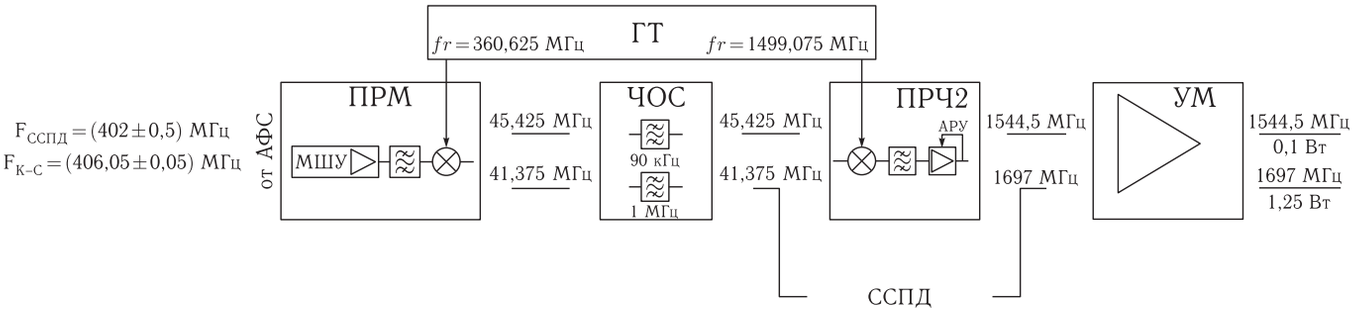


Рис. 4. Укрупненная функциональная схема канала КОСПАС–САРСАТ из состава РССПД КА «Луч-5А»:
ГТ — блок гетеродинов;
ЧОС — частотно-селективный ограничитель;
ПРМ — приемное устройство;
ПРЧ2 — преобразователь частоты

Канал КОСПАС–САРСАТ из состава КА серии МКСР «Луч»

Аппаратура ретрансляции сигналов международной системы поиска и спасания КОСПАС–САРСАТ размещена не только на борту метеорологических геостационарных аппаратов типа «Электро-Л». В настоящее время на геостационарной орбите успешно функционируют КА «Луч-5А», «Луч-5Б» и «Луч-5В», которые входят в МКСР «Луч». На борту КА «Луч-5А» и «Луч-5В» размещены каналы ретрансляции сигналов КОСПАС–САРСАТ [6].

На рис. 4 представлена укрупненная функциональная схема канала КОСПАС–САРСАТ из состава КА серии «Луч-5» из МКСР «Луч».

Согласно [6] ретранслятор системы сбора и передачи данных (РССПД) обеспечивает одновременную ретрансляцию сигналов двух систем: КОСПАС–САРСАТ — частота приема 406,05 МГц и ССПД — частота приема 402 МГц. Прием от АФС осуществляется прибором ПРМ. Прибор ПРМ является малошумящим входным усилителем, обеспечивающим минимальную эффективную шумовую температуру изделия, и понижающим преобразователем частоты, переносящим спектры сигналов из диапазона входных частот в диапазон промежуточных частот ПЧ $(41{,}375 \pm 0{,}5)$ МГц для канала ССПД и $(45{,}425 \pm 0{,}04)$ МГц для канала КОСПАС–САРСАТ. Сигналы на промежуточных частотах поступают на прибор ЧОС, обеспечивающий узкополосную частотную селекцию сигналов и их разделение. С ЧОС сигнал КОСПАС–САРСАТ на центральной частоте 45,425 с полосой 90 кГц поступает на прибор ПРЧ2, где переносится на центральную частоту 1544,5 МГц и поступает на УМ. УМ обеспечивает одновременное усиление и передачу двух сигналов: ССПД на частоте передачи 1697 МГц и КОСПАС–САРСАТ на частоте 1544,5 МГц. При этом выходной уровень сигнала КОСПАС–САРСАТ должен быть до 100 мВт.

Частоты гетеродинов, в отличие от рассмотренных ранее систем, формируются в отдельном приборе ГТ.

Система БРКС-К1 из состава КА «ГЛОНАСС-К1»

Система БРКС-К1, установленная на борту КА ГЛОНАСС-К 11Л и 12Л [7, 8], имеет интегрированный МШУ, обеспечивающий прием сигналов с минимальным коэффициентом стоячей волны (КСВ) и коэффициентом шума ($К_ш$) на частоте 406,05 МГц (рис. 5). Система ретрансляции является автономной и не имеет связей с сигналами трансляции других систем. Ретранслятор [8] построен на схеме с двойным преобразованием частоты. Промежуточная частота составляет 44,9 МГц. На промежуточной частоте осуществляется частотная селекция посредством выбора фильтра:

- $F_{ном}$ — 44,9 МГц, $2\Delta F$ — 120 кГц;
- $F_{ном}$ — 44,893 МГц, $2\Delta F$ — 90 кГц.

Сформированный сигнал переносится на частоту 1544,9 МГц и поступает на усилитель мощности.

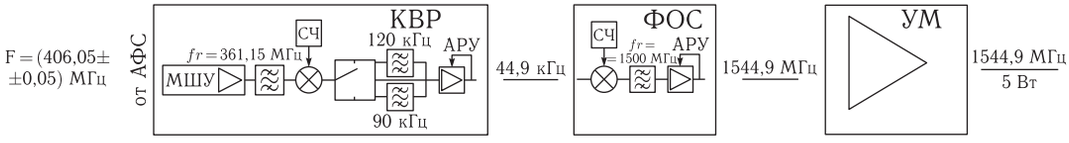


Рис. 5. Укрупненная функциональная схема БРКС КА «ГЛОНАСС-К1»: КВР — конвертер, ФОС — формирователь ответного сигнала

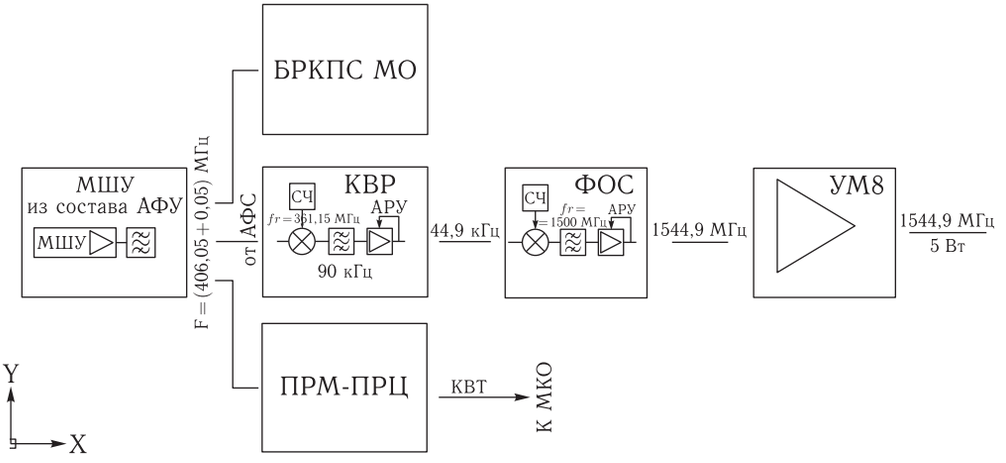


Рис. 6. Укрупненная функциональная схема перспективного БРКС-К2 КА «ГЛОНАСС-К2»

Система БРКС-К2 из состава КА «ГЛОНАСС-К2»

Система БРКС-К2, предназначенная для установки на борт планируемых КА «ГЛОНАСС-К2» 13Л и 14Л, в настоящий момент находится на стадии наземных испытаний. Таким образом, до завершения наземной отработки ее следует рассматривать только в качестве перспективной.

Одним из отличий БРКС-К2 от БРКС-К1 является вынесенный МШУ, входящий в состав АФУ КА. Кроме того, в аппаратуре БРКС-К2 отсутствуют переключаемые фильтры на промежуточной частоте. Селекция сигнала осуществляется одним фильтром с параметрами $F_{\text{ном}}$ — 44,9 МГц, $2\Delta F$ — 90 кГц. В остальном схема ретрансляции информации аналогична решению, примененному в системе БРКС-К1.

Существенным отличием систем друг от друга является наличие обратного канала с обработкой на борту сигнала квитирования (КВТ) для передачи в составе навигационного сигнала L1OC. С отдельного выхода МШУ шумоподобный сигнал КВТ на центральной частоте 405,928 МГц поступает на прибор приемник–процессор (ПРМ–ПРЦ), который осуществляет обработку, выделение и запоминание целевой информации, после чего по мультиплексному каналу обмена (МКО) «посылка» поступает в бортовой комплекс управления (БКУ) для вставки в соответствующую строку навигационного кадра. Кроме того, сигнал с выхода МШУ поступает на еще одну смежную систему специального назначения со схожим функционалом и принципом работы.

На рис. 6 представлена укрупненная функциональная схема перспективной системы БРКС-К2 для КА «ГЛОНАСС-К2».

Система БРКС-К2-М из состава КА «ГЛОНАСС-К2»

В настоящий момент находится в разработке на этапе эскизного проектирования модернизированная система БРКС-К2-М, главным отличием которой от системы БРКС-К2 является отказ

от импортных комплектующих в пользу перспективных отечественных компонентов. Технические характеристики системы, принцип работы и функциональная схема модернизированной системы предполагаются без изменений по сравнению с системой БРКС-К2. Завершение ОКР планируется в 2020 г.

Анализ характеристик бортовой аппаратуры системы КОСПАС–САРСАТ различных космических сегментов (низкоорбитального, среднеорбитального и геостационарного)

Как уже было сказано выше, в настоящее время все комплексы приема и ретрансляции сигналов системы поиска и спасания создаются по различным техническим заданиям, более того, изделия (поскольку размещаются на различных космических аппаратах) создаются по заказу различных головных предприятий. Поэтому требования, предъявляемые в технических заданиях на эту аппаратуру, как правило, тоже не совпадают.

В качестве примера можно привести требования к коммутации шины бортовой сети космических аппаратов, изготавливаемых на различных предприятиях промышленности. АО «НПО им. С. А. Лавочкина» (головное предприятие по созданию КА «Электро-Л» и «Арктика-М») придерживается принципа коммутации отрицательной шины, в то время как АО «ИСС им. академика М. Ф. Решетнева» (головное предприятие по созданию КА серии «ГЛОНАСС» и «Луч») коммутирует положительную.

В настоящей работе указанные выше вопросы рассматриваться не будут. Также не рассматриваются требования к комплексам на воздействия внешних воздействующих факторов, включая механическую вибрацию, температурный режим и воздействие факторов космического пространства. Очевидно, что эти характеристики определяются типом целевой орбиты и средствами выведения космического аппарата. При создании аппаратуры системы КОСПАС–САРСАТ применительно к указанным типам воздействий необходимо учесть самые жесткие требования, предъявляемые в настоящее время, по каждому из их типов.

Задачей настоящей работы является проведение анализа технических требований к аппаратуре КОСПАС–САРСАТ, предназначенной для размещения на космических аппаратах различных сегментов международной системы, с целью определения возможности их гармонизации при разработке максимально унифицированного решения. Основные требования к космическим комплексам всех сегментов системы КОСПАС–САРСАТ определяются системными документами Программы [4,5,7].

Рассмотрим основные технические характеристики комплексов ретрансляции сигналов системы КОСПАС–САРСАТ. В табл. 1 сведены все основные требования к аппаратуре различных сегментов: частоты приема и передачи, чувствительность, тип модуляции выходного сигнала, а также символически (в виде типов орбиты) приведены условия эксплуатации.

Анализ таблицы показывает, что базовые требования к аппаратуре всех сегментов международной системы поиска и спасания близки: комплексы должны принимать сигнал от радиобуев в диапазоне 406,0–406,1 МГц, излучать сигнал в диапазоне 1544,0–1545,0 МГц, мощность излучения должна быть порядка 5 Вт.

Тем не менее, есть и отличия. Например, уровень выходных сигналов КА «Луч-5А» и «Луч-5В» существенно ниже 5 Вт и составляет максимум 0,1 Вт. Однако даже и в таком этом случае сигнал ретранслятора принимается земной станцией с необходимым для декодирования информации соотношением сигнал–шум, поскольку параметры антенны станций приема при проектировании выбирались со значительным запасом.

Кроме того, есть отличия в требованиях по чувствительности аппаратуры. Подобное различие может определяться высотами орбит, на которых предполагается использовать соответствующие ретрансляторы. Однако разницу, например, в типах модуляции ретранслируемого сигнала объяснить нелегко.

Необходимо отметить: отличаются и конструктивные решения, что наглядно продемонстрировано на примере реализации МШУ. В случае КА «Электро-Л» или «Арктика-М», а также БРКС-К2

Таблица 1. Основные технические характеристики ретрансляторов КОСПАС–САРСАТ для разных КА

	Канал 8 БРТК «Электро-Л»	Канал 8 БРТК «Арктика-М»	БРКС-К1 КА «ГЛОНАСС-К1»	БРКС-К2 КА «ГЛОНАСС-К2»	Канал КОСПАС–САРСАТ РССПД КА «Луч-5А»	РК-СМ-МКА КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2
Частота передачи, МГц	1544,55	1544,55	1544,9	1544,9	1544,5	1544,5
Мощность излучения, Вт	> 4	> 4	3–5	3–5,5	0,01–0,1[1]	4–6
Наличие прямой ретрансляции	Есть с модуляцией типа ЛФМ	Есть с модуляцией типа ЛФМ	Есть	Есть	Есть	Есть с модуляцией типа ЛФМ
Обработка на борту	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Опционально обработка сигнала квитирования	Отсутствует	Выделение информации, а также измерение доплеровского смещения частоты и времени приема посылки, формирования информационного кадра
Обратный канал	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Полоса приема, кГц	120/30	120/30	120/90	90	90	90
Промежуточная частота, МГц	26,05/26,025	26,05/26,025	44,9/44,893	44,9	45,425	46,05
$T_ш$, К	160	160	190	150	140	Требования не предъявляются
Чувствительность по приему, дБВт	-173	-173	-160	-160	-155	-161
Автономность	Объединение по приему с каналом ССПД в диапазоне 402 МГц и МЛС в диапазоне 465 МГц	Объединение по приему с каналом ССПД в диапазоне 402 МГц	Автономная система	КВТ в составе сигнала L1OC, Объединен по приему (МШУ) со смежной системой специального назначения	Объединение по приему (402 МГц) и передаче (1697 МГц) с каналом ССПД	Автономная система
Конструктив МШУ	Выделенный прибор с внешним питанием (+15 В)	Выделенный прибор с внешним питанием (+15 В)	Интегрирован	Автономный прибор в составе АФУ	Интегрирован в объединенный ПРМ	Интегрирован
САС, лет	10	7	10	10	10	5
Условия эксплуатации (орбита)	ГСО	ВЭО типа «Молния»	Средневысокая круговая ($h = 19{,}100$ км, $i = 64{,}8$)	Средневысокая круговая ($h = 19{,}100$ км, $i = 64{,}8$)	ГСО	Низкая, близкая к круговой ($h = 900$ км, $i = 81{,}2$)

[1] Информация принимается с учетом запаса линии КА–земная станция, а также с учетом доработок, проведенных с наземным оборудованием.

Таблица 2. Предложения по унификации требований к аппаратуре КОСПАС–САРСАТ для различных платформ

Параметр	Значение
Частота передачи, МГц	1544,5 (для сформированного на борту информационного кадра для НССПС и для прямой ретрансляции для ГССПС и ВССПС); 1544,9 (для прямой ретрансляции ССССПС)
Мощность излучения, Вт	4–6
Тип ретрансляции	Прямая
Обработка на борту	1. Выделение информации, а также измерение доплеровского смещения частоты и времени посылки, формирование информационного кадра. 2. Обработка сигнала квитирования, формирование информационного кадра
Обратный канал	Да
Полоса приема, кГц	90
Промежуточная частота, МГц	44,9
$T_ш$, К	140
Чувствительность по приему, дБВт	–173
Автономность	Объединение по приему с каналом ССПД в диапазоне 402 МГц, системой специального назначения и каналом ретрансляции данных ПСД, полученных через НО ИСЗ в диапазоне 465 МГц
Исполнение МШУ	Выделенный автономный прибор с питанием от БС, в состав АФУ не входит

на «ГЛОНАСС-К2» это внешний прибор с выделенным питанием. В случае РССССПД на КА «Луч-5А» или «Луч-5В» и БРКС-К1 на «ГЛОНАСС-К1» МШУ интегрирован непосредственно в комплексы. Налицо отсутствие системного подхода и единой научно-технической политики при проектировании бортовой аппаратуры системы поиска и спасания.

В целях дальнейшего развития системы для снижения затрат на разработку и изготовление комплектов аппаратуры для разных платформ целесообразно выработать единые и максимально унифицированные требования с учетом выбора максимально жестких требований, предъявляемых к аппаратуре, функционирующей на различных орбитах.

На основе анализа ТТХ аппаратуры для различных платформ по критериям максимальной приспособленности и худшего случая были сформированы общие требования с целью ее унификации для будущих проектов. Эти предложения представлены в табл. 2.

Сформированные требования учитывают необходимость излучения сигнала на разных частотах, что определяется системными требованиями КОСПАС–САРСАТ для аппаратуры НССПС, ГССПС и ССССПС. Кроме того, предложены характеристики аппаратуры в части мощности выходного сигнала, входной полосы, чувствительности, промежуточной частоте преобразования и базовым требованиями по исполнению.

