

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Том 7. Выпуск 2. 2020

Том 7. Выпуск 2. 2020

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

Редакционный совет

Председатель

председатель: Тюлин А.Е., д.э.н., к.т.н., член-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Заместители председателя: Ерохин ГА., к.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Романов А.А., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Москва, Россия Носторов Б.А., к.а. н. Ос «Российские космические системы», Москва, Россия

Нестеров Е.А., к.э.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Члены редакционного совета:

Артемьев В.Ю., АО «Научно-производственное объединение измерительной

Артемисев Di.с., АС ктаучно-производственное соовдинение измерительной техники», Москва, Россия Ахмедов Д.Ш., д.т.н., член-корр. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, ДТОО «Институт космической техники и технологий», Алма-Ата, Казахстан Батурин Ю.М., дю.н., проф., член-корр. РАН, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия Блинов А.В., к.т.н., член-корр. Российской инженерной академии, АО «Начию исоводоваторский инальтится изморатори и рассая Сосима.

Влинов А.В., к.I.н., член-корр. Российской инженерной академии, AO «Научно-исследовательский институт физических измерений», Пенза, Россия Габитов И.Р., к.ф.-м.н., проф., Университет Аризоны, США Жантаев Ж.Ш., д.ф.-м.н., академик КазАЕН, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алма-Ата, Казахстан Жмур В.В., д.ф.-м.н., проф., Московский физико-технический институт, Москва, Россия

Россия

Россия Кулешов А.П., д.т.н., проф., академик РАН, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия Носенко Ю.И., д.т.н., проф., АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия Перминов А.Н., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Российской инженерной академии, Российской академии космонавтики и К.А. Шиописоргов. АО «Российской академии космонавтики и К.А.

Российской инженерной академии, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Победоносцев В.А., д.т.н., доцент, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «Научно-исследовательский институт космического приборостроения», Москва, Россия Ступак Г.Г., д.т.н., проф., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Чеботарев А.С., д.т.н., проф., АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», Москва, Россия Чернявский Г.М., д.т.н., проф., член-корр. РАН, АО «Российские космические системы» Москва Россия

системы», Москва, Россия Четыркин А.Н., филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация»–

«Научно-исследовательский институт космического приборостроения», Москва, Россия

Журнал выходит 4 раза в год. Журнал включен в РИНЦ. Журнал включен в Гелиц. Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Мнение авторов статей может не совпадать с мнением редакции. ISSN 2409-0239 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2 Подписной индекс 94086 в Объединенном каталоге «Пресса России»

Редакционная коллегия

Главный редактор Романов А.А., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Москва, Россия

Заместитель главного редактора: Федотов С.А., к.т.н., с.н.с., АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Члены редакционной коллегии:

Алексеев О.А., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва,

Россия Алыбин В.Г., д.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Белоконов И.В., д.т.н., проф., Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия Бетанов В.В., д.т.н., проф., член-корр. Российской академии ракетных и артиплерийских наук, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Бугаев А.С., д.ф.-м.н., проф., академик РАН, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия Васильков А.П., к.ф.-м.н., свепсе Systems and Applications Inc., Мэриленд, США Ватутин В.М., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Данилин Н.С., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия акалемий Российской акалемии космонаватики им. К.Э. Циолковского

Данилин Н.С., д.т.н., проф., академик Международной и Российской инженерных академий, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Дворкин В.В., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Жодзишский А.И., д.т.н., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия Жуков А.А., д.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Колачевский Н.Н., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия Кукушкин С.С., д.т.н., проф., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, член-корр. Российской инженерной академии, АО «Российские космические системы», Москва, Россия

им. К.Э. циолковского, член-корр. Российской инженерной академии, AO «Российские космические системы», Москва, Россия Михайлов В.Ю., д.т.н., проф., Московский авиационный институт, Москва, Россия. Новиков Д.А., д.т.н., проф., член-корр. РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия Потруковии А.А., а ф. им. делька, истора СМИ М.

Петрукович А.А., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия Поваляев А.А., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва,

Россия

Пулинец С.А., д.ф-м.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия Райнер Сандау, д.т.н., адъюнкт-проф., Международная академия астронавтики, Берлин, Германия

Римская О.Н., к.э.н., доцент, АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Стрельников С.В., д.т.н., АО «Научно-производственное объединение «Орион», Краснознаменск, Россия Сычев А.П., к.т.н., АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»,

Москва, Рос

Москва, Госсия Тисленко В.И., д.т.н., проф., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия Токарев А.С. (отв. секретарь), АО «Российские космические системы», Москва,

Россия

Тузиков А.В., д.ф.-м.н., проф., член-корр. Национальной академии наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

АО «Российские космические системы»

111250, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 53 Тел. +7 (495) 673-96-29 www.spacedevice.ru e-mail: journal@spacecorp.ru