На рис. 7 представлена укрупненная функциональная схема предлагаемого унифицированного бортового комплекса системы КОСПАС–САРСАТ.

В соответствии с рис. 7 на МШУ, обеспечивающий шумовую температуру не более 140 К, осуществляется прием сигнала в диапазоне частот 400–410 МГц. МШУ должен иметь в своем составе достаточное количество выходов для обеспечения работы системы КОСПАС–САРСАТ, а также системы ССПД и смежной системы специального назначения.

В настоящий момент рассматривается вариант создания унифицированного общего конвертера для каналов КОСПАС–САРСАТ и ССПД.

В конвертере сигнал КОСПАС–САРСАТ переносится на центральную частоту 44,9 МГц или 44,5 МГц (в зависимости от исполнения)

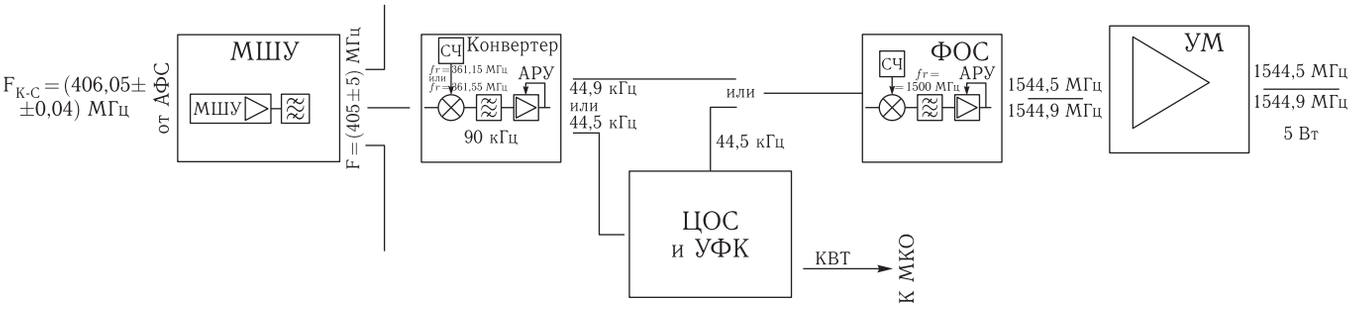


Рис. 7. Укрупненная функциональная схема унифицированного бортового комплекса системы КОСПАС–SARSAT:
МШУ — малошумящий усилитель;
АФС — антенно-фидерная система;
ФОС — формирователь ответного сигнала;
УМ — усилитель мощности;
ЦОС — цифровая обработка сигнала;
УФК — устройство формирования кадра;
СЧ — синтезатор частоты;
МКО — мультиплексный канал обмена;
КВТ — квитанция;
АРУ — автоматическая регулировка усиления

и осуществляется его фильтрация на промежуточной частоте. Таким образом, исполнения конвертера различаются частотой гетеродина, формируемой синтезатором частот (СЧ), и фильтром полосой 90 кГц на промежуточных частотах. Так, для ретрансляторов для геостационарных КА (например, серии «Электро-Л» и «Луч») или КА на высокоэллиптической орбите (например, «Арктика-М») потребуется модификация конвертера с частотой гетеродина 361,55 МГц и промежуточной частотой 44,5 МГц с соответствующей настройкой фильтра. Для ретранслятора для среднеорбитальных аппаратов серии «ГЛОНАСС» потребуется конвертер с частотой гетеродина 361,15 МГц и промежуточной частотой 44,9 МГц. При этом предполагается, что подобную конфигурацию можно осуществить за счет модификаций программного обеспечения.

С выхода конвертера сигнал поступает на ЦОС, где осуществляется его цифровая обработка и выделение информации. ЦОС также потребует различного исполнения программного обеспечения для разных проектов в связи с различными входными частотами аппаратов. В УЗФК осуществляется формирование кадра и его модуляция частотой 44,5 МГц.

Внутренняя коммутация приборов также может иметь несколько вариантов. Так, для аппаратов НССПС серии «Метеор» сигнал на ФОС поступает с УЗФК. То есть ретрансляция осуществляется посредством обработки сигнала с последующей модуляцией. Поэтому прямой связи по ВЧ между КВР и ФОС не требуется. В остальных же случаях сигнал на ФОС поступает непосредственно с КВР, поскольку только такая связь обеспечивает прямую ретрансляцию без обработки. Вообще ЦОС и УФЧ не применяются на ретрансляторах для ГССПС. На бортовых системах этих аппаратов (серия «Электро-Л», «Арктика-М», «Луч») не предусматривается обработка сигнала на борту. ЦОС и УФЧ применяются на аппаратах серии «ГЛОНАСС», поскольку в них требуется наличие обратного канала с обработкой на борту сигнала квитирования (КВТ) для передачи в составе сигнала L1OC. Но сформированная последовательность поступает через МКО в БКУ для вставки в соответствующую строку навигационного кадра.

В ФОСе сигнал (частотой 44,5 МГц или частотой 44,9 МГц) переносится в диапазон 1544 МГц (частота гетеродина 1500 МГц), после чего поступает на усилитель мощности (УМ), где усиливается до 5 Вт и поступает на АФС.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что предложенный вариант построения перспективного ретранслятора обеспечивает все необходимые варианты передачи сигнала при единой унифицированной схеме с предложенными ТТХ в табл. 2 с минимальными модификациями.

Заключение

В статье рассмотрены технические характеристики существующих и перспективных комплексов системы поиска и спасания КОСПАС–SARSAT,

предназначенных для размещения на различных космических аппаратах.

В результате проведенного анализа сформированы унифицированные требования к перспективной бортовой аппаратуре, которая при условии ее разработки и реализации в перспективных ОКР в рамках ФКП 2016–2025 или ФЦП «ГЛОНАСС» может быть размещена на космических аппаратах низкоорбитального, среднеорбитального и геостационарного (включая высокоэллиптические космические аппараты) сегментах системы.

С учетом проектирования перспективной аппаратуры КОСПАС–САРСАТ в виде комплекса базовых элементов с жестко ограниченной функциональностью, а также с учетом необходимости реализации функции обработки сигнала аварийных радиобуев на борту низкоорбитальных космических аппаратов появляется возможность создания максимально унифицированного комплекса поиска и спасания, который с минимальной реконфигурацией может быть использован на борту любого сегмента системы поиска и спасания.

Разработка максимально унифицированного комплекса позволит не только повысить его надежность и снизить затраты на разработку и производство, но также и принципиально уменьшить время на адаптацию к различным космическим аппаратам, снизить потребную номенклатуру электрорадиоизделий, расширив перечень используемых отечественных компонентов, а также продемонстрировать преимущества использования унифицированной контрольно-проверочной аппаратуры.

Список литературы

1. Документ C/S P.001R // Электрон. дан. Канады, 1988. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int
2. *Балашов А. И.*, *Зурабов Ю. Г.*, *Пчеляков Л. С. и др.* Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / Под ред. В. С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1984. 376 с.
3. *Урличич Ю. М.*, *Макаров Ю. Ф.*, *Селиванов А. С.*, *Никушкин И. В.*, *Рогальский В. И.*, *Зурабов Ю. Г.* История создания и перспективы развития международной космической системы поиска и определения местоположения терпящих бедствие судов и самолетов КОСПАС–САРСАТ // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 12–15.
4. Документ C/S T.003 // Электрон. дан. Канады, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int
5. Документ C/S T.011 // Электрон. дан. Канады, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int
6. *Семин В. И.*, *Дедов Н. В.*, *Федосеев А. В.*, *Тарасов К. В.* Настоящее и будущее космической системы поиска и спасания. Геостационарный сегмент // Телекоммункации и транспорт, 2012, № 4. С. 25–29.
7. Документ C/S T.016 // Электрон. дан. Канады, 2014. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int
8. *Ступак Г. Г.*, *Никушкин И. В.*, *Суринов А. С.*, *Рогальский В. И.*, *Косенко В. Е.* Анализ состояния и перспектив развития российского среднеорбитального сегмента международной космической системы КОСПАС–САРСАТ // Телекоммункации и транспорт, 2012, № 4. С. 29–34.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 69–76

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 621.396.7 : 338 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.69

Использование подходов «непрерывного инжиниринга» при адаптации приемных комплексов РК-СМ-МКА для размещения на борту КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2

А. А. Романов[1], А. А. Романов[2], Н. Н. Булгаков, А. Н. Ершов, А. С. Колобаев

[1,2]д. т. н., профессор
АО «Российские космические системы»

e-mail: Romanov@spacecorp.ru, Romanov_AlAl@risde.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты применения подходов «системного инжиниринга», а точнее, его относительно нового направления — «непрерывный инжиниринг» при организации проведения работ по адаптации комплекса поиска и спасания на борту космического аппарата типа «Метеор-М». Предлагается описание методики управления проектом адаптации аппаратуры комплекса поиска и спасания (изделие РК-СМ-МКА) для ее размещения на борту КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2, а также обсуждаются результаты ее применения.

Показано, что создание отдельного блока преобразования интерфейсов позволило разместить бортовой радиотехнический комплекс аппаратуры в максимально короткие сроки, тем самым обеспечив директивные сроки запуска космического аппарата.

Ключевые слова: системный инжиниринг, управление проектами, V-диаграмма, фазы жизненного цикла, непрерывная верификация, непрерывный инжиниринг

Continuous Engineering Approaches in RK-SM-MKA Adaptation for Meteor-M No. 2-1 and 2-2 Spacecrafts

A. A. Romanov[1], A. A. Romanov[2], N. N. Bulgakov, A. N. Ershov, A. S. Kolobaev

[1,2]doctor of engineering science, professor
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: Romanov@spacecorp.ru, Romanov_AlAl@risde.ru

Abstract. The paper gives the results of using the system engineering methods, more precisely, its relatively new trend — continuous engineering when performing adjustment of the search and rescue payload of the Meteor-M type. The article offers the description of the method for project management aimed at adaptation of the search and rescue complex (item PK-SM-MKA) for installation on board of the Meteor-M No. 2-1 and No. 2-2 spacecraft. The results of its application are also discussed.

It is shown, that building of a separate unit for interfaces transformation made it possible to install the onboard radio engineering complex of the equipment as soon as possible, thus having provided the scheduled time for the spacecraft launch.

Keywords: system engineering, project management, V-diagram, life cycle phases, continuous verification, continuous engineering

Введение

На сегодняшний день можно констатировать, что закон Мура все еще выполняется, то есть количество транзисторов в процессорах возрастает в 2 раза в течение двух лет. Естественным следствием этого закона является постоянное усложнение изделий различного назначения, использующее возрастающие возможности электронной компонентной базы.

В настоящее время сложность изделий космической техники также серьезно возросла. Кроме того, постоянно ужесточаются требования к изделиям с точки зрения надежности, сроков активного существования и т.д. За рубежом примерно с 70-х гг. прошлого века при проектировании изделий различного назначения начали формироваться подходы системного инжиниринга [1] (которые в настоящее время постепенно внедряются в России), жестко регламентирующие фазы жизненного цикла создания изделия в комплексе с процедурами контроля каждого из этапов, а также верификации и валидации выходных продуктов. Формируются специальные визуальные программные среды и языки объектного программирования [2], которые позволяют упростить процесс системного проектирования изделий или создания сложных систем.

На основе указанного базиса уже в настоящее время формируется множество дополнительных подходов, позволяющих повысить эффективность решения задач, возникающих при проектировании новых изделий. В рамках настоящей работы предлагается рассмотреть вопросы применения подходов «непрерывного инжиниринга» [3,4] при решении задачи адаптации комплекса поиска и спасания (изделие РК-СМ-МКА) для его установки на борт космических аппаратов серии «Метеор-М».

Непрерывный инжиниринг (НИ) предлагает методики развития предприятий для успешной разработки инновационных продуктов с постоянно растущей сложностью и связностью с учетом актуальных (или постоянно меняющихся) требований потребителя и рынка. НИ не является общей заменой подходов системного инжиниринга или существующих методик управления проектами. В рамках методик НИ происходит пересмотр ключевых подходов управления проектами путем внедрения таких мероприятий, как непрерывная верификация, разблокирование инженерных знаний и стратегическое повторное использование результатов уже проведенных разработок.

Комплекс РК-СМ-МКА предназначен для приема и обработки сигналов радиобуев системы КОСПАС–САРСАТ [5,6] и был первоначально разработан для размещения на КА «Стерх» и «Обзор-О», которые, в соответствии с международными обязательствами Российской Федерации в рамках Программы КОСПАС–САРСАТ [7], должны были быть запущены на орбиту, составив основу российского низкоорбитального сегмента. В 2015 г. из-за закрытия проектов «Стерх» и «Обзор-О» было принято решение установить РК-СМ-МКА на борт космических аппаратов «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2 при условии обеспечения запуска указанных аппаратов не позднее 2017–2018 гг.

С учетом того, что сроки адаптации комплекса для запуска космических аппаратов были крайне сжатыми, при планировании работ по этому проекту было предложено воспользоваться подходами «Continuous Engineering» — «непрерывного инжиниринга», позволяющими обеспечить своевременную поставку аппаратуры на головное предприятие.

Таким образом, в рамках настоящей работы предлагается описание методики управления проектом адаптации аппаратуры РК-СМ-МКА для ее размещения на борту КА «Метеор-М» № 2-1 и № 2-2, а также обсуждаются результаты ее применения.

Непрерывный инжиниринг

В настоящее время широко используется системный подход к проектированию сложных изделий, получивший название «системный инжиниринг». В рамках подхода системного инжиниринга все аспекты разработки продукта рассмотрены с самого начала процесса проектирования и последовательно применяются для непрерывного улучшения создаваемого продукта [1].

Очевидно, что в случае адаптации изделия, изначально предназначенного для другого космического аппарата, с учетом требований новой плат-

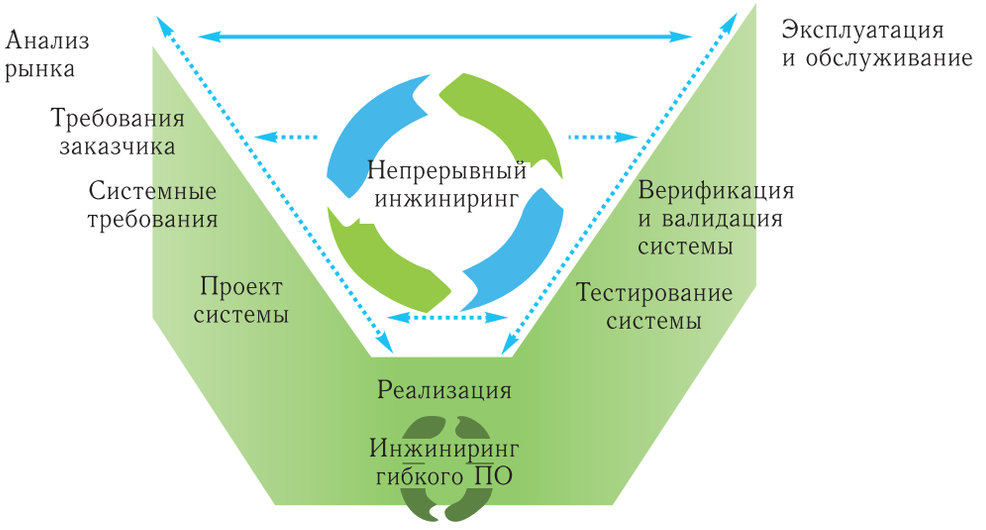


Рис. 1. V-диаграмма в представлении НИ [3]

формы КА необходимо начать проектирование с самой начальной точки — пересмотреть и изменить (при необходимости) базовые требования к изделию. Однако в таком случае становится понятным, что, возможно, будет необходимо осуществить полный цикл переработки комплекса, что потребует значительного времени и финансовых ресурсов.

Известный физик современности Стивен Хокинг сказал: «Интеллект — это способность адаптироваться к изменениям». Соответственно необходимо найти такой подход к процессу разработки продукции, который бы по крайней мере не отвергал изменения на различных стадиях проектирования продукта [3].

Подобный подход под названием «непрерывный инжиниринг» представила IBM в 2014 г. Он виделся специалистам корпорации как способность предприятия развивать сложные электронные продукты, создаваемые в интересах функционирования и развития подходов концепции интернета вещей (IoT) [4]. «Непрерывный инжиниринг» создавался на основе более чем 25-летнего опыта IBM, которая предлагала решения в рамках концепции системного инжиниринга и разработки встроенного программного обеспечения для различных производителей, включая производителей из аэрокосмической промышленности [8].

НИ представляет логическое развитие подходов системного инжиниринга. Он сохраняет фокусирование на систему, уровни абстракции и основные процессы, которые формируют базис системного инжиниринга, но добавляет новый взгляд на то, как действия соединяются между собой [3].

В рамках непрерывного инжиниринга V-диаграмма процесса разработки продукта или системы (рис. 1) больше не представляет собой последовательную серию шагов, наоборот, она предполагает выполнение действий, которые осуществляются итеративно (и с большой вероятностью параллельно) через весь процесс разработки продукта, а также связывает действия и соединения между инжиниринговыми, операционными и маркетинговыми данными [3].

Основная идея НИ состоит в сокращении дистанции между текущими планами разработки и актуальными (или вновь возникшими) требованиями, предъявляемыми к продукту.

Как уже было сказано выше, принципиальным отличием подходов НИ от традиционных подходов к проектированию изделий является его направленность на учет постоянно меняющихся требований к продукту, поскольку коммерческий успех продукта существенно определяется требованиями рынка, которые подвержены серьезным вариациям. Применяя предлагаемые в НИ методики, при условии возникновения расхождений между технической реализацией изделия и требованиями к нему в процессе непрерывного процесса верификационного

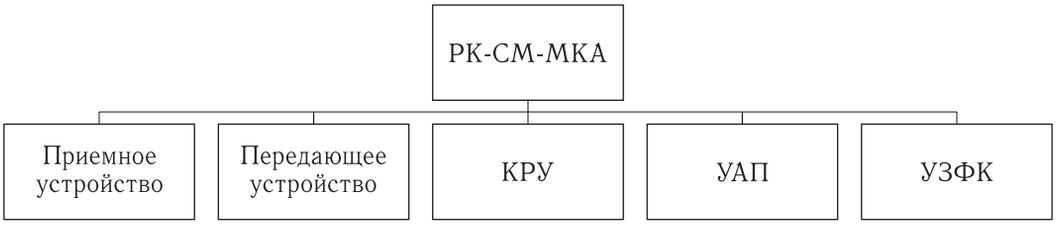


Рис. 2. Структурная схема комплекса РК-СМ-МКА

тестирования, можно будет своевременно изменить дизайн продукта непосредственно тогда, когда это необходимо.

Для того чтобы быть максимально готовым к постоянным изменениям требований, был предложен механизм (и его преимущество состоит в том, что он не выходит за рамки подходов системного инжиниринга) повторного использования разработанных продуктов или их составных частей. Более того, подобный подход может оказаться крайне эффективным для адаптации уже существующих продуктов или изделий к изменившимся условиям их использования.

Простой пример, который приведен в [3]. Если программный продукт в подсистеме продукта «Б» выполняет практически те же функции, что и в подсистеме продукта «А», может показаться, что необходимо просто скопировать программный код продукта «А» и модифицировать его для удовлетворения требований к подсистеме продукта «Б».

На первый взгляд, предложенный механизм выполнения задачи позволит ускорить процесс адаптации. Однако если код продукта «А» будет просто скопирован и изменен для использования в рамках продукта «Б», последний продукт становится собственником модифицированного кода и все верификационные тесты с этим ПО должны будут проводиться в рамках проверки продукта «Б». Нельзя просто принять, что результаты верификации кода продукта «А» применяются к продукту «Б», поскольку код продукта «А» был изменен. Более того, если найден дефект в коде продукта «А», будет сложно установить, устранен ли этот дефект в коде продукта «Б» или наоборот без проведения соответствующих работ для коррекции программного обеспечения каждого из продуктов. То есть в любом случае придется проводить работы по устранению этого дефекта дважды. Следовательно, эффективность указанного решения явно невысока.

Именно с этой точки зрения более эффективно пойти путем заимствования ранее созданных продуктов. Если при разработке подсистемы продукта «А» известно, что подсистемы продукта «Б» требуют примерно аналогичной функциональности, можно создать технические или конструкторские решения таким образом, чтобы продукт «Б» использовал части дизайна продукта «А» системно, то есть включая требования, программы испытаний, программное обеспечение и прочие элементы — без модификаций. В этом случае определенные составные части продукта «А» просто внедряются в дизайн продукта «Б» и, как видно из изложенного выше, подобный подход повторного использования результатов предшествующих разработок будет существенно эффективнее.

В соответствии с НИ необходимо принципиально разделить понятия «создание инновационного продукта или изделия» и «разработка базовых элементов или технологий». Инновационный продукт должен производиться с максимальным заимствованием уже созданных технологий или элементов, которые обеспечат ему конкурентные преимущества на коммерческом рынке.

Процесс конструирования базовых технологий должен проходить независимо и в опережение создания потребительских продуктов, четко ориентируясь на нужды потребителей или рынка в целом.

Описание комплекса РК-СМ-МКА

Комплекс РК-СМ-МКА (рис. 2) представляет совокупность приборов различного назначения: приемное устройство, передающее устройство, командно-распределительное устройство (КРУ),

устройство антенный переключатель (УАП), а также устройство записи и формирования кадра (УЗФК), которое готовит информацию для передачи в передающее устройство комплекса.

Собственно, основная проблема при адаптации комплекса РК-СМ-МКА, возникающая при размещении его на борту КА типа «Метеор», — необходимость преобразования интерфейсов обмена телеметрической и командной информацией путем модификации или новой разработки прибора УЗФК из состава комплекса под новые требования с учетом изменившейся платформы космического аппарата. В любом случае, поскольку документация на комплекс была ранее полностью верифицирована и была получена литера «О», подобные изменения аппаратуры комплекса привели бы к необходимости повторного цикла наземной отработки изделия.

Описание предлагаемой методики

При установке изделий космического назначения на космические аппараты, изначально не предназначенные для размещения вышеупомянутых комплексов, как правило, возникает необходимость внесения существенных изменений в конструкцию уже готового изделия, в силу уникальности отдельно взятой космической платформы. Вопросы унификации являются крайне важным аспектом современного космического приборостроения, которому, наконец, начали уделять необходимое внимание [9], но они не предлагаются к подробному рассмотрению в рамках настоящей статьи.

Изменения конструкторской документации при адаптации комплексов вызываются в том числе потенциальными изменениями требований по компоновке, интерфейсам аппаратуры, а также стойкости к воздействию внешних воздействующих факторов космического пространства.

Следовательно, при планировании и осуществлении необходимых доработок, как правило, начинают с изменения существующей документации и проводят модернизацию составных частей комплекса под изменившиеся требования, что, как следствие, приводит к повторению всей процедуры наземной экспериментальной отработки не только модернизированных составных частей, но и комплекса в целом. К сожалению, процессы отработки занимают очень значительное время и требуют значительных финансовых ресурсов.

В силу сложившейся практики при проектировании космического аппарата антенно-фидерный комплекс входит в радиотехнический комплекс функционально, поэтому разрабатывается и изготавливается производителем космической платформы. Именно поэтому в рамках этой работы не рассматриваются вопросы создания антенно-фидерного комплекса, а приведены только аспекты разработки бортовой аппаратуры.

При адаптации РК-СМ-МКА на борту КА типа «Метеор-М» возникла необходимость изменения конструкторской документации в части длин и структуры кабельной сети комплекса (в силу перекомпоновки изделия для размещения на борту новой платформы), введения дополнительных защитных кожухов для некоторых приборов, удовлетворяющих более жестким требованиям по внешним воздействующим факторам (ВВФ) с учетом изменившейся высоты орбиты. Кроме того, самой серьезной проблемой при решении указанной задачи являлась необходимость существенной переработки интерфейса РК-СМ-МКА в целях взаимодействия со служебными подсистемами космического аппарата.

Наиболее очевидным решением в создавшейся ситуации стало осуществление доработки прибора УЗФК, осуществляющего информационный обмен при получении команд от космического аппарата и передачу целевой информации в радиолинию. Необходимо учитывать, что комплекс РК-СМ-МКА изготавливался по «литерной» документации в рамках серийного производства. При условии принятия решения о доработке прибора УФЗК, учитывая серьезность доработок не только приборов бортового комплекса, но и приборов контрольно-проверочной аппаратуры, с большой вероятностью пришлось бы повторить циклы наземной экспериментальной отработки для подтверждения коррекций «литерной» документации.

В соответствии с договорными документами на комплекс РК-СМ-МКА полный цикл испытаний и прочих необходимых работ составляет около 24 месяцев, что не удовлетворяло срокам поставки аппаратуры, требуемых изготовителем платформы,

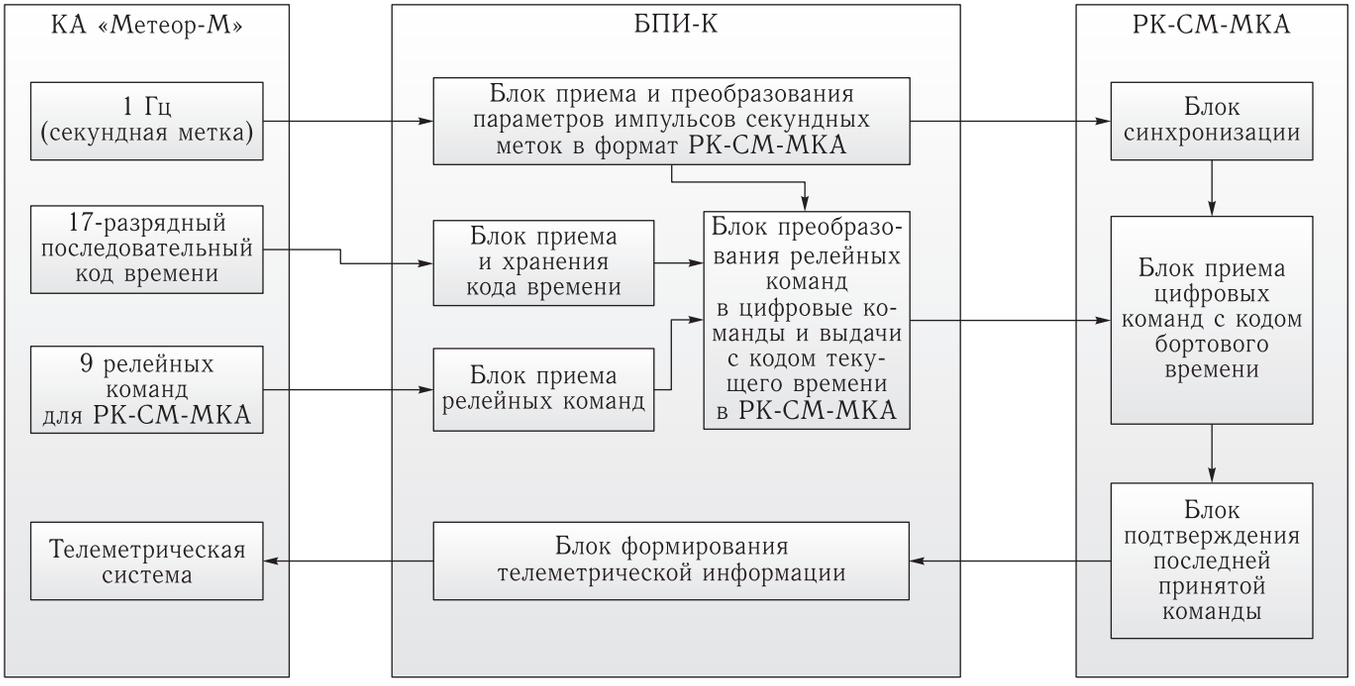


Рис. 3. Схема функционирования БПИ-К

с учетом сжатых сроков запуска космического аппарата.

Поэтому, в соответствии с подходами НИ, было принято решение не модифицировать комплекс РК-СМ-МКА в части изменения функциональности его приборов и поставлять РК-СМ-МКА в неизменном виде.

Для обеспечения адаптации комплекса была начата разработка специального и относительно простого прибора, выполняющего крайне узкую функцию преобразования интерфейсов, который бы обеспечил передачу команд на комплекс РК-СМ-МКА, а также вывод информации из комплекса в служебные системы платформы аппарата.

Описание блока преобразования интерфейсов

Блок преобразования интерфейсов (БПИ-К) представляет собой отдельный блок, в состав которого входят два независимых комплекта, основной и резервный, включенных по схеме ненагруженного (холодного) резервирования, что обеспечивает соответствующий требованиям уровень надежности.

БПИ-К осуществляет прием релейных команд последовательного 17-разрядного кода бортовой шкалы времени (БШВ) в формате бортового комплекса управления (БКУ) КА «Метеор-М» и преобразование в формат, обеспечивающий управление аппаратурой РК-СМ-МКА (рис. 3).

БПИ-К выполняет следующие функции:

– прием от БКУ КА «Метеор-М» секундной метки и передача ее с другими параметрами импульсов в РК-СМ-МКА;

– прием от БКУ КА «Метеор-М» раз в секунду последовательного 17-разрядного кода БШВ и сохранение его в буфере БПИ-К (при сохранении осуществляется перезапись предыдущего кода);

– прием от БКУ КА «Метеор-М» релейных команд и выдача в РК-СМ-МКА по интерфейсу RS232 информационного кадра (цифровой команды) с кодом принятой релейной команды и с кодом бортового времени, хранящегося в буфере БПИ-К;

– прием из РК-СМ-МКА квитанции о прохождении переданной команды;

– выдача в КА «Метеор-М» телеметрии о прохождении команды.

Результаты применения подходов НИ

Отказ от классической схемы выполнения работ в рамках подходов системного инжиниринга, готовность к гибкому изменению требований к системе или финальному продукту позволили существенно сократить сроки поставки аппаратуры. Так, срок изготовления блока преобразования интерфейсов (без учета сроков закупки комплектующих) составил не более 9 месяцев, включая циклы наземной экспериментальной отработки.

Принимая во внимание минимально необходимые доработки комплекса РК-СМ-МКА, аппаратуру поставили в сроки, обеспечивающие директивное время запуска космического аппарата. Предстоящий пуск КА «Метеор-М» № 2-1 очень важен, поскольку впервые за много лет на низкой околоземной орбите появится космический аппарат с полезной нагрузкой поиска и спасания, что позволит возобновить выполнение международных обязательств России перед программой КОСПАС–SARSAT.

Кроме того, в рамках программы импортозамещения при проектировании аппаратуры блока преобразования интерфейсов были отработаны базовые технологии программирования и функционального использования электронной компонентной базы отечественного производства, которые в перспективе предполагается использовать в прочих разработках АО «Российские космические системы».

С учетом полученного опыта, разработанного программного обеспечения (как технологического, так и целевого), схемотехнических решений, методик испытаний ЭКБ и технологических оснасток применения отечественной электронной компонентной базы можно резюмировать, что был получен набор инженерных «артефактов», которые позволят повысить эффективность перспективных разработок приборов космического базирования, что особенно важно при применении отечественной ЭКБ.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что в сложившейся ситуации космическая отрасль как в Российской Федерации, так и в мире все более теряет свои «драйверские» позиции по применению новейших технологий в приборостроении.

Учитывая бурное развитие рынков потребительской электроники, а также смену текущего технологического уклада и постоянное усложнение разрабатываемых изделий, становится понятным, что необходимо менять управленческие подходы к организации работ при проведении научных исследований и разработок по созданию космической техники, ориентируясь и адаптируя (бесспорно) опыт создания приборов для массового рынка.

Показано, что применение подходов «непрерывного инжиниринга», основанного на базовых принципах классического системного инжиниринга, может сократить время выполнения работ по адаптации аппаратуры РК-СМ-МКА для размещения на борту КА типа «Метеор-М».

Предложена методика управления проектом с использованием подхода стратегического повторного использования ранее выполненных разработок НИ. В соответствии с приведенной методикой было принято решение не модифицировать комплекс РК-СМ-МКА и осуществить поставку в соответствии с «литерной» документацией. Для осуществления необходимых изменений при адаптации изделия было предложено разработать относительно простой прибор, выполняющий существенно ограниченную функцию — преобразование интерфейсов.

В результате было обеспечено выполнение работ по адаптации комплекса поиска и спасания для его размещения на новом для него космическом аппарате в сроки, не превышающие 9 месяцев, с учетом необходимости принципиальной доработки интерфейсов взаимодействия со служебными подсистемами и полной перекомпоновки на борту космического аппарата.

Список литературы

1. *Романов А. А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.

2. *Friedenthal S.*, *Moore A.*, *Steiner R.* A Practical Guide to SysML. The system modeling language. Elsevier, 2008. 577 с.

3. *Shamieh C.* Continuous Engineering for Dummies. IBM Limited Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2014. 66 с.

4. Документ What is Continuous engineering // Электрон. дан. США, 2015. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.ibm.com

5. *Урличич Ю. М.*, *Макаров Ю. Ф.*, *Селиванов А. С.*, *Никушкин И. В.*, *Рогальский В. И.*, *Зурабов Ю. Г.* История создания и перспективы развития международной космической системы поиска и определения местоположения терпящих бедствие судов и самолетов КОСПАС–САРСАТ // Телекоммункации и транспорт, 2012, № 4. С. 12–15.

6. *Урличич Ю. М.*, *Макаров Ю. Ф.*, *Селиванов А. С.*, *Никушкин И. В.*, *Рогальский В. И.*, *Архангельский В. А.*, *Зурабов Ю. Г.* Принцип действия и основные характеристики системы КОСПАС // Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 4. С. 15–20.

7. Документ C/S P.001R // Электрон. дан. Канады, 1988. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.cospas-sarsat.int

8. *Uckelmann D.*, *Harrison M.*, *Michahelles F.* An Architectural approach towards the future internet of things. Architecting the internet of things. Springer. IEEE World Forum, 2014. P. 89–93.