© АО «Российские космические системы» © ФИЗМАТЛИТ



Москва ФИЗМАТЛИТ [®] 2020

2020, т. 7, вып. 2

Содержание

Космические навигационные системы и приборы. Радиолокация и радионавигация	
Результаты международных испытаний этапа III фазы «Демонстрация и Оценка» среднеорбитального сегмента КОСПАС-САРСАТ Антонов Д.В., Варгин А.Б., Воропаева А.В., Киреев А.А., Масловский А.Ю., Федосеев А.В.	3
Радиотехника и космическая связь	
Экспериментальное исследование эффективности поляризационного уплотнения для сверхскоростной радиолинии систем ДЗЗ Аджибеков А.А., Березкин В.В., Ершов А.Н., Петров С.В., Петров А.В., Шишминцев П.В.	11
Особенности применения полноповоротных антенных систем в наземных комплексах радиомониторинга Кожевников С.В., Кирилюк С.Д., Тимофеев С.С., Глуздов А.Н., Теплоухова Н.Е.	21
Исследование эффективности применения киральных метаматериалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов Филиппов С.Б.	33
Системный анализ, управление космическими аппаратами, обработка информации и системы телеметрии	
Методологические аспекты создания сервисов многоцелевой аэрокосмической системы прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера Алексеев О.А., Серебряков В.Б., Тищенко П.А., Разумова Н.В., Линьков А.Д.	39
Решение прикладных задач, связанных с методами обработки топологических компонентов посредством исследования их взаимных размещений Архангельский А. Н.	50
Протоколы динамической маршрутизации и коммутации, метод построения сети связи для нужд ракетно-космической отрасли Селифанов В. А., Мартыненко В. В.	63
Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах	
Физико-технологические ограничения при проектировании многослойной коммутационной СВЧ-платы Жуков А. А., Калашников А. Ю., Соловьев М. К.	70
Метрологический комплекс регистрации и измерения терагерцового излучения на основе пленочных структур Сг-слюда-Аl-VO _x и Cr-слюда-VO _x Олейник А. С., Мещанов В. П.	78
Анализ влияния внутренних дефектов на надежность танталовых конденсаторов Алыков А. Н., Булаев И. Ю., Корбанкова Т. Ю., Кулибаба А. Я.	90
О проблеме производства отечественных микросхем космического применения Данилин Н. С., Димитров Д. М.	97

ROCKET-SPACE DEVICE ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

2020, Vol. 7, Iss. 2

Contents

opuce navigation systems and Devices. Mathematication and Mathematication	
Results of Phase III of the International COSPAS-SARSAT MEOSAR Demonstration	
Antonov D. V., Vargin A. B., Voropaeva A. V., Kireev A. A., Maslovskiy A. Yu., Fedoseev A. V.	3
Radio Engineering and Space Communication	
Experimental Study of Polarization Multiplexing Efficiency for a Very-High-Speed Radio Link of Earth Remote Sensing Systems	
Adzhibekov A. A., Berezkin V. V., Ershov A. N., Petrov S. V., Petrov A. V., Shishmincev P. V.	11
Application of Full Rotatable Antenna Systems in Ground-based Radio Monitoring Complexes Kozhevnikov S. V., Kiriljuck S. D., Timofeev S. S., Gluzdov A. N., Teploukhova N. E.	21
Effectiveness Research of Chiral Metamaterials in the Structures of Antennas	
of Spacecraft Radio Engineering Systems <i>Philippov S. B.</i>	33
Systems Analysis, Spacecraft Control, Data Processing, and Telemetry Systems	
Methodological Aspects of Creating the Services of the Multipurpose Aerospace Forecasting System	
for Natural and Anthropogenic Emergencies Alekseev O. A., Serebryakov V. B., Tishchenko P. A., Razumova N. V., Lin'kov A. D.	39
Applied Problems Solution Based on Methods for Processing of Topological Components by Studying their Relative Locations <i>Arkhangel'skiu A N</i>	40
Protocols of Dynamic Routing and Switching a Method for Construction of a Communication Network	10
for the Needs of the Rocket and Space Industry Selifanov V. A., Martynenko V. V.	63
Solid-State Electronics, Radio Electronic Components, Micro- and Nanoelectronics, Quantum Effect Devices	
Physical and Technological Limitations for the Construction of a Multilayer Switching Microwave Board Zhukov A. A., Kalashnikov A. Yu., Soloviev M. K.	70
Metrological Complex for Recording and Measuring Terahertz Radiation Based on Cr -mica-Al-VO _x and Cr -mica-VO _x Film Structures Oleunik A.S. Meshanov V.P.	78
Impact Analysis of Internal Defects of Tantalum Canacitors on their Reliability	
Alykov A. N., Bulaev I. Yu., Korbankova T. Yu., Koulibaba A. Ya.	90
Production of High-quality Russian Microcircuits for Space Equipment Danilin N. S., Dimitrov D. M.	97

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 3–10

____ КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. _____ РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.3.10

Результаты международных испытаний этапа III фазы «Демонстрация и Оценка» среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ

Д. В. Антонов, antonov_dv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А.Б.Варгин, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Воропаева, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Киреев, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Масловский, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Федосеев, fedoseev_av@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты международных испытаний КОСПАС-САРСАТ по оценке точности определения координат аварийных радиобуев (АРБ) на этапе III фазы «Демонстрация и Оценка» (ДиО) среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС). Результаты испытаний получены на станциях приема и обработки информации (СОСПОИ) в г. Москве (Россия), в г. Тулузе (Франция), в штате Мэриленд (США) и на о. Шпицберген (Норвегия). По результатам проведенных испытаний погрешность местоопределения АРБ, полученная на московской СОСПОИ, составила 0,64–0,82 км в 95% случаев при использовании штатных спутников с транспондерами *L*-диапазона, что в 6–8 раз меньше заданной требованиями к системе СССПС. Проведено сравнение и подтверждено соответствие теоретически рассчитанных и реально полученных во время испытаний погрешностей местоопределения. Отмечено негативное влияние неполного космического сегмента на погрешность местоопределения. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными московской СОСПОИ на этапе II фазы «ДиО» (с использованием спутников с транспондерами *S*-диапазона), и результатами, предоставленными другими национальными администрациями, участвовавшими на этапах II и III фазы ДиО СССПС.