9. Космическое приборостроение России: объединение для прорыва // Электрон. дан. России, 2016. Заглавие с экрана. Режим доступа: http://www.russianspacesystems.com/2016/10/04/kosmicheskoe-priborostroenie-rossii

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 77–86

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 621.396.7 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.77

Пути повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ

В. А. Архангельский[1], **В. В. Селезнев**[2]

[1]*к. т. н., доцент,* [2]*к. т. н.*
АО «Российские космические системы»

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Аннотация. В статье анализируются способы повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев на наземных станциях среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ. Описываются отличия решения навигационной задачи в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ от решения навигационной задачи в классических радионавигационных системах. Подробно описан метод, позволяющий добиться значительного увеличения точности измерений частоты и соответственно точности определения координат узкополосных буев (буев первого поколения).

Показано, что некоторого улучшения точности можно достичь за счет использования измерений времен прихода сигнала на спутник-ретранслятор и оптимизацией выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн наземных станцией. Рассмотрены широкополосные аварийные буи (буи второго поколения), точность независимого определения которых будет значительно выше, чем буев первого поколения.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, СССПС, метод измерения частоты, точность, навигационная задача

Approaches to Accuracy Improvement of GNSS Independent Determination of Position Data of Emergency Radio Beacons in the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System

V. A. Arkhangel'skiy[1], **V. V. Seleznev**[2]

[1]*candidate of engineering science, associate professor,* [2]*candidate of engineering science*
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Abstract. This article analyzes the approaches to improvement of the accuracy of GNSS independent determination of position data of COSPAS–SARSAT radio beacons by the MEOLUT stations. It describes the differences in the locating process of medium Earth orbit segment of COSPAS–SARSAT and conventional space-based radio navigation systems. A method to improve the frequency measurement accuracy significantly is provided. Increasing of frequency measurement accuracy leads to an improvement in location accuracy of narrowband radio beacons (first generation beacons).

It is shown that an improvement in the measurement accuracy can be achieved by utilizing the measurements of signal arrival times at a relay satellite and an optimization of the relay satellite selection for pointing of the ground station antennas. Broadband beacons (second generation beacons) are considered, with the accuracy of their location being significantly higher than the one of the narrowband beacons.

Keywords: COSPAS–SARSAT, MEOSAR, frequency measuring, accuracy, locating

Введение

Важнейший вопрос для создающейся в настоящее время среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС) — точность независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев (АРБ). Более чем 30-летний опыт использования при поисково-спасательных операциях низкоорбитального сегмента (НССПС) показал, что обеспечиваемая в нем точность независимого определения — не хуже 5 км в 95 % случаев — достаточна для успешного проведения поиска потерпевших бедствие. Получение такой же или лучшей точности в системе СССПС связана с серьезными трудностями, которые вызваны значительно большей высотой орбит космических аппаратов (КА) в СССПС и кратковременностью и узкополосностью сигналов, излучаемых аварийными радиобуями, которых в мире в настоящее время находится в эксплуатации более 3 млн штук. Исследованию путей преодоления этих трудностей и описанию разработанных в результате этих исследований способов, методов и алгоритмов обработки принятых на станциях приема и обработки данных среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ (СПОИ-СО), посвящена данная статья.

Предварительный анализ способов независимого определения координат аварийных радиобуев в системе СССПС

В КОСПАС–САРСАТ различают 2 способа определения координат на наземных станциях приема и обработки (СПОИ). Первый — независимый от глобальных навигационных систем (ГНСС), при котором координаты АРБ определяются по навигационным измерениям его излученного сигнала. Второй — зависимый от ГНСС, при котором АРБ сам определяет свои координаты с помощью ГНСС-приемника и кодирует их в цифровом сообщении, а на СПОИ эти координаты извлекаются из цифрового сообщения.

Следует отметить, что навигационным приемником оборудованы не все АРБ. Кроме того, за годы эксплуатации независимый способ определения координат зарекомендовал себя более надежным, чем зависимый. Требования СССПС (5 км в 95 % случаев за 10 мин после активации АРБ) выдвигаются именно к независимым решениям, в то время как зависимые решения считаются опциональными и требования к ним не выдвигаются. Далее в статье под определением координат будет подразумеваться определение координат независимым образом.

Космический сегмент СССПС представляет установленные на КА ГНСС ГЛОНАСС, GPS и Galileo ретрансляторы сигналов АРБ. Эти системы в терминологии КОСПАС–САРСАТ имеют название SAR/GLONASS, SAR/Galileo, SAR/GPS и DASS/GPS (спутники системы DASS/GPS не являются штатными для СССПС, однако могут использоваться опционально). Для независимого определения координат АРБ в СССПС доступны измерения времен прихода сигнала АРБ на спутники-ретрансляторы (это время имеет обозначение *TOA*) и измерения частот этого сигнала (*FOA*). Каждая СПОИ-СО оборудована 4 и более информационно-измерительными комплексами (ИИК), причем каждый ИИК принимает ретранслированные сигналы АРБ с одного из спутников-ретрансляторов, что позволяет иметь измерения *TOA* и *FOA* от одной и той же посылки АРБ, но ретранслированные через разные КА.

Хорошо известные и широко используемые в космических навигационных системах способы решения навигационных задач, т. е. способы независимого определения координат, в системе СССПС непригодны без изменения сигналов, излучаемых радиобуями. Действительно, при ширине спектра сигнала радиобуев, равной 1,6 кГц [1], и реальных энергетических потенциалах принимаемых СПОИ-СО сигналов $H \approx 30$–35 дБГЦ ошибка измерения времени распространения сигнала от АРБ до КА будет $\sim$20 мкс и, следовательно, ошибка определения псевдодальности $\sigma_D \approx 6$ км. При такой ошибке псевдодальности получить точность определения местоположения 5 км с вероятностью 95 % при приеме всех посылок радиобуя в течение 10 мин можно только при геометрическом факторе $HDOP < 1$, что реально выполняется достаточно редко [2].

Использование доплеровского метода определения координат в СССПС затруднено из-за малости длительности интервала, на котором можно измерять частоту по немодулированной части сигнала (всего 0,16 с) и существенно меньших производных доплеровских сдвигов частоты по координатам буя из-за большой высоты орбит КА СССПС.

Хотя возможность и эффективность решения навигационной задачи только по измерениям частоты сигналов, принимаемых от нескольких навигационных КА, была показана достаточно давно [3], для использования в СССПС этой идеи необходимо повысить точность измерения частот сигналов радиобуя, ретранслированных несколькими КА.

История вопроса

С самого начала исследований и разработки системы СССПС Россия уделяла большое внимание обеспечению высокой точности определения координат радиобуев. Первые результаты этих исследований были представлены на втором заседании рабочей группы DASS-SAR/GLONASS (WG-2) 10 марта 2006 г. в Москве, в Российском институте космического приборостроения. Более полные результаты исследований были доложены на четвертой встрече WG-2 DASS-SAR/GLONASS 6–8 июня 2007 года в г. Железногорске (Россия).

В этих докладах было показано:

– при высокой точности измерения *FOA* ($\sigma_{FOA} = 0{,}04$ Hz), полностью развернутом космическом сегменте (24 КА) и наличии измерений от всех КА в зоне радиовидимости АРБ требуемая точность определения координат ($\leqslant 5$ км с вероятностью $\geqslant 0{,}95$) обеспечивается при любых движениях радиобуя в любой момент времени в любой точке земного шара. При этом в большинстве случаев получаемая точность определения координат в 3–8 раз лучше требуемых 5 км;

– совместное использование двух полностью развернутых систем 24 DASS/GPS и 24 SAR/GLONASS во всех случаях обеспечивает точность определения координат радиобуев не хуже 500 м;

– точность определения координат радиобуев по измерениям только *TOA* с ошибкой $\sigma_{TOA} = 10$ мкс значительно хуже.

Некоторые дополнительные результаты исследования точности определения координат радиобуев для отдельной московской СПОИ-СО приведены в [4]. Экспериментальные данные о точности определения координат орбитографических, тестовых и аварийных радиобуев, полученные на московской СПОИ-СО в апреле–мае 2014 г. были доложены на 28-м заседании Объединенного комитета КОСПАС–САРСАТ в июне 2014 г.

Эти данные полностью подтвердили вышеизложенные результаты теоретических исследований и моделирований. Следует также отметить, что полученные московской СПОИ-СО точности определения координат радиобуев в 3–5 раз лучше точностей, полученных СПОИ-СО других стран на фазе «Демонстрация и оценка» СССПС в 2015 г. [5].

Ключевым вопросом для получения высокой точности определения координат является получение высокой (лучше 0,1 Гц) точности измерения *FOA* на СПОИ-СО. Вопросы, касающиеся способов вычисления *FOA* и точности ее измерения, подробно обсуждались на C/S EWG-2/2009 в марте 2009 г. и 23-м Объединенном комитете КОСПАС–САРСАТ. Канада, США, Европейская комиссия и Россия изложили свои представления о методе и точности измерения *FOA*, которые реализованы на разработанных ими СПОИ-СО и предложения по их улучшению. К сожалению, дискуссии на эту тему не привели к выработке согласованного мнения по способу измерения частоты и этот вопрос остался открытым.

Точность измерений *FOA*

Способ измерения *FOA*, реализованный на российской СПОИ-СО, был кратко описан в документе C/S JC-23/8/18, представленном Россией в июне 2009 г. Так как, по-видимому, суть этого способа и ошибки измерений, влияющие на точность определения координат радиобуев, были не вполне поняты участниками обсуждений 23-го Объединенного комитета, здесь приводится более подробное описание, отражающее как методологическую, так и техническую его сторону.

Математическое определение *FOA*, а также уравнения для решения навигационной задачи

приведены в [6]. В этой же статье показывается, что для определения координат радиобуя достаточно знать разности измерений *FOA* (*DFOA*), сформированных по измерениям от одной и той же посылки АРБ, но принятых через разные КА. В этом случае ошибки измерения *FOA*, вызванные нестабильностью частоты АРБ для одной и той же посылки, ретранслированной через разные КА, **полностью исключаются**.

Потенциальная точность измерения *DFOA*, определяемая неравенством Крамера–Рао, равна

$$\sigma_{DFOA\,\min} \geqslant \frac{\sqrt{6}}{2\pi}\left(\frac{1}{(C/N_0)_1 T^3} + \frac{1}{(C/N_0)_2 T^3}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $(C/N_0)_1$ и $(C/N_0)_2$ — энергетические потенциалы сигналов радиобуя, ретранслированных двумя спутниками (1-м и 2-м соответственно);

T — длительность интервала измерения.

При $(C/N_0)_1 = (C/N_0)_2 = 35$ дБГц и $T = 0{,}44$ с

$$\sigma_{DFOA\,\min} = 0{,}034 \text{ Гц}.$$

При $(C/N_0)_1 = (C/N_0)_2 = 30$ дБГц и $T = 0{,}44$ с

$$\sigma_{DFOA\,\min} = 0{,}06 \text{ Гц}.$$

С учетом необходимого «запаса» и потерь на реализацию можно принять: требуемая точность измерения *D FOA* должна быть не хуже 0,15 Гц.

Способ измерения *FOA*, позволяющий получить точность определения *D FOA*, близкую к оптимальной

Как было показано в [6], для определения координат радиобуев достаточно знать только разности *FOA* (*D FOA*), технически удобнее в приемниках каждого канала (ствола) СПОИ-СО измерять *FOA*, а разности их получать при обработке этих измерений в алгоритме определения координат. По этой причине в данной статье описывается способ измерения *FOA*, реализованный на российской СПОИ-СО, однако при оценке ошибок измерений будем учитывать только ошибки, возникающие из-за собственных шумов ретрансляторов и, в меньшей степени, из-за шумов СПОИ-СО.

Описываемый ниже способ запатентован в России [7]. Основная идея способа измерения *FOA*, примененного на российской СПОИ-СО, которая была изложена в документе C/S JC-23/8/18 от 09.06.2012, состоит в:

1) восстановлении чистой несущей на всей длине посылки буя за счет фазовой модуляции с индексом 1,1 рад принятого сигнала посылки достоверной информацией посылки с обратным знаком (ремодуляции);

2) измерении частоты этой ремодулированной посылки с использованием алгоритма, дающего точность, близкую к потенциальной.

Для лучшего понимания идеи ниже приводится подробное описание этого способа.

Входной информацией для алгоритма измерения частоты (*FOA*) являются комплексные цифровые отсчеты принятого приемником СПОИ-СО сигнала, передаваемого спутником-ретранслятором, гетеродинированные в область нулевых частот:

$$Z_k = Z(t_k) = S(t_k) + N(t_k) = A_{sk}e^{i2\pi f t_k} + N_k, \quad (2)$$

где $t_k = k\Delta t$, $\Delta t = 10$ μs, $A_{sk} = a(t_k)e^{i2\pi\varphi_k}$, $N_k = X_k + iY_k$, $a_s(t_k)$, $\varphi_k(t_k)$ — амплитуда и фаза сигнала буя, X_k, Y_k — независимые случайные величины с $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = N_0\Delta f_{\text{ш}}$, $\Delta f_{\text{ш}} = 80$ кГц — шумовая полоса приемника.

В этой формуле присутствует сигнал $S(t_k)$ только одного буя. На самом деле одновременно в Z_k могут входить сигналы нескольких буев, а также нескольких помех. В дальнейшем описании алгоритма обработки отсчетов Z_k для упрощения изложения также будет говориться о сигнале только одного буя. Необходимые указания об изменениях или дополнениях к алгоритму, возникающие из-за наличия сигналов нескольких буев и помех, не меняющие сути описываемых алгоритмов, будут даваться в тексте по мере необходимости.

Частота f сигнала $S(t_k)$ в формуле (2) равна

$$f = (FOA + f_{\text{г.СР}})\left(1 - \frac{\dot{D}}{c} + \Delta_{\text{рел.}}\right) - f_{\text{г.СПОИ-СО}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{г.СР}}$ — частота гетеродина спутника-ретранслятора,

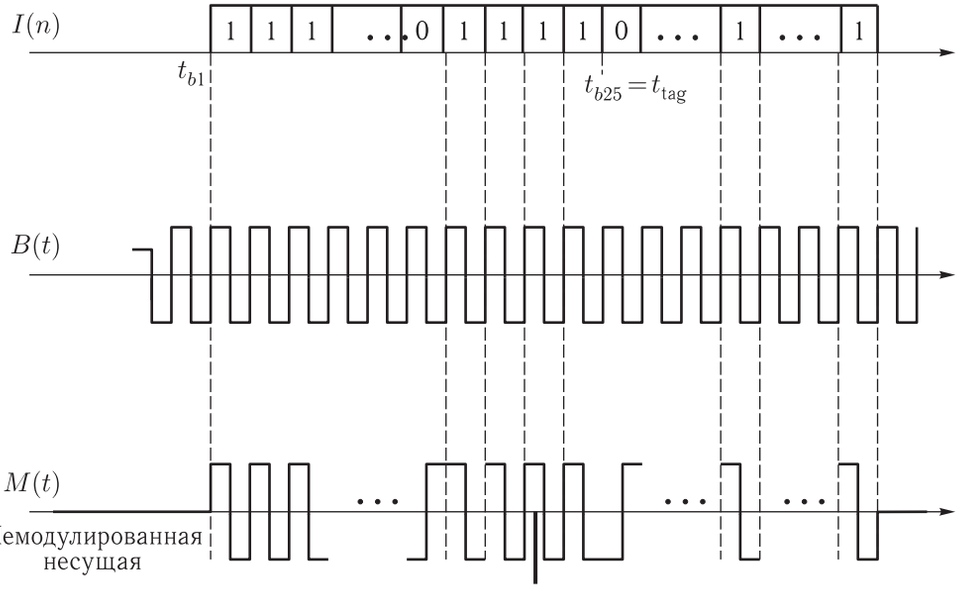


Рис. 1. Графики функций $I(n)$, $B(t)$, и $M(t)$

$f_{\text{г.СПОИ-СО}}$ — частота гетеродина приемника СПОИ-СО,

$\Delta_{\text{рел.}}$ — релятивистская поправка,

$\dot{D}$ — радиальная скорость КА относительно СПОИ-СО,

c — скорость света.

Частота гетеродина спутника-ретранслятора формируется из частоты высокостабильного генератора навигационного сигнала спутника, а частота гетеродина приемника СПОИ-СО формируется из принятой на СПОИ-СО частоты навигационного сигнала, излучаемого этим спутником и равна

$$f_{\text{г.СПОИ-СО}} = \\ = (406{,}05 \cdot 10^6 \text{ Гц} + f_{\text{г.СР}}) \left(1 - \frac{\dot{D}}{c} + \Delta_{\text{рел.}}\right). \quad (4)$$

Подставляя это значение в (3) и учитывая, что частота квантования цифровых отсчетов Z_k в формуле (2) $F_{\text{кв.}} = \frac{1}{\Delta t}$ также формируется из частоты принятого на СПОИ-СО навигационного сигнала, получим

$$f = FOA - 406{,}05 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (5)$$

Возможные значения f лежат в области ± 40 кГЦ.