Ключевые слова: космический аппарат, КОСПАС-САРСАТ, СССПС, аварийные радиобуи, АРБ

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 3–10

___ КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. _____ РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

Results of Phase III of the International COSPAS-SARSAT MEOSAR Demonstration and Evaluation Test Campaign

D. V. Antonov, antonov_dv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. B. Vargin, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Voropaeva, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Kireev, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Maslovskiy, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Fedoseev, fedoseev_av@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The results of world wide demonstration and evaluation (D&E) test campaign aimed at characterizing the performance of the COSPAS–SARSAT medium-orbit satellite search and rescue (MEOSAR) system with respect to its capability to independently locate COSPAS-SARSAT first-generation 406 MHz distress radio beacons (DR) are presented. The location accuracy estimates were collected during Phase III of the MEOSAR D&E at the local user terminals (MEOLUTs) in Moscow, in Toulouse (France), in the state of Maryland (USA) and on Spitsbergen (Norway). According to the results, the location error achieved at the Moscow MEOLUT was 0.64–0.82 km in 95% of cases when using MEOSAR L-band satellites, which is 6–8 times lower than the requirements established for the MEOSAR system. The comparison between theoretical location accuracy estimates and actual location errors is made and the validity of the calculations is demonstrated. The article also notes the negative impact of an incomplete MEOSAR space segment on the location error. Finally, the results are compared with the results obtained at the Moscow MEOLUT in phase II of the D&E (using satellites with S-band transponders) and the results provided by other National Administrations that participated in phases II and III of the MEOSAR D&E.

Keywords: spacecraft, COSPAS-SARSAT, MEOSAR, distress radio beacons

Введение

Среднеорбитальная спутниковая система поиска и спасания (СССПС) КОСПАС-САРСАТ является результатом эволюции требований и ожиданий пользователей системы КОСПАС-САРСАТ к ее характеристикам и возможностям. СССПС КОСПАС-САРСАТ получила значительные преимущества перед геостационарными и низкоорбитальными спутниковыми системами поиска и спасания (НССПС и ГССПС), уже входящими в КОСПАС-САРСАТ как по глобальности обслуживания, так и по оперативности доставки информации в поисково-спасательные службы за счет перехода на среднеорбитальный космический сегмент. Данная система разрабатывается с двухтысячных годов силами участников соглашения о Международной программе КОСПАС-САРСАТ и в данный момент принята в стадию ранней эксплуатации. Демонстрация работы системы как один из этапов ее создания проводиась в 2013-2019 гг. на фазе «Демонстрация и Оценка» (ДиО).

Фаза «Демонстрация и Оценка» СССПС была учреждена Советом КОСПАС-САРСАТ для подтверждения ожидаемых возможностей разрабатываемой системы и определения ее преимуществ относительно НССПС и ГССПС. В силу жесткой связи темпов развития СССПС с наличием наземного и в основном космического сегментов фаза ДиО проводилась в несколько этапов [1]. 1-й этап был проведен в 2013–2014 гг. при частично развернутом космическом сегменте *S*-диапазона¹ (всего на момент проведения испытаний было доступно 9 спутников-ретрансляторов). 2-й этап был проведен в 2015–2016 гг. (космический сегмент состоял из 16 спутников *S*-диапазона и 3 спутников *L*-диапазона). Активная фаза испытаний 3-го этапа проводилась в 2017-2019 гг. с использованием 16 спутников *L*-диапазона.

На этапе III фазы ДиО проводилась серия технических и эксплуатационных тестов, из них для данной статьи выделены тесты, целью которых являлось независимое определение местоположения аварийных радиобуев (АРБ).

В настоящей статье приведены результаты оценки возможности СОСПОИ решать задачу независимого определения местоположения АРБ, полученные в ходе испытаний СОСПОИ с имитатором сигналов АРБ (тест Т-4) и с реальными АРБ (тест Т-5).

Напомним [2], что к СОСПОИ выдвигаются следующие требования по точности определения местоположения неподвижных АРБ первого поколения [2]:

 погрешность определения местоположения по одной посылке АРБ должна быть не хуже 5 км в 90% случаев;

 погрешность определения местоположения АРБ за 10-минутный интервал (по 13 посылкам) должна быть не хуже 5 км в 95% случаев.

Алгоритмы решения задачи определения местоположения были описаны ранее [3], поэтому в контексте настоящей статьи следует лишь напомнить, что навигационными измерениями в такого рода задаче является совокупность измерений времен прихода сигналов АРБ на спутникиретрансляторы (*TOA* — time of arrival) и их частот (*FOA* — frequency of arrival).

Помимо приведения результатов независимого определения местоположения, в данной статье также проводится сравнение априорных оценок погрешности определения и реальных ошибок определения местоположения (используется ожидаемая горизонтальная ошибка², требования к формированию которой определены в [2]).

¹СССПС предусматривает прием на наземных СПОИ сигналов в диапазоне 1544,5 \pm 0,5 МГц (*L*-диапазон). Однако на ранней стадии развития СССПС для оценки возможности системы были использованы единственные имеющиеся на тот момент ретрансляторы на базе спутников GPS с возможностью ретрансляции только в *S*-диапазоне (центральная частота — 2226 МГц). На дальнейших этапах развития СССПС было принято решение о возможности, но не обязательности использования таких ретрансляторов наземным сегментом. Ретрансляторы *S*-диапазона изначально имеют большую рабочую ширину полосы ретрансляции (220 кГц по уровнюминус 3 дБ) и, как следствие, ретранслируют рабочую полосу системы и соседние частоты, что приводит к меньшему соотношению сигнал/шум принимаемых на земных станциях сигналов АРБ.

²Формулы для расчета горизонтальной ошибки приведены в [4].

Результаты испытаний. Анализ результатов теста Т-4

Данный тест проводился для оценки точностных, вероятностных и временных характеристик СССПС. Основной целью теста была оценка погрешности местоопределения АРБ в 95% случаев после излучения 1, 2, 3, 5, 7 и 13 посылок [1].

Для излучения аварийных сигналов использовался специально запрограммированный имитатор неподвижных АРБ, расположенный в г. Тулузе во Франции (расстояние до СОСПОИ в г. Москве примерно 2900 км). Во время теста воспроизводилась работа 25 АРБ. Каждый имитируемый АРБ работал на протяжении 10 мин, в течение которых излучал 13 посылок (период повторения посылок равен 50 с). В течение 24 ч имитация работы 25 АРБ была повторена 48 раз (каждое повторение называется слотом, слоты следовали один за другим каждые полчаса). Проведение теста в течение 24 ч позволило оценить результаты работы СОСПОИ при различных взаимных расположениях имитируемых АРБ и спутников-ретрансляторов.

В табл. 1 представлены осредненные за 24 ч результаты проведенного теста. Совместная видимость имитатора АРБ и СОСПОИ в г. Москве

Таблица 1. Осредненные по 47 слотам результаты теста Т-4

Количество излученных посылок	1	2	3	5	7	13
Вероятность с ошибкой <1 км	0,844	0,911	0,904	0,919	0,904	0,921
Вероятность с ошибкой <5 км	0,936	0,978	0,973	0,978	0,988	0,999
Вероятность с ошибкой <10 км	0,943	0,985	0,978	0,986	1,000	1,000
Погрешность местоопреде- ления в 95% случаев, км	2,004	1,329	1,295	0,941	0,840	0,638

по крайней мере 3 спутниками-ретрансляторами была обеспечена для 47 из 48 слотов. При количестве спутников-ретрансляторов в совместной зоне видимости менее 3 (1 слот) обработка данных не производилась, так как для определения координат АРБ требуются измерения как минимум от 3 космических аппаратов.

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, требования к погрешности местоопределения АРБ были выполнены с большим запасом (0,638 км при требуемых ≤5,0 км в 95% случаев).

В табл. 2 приведено сравнение погрешностей местоопределения АРБ, полученных на московской СОСПОИ на 2-м и 3-м этапах фазы «Демонстрация и Оценка» СССПС [4], а также сравнение с результатами СОСПОИ других национальных администраций, участвовавших на 3-м этапе [5,6].

Исходя из продемонстрированных результатов теста Т-4, СОСПОИ в г. Москве улучшило результаты, полученные на 2-м этапе ДиО (погрешность местоопределения уменьшилась в 2,2 раза). По сравнению с зарубежными аналогами достигнута значительно меньшая погрешность местоопределения (для разных СОСПОИ в 8–12 раз).

Для контроля результатов, полученных при работе СОСПОИ, задавшись предполагаемым количеством принятых посылок, формируем априорную оценку *EHE* (expected horizontal error — ожидаемую горизонтальную ошибку), необходимую для описания качества определяемых координат. Обозначим этот показатель $EHE_{A\PiP}$.

На рис. 1 отображены априорно рассчитанные *ЕНЕ*_{АПР} (голубым цветом) и реальные погрешности местоположения АРБ в каждом слоте (оранжевым цветом).

Из приведенного рисунка видно, что теоретически предсказанное значение $EHE_{\rm A\PiP}$ соответствует фактически получаемым погрешностям местоопределения APБ. Некоторые расхождения теоретически предсказанных и реально полученных ошибок объясняются недостаточно большим количеством имитируемых APБ (25 штук). Также из представленного рисунка видно, что в некоторых слотах наблюдаются выбросы показателя $EHE_{\rm A\PiP}$, которые объясняются неполным космическим сегментом и невозможностью выбора удачной конфигурации спутников-ретрансляторов. В будущем,

Таблица 2. Сравнение результатов теста ДиО Т-4, полученных различными национальными администрациями

Местоположение СОСПОИ, этап	СОСПОИ в г. Москве (Россия), 3-й этап	СОСПОИ в г. Москве (Россия), 2-й этап	СОСПОИ в г. Тулузе (Франция), 3-й этап	СОСПОИ в штате Мэрилэнд (США), 3-й этап
Погрешность местоопределения с вероятностью 95% за 10 мин	0,638 км	1,42 км	5,0 км	7,5 км



Рис. 1. Сравнение ЕНЕ АПР и реальных погрешностей местоопределения в каждом слоте

при полностью развернутом космическом сегменте, таких выбросов можно будет полностью избежать.