Фаза сигнала буя $\varphi(t_k)$ равна

$$\varphi_k = \varphi(t_k) = \varphi_0 + 1{,}1 \text{ рад} \cdot M(t_k), \quad (6)$$

где φ_0 — начальная фаза сигнала, то есть фаза сигнала в момент времени начала 25 бита цифровой информации сообщения посылки буя (t_{tag}),

$M(t_k)$ — функция, определяемая информацией, заложенной в посылку буя.

$$M(t_k) = \begin{cases} 0 \quad \text{при } -22\,000 \leqslant k < -6000, \\ B(t_k)[2I(n) - 1] \\ \quad \text{при } -6000 \leqslant k \leqslant 22\,000, \end{cases} \quad (7)$$

где $I(n) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ — двоичная цифровая последовательность посылки буя,

n — номер бита этой последовательности,

$B(t_k)$ — меандр с частотой $F_B \approx 400$ Гц, то есть периодом, равным длительности одного бита 2,5 мс $= 250\Delta t$;

$$B(t_k) = \begin{cases} 1 \quad \text{при } t_{bn} \leqslant t_k \leqslant t_{bn} + 125\Delta t, \\ -1 \text{ при } t_{bn} + 125\Delta t \leqslant t_k \leqslant t_{bn} + 250\Delta t, \end{cases} \quad (8)$$

где t_{bn} — момент начала n-го бита,

$t_{b25} = t_{\text{tag}}$ — начало отсчета времени в посылке, то есть за начало отсчета последовательности t_k принят момент времени $t_0 = t_{\text{tag}}$,

$$t_{bn} = t_{\text{tag}} - 6250\Delta t + 250n\Delta t. \quad (9)$$

На рис. 1 представлены графики функций $I(n)$, $B(t)$ и $M(t)$. На этих графиках моменты времени t_k не показаны.

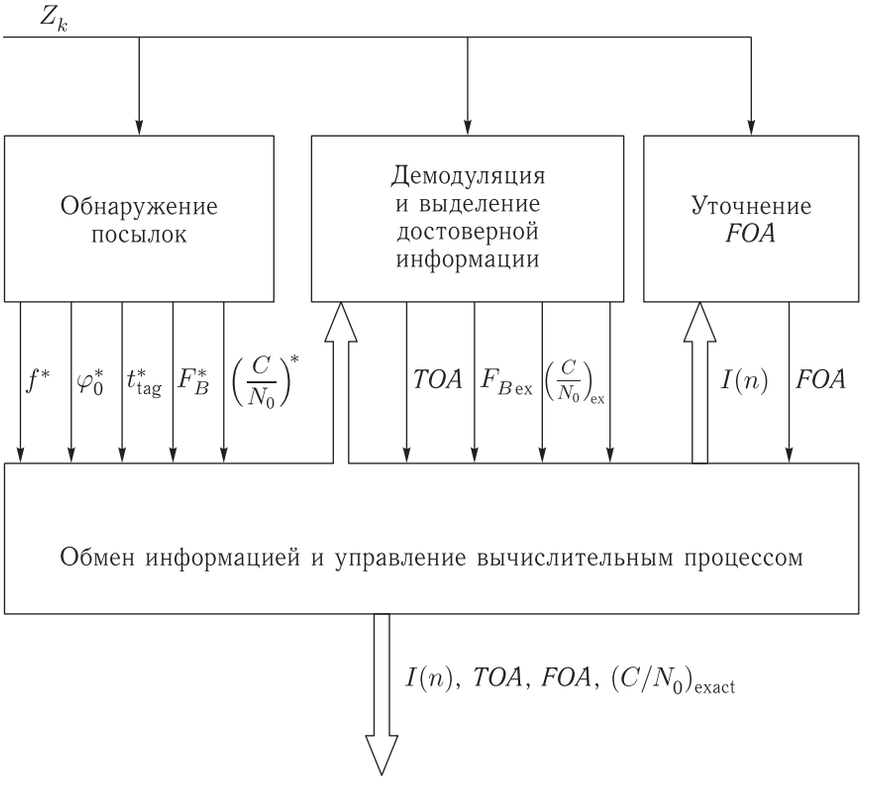


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма обработки комплексных цифровых отсчетов с выхода одного канала СПОИ-СО

Алгоритм обработки комплексных цифровых отсчетов Z_k с выхода приемника каждого ИИК СПОИ-СО можно разделить на четыре взаимодействующих блока, функциональная схема взаимодействия которых показана на рис. 2. Входной поток Z_k поступает на блоки пакетами. Начало каждого пакета привязано к шкале времени навигационного сигнала, для чего используется время, полученное от приемника навигационного сигнала, принимаемого с того же спутника, что и сигнал СПОИ-СО, тактовая частота опроса (100 кГц) также формируется из принятого навигационного сигнала. Таким образом, любое значение Z_k является точно привязанным к бортовому времени спутника-ретранслятора.

Блок обнаружения посылок состоит из двух алгоритмов, решающих задачи обнаружения и предварительного (приближенного) измерения их параметров:

– алгоритма быстрого преобразования Фурье, который обнаруживает несущую частоту посылки и определяет ее значение (f^*), фазу φ_0^* и $(C/N_0)^*$ — отношение сигнал/шум посылки;

– алгоритма корреляционного анализа наличия синхрослова (первые 24 бита цифровой части посылки, одинаковые для всех посылок) и определения t_{tag}^*.

Здесь и далее верхним индексом «*» обозначаются приближенные значения параметров посылки. Для получения более точных значений f^* и t_{tag}^* используется квадратичная аппроксимация дискретных значений основного пика результата БПФ и корреляционной функции (рис. 3).

Используются три значения амплитуды спектральных отчетов БПФ:

– наибольшее — a_1 с частотой f_1,

– отстоящее от него на $-\Delta$ по частоте — a_2,

– отстоящее от a_1 на $+\Delta$ по частоте — a_3.

Значение частоты максимум a в спектре вычисляется с помощью параболической аппроксимации и находится по формуле:

$$f_m^* = f_1 + \delta = f_1 - \frac{a_2 - a_3}{a_1 - \frac{a_2 + a_3}{2}}. \qquad (10)$$

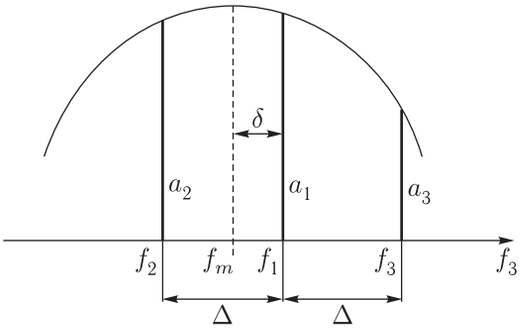


Рис. 3. Отсчеты амплитуд спектра, полученные БПФ в области максимума его огибающей

Аналогично вычисляется и $t^*_{\text{tag}.m}$.

Кроме этих функций, блок обнаружения посылки определяет значение тактовой частоты посылки (F^*_B) и проверяет посылку на достоверность, ее длительность и положение временной метки t^*_{tag} в середине посылки.

Полученные в результате работы этого блока приближенные значения параметров посылки f^*, φ^*_0, t^*_{tag}, F^*_B и $(C/N_0)^*$ используются последующими блоками в качестве необходимых исходных данных.

Блок обнаружения должен обнаруживать все посылки от всех буев, имеющиеся в потоке входных данных Z_k, полученном от данного спутника-ретранслятора, $(C/N_0)^*$ которых превышает заданный порог.

Блок демодуляции и выделения достоверной посылки, используя параметры f^*, φ^*_0, t^*_{tag}, F^*_B, $(C/N_0)^*$, производит демодуляцию посылки точно таким же образом, как это делается в геостационарном сегменте, выделяя из нее информацию $I^*(n)$ и затем, с помощью декодера БЧХ исправляет в $I^*(n)$ все неверные биты. Если произошло исправление не более двух ошибок и, кроме того, в синхрослове все 9 бит, начиная с 16 и по 24, верные — посылка считается достоверной и ее можно обозначать $I(n)$ (без звездочки). Если же в результате процедур декодирования БЧХ и проверки синхрослова посылка признана недостоверной, то включается процесс накопления сигнала посылки путем суммирования соответствующих значений Z_k, полученных от двух или более соседних по времени посылок.

Распознавание посылок от одного и того же буя производится по параметрам f^* и t^*_{tag}. Демодуляция посылки, полученной в результате суммирования, дает более достоверную информацию ($I^*(n)$), которая после декодирования БЧХ и верификации синхрослова дает правильное $I(n)$ с большей вероятностью.

Кроме этой основной функции, блок демодуляции и выделения достоверной посылки уточняет необходимые для точной демодуляции параметры посылки $t_{\text{tag exact}} = TOA$ и $F_{B\,\text{exact}}$.

Блок уточнения *FOA*, используя параметры посылки f^*, φ^*_0, определенные блоком обнаружения, и $I(n)$, $t_{\text{tag exact}}$, $F_{B\,\text{exact}}$, полученные от блока демодуляции и выделения достоверной посылки, уточняет f^*, получая в результате более точное значение f_{exact}, то есть *FOA*.

Значение *FOA* вычисляется для **каждой** обнаруженной посылки, в том числе и тех посылок, по которым не получено достоверной информации ($I^*(n) \neq I(n)$), а достоверная информация $I(n)$ получена после суммирования сигналов нескольких посылок.

Полученная информационная последовательность $I(n)$ может быть использована для вычисления *FOA* любой посылки этого буя, причем в том числе в каналах приема сигналов этого буя через другие спутники-ретрансляторы. Такое использование $I(n)$ существенно увеличивает число посылок, параметры *FOA* и *TOA* которых могут быть измерены и, следовательно, повышает надежность и точность определения координат этого буя.

Уточненное значение *FOA* вычисляется по формулам, которые являются реализацией метода наименьших квадратов для данного случая:

$$FOA = f^* + F, \tag{11}$$

где

$$F = \frac{3I_m\left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k)k\right]}{2\pi a^* N(N+1)(2N+1)\Delta t} \cong$$
$$\cong \frac{6}{2\pi TN} \cdot \frac{Im\left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k)k\right]}{\text{Re}\left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k)\right]}. \tag{12}$$

В этих формулах

$F = f_{\text{ex.}} - f^*$ — уточнение предварительной оценки частоты f^*;

a^* — оценка амплитуды сигнала буя

$$a^* = \frac{1}{2N}\mathrm{Re}\left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k)\right]; \qquad (13)$$

Z_k — комплексные цифровые отсчеты сигнала с выхода приемника;

K — номер отсчета Z_k.

За нулевой номер ($k = 0$) принят момент времени $t^*_{\text{tag exact}} = TOA$;

$\Delta t = 10$ мкс — интервал квантования;

$N = \frac{T}{2\Delta t} = 22\,000$;

$T = 2N\Delta t$ — длительность посылки буя (440 мс);

$S_0^*(t_k)$ — нормализованное (с амплитудой, равной 1) комплексно-сопряженное значение сигнала с подставленными в него значениями частоты f^*, фазы φ_0^* и $I(n)$, то есть

$$S_0^*(t_k) = e^{-i[2\pi f^* t_k + \varphi_0^* + 1{,}1M(t_k)]}; \qquad (14)$$

$\mathrm{Re}[\,]$, $\mathrm{Im}[\,]$ — действительная и мнимая части комплексного выражения в квадратных скобках соответственно.

Формулы (12) и (13) дают достаточно высокую точность определения *FOA* и a^*, если ошибка предварительной оценки f^* не превышает 0,5 Гц, что обеспечивается алгоритмом обнаружения, описанным выше, при $\frac{C}{N_0} \geqslant 30$ дБГц. При больших ошибках предварительного определения f^* можно сделать второе приближение для вычисления FOA_2, использовав в формулах (11)–(14) вместо f^* *FOA* первого приближения (FOA_1).

Среднеквадратическая ошибка измерения *FOA* за счет шумов ретранслятора и MEOLUT равна

$$\sigma_{FOA} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi T\sqrt{(C/N_0)T}}, \qquad (15)$$

а с. к. о. амплитуды посылки

$$\frac{\sigma_a}{a} = \frac{1}{\sqrt{2(C/N_0)T}}. \qquad (16)$$

При $C/N_0 = 26$ дБГц, $\sigma_{FOA} = 0{,}067$ Hz, а $\frac{\sigma_a}{a} = 5{,}33\,\%$

При этих оценках не учтены ухудшения, вызванные неидеальностью формы модулирующего сигнала, а также возникающие из-за ошибок $t^*_{\text{tag exact}} = TOA$ и $F_{B\,\text{exact}}$. Поэтому реальные значения σ_{FOA} и $\frac{\sigma_a}{a}$ в $\sim$1,5 раза хуже.

При больших (C/N_0) ошибки σ_{FOA} и σ_a будут, естественно, уменьшаться.

Кроме ошибок от шумов приемников на спутниках-ретрансляторах и СПОИ-СО и ошибок от нестабильностей частоты и фазы передатчиков буев, ошибки измерения *FOA* вызываются также нестабильностями условий распространения радиоволн в ионосфере на путях их распространения от буя до спутников, так называемые ионосферные ошибки. В разных областях ионосферы, через которые проходит путь распространения, эти ошибки только частично компенсируются, а их флюктуации на интервале длительности посылки практически независимы.

Проведенные оценки этих ошибок показали, что в периоды большой солнечной активности с. к. о. ионосферных ошибок *FOA* могут достигать величины

$$\sigma_{FOA\,\text{ion.}} = 0{,}05 \text{ Гц}.$$

Тогда суммарная величина вычисления разности *FOA* (*DFOA*) при $C/N_0 = 30$ дБГц может достигать

$$\sigma_{FOA\,\text{sum}} = 0{,}093 \text{ Гц}.$$

Другие способы повышения точности определения координат буев

Как отмечалось выше, высокая точность измерений *FOA* ($\sigma_{FOA\,\text{sum}} = 0{,}093$ Гц) позволит определять координаты неподвижных радиобуев при полностью развернутой системе спутников-ретрансляторов ($\geqslant 24$ КА) в любой момент времени, в любой точке земного шара с ошибкой $\leqslant 2$ км, с вероятностью $\geqslant 95\,\%$ при использовании измерений *FOA*, полученных от 3–4 спутников-ретрансляторов.

Для определения координат радиобуев, движущихся на море под действием течений, ветра и качки от волнения моря для решения 6-параметрической навигационной задачи (2 координаты, неопределенность частоты и три компонента вектора скорости буя), необходимы измерения *FOA*, полученные в общем случае не менее чем через

6 спутников-ретрансляторов, находящихся не менее чем в 3 разных орбитальных плоскостях. Такое возможно только при полностью развернутом космическом сегменте — не менее 24 КА на орбитах и наличии на СПОИ-СО не менее 6 антенн.

В некоторых случаях требуемую точность определения координат радиобуев, движущихся на море со скоростью до 3 м/с (6 узлов), можно получить и при использовании меньшего числа антенн на СПОИ-СО за счет применения, кроме измерений *FOA*, еще и измерения *TOA*.

Для того чтобы измерения *TOA* реально могли дать требуемую или близкую к ней точность определения координат буев, необходимо принять все меры по уменьшению погрешностей их измерений.

Первая из таких мер — использование усреднения измерений *TOA* за интервал времени 10–15 мин, т. е. получение по 12–18 измерений через каждый спутник-ретранслятор. Такое усреднение позволит в отсутствие негауссовых помех уменьшить ошибку измерения *TOA* в 3,5–4 раза, т. е. до величин 6–8 мкс вместо достигнутых на сегодняшний день на всех СПОИ-СО 20–30 мкс. Для усреднения измерений *TOA* (так же, как и *FOA*) нет необходимости использовать специальные алгоритмы и программы, так как это усреднение оптимальным образом реализует алгоритм метода наименьших квадратов, который используется при определении АРБ на СПОИ-СО.

Кроме этого, необходимо уменьшить систематические ошибки измерений *TOA*, вызванные неизвестностью (неопределенностью) и нестабильностью задержек сигналов в бортовой аппаратуре спутников-ретрансляторов. Для этой цели кажется наиболее приемлемым предложение Франции о юстировке спутников-ретрансляторов по сигналам орбитографических и тестовых буев с известными координатами. При этом следует отметить, что при такой юстировке не требуется высокая точность привязки моментов излучения этих буев, так как на ошибку определения координат буев по измерениям *TOA* (так же, как и по измерениям *FOA*) влияют только ошибки измерений (вычислений) разностей *TOA* (*DTOA*), полученных через разные спутники-ретрансляторы, а отнюдь не абсолютные значения ошибок *TOA*, вызванных задержками каждого ретранслятора. При реализации такой юстировки задержек сигнала в ретрансляторах следует учитывать, что из-за их узкополосности величина задержек зависит от частоты ретранслированного сигнала (фазово-частотная характеристика ретранслятора нелинейна). Поэтому юстировку необходимо проводить на нескольких частотах (литерах) работы буев. Методика проведения и обработки юстировки задержек должна быть разработана.

Преимуществом этого способа является то, что для определения координат медленно-двигающихся на море под воздействием ветра, качки и течения АРБ не требуются измерения, полученные одновременно через 6 спутников-ретрансляторов (т. к. измерения *TOA* не зависят от скорости АРБ). Для получения ошибки определения координат $\leqslant$ 5–7 км с вероятностью 95 % достаточно измерений *TOA*, полученных всего от 4-х спутников-ретрансляторов. Это существенно упрощает практическую реализацию этого способа при не полностью развернутом космическом сегменте СССПС. Результаты моделирования определения координат движущихся радиобуев за счет использования измерений *TOA* в дополнение к *FOA* приведены в статье [6]. К сожалению, данный способ пока еще не получил экспериментального подтверждения.

Еще один способ повышения точности определения координат радиобуев — оптимальный выбор спутников-ретрансляторов, по которым проводятся измерения СПОИ-СО из всех видимых. Этот способ эффективен при недостаточном числе антенн на СПОИ-СО. Алгоритм оптимального планирования перенацеливания антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы, реализующие этот способ, описан в [8].

И, наконец, очень эффективным способом повышения точности координат радиобуев, который может и должен быть реализован в более далекой перспективе, является переход в системе КОСПАС–SARSAT к использованию широкополосных радиобуев [9]. Кроме повышения точности определения координат до величин порядка 200–300 м с вероятностью 95 % буев, движущихся с любой скоростью (в том числе и авиационных в падении), этот способ позволит уменьшить влияние узкополосных помех от радиосредств, незаконно работающих в диапазоне частот КОСПАС–SARSAT.

К сожалению, переход системы КОСПАС–САРСАТ полностью на широкополосные радиобуи потребует значительного времени, по-видимому, не менее 7–10 лет. До этого необходимо использовать вышеперечисленные способы.

Выводы

Существенное повышение точности определения координат радиобуев первого поколения в СССПС может быть получено за счет уменьшения ошибок измерений частоты *FOA*, вызванных собственными шумами приемников спутников-ретрансляторов и СПОИ-СО посредством увеличения интервала измерения *FOA* до полной длительности посылки радиобуя. Среднеквадратическая ошибка разностей измерений *FOA* (*DFOA*) не должна превышать 0,15 Гц, что соответствует ошибкам измерений *FOA*, вызванным собственными шумами спутников-ретрансляторов и СПОИ-СО $\sigma_{FOA\text{noise}} < 0{,}1$ Гц.

Некоторого улучшения точности определения координат АРБ первого поколения можно достичь с помощью измерений *TOA*. Целесообразно производить усреднение этих измерений за 10–15 мин и юстировку бортовых задержек сигналов в спутниках-ретрансляторах по сигналам орбитографических и тестовых буев. Этот способ требует разработки соответствующей методики юстировки и экспериментальной проверки. Точность определения координат АРБ только по измерениям *TOA* значительно ниже, чем при использовании *FOA*, однако при определенных условиях в некоторой зоне она может быть порядка требуемых 5 км.

Определенную помощь в повышении точности определения координат буев может оказать оптимизация планирования перенацеливания антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы, минимизирующая ошибки определения в зоне обслуживания СПОИ-СО.

В более отдаленной перспективе эффективным способом получения высокой точности определения координат (200–300 м) является использование широкополосных буев КОСПАС–САРСАТ второго поколения.

Список литературы

1. Specification for COSPAS–SARSAT 406 MHz distress beacons // C/S T.001 Issue 3 — Revision 16. December 2015.
2. *Шебшаевич В. С.*, *Дмитриев П. П.*, *Иванцевич Н. В.*, *Калугин А. В.*, *Ковалевский Э. Г.*, *Кудрявцев И. В.*, *Кутиков В. Ю.*, *Молчанов Ю. Б.*, *Максютенко Ю. А.* Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1982.
3. *Неволько М. П.*, *Архангельский В. А.*, *Михайлов А. В.*, *Кульнев В. В.* К вопросу о навигации потребителей с помощью навигационных спутников // Космические исследования, 1985, т. 23, № 6. С. 80.
4. *Arkhangelskiy V.*, *Beloglazova N.*, *Antonov D.* COSPAS–SARSAT EWG-1/2012. Impact Of TOA/FOA Measurement Accuracy And Number of MEOLUT Antennas On Location Accuracy (Stand-Alone Moscow MEOLUT emulation). 26–30 March 2012, Montreal, Canada. http://www.cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/EWG-1%202012%20Presentation-1-Russia.pdf (Дата обращения: 23.03.2017), 15 p.
5. *Антонов Д. В.*, *Федосеев А. В.* Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
6. *Антонов Д. В*, *Архангельский В. А.*, *Белоглазова Н. Ю.* Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
7. Способ измерения частоты сигналов посылок радиобуев в космической системе поиска и спасания. Патент на изобретение № 2592050, Россия, 2015 г. Патентообладатель: АО «Российские космические системы». Авторы: А. М. Петушков, Е. О. Романов, В. В. Селезнев, В. А. Архангельский, Н. В. Дедов.
8. *Антонов Д. В.* «Оптимальное планирование наведения на КА наземных антенн среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 4. С. 17–22.
9. Second Generation 406 MHz Beacon Implementation Plan // C/S R.017 Issue 1 — Revision 5. May 2016.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 3, с. 87–97

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 621.396 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3.87

Текущее состояние и основные характеристики геостационарных спутников-ретрансляторов системы КОСПАС–САРСАТ на базе космических аппаратов «Луч-5А» и «Луч-5В»

В. А. Архангельский[1], **Н. В. Дедов**[2], **А. И. Литвин**[3], **А. И. Останний**[4], **В. И. Семин**[5], **А. В. Федосеев**[6], **М. Ю. Новиков**[7], **В. А. Портнягин**[8], **С. М. Роскин**[9], **Н. А. Тестоедов**[10]

[1]*к. т. н.,* [10]*д. т. н., член-корр. РАН*
[1–6]*АО «Российские космические системы», Москва, Россия*
[7–10]*АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева», г. Железногорск, Россия*

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Аннотация. В статье приводятся результаты летных испытаний российских геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ, созданных на базе спутников-ретрансляторов (СР) «Луч-5А» и «Луч-5В» Многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч» и земных станций приема информации аварийных радиобуев (СПИАБ).

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, поисково-спасательные работы, российский сегмент, спутник-ретранслятор, «Луч-5А», «Луч-5В»

Current Status and Main Performance Characteristics of COSPAS–SARSAT Louch-5A and Louch-5V Geostationary Satellites

V. A. Arkhangel'skiy[1], **N. V. Dedov**[2], **A. I. Litvin**[3], **A. I. Ostanniy**[4], **V. I. Semin**[5], **A. V. Fedoseev**[6], **M. Yu. Novikov**[7], **V. A. Portnyagin**[8], **S. M. Roskin**[9], **N. A. Testoedov**[10]

[1]*candidate of engineering science,*
[10]*doctor of engineering science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences*
[1–6]*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia*
[7–10]*ISS-Reshetnev Company, Zheleznogorsk, Russia*

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of in-orbit validation tests of the COSPAS-SARSAT GEOSAR system based on Louch-5A and Louch-5V satellites of the Multifunctional Space Relay System (MSRS) Louch and Russian GEOLUTs.

Keywords: COSPAS–SARSAT, search and rescue operations, Russian segment, relay satellite, Louch-5A, Louch-5V

Введение

Геостационарные сегменты системы КОСПАС–САРСАТ (GEOSAR) начали создаваться разными странами мира (США, Европейским Союзом, Индией, Россией) в 90-е гг. прошлого века как дополнительный сегмент системы к эксплуатируемому низкоорбитальному сегменту сегменту системы КОСПАС–САРСАТ (LEOSAR). Системы GEOSAR значительно повышают оперативность обнаружения сообщений аварийных радиобуев (АРБ) по сравнению с существующими системами LEOSAR. За исключением полярных районов, максимальное время получения достоверного сообщения АРБ в системах GEOSAR не превышает 10 мин, что существенно меньше, чем в низкоорбитальном сегменте, где оно доходит до 1,5–2 ч.

Включение в состав АРБ навигационной аппаратуры потребителей (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS) позволяет определять координаты АРБ с точностью до десятков метров. Если же в АРБ нет НАП, геостационарные спутники системы КОСПАС–САРСАТ позволяют оперативно оповещать о факте аварии, в то время как координаты терпящего бедствие АРБ будут получены с помощью системы LEOSAR с запаздыванием.

Геостационарный сегмент состоит из КА на геостационарной орбите с установленным на нем ретранслятором сигналов АРБ и приемных земных станций. Бортовой ретранслятор сигналов АРБ принимает аварийные посылки в диапазоне частот 406,0–406,1 МГц и ретранслирует их в диапазоне частот 1544,5±0,05 МГц на приемные земные станции, которые обнаруживают ретранслированные посылки АРБ и выделяют из них достоверную информацию.

Ретрансляторы сигналов АРБ системы КОСПАС–САРСАТ обычно устанавливаются на спутники другого целевого назначения в качестве дополнительной нагрузки. В настоящее время ретрансляторы сигналов АРБ геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ установлены на российские КА «Луч-5А» (167° в. д.) и «Луч-5В» (95° в. д.) МКСР «Луч», КА «Электро-Л» №2 (76° в. д.) и на зарубежные космические аппараты: Европейского Союза — КА серии «MSG» (3,4° з. д.; 0°; 9,5° в. д.), США — КА серии GOES (75° з. д.; 105° з. д.; 135° з. д.) и Индии — КА INSAT-3D (82° в. д.).

В качестве приемных земных станций для геостационарного наземного сегмента на базе КА «Луч-5А» и «Луч-5В»используются приемные земные станции СПИАБ, успешно прошедшие испытания с КА «Электро-Л».

В статье приведены результаты летных испытаний российских геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ, созданных на базе спутников-ретрансляторов «Луч-5А» и «Луч-5В» и земных станций приема информации аварийных радиобуев (СПИАБ), а также результаты международных испытаний геостационарной спутниковой системы поиска и спасания на базе КА «Луч-5А».

Зависимость основного функционального параметра геостационарной системы (КА + СПИАБ) от характеристик спутника-ретранслятора

Основной функциональный параметр геостационарного сегмента КОСПАС–САРСАТ — **вероятность получения достоверной посылки** ($P_{\text{дост.}}$) от АРБ, находящегося в зоне видимости СР, за заданное время (не более 5 мин) [1].

При использовании СР радиолиния, по которой передается сигнал АРБ на СПИАБ, состоит из двух участков: АРБ–СР и СР–СПИАБ.

Общий вид земной станции СПИАБ, а также КА «Луч-5А» и «Луч-5В» представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Вероятность $P_{\text{дост.}}$ зависит от энергетического потенциала (H), т. е. отношения мощности сигнала $P_{\text{с}}$ посылки к спектральной плотности мощности шума $N_{\text{ш}}$ на входе приемника СПИАБ, а также от параметров сигнала посылки: числа и длительности символов (бит) в посылке, типа и индекса модуляции, метода и параметров примененного кода для обнаружения и исправления ошибок. Эти параметры сигнала посылки в системе КОСПАС–САРСАТ были выбраны в 70-е гг. прошлого века при проектировании низкоорбитального сегмента этой системы [2], т. е. задолго до начала проектирования геостационарного сегмента, и к началу этого проектирования был создан достаточно

Рис. 1. СПИАБ, размещенная на пункте эксплуатации в районе г. Хабаровска

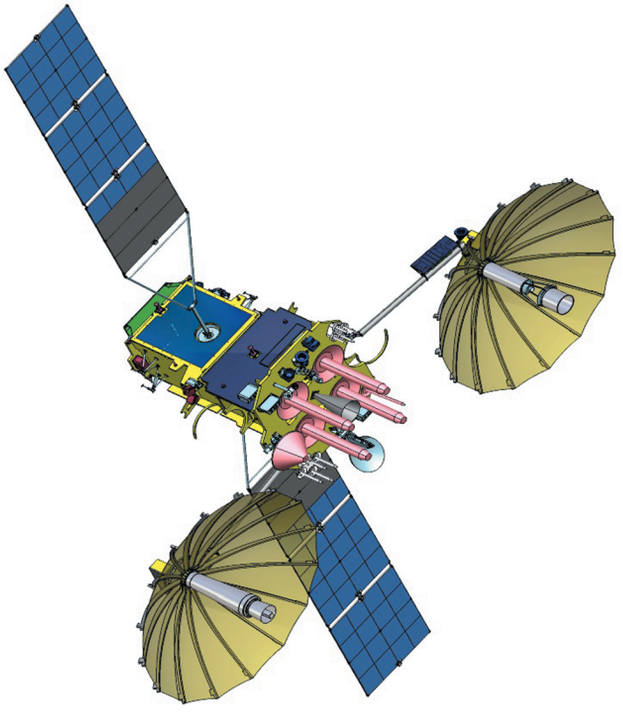


Рис. 2. Общий вид КА «Луч-5А», «Луч-5В»

большой парк АРБ, состоящий из нескольких сотен тысяч штук. Поэтому реальными путями получения требуемой высокой вероятности приема достоверного сообщения при создании геостационарных сегментов являются:

– повышение энергетического потенциала радиолиний АРБ–СР–СПИАБ;

– оптимизация обработки принятых СПИАБ сигналов, в том числе использование возможности накапливать энергию сигналов посылок посредством когерентного суммирования их.

В системе КОСПАС–САРСАТ для обнаружения и исправления ошибок используется код Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ), содержащий 82 символа (бита), из которых 61 — информационный и 21 — проверочный, и исправляет до трех ошибок и обнаруживает четное число ошибок, равное или большее четырех [3].

Этот код не может обнаружить и тем более исправить нечетное число ошибок большее трех, и для любого нечетного числа ошибок более 3 будет

исправлять какие-либо 3 и ошибочно считать это сообщение достоверным. Чтобы исключить такие ложные сообщения, в КОСПАС–САРСАТ принято считать достоверными только те сообщения, в которых исправлено не более двух ошибок и не обнаружено более двух четных ошибок. Сообщение с исправленными тремя ошибками считается недостоверным.

При таком алгоритме декодирования кода БЧХ $(82, 61)$ вероятность достоверного[1] сообщения равна

$$P_{\text{дост.}} = \sum_{k=0}^{k=2} C_{82}^{k}(1-p_1)^{82-k}p_1^k, \qquad (1)$$

где C_{82}^{k} — число сочетаний из 82 по k;

p_1 — вероятность ошибки одного бита сообщения.

При оптимальной обработке принятого СПИАБ сигнала вероятность ошибки приема одного бита сигнала равна [4]

$$p_1 = 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{2E_1 n}{N_{\text{ш}}}}\right) = 1 - \Phi(L_E H \tau n), \qquad (2)$$

где $E_1 = l_E P_c \tau$ — энергия одного бита принятого сигнала;

H — энергетический потенциал на входе приемника СПИАБ;

τ — длительность одного бита ($\tau = 1/c$, где c — скорость передачи информации от АРБ, равная 400 бит/с);

$L_E = m l_{\text{реал.}}$ — коэффициент потерь мощности сигнала, т. е. доля мощности сигнала, идущая на модуляцию его полезной информацией с учетом потерь на реализацию;

m — доля мощности, идущая на модуляцию полезной информации от суммарного сигнала;

$l_{\text{реал.}}$ — потери на реализацию;

$N_{\text{ш}}$ — спектральная плотность мощности шума на входе приемника СПИАБ;

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_{-\infty}^{z} e^{-\frac{x^2}{2}}\, dx \text{ — интеграл вероятности;} \qquad (3)$$

n — число посылок АРБ, когерентно суммированных для получения достаточно малого числа ошибок в сообщении, чтобы оно прошло проверку на достоверность при декодировании кода БЧХ.

Принимая в формулах (1), (2), (3) значения коэффициентов потерь $m = -1$ дБ, что соответствует потерям при фазовой модуляции с индексом 1,1 рад, принятой в АРБ [1];

$$l_{\text{реал.}} = -2 \text{ дБ},$$

получим

$$\frac{E}{N_{\text{ш}}} = H - 10\lg c + 10\lg n = H - 26 + 10\lg n. \qquad (4)$$

Результаты расчетов по формулам (1)–(4) представлены на рис. 3.

Как следует из рисунка, $P_{\text{дост.}}$ однозначно определяется значениями H и n.

Энергетический потенциал сквозной радиолинии АРБ–СР–СПИАБ можно рассчитать по следующей формуле:

$$\frac{1}{H_\Sigma} = \frac{1}{H_1}\left(1 + \frac{N_{\text{пх1}}}{N_{\text{ш СР}}}\right) + \frac{1}{H_2}\left(1 + \frac{P_{\text{пх}\Sigma}}{P_{\text{с прм СР}}}\right) + \frac{\Delta f_{\text{СР}}}{H_1 H_2}, \qquad (5)$$

где H_1 — энергетический потенциал радиолинии АРБ–СР;

H_2 — энергетический потенциал радиолинии СР–СПИАБ;

$\Delta f_{\text{СР}}$ — полоса пропускания ретранслятора на СР;

$N_{\text{ш СР}}$ — спектральная плотность мощности шумов на входе приемника СР;

$N_{\text{пх1}}$ — спектральная плотность мощности широкополосной помехи на входе приемника СР;

$P_{\text{пх}\Sigma}$ — суммарная мощность широкополосной помехи и узкополосных помех, действующих в полосе приема СР;

$P_{\text{с прм СР}}$ — мощность сигнала посылки АРБ на входе СР.

Формула (5) является некоторой модификацией формулы расчета энергетики радиолиний в спутниковых радиосистемах связи [5]. При отсутствии внешних помех эта формула приобретает хорошо известный вид:

$$\frac{1}{H_\Sigma} = \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} + \frac{\Delta f_{\text{СР}}}{H_1 H_2}. \qquad (5а)$$

[1] С учетом, что принятое сообщение уже прошло проверку на наличие правильное битовой (15 бит) и кадровой (9 бит) синхронизации.