Анализ результатов теста Т-5

Задачи и критерии оценки теста с аварийными буями были такими же, как и для теста ДиО Т-4, но вместо использования имитатора задействовались 35 серийных неподвижных АРБ, которые были расположены в разных точках земного шара. В данной статье представлены результаты по 6 АРБ, которые находились на расстоянии не более 3000 км от московской СОСПОИ. В табл. 3 представлены результаты по оценке погрешностей местоопределения АРБ в 95% случаев в совмест-

ной видимости 3 и более КА после излучения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 13 посылок АРБ.

Как видно из представленных результатов, погрешность местоопределения 6 неподвижных АРБ в 95% случаев составила 0,46–1,18 км (в среднем 0,82 км), что в 4–10 раз меньше величины погрешности, заданной для СССПС (в 6 раз по отношению к среднему значению).

В табл. 4 приведено сравнение погрешностей местоопределения АРБ на московской СОСПОИ на 2-м и 3-м этапах фазы ДиО СССПС, а также сравнение с результатами СОСПОИ других национальных администраций, участвовавших на 3-м этапе [7–9].

Исходя из полученных результатов теста Т-5, СОСПОИ в г. Москве улучшило результаты,

№ И	Илентификатор Страна С		Расстоя- ние от	Кол-во однопо-	Погрешность местоопределения АРБ в 95% случаев по <i>N</i> посылкам							
	пдентификатор Стран	Страна	до АРБ, км	решений	1 пос.	2 пос.	3 пос.	4 пос.	5 пос.	6 пос.	7 пос.	13 пос.
1	2065E84560FFBFF	Норвегия	1758	1397	3,83	3,9	2,55	2,11	2	1,52	1,68	0,84
2	1EFC6A87D0FFBFF	Италия	2216	1234	2,95	2,7	1,88	1,59	1,46	1,37	1,28	1,18
3	1C7C084B20FFBFF	Франция	2425	1193	2,36	1,76	1,27	1,03	0,98	0,93	0,82	0,59
4	1C7C8C8880FFBFF	Франция	2888	1065	2,05	1,83	1,48	1,27	1,07	0,95	1,05	0,8
5	1C7C0CF1E6FFBFF	Франция	2888	1197	1,93	1,76	1,19	1,03	0,75	0,65	0,65	0,46
6	1C7DF3800CFFBFF	Франция	2961	931	4,21	3,92	3,51	2,66	2,35	2,26	2,3	1,04

Таблица 3. Погрешность местоопределения для 6 АРБ в 95% случаев в совместной видимости 3 и более КА

Таблица 4. Сравнение результатов теста ДиО Т-5, полученных различными национальными администрациями

Местоположение СОСПОИ, этап	СОСПОИ в г. Москве (Россия), 3-й этап	СОСПОИ в г. Москве (Россия), 2-й этап	СОСПОИ в г. Тулузе (Франция), 3-й этап	СОСПОИ о. Шпицберген (Норвегия), 3-й этап	СОСПОИ в штате Мэрилэнд (США), 3-й этап
Погрешность местоопределения АРБ с вероятностью более 95% за 10 мин (13 посылок)	0,82 км	2 км	9 км	5 км	27 км

полученные на 2-м этапе ДиО (погрешность местоопределения уменьшилась в 2,5 раза). По сравнению с зарубежными аналогами достигнута значительно меньшая погрешность местоопределения (для разных СОСПОИ в 6–30 раз).

При оценке качества работы СОСПОИ в тесте ДиО Т-5 так же, как и в тесте ДиО Т-4, в некоторых случаях происходило ухудшение показателя $EHE_{\rm A\PiP}$, а вместе с ним — точности определения координат APБ, что проиллюстрировано для одного из APБ с номером 1C7C8C8880FFBFF (Франция) на рис. 2 и 3. Кроме того, из приведенных рисунков видно, что теоретически рассчитанные значения $EHE_{\rm A\PiP}$ (показанные голубым цветом) достоверно описывают фактически полученные местоопределения APБ (показанные красными точками).

Анализ полученных результатов

Выполнение требований КОСПАС-САРСАТ (погрешность местоопределения АРБ за 10-ми-

нутный интервал должна быть не более 5 км в 95% случаев для неподвижных АРБ) было достигнуто московской СОСПОИ уже на 2-м этапе фазы «Демонстрация и Оценка» и подтвердилось на 3-м этапе.

Положительные результаты на 2-м этапе были достигнуты во многом за счет использования специально разработанного алгоритма цифровой обработки сигнала [10], в результате чего была получена малая величина погрешности измерения частоты $CKO_{FOA} = 0,08$ Гц. При этом для зарубежных СОСПОИ при сопоставимой погрешности измерения времени погрешность измерения частоты составляла $CKO_{FOA} = 0,2-0,4$ Гц [7]. Как было показано в исследовании [3], основной вклад в точность определения координат вносят именно измерения частоты.

Для этапа III фазы «Демонстрация и Оценка» аппаратура и алгоритм работы московской СОСПОИ не претерпели изменений. Однако погрешность измерения частоты уменьшилась до *СКО_{FOA}* = 0,04 Гц.



Рис. 2. График сравнения ЕНЕ и реально полученных погрешностей местоопределения АРБ по одной посылке



Рис. 3. График сравнения *ЕНЕ* и реально полученных погрешностей местоопределения APБ по 13 посылкам

Такой результат свидетельствует об ожидаемо меньшей погрешности местоопределения АРБ при использовании существующих штатных ретрансляторов *L*-диапазона по сравнению с экспериментальной полезной нагрузкой S-диапазона. Это объясня-

на отношение сигнала к шуму и, соответственно, на точность измерения координат — G/T, измеренный на орбите на краю зоны обслуживания, для DASS в среднем составляет -21,46 дБ/К при требовании > -17,7 дБ/К, в то время как для Galileo ется тем, что определяющий показатель, влияющий FOS >-15,3 дБ/К и для Глонасс-К -16,3 дБ/К [11].

Выводы

На этапе III фазы «Демонстрация и Оценка» проводилась серия технических и эксплуатационных тестов. При проведении испытаний по тестам Т-4 и Т-5 на московской СОСПОИ были достигнуты следующие результаты:

– погрешность определения местоположения АРБ за 10-минутный интервал (по 13 посылкам) в 95% случаев при использовании штатных спутников с транспондерами *L*-диапазона в тестах Т-4 и Т-5 составила соответственно 0,64 и 0,82 км (в среднем), что подтвердило способность московской СОСПОИ выполнить точностные требования КОСПАС-САРСАТ для данного класса КА (≤5 км) и в 2,2–2,5 раза улучшило результаты, достигнутые на этапе II (с использованием спутников с транспондерами *S*-диапазона);

– данные результаты (погрешности местоопределения) лучше (меньше) результатов, полученных зарубежными аналогами, в 8–12 раз по результатам теста Т-4 и в 6–30 раз по результатам теста Т-5;

 отмечено негативное влияние неполного космического сегмента, которое приводило к значительному увеличению погрешности местоопределения в отдельные интервалы времени.

Список литературы

- Cospas-Sarsat demonstration and evaluation plan for the 406 MHz MEOSAR System (C/S R.018) // Issue 2. Revision 5. 2018.
- 2. Cospas-Sarsat MEOLUT performance specification and design guidelines (C/S T.019) // Issue 2. Revision 3. 2019.

- 3. 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 // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
- 4. Антонов Д. В., Федосеев А. В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС-САРСАТ // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
- 5. Meosar D&E test T-4: phase III results from the French MEOLUT. 2017.
- COSPAS-SARSAT MEOSAR D&E Phase III Technical Test T-4 Independent 2D, Location Capability USA, Maryland. – 2018.
- 7. Meosar D&E test T-5: phase III results from the French MEOLUT. 2017.
- Meosar D&E test T-5: phase III results from the Spitsbergen European MEOLUT. – 2017.
- COSPAS–SARSAT MEOSAR D&E Phase III Technical Test T-5 Independent 2D, Location for Operational Beacons USA Maryland. – 2018.
- Архангельский В.А., Селезнев В.В. Пути повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС-САРСАТ // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2017, т. 4, № 3. С. 77–78.
- 11. Description of the 406 MHz payloads used in the Cospas-Sarsat MEOSAR System (C/S T.016) // Issue 1. Revision 4.2019.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 11–20

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ——

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.11.20

Экспериментальное исследование эффективности поляризационного уплотнения для сверхскоростной радиолинии систем ДЗЗ

А.А.Аджибеков, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Березкин, к. т. н., nkpor@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Н. Ершов, nkpor@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С.В. Петров, *petrov_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А.В.Петров, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П.В.Шишминцев, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются принципы организации стенда для совершенствования и исследования характеристик сверхскоростных радиолиний как систем ДЗЗ в целом, так и отдельных их составляющих, позволяющих в перспективных комплексах выполнить целевые требования для решения необходимых задач народно-хозяйственного значения, которые обозначены в определяющих документах по данной тематике. Основное внимание уделено методам поляризационного уплотнения, позволяющего практически удвоить реализованную ранее пропускную способность реальной радиолинии, что особенно важно для хорошо освоенного и очень загруженного участка X-диапазона, выделенного для систем ДЗЗ (8,025–8,4 ГГц).

Ключевые слова: радиолиния, канал связи, поляризационная развязка, частотно-энергетические ресурсы, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), модуляция с высокой кратностью, корректирующее кодирование, сигнальное созвездие

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 11–20

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

Experimental Study of Polarization Multiplexing Efficiency for a Very-High-Speed Radio Link of Earth Remote Sensing Systems

A. A. Adzhibekov, contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation V. V. Berezkin, Cand. Sci. (Engineering), nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation A. N. Ershov, nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation S. V. Petrov, petrov_sv@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation A. V. Petrov, nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation P. V. Shishmintsev, contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The principles of organizing a test stand for the improvement and research of the characteristics of ultra-high-speed radio links both of Earth remote sensing (ERS) systems as a whole and of their individual components are considered. These principles allow promising complexes to meet the target requirements for solving the necessary tasks of national economic importance indicated in the definitive documentation on this topic. The main focus is on polarization multiplexing methods, which allow us to almost double the capacity of the real radio link achieved previously, which is especially important for a well-developed and very busy section of the *X*-band allocated for ERS systems (8.025–8.4 GHz).