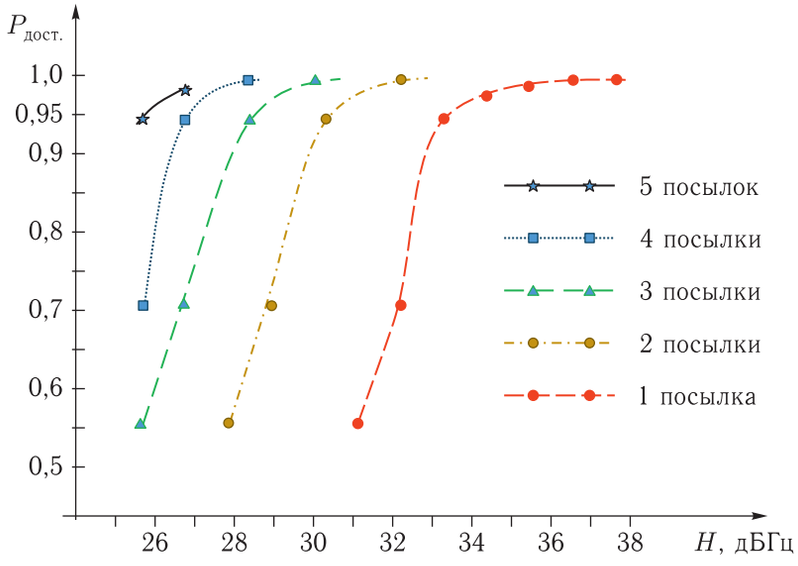


Рис. 3. Зависимость вероятности получения достоверного сообщения радиобуя от энергетического потенциала составной радиолинии АРБ–СР–СПИАБ и числа посылок в накоплении

Энергетические потенциалы радиолиний АРБ–СР (H_1) и СР–СПИАБ (H_2) рассчитываются по формулам:

$$H_1 = \textit{ЭИИМ}_{\text{АРБ}} + (G/T)_{\text{СР}} + 20\lg\left(\frac{\lambda_1}{4\pi D}\right) + \\ + L_{\text{м.л.}} + L_{\text{пол.}} - 228{,}6 \text{ дБГц}, \quad (6)$$

$$H_2 = \textit{ЭИИМ}_{\text{СР}} + (G/T)_{\text{СПИАБ}} + 20\lg\left(\frac{\lambda_2}{4\pi D}\right) + \\ + L_{\text{пот.}} - 228{,}6 \text{ дБГц}. \quad (7)$$

В этих формулах

ЭИИМ — эквивалентная изотропно излучаемая мощность АРБ или СР соответственно;

G/T — параметр качества приемной системы СР или СПИАБ;

$\lambda_1 = 73{,}88$ см — длина волны в линии АРБ–СР;

$\lambda_2 = 19{,}42$ см — длина волны в линии СР–СПИАБ;

$L_{\text{м.л.}} = -2{,}0$ дБ — потери из-за многолучевости на линии АРБ–СР;

$L_{\text{пол.}} = -4{,}1$ дБ — поляризационные потери в этой линии;

$L_{\text{пот.}} = -1$ дБ — дополнительные суммарные потери в радиолинии СР–СПИАБ.

Потери за счет распространения сигнала в атмосфере будем считать учтенными в дополнительных суммарных потерях в радиолинии СР–СПИАБ.

Все величины, входящие в формулу (5), выражены в натуральных единицах, а в формулах (6) и (7) — в децибелах.

Анализ формулы (5) показывает, что максимально возможное значение H_Σ всегда меньше, чем H_1. Если выполняются условия

$$H_2 \gg H_1 \quad \text{и} \quad H_2 \gg \Delta f_{\text{СР}}, \quad (8)$$

а помехи были достаточно малы, то есть

$$N_{\text{пх}} \ll N_{\text{ш СР}} \quad \text{и} \quad P_{\text{пх}\Sigma} \ll P_{\text{с прм СР}} \cdot \frac{H_2}{H_1}. \quad (9)$$

и выполняются условия $H_2 > 10H_1$, $\Delta f_{\text{СР}} < 0{,}1H_2$, то

$$H_\Sigma = H_1 - 1{,}1 \text{ дБГц}.$$

Если выполняются условия $H_2 > 3H_1$, $\Delta f_{\text{СР}} < 0{,}1H_2$, то

$$H_\Sigma \cong H_1 - 3 \text{ дБГц}.$$

За исключением помехи, совпадающей по спектру с сигналом посылки, которая не может быть уменьшена никаким увеличением H_1 или H_2, остальные неравенства в (8) и (9) усиливаются с ростом H_2. Отсюда следует, что для повышения

вероятности приема достоверного сообщения нужно увеличивать H_1 и H_2.

Как следует из формул (6) и (7), основными параметрами, которые определяют H_1 и H_2 в геостационарном сегменте системы КОСПАС–САРСАТ и могут быть изменены при создании ее составных частей — СР и СПИАБ, являются $(G/T)_{\text{СР}}$, $\textit{ЭИИМ}_{\text{СР}}$ и $(G/T)_{\text{СПИАБ}}$.

Результаты летных испытаний геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ на базе спутников-ретрансляторов «Луч-5А» и «Луч-5В»

Измерения G/T и определение ЭИИМ ретранслятора, а также расчет вероятности приема достоверного сообщения проводились по программе и методике КОСПАС–САРСАТ С/S Т.013 [1].

До начала этих испытаний был определен параметр качества (G/T) московской СПИАБ, равный 9,8 дБ/К. В результате проведенных измерений были получены следующие результаты:

- эквивалентная изотропно-излучаемая мощность СР: $\textit{ЭИИМ} = 26{,}9$ дБмВт;
- параметр качества СР: $G/T = -9{,}2$ дБ/К;
- ширина полосы пропускания ретранслятора по уровню 3 дБ: $\Delta f_{\text{р}} = 80$ кГц.

Вероятности получения достоверных посылок, в зависимости от *ЭИИМ* тестового радиобуя (ЭИИМ$_{\text{ТРБ}}$), приведены в табл. 1.

Требуемая стандартом С/S Т.009 вероятность получения достоверного сообщения за 5 мин — 0,99, что выполняется для всех значений излучаемой мощности тестового АРБ. Требования к получению достоверного сообщения по первой излученной посылке в документах КОСПАС–САРСАТ не предъявляются, однако приведенные в табл. 1 значения $P_{1\text{пос}} = 0{,}98$ для $\textit{ЭИИМ}_{\text{ТРБ}} = 29$ дБмВт и $P_{1\text{пос}} = 0{,}9$ для $\textit{ЭИИМ}_{\text{ТРБ}} = 26$ дБмВт являются очень хорошими.

Энергетический запас геостационарного сегмента КОСПАС–САРСАТ на основе КА «Луч-5А» составляет следующее значение.

Таблица 1. Вероятности получения достоверного сообщения АРБ при накоплении энергии посылок за время 5 мин ($P_{5\text{пос}}$) и по первой посылке ($P_{1\text{пос}}$)

$\textit{ЭИИМ}_{\text{ТРБ}}$, дБмВт	$H_{\text{СРД.}}$, дБГц	с. к. о. $H_{\text{СРД.}}$, дБГц	$P_{5\text{пос}}$	$P_{1\text{пос}}$
32,4	42,2	1,5	1,0	0,97
29,0	37,2	1,3	1,0	0,98
28,0	36,3	1,4	1,0	0,94
26,0	34,9	0,7	1,0	0,90

Примечание. $H_{\text{СРД}}$ — значение среднего энергетического потенциала по всем излученным посылкам АРБ, измеренного на СПИАБ, а с. к. о. $H_{\text{СРД.}}$ — его среднее квадратическое значение (σ).

Запас системы равен 11 дБ (37 дБмВт–26 дБмВт), где

– 37 дБмВт — номинальное значение $\textit{ЭИИМ}_{\text{ТРБ}}$ (C/S T/.001 [2]);

– 26 дБмВт — наименьшее значение $\textit{ЭИИМ}_{\text{ТРБ}}$, при котором обеспечивается заданная вероятность $P \geqslant 0{,}99$ получения достоверного сообщения, установленное при испытаниях.

Судя по данным табл. 1, фактический запас системы еще больше. Документами КОСПАС–САРСАТ требования к энергетическому запасу не предъявляются, однако в них имеется рекомендация иметь этот запас по возможности большим, т. к. это позволит принимать аварийные сообщения при неудачных расположениях АРБ:

- при расположении оси антенны радиобуя близкой к направлению на СР;
- нахождении АРБ в лесах или в условиях другой сильной растительности;
- наличии около АРБ затеняющих или переотражающих излучение предметов и т. п.

Приведенные результаты испытаний показывают весьма высокой уровень основных характеристик геостационарного сегмента на базе КА «Луч-5А». Для подтверждения этого утверждения рассмотрим табл. 2, в которой приведены основные характеристики действующих геостационарных сегментов разработки США, ЕС и России вместе с характеристиками сегмента на базе КА «Луч-5А».

Из таблицы видно, что по основному параметру (G/T), определяющему вероятность достоверного приема аварийного сообщения, при плохой

Таблица 2. Сравнительные характеристики основных параметров геостационарных сегментов системы КОСПАС–САРСАТ

Параметр \ Система	GOES, США	MSG, ЕС	«Электро-Л», Россия	«Луч-5А», «Луч-5В», Россия
G/T, дБ/К	−18,5	−21,3	−16,5	−9,2
ЭИИМср, дБмВт	45,0	20,0	50,1	26,9
Δf_p — полоса ретрансляции, кГц	100	180	138	80

энергетике радиолинии АРБ–СР, **СР «Луч-5А» значительно лучше** всех остальных КА, используемых в других геостационарных сегментах. По остальным параметрам КА «Луч-5А» соответствует требованиям и уровню других СР. Исключение составляет только малое значение $ЭИИМ_{СР}$. Правда, для СР MSG это значение еще меньше, но последний использует земные приемные антенны диаметром 9 м, а на СПИАБ всего 5 м. Влияние малой *ЭИИМ* на качестве геостационарного сегмента будет рассмотрено в следующем разделе.

Оценка уровня и влияния помех на геостационарный сегмент КОСПАС–САРСАТ на базе КА «Луч-5А»

Исследование помех в диапазоне рабочих частот КОСПАС–САРСАТ 406,01–406,09 МГц и их влияния на работу геостационарного сегмента проводилось двумя способами:

- визуальным наблюдением и анализом частотно-временной панорамы принимаемого СПИАБ сигнала;
- измерением на достаточно протяженных отрезках времени уровня сигналов, принимаемых СПИАБ от ортографического радиобуя (ОРБ), размещенного на о. Кергелен (координаты 70° в. д., 50° ю. ш.) и постоянно, с периодом 30 с, излучающего достаточно мощные (с *ЭИИМ* ∼38–40 дБм) сигналы. При отсутствии помех энергетический потенциал принимаемых сигналов ОРБ должен быть 48–50 дБГц. Уменьшение фактически принимаемого энергетического потенциала ОРБ возникает из-за действия помех. По величине уменьшения фактически принимаемого энергетического потенциала ОРБ относительно энергетического потенциала ОРБ при отсутствии помех можно приближенно оценить суммарную мощность последних.

На рис. 4 и 5 представлены примеры частотно-временных панорам, принимаемых СПИАБ с КА «Луч-5А». По вертикальной оси на этих рисунках расположена частота, по горизонтальной — время (МСК). Уровень помех отображается цветом: синий — слабый, зелено-желтый — средний, красный — большой. Этот уровень измеряется в полосе элементарного фильтра быстрого преобразования Фурье ≈ 10 Гц (рис. 4 и рис. 5). Желтыми короткими линиями отображены принятые посылки радиобуев, желтой горизонтальной черточкой с той же желтой вертикальной сразу после горизонтальной обозначены принятые достоверные посылки.

Рис. 4 представляет частотно-временную панораму в дневное время (14 ч МСК 26.09.2012), а рис. 5 — в вечернее время (19 ч МСК 26.09.2012). Анализ этих рисунков показывает, что число и интенсивность помех в вечернее время значительно больше и многие посылки не могут быть достоверно выделены.

На рис. 6 представлена зависимость измеренного энергетического потенциала в радиолинии ОРБ–СР «Луч-5А» — СПИАБ за период времени с 00 до 23 ч 27.09.2012. Из рис. 6 видно, что в вечернее время (с 18 ч 30 м до 21 ч МСК) потенциал посылок был существенно (на 5–6 дБ) меньше, чем в остальное время суток. Это уменьшение может быть объяснено наличием в диапазоне частот, принимаемых ретранслятором КА «Луч-5А», достаточно мощных помех, не совпадающих по спектру с посылками ОРБ о. Кергелен

Суммарная мощность этих помех порядка −48 дБВт, т. е. на 6 дБ больше мощности собственных шумов ретранслятора. Аналогичные снижения потенциала наблюдались и в другие дни, примерно в те же часы. Такое уменьшение потенциала для

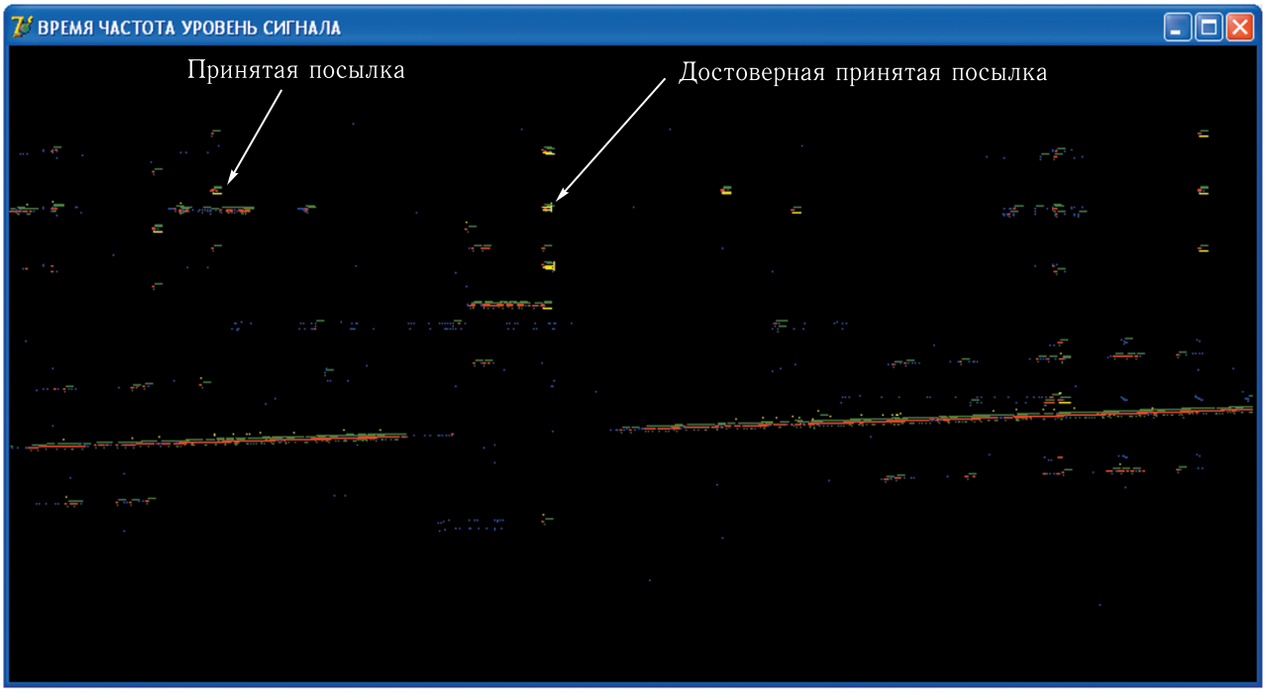


Рис. 4. Частотно-временная панорама спектра сигналов на входе процессора СПИАБ. 26.09.2012, 14 ч МСК

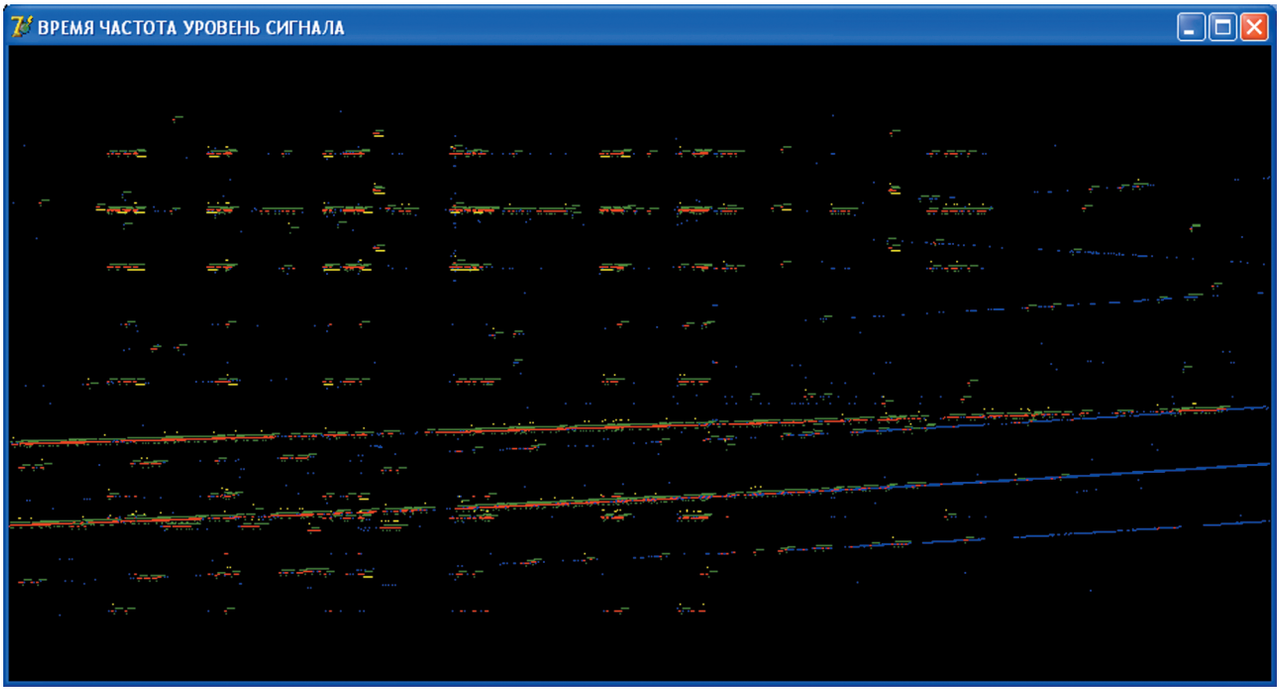


Рис. 5. Частотно-временная панорама спектра сигналов на входе процессора СПИАБ. 26.09.2012, 19 ч МСК