Keywords: radio link, communication channel, polarization isolation, frequency-power resources, Earth remote sensing, high order modulation, correction coding, constellation diagram

Введение

Основные характеристики реализованных и перспективных радиолиний

К целевым функциям систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) прежде всего относятся [1,2]:

 – разрешающая способность (десятки сантиметров) и точность измерений гелиогеофизических характеристик (единицы или доли процента);

- зона охвата (сотни и тысячи километров);

– число спектральных каналов (до нескольких десятков) [2].

Для реализации этих требований должны быть оптимизированы и реализованы следующие характеристики радиолинии:

 – уникальная скорость передачи информации (до нескольких гигабит в секунду);

– виды модуляции высокого порядка (вплоть до 64–256 APSK);

 помехоустойчивые виды кодирования (TPC, LDPC и каскадные коды на их базе);

 методы обеспечения энергетических соотношений (характеристики антенных устройств, мощность передающих и чувствительность приемных устройств);

– методы коррекции погрешностей радиотехнических элементов радиолинии (амплитудных нелинейностей, АЧХ и НГВЗ).

Основная из требуемых характеристик радиолинии — сверхвысокая скорость передачи — определяется объемом информации, поступающей прежде всего от комплекса аппаратуры, обеспечивающей перечисленные выше целевые функции.

Типовая максимальная пропускная способность существующей группировки отечественных спутников ДЗЗ составляет ~300 Мбит/с [3,4].

Наиболее часто используемым методом увеличения скорости передачи информации с эксплуатируемых на текущий момент объектов ДЗЗ является частотное уплотнение, которое в перспективе не представляется соответствующим возросшим требованиям реализации целевых функций в указанном выше участке *X*-диапазона.

Поэтому для реализации радиолиний соответствующих параметрам целевых функций перспективных объектов [5] требуется существенное увеличение пропускной способности [6].

Наилучшие результаты по информативности были реализованы на прошедших недавно успешных испытаниях экспериментальной спутниковой системы передачи информации ДЗЗ с информационной скоростью передачи информации чуть более 850 Гбит/с, символьной скоростью в канале 266,6 МГц, видом модуляции 16 APSK, типом кодирования TPC0,8 (эквивалентная скорость передачи двоичных символов несколько более 1 ГГц/с) [4].

На текущий момент проведены стендовые испытания режима 32 APSK с кодированием типа LDPC 7/8. Анализ энергетических потерь, проведенный по комплексным результатам, показывает достаточно высокое качество реализации основных звеньев радиолинии (эксперимент проводился на серийно выпускаемой аппаратуре [7] и позволяет положительно оценить возможность проектирования реальной (одноканальной) радиолинии со скоростью передачи до 1500 Мбит/с).

В ближайшее время дальнейшее уплотнение канала связи предполагается производить путем реализации двухканального поляризационного уплотнения и модуляции высокого порядка (вплоть до 64 APSK) в сочетании с мощными современными видами корректирующего кодирования, а также с использованием адаптивного режима работы.

Уплотнение радиолинии методами поляризационного разделения каналов

Уплотнение радиолинии методами поляризационной развязки с использованием видов модуляции и кодирования, приведенными в табл. 2 (до 64 APSK и LDPC 7/8), в пределе может обеспечить скорость передачи в канале до $300 \cdot 6 \cdot 2 =$ = 3,6 Гсимв/с.

С учетом величины кодовой скорости и погрешностей реализации можно ставить задачу натурного эксперимента для реализации информативности радиолинии в одном канале до 3 Гбит/с.

К настоящему времени проведены испытания с видом модуляции 32 APSK и LDPC (7/8) кодом.

Упрощенная структурная схема аппаратуры, обеспечивающей поляризационную развязку радиолинии, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда для исследования эффективности поляризационного уплотнения в сверхскоростной радиолинии ДЗЗ. Состав аппаратуры: 1 — поляризационный селектор, 2 — источник сигнала канала левой поляризации, 3 — источник сигнала канала правой поляризации, 4 — приемник сигнала канала левой поляризации, 5 — приемник сигнала канала правой поляризации, 6 — передающая антенна, 7 — приемная антенна

Экспериментальный стенд для исследования эффективности поляризационного уплотнения в сверхскоростной радиолинии ДЗЗ представляет собой наведенные друг на друга приемную и передающую антенны, размещенные в безэховой камере. Обе антенны включают поляризационные селекторы, позволяющие антеннам излучать (принимать) независимо электромагнитные волны с левой и правой поляризацией. В качестве приемной и передающей антенн используются зеркальные антенны диаметром 300 мм (рис. 2).

Поляризационный селектор представляет собой облучатель в виде открытого конца квадратного волновода со ступенчатым поляризатором (рис. 3). Поляризатор выполнен в виде перегородки, плоскость которой перпендикулярна одной из стенок волновода. По мере удаления от открытого конца волновода высота перегородки ступенчато увеличивается и квадратный волновод переходит в два прямоугольных волновода. При возбуждении одного из этих прямоугольных волноводов волна Н10, распространяясь в сторону открытого конца волновода, взаимодействует с перегородкой, порождая две ортогональные линейно поляризованные волны в квадратном волноводе. Параметры ступенчатой структуры выбраны таким образом, чтобы обеспечить равенство амплитуд двух этих линейно поляризованных волн при фазовом сдвиге между ними в 90°.

Характеристики облучателей приемной и передающей антенн (КСВН и КЭЛ по каждому ка-



Диапазон частот, ГГц	8,025-8,4
Диаметр зеркала, мм	300
Коэффициент усиления с учетом потерь в фидере, дБ	Не менее 22
Круговая поляризация	Правая и левая
Коэффициент эллиптичности	Не менее 0,92
Углы поворота:	
по оси 1	$\pm 75^{\circ}$
по оси 2	$\pm90^{\circ}$
Масса, кг	$\sim \! 4$
Летная квалификация прототипа	На 2 КА ДЗЗ

Рис. 2. Двухканальная остронаправленная антенна (OHA) X-диапазона с двуугломестным приводом и поляризационной развязкой

налу, развязки между каналами) представлены на рис. 4-11 и в таблице 1.

Как видно из рис. 4–11 и табл. 1, КСВН обоих облучателей в рабочей полосе частот не превышает 1,26–1,27, значение КЭЛ облучателей в рабочей полосе частот не опускается ниже 0,92–0,93.

В табл. 2 приведены величины уровней поляризационной развязки каналов передачи в зависимости от реализованных коэффициентов эллиптичности наземных и бортовых антенн [8].

При приеме на открытый конец волновода измеренная по модулированному, широкополосному



Рис. 3. Облучатель для приемной и передающей антенн



Рис. 4. Частотная зависимость КСВН по каналу левой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 5. Частотная зависимость КСВН по каналу правой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны



Рис. 6. Частотная зависимость развязки между каналами левой и правой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 7. Частотная зависимость развязки между каналами левой и правой поляризации двухканального облучателя X-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны

сигналу величина поляризационной развязки оказалась равной около -27 дБ. Однако для получения уровня, необходимого для нормальной работы приемно-демодулирующего тракта оказалось необходимым смонтировать на приемной стороне «зеркало», не вполне согласованное с приемным облучателем, и коэффициент развязки упал до величины -21.6 дБ (выделено курсивом в табл. 2).

Анализ результатов эксперимента показал, что при специальном проектировании приемной антен-



Рис. 8. Частотная зависимость КЭЛ по каналу левой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 9. Частотная зависимость КЭЛ по каналу правой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны

ной системы эта величина может быть улучшена на 3-4 дБ.

В табл. З представлены данные, позволяющие оценить возможности информативности реальных радиолиний с использованием антенн различного диаметра (оценка проводилась для орбиты высотой 700 км).



Рис. 10. Частотная зависимость КЭЛ по каналу левой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны



Рис. 11. Частотная зависимость КЭЛ по каналу правой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны

Измерение эффективности поляризационного уплотнения

Общая структурная схема экспериментального стенда для измерения эффективности поляризационного уплотнения представлена на рис. 12.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ 17

Таблица 1. Характеристика двухканальных облучателей *Х*-диапазона частот круговой поляризации передающей и приемной антенны

Параметры	Облучатель передающей антенны	Облучатель приемной антенны			
Диапазон частот, МГц	8025-8400				
Направление вращения поляризации	Левая/Правая				
КСВН в полосе частот, не более	1,26	1,27			
Коэффициент эллиптичности по полю в максимуме диаграммы направленности	0,93	0,92			

Таблица 2. Соответствие коэффициента эллиптичности БА и НА величинам поляризационной развязки

Коэффициент эллиптичности		Развязка, дБ							
БА / НА	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
0,99	-40,0	-36,4	-33,9	-31,9	-30,3	-28,9	-27,7	-26,6	-25,7
0,98	-36,4	-33,9	-31,9	-30,3	-28,9	-27,7	-26,7	-25,7	-24,9
0,97	-33,9	-31,9	-30,3	-29,0	-27,8	-26,7	-25,8	-24,9	-24,1
0,96	-31,9	-30,3	-29,0	-27,8	-26,7	-25,8	-24,9	-24,2	-23,4
0,95	-30,3	-28,9	-27,8	-26,7	-25,8	-25,0	-24,2	-23,4	-22,8
0,94	-28,9	-27,7	-26,7	-25,8	-25,0	-24,2	-23,5	-22,8	-22,2
0,93	-27,7	-26,7	-25,8	-24,9	-24,2	-23,5	-22,8	-22,2	-21,6
0,92	-26,6	-25,7	-24,9	-24,2	-23,4	-22,8	-22,2	-21,6	-21,1
0,91	-25,7	-24,9	-24,1	-23,4	-22,8	-22,2	-21,6	-21,1	-20,5

Таблица 3. Возможности реальных радиолиний с использованием антенн различного диаметра

Пар	AMATD	Угол места							
Пар	amerp	5	15	30	60	90			
Ø3.5 M	1 канал	900	1200	1200	1500	1800			
20,0 M	2 канала	2×600	2×900	2×1200	2×1200	2×1200			
Ø4.8 M	1 канал	900	1200	1500	1800	1800			
Ø4,0 M	2 канала	2×900	2×1200	2×1200	2×1200	2×1200			
Ø7.0 м	1 канал