ОРБ, размещенного на о. Кергелен, из-за большой *ЭИИМ* никак не повлияло на вероятность правильного приема достоверных сообщений ОРБ о. Кергелен. Однако для аварийных буев, которые из-за неудачного расположения могут иметь малую *ЭИИМ* (29 дБмВт и меньше), снижение потенци-

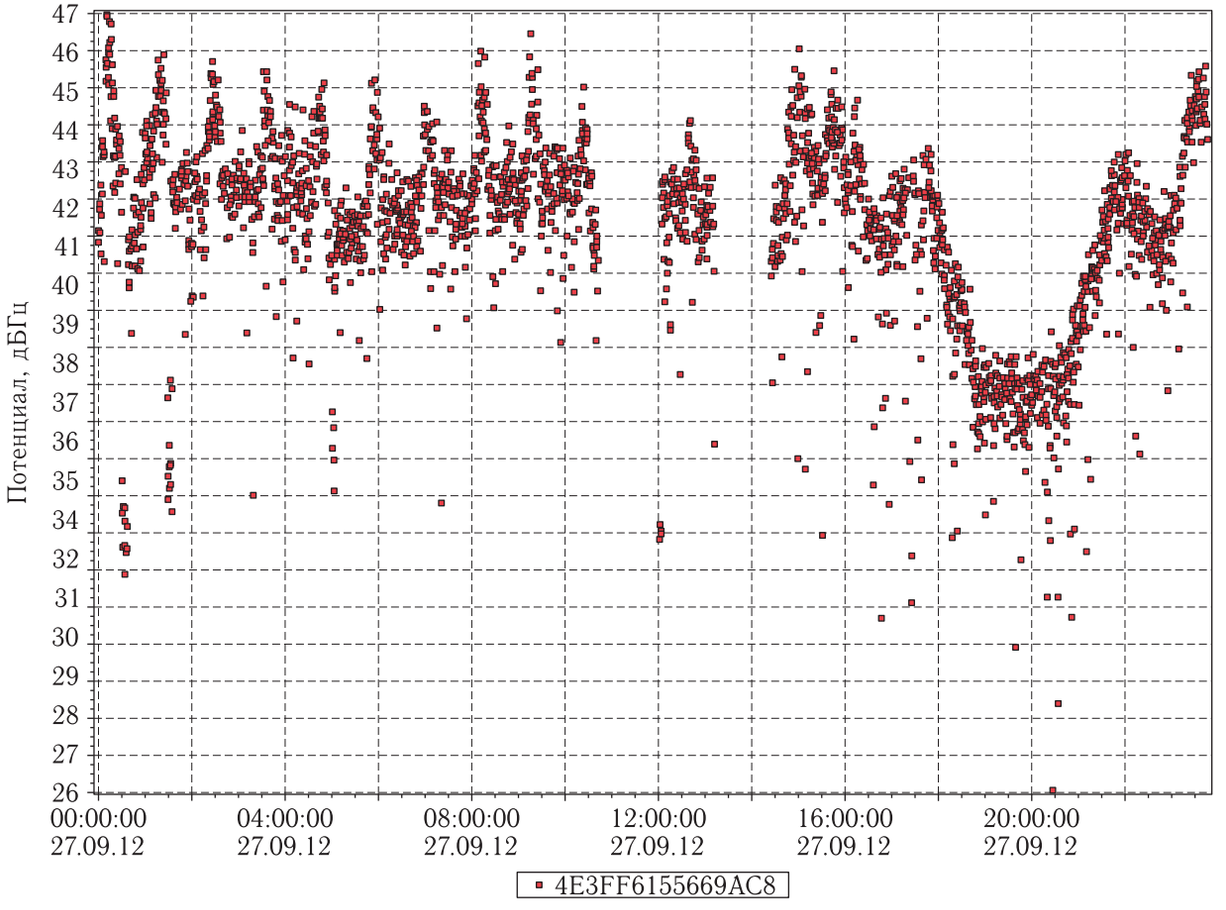


Рис. 6. Энергетический потенциал ОРБ о. Кергелен, ретранслированный КА «Луч-5А» 27.09.2012

ала за счет таких помех не позволит принимать достоверные посылки данных АРБ.

Поскольку увеличение доли мощности передатчика ретранслятора, отводимой на ретрансляцию сигналов КОСПАС–САРСАТ в изготовленном и выведенном на орбиту КА «Луч-5А», невозможно, было принято решение об увеличении G/T антенны СПИАБ. Это увеличение можно было сделать путем замены облучателя антенны, МШУ и входного фильтра. Соответствующие доработки СПИАБ были сделаны в 2013 г., и в 2014 г. два комплекта СПИАБ по доработанной документации были изготовлены для размещения в районах Хабаровска и Железногорска.

После монтажа и ввода в эксплуатацию СПИАБ в г. Хабаровске в ноябре 2015 г. были проведены испытания геостационарного сегмента, состоящего из этой СПИАБ и КА «Луч-5А», находящегося в орбитальной позиции 167° в. д., а также испытания с этой же СПИАБ и КА «Луч-5В» в орбитальной позиции 95° в. д.

Проведенные испытания полностью подтвердили высокие технические характеристики СР «Луч-5А» и «Луч-5В», полученные при испытаниях в 2012 г. Значительного (на 5 и более децибел) снижения потенциала принимаемых посылок за счет помех, обнаруженного в 2012 г. при испытаниях СР «Луч-5А» с московской СПИАБ, на доработанной СПИАБ не обнаружено. Все характеристики геостационарного сегмента «Луч-5А» и СПИАБ в г. Хабаровске полностью удовлетворяют требованиям КОСПАС–САРСАТ Т.013 [1], и этот сегмент может быть представлен в Совет КОСПАС–САРСАТ для ввода в штатную эксплуатацию.

Для ввода в штатную эксплуатацию в системе КОСПАС–САРСАТ геостационарного сегмента «Луч-5В» и СПИАБ в г. Железногорске планируется в 2018 г. ввести в строй эту СПИАБ

и повторить испытания этого сегмента на соответствие требованиям C/S T.013.

Международные испытания геостационарной спутниковой системы поиска и спасания на базе КА «Луч-5А»

В 2012 г. решением 57-й сессии Совета КОСПАС–САРСАТ были закреплены намерения национальных администраций Российской Федерации, Новой Зеландии и США провести испытания по оценке характеристик ГССПС на базе КА «Луч-5А» с целью обеспечения ввода бортового ретранслятора данного КА в систему КОСПАС–САРСАТ.

В 2017 г. после многочисленных уточнений сроков данные испытания были начаты. Цели испытаний:

1) оценка характеристик радиолинии КА «Луч-5А»–СПИАБ;

2) уточнение спецификаций и стандартов КОСПАС–САРСАТ в части требований к приемным станциям СПОИ, которые планируют осуществлять прием сигнала с КА серии «Луч».

Проведение испытаний осуществляется по программе и методике, приведенной в документе КОСПАС–САРСАТ — C/S R.020. В соответствии с данной программой Россия является координатором испытаний и ответственной за функционирование бортового ретранслятора на период испытаний, а также предоставляет наземные средства приема; Новая Зеландия обеспечивает прием на своей наземной станции, а США обеспечивает работу имитатора сигналов радиобуев, расположенного на Гавайских островах.

На начало июня 2017 г. проведены следующие из запланированных испытаний.

1. Испытание №1 «Пороговые характеристики приема, системный запас и эффективность обработки сообщений радиобуя».

2. Испытание №2 «Время, необходимое для формирования достоверного и подтвержденного сообщений».

3. Испытание №4 «Пропускная способность канала СПИАБ КА «Луч-5А».

По предварительной оценке результатов испытаний №1 и №2 можно сделать следующие выводы:

– запас системы в геостационарной спутниковой системе поиска и спасания (ГССПС), по данным российской и новозеландской СПИАБ, составляет не менее 11 дБ (разность между ЭИИМ стандартного радиобуя в 37 дБмВт и ЭИИМ АРБ при пороге приема сообщений станцией СПИАБ), что лучше на 3–6 дБ, чем запас в других ГССПС (MSG, «Электро-Л», GOES);

– среднее время получения достоверного сообщения в 95 % случаев не превышало 2 мин для всех уровней ЭИИМ радиобуя (от 24 до 37 дБмВт).

Следует отметить, что полученные предварительные результаты свидетельствуют о преимуществе оцениваемой радиолинии перед имеющимися в КОСПАС–САРСАТ (в части КА серии MSG, КА серии «Электро-Л» и КА серии GOES). Неоспоримым фактом также является то, что значительный вклад в повышенные характеристики геостационарного сегмента КОСПАС–САРСАТ на основе КА «Луч-5А» обеспечивается за счет ретранслятора КОСПАС–САРСАТ на КА «Луч-5А».

В ближайшее время после завершения испытаний отчет о них и рекомендации о вводе ретранслятора в систему КОСПАС–САРСАТ будут направлены на рассмотрение Объединенного комитета КОСПАС–САРСАТ.

Заключение

Результаты летных испытаний российских геостационарных сегментов системы «КОСПАС–САРСАТ», созданных на базе спутников-ретрансляторов (СР) «Луч-5А» и «Луч-5В» Многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч» и земных станций приема информации аварийных радиобуев (СПИАБ), проведенные в 2012–2013 гг., показали высокой уровень основных характеристик геостационарного сегмента на базе КА «Луч-5А».

Так, по одному из основных параметров — G/T, определяющему вероятность достоверного приема аварийного сообщения, КА «Луч-5А»

значительно (до 10 дБ) лучше КА, используемых в других геостационарных сегментах международной системы КОСПАС–САРСАТ (КА MSG, КА GOES, КА «Электро-Л»). Энергетический запас радиолинии (запас системы), т. е. разница между ЭИИМ номинального аварийного радиобуя, удовлетворяющего спецификациям КОСПАС–САРСАТ [2], и значения ЭИИМ, при котором СПИАБ еще может выполнять требования КОСПАС–САРСАТ, по вероятности выделения достоверного сообщения составила не менее 11 дБ, что на 3–6 дБ больше, чем для других СР системы КОСПАС–САРСАТ.

В 2017 г. были также проведены международные испытания по оценке ГССПС на базе КА «Луч-5А» с участием США и Новой Зеландии, предварительные результаты которых свидетельствуют об очевидном преимуществе КА «Луч-5А» перед имеющимися в КОСПАС–САРСАТ. Неоспоримым фактом также является то, что значительный вклад в повышение качества характеристик геостационарного сегмента КОСПАС–САРСАТ на основе КА «Луч-5А» обеспечивается за счет аппаратуры ретрансляции, имеющейся на борту КА «Луч-5А». В ближайшее время отчет об испытаниях и рекомендации о вводе КА в систему КОСПАС–САРСАТ будут направлены на рассмотрение Объединенного комитета КОСПАС–САРСАТ.

Таким образом, высокие тактико-технические характеристики СР «Луч-5А» и «Луч-5В» и земных станций, подтвержденные результатами национальных и международных испытаний, позволяют сделать вывод, что геостационарные сегменты в составе этих СР и их земных станций готовы к вводу в систему КОСПАС-САРСАТ.

Геостационарный сегмент в составе космического аппарата (КА) «Луч-5А» и СПИАБ, размещенной в г. Хабаровске, с технической точки зрения готовы к вводу в эксплуатацию в систему КОСПАС–САРСАТ в 2017 г. Ввод в эксплуатацию комплекса на базе КА «Луч-5В» будет осуществляться после введения в строй СПИАБ в г. Железногорске.

Список литературы

1. COSPAS–SARSAT GEOSAR Space Segment Commissioning Standard // C/S T.013, Issue 1, Revision 2, October 2013.
2. Specification for COSPAS–SARSAT 406 MHz distress beacons // C/S T.001, Issue 3, Revision 15, October 2014.
3. *Кларк Дж., мл., Кейп Дж.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Радио и связь, 1987.
4. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1986.
5. *Спилкер Дж., мл.* Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ. / Под ред. В. В. Маркова. М.: Связь, 1978.

Требования к материалам для публикации в научно-техническом журнале *«Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы»*

1. Представляемые рукописи должны соответствовать тематике журнала, отвечать критериям ВАК РФ по научной новизне, не должны быть опубликованы ранее в других печатных или электронных изданиях.

2. Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным в следующей последовательности:
   - индекс УДК (слева);
   - название статьи, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и ученое звание каждого из авторов, должность, место работы (полное название организации, страна, город, e-mail), структурированная аннотация (150–200 слов) и ключевые слова (5–6 слов) на русском и английском языках;
   - основной текст;
   - список литературы.

3. Основной текст статьи рекомендуется подразделять на: Вводную часть, Данные о методике исследования, Экспериментальную часть, Выводы.

   Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008, представляется на русском языке.

4. Рукопись статьи представляется в одном экземпляре, напечатанном на принтере на одной стороне стандартного листа бумаги формата А4.

5. Набор текста в редакторе MS Word (расширение только .doc) при использовании стандартных шрифтов Times New Roman, размер — 14, межстрочный интервал — 1,5. Поля со всех сторон — 20 мм.

6. Для набора формул следует применять встроенный редактор формул Microsoft Equation 3.0. Формулы набираются латинским алфавитом, размер шрифта 11. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

7. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна соответствовать системе СИ.

8. Рисунки и графики оформляются в цветном изображении, должны быть четкими и не требовать перерисовки. Шрифт текста в иллюстративном материале Arial Reg, со строчных букв (кроме названий и имен).

9. Таблицы должны быть пронумерованы, иметь краткое наименование, межстрочный интервал в наименовании таблицы одинарный, выравнивание по ширине страницы. Текст в таблице печатается со строчных букв, без полужирного начертания.

10. К статье прилагаются электронные файлы:
    - сформированной статьи;
    - рисунков, графиков (выполняются в форматах jpeg или tiff с разрешением не менее 300 dpi и размером не более формата А4);
    - сведений об авторах (Ф.И.О. полностью, ученая степень, ученое звание, аспирант или соискатель ученой степени, рабочий и мобильный телефоны, адрес электронной почты).

11. На последней странице рукописи должны быть подписи всех авторов. Редакция не ставит в известность авторов об изменениях и сокращениях рукописи, имеющих редакционный характер и не затрагивающих принципиальных вопросов.

12. Рукописи, в которых не соблюдены данные требования, не рассматриваются для публикации.

13. Авторы статей несут ответственность за полноту и достоверность цитируемой в них литературы, а также за публикацию заимствованного материала без ссылки на источник. За публикацию материалов, содержащих закрытые сведения, авторы несут персональную ответственность на основании действующих законодательных актов.

14. К статье прилагается заключение о возможности опубликования в открытых источниках.

15. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленного в редакцию материала принимается редакционной коллегией и является окончательным.

Научно-технический журнал

**РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

ТОМ 4. ВЫПУСК 3. 2017

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №ФС77-55464 от 25 сентября 2013 г.*

*Журнал включен в РИНЦ.
Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
Подписной индекс издания 94086 в Объединенном каталоге «Пресса России»*

Редактор *В.Р. Игнатова*
Оригинал-макет: *Д.П. Вакуленко*
Оформление переплета: *Н.Л. Лисицына*

Подписано в печать 12.09.2017. Формат 60×88/8. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 13,48. Тираж 220 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 17 Б
E-mail: porsova@fml.ru, sale@fml.ru
Сайт: http://www.fml.ru
Интернет-магазин: http://www.fmllib.ru

Отпечатано с электронных носителей издательства
в АО «ИПК «Чувашия»,
428019, г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, 13

Тематические разделы журнала

«Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы»

• Космические навигационные системы и приборы. Радиолокация и радионавигация

• Аэрокосмические методы зондирования Земли

• Радиотехника и космическая связь

• Системный анализ, управление космическими аппаратами, обработка информации и системы телеметрии

• Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АО «Российские космические системы»

111250, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 53, тел. (495) 673-96-29

www.russianspacesystems.ru e-mail: journal@spacecorp.ru

ISSN 2409-0239

ISSN 2409-0239

DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.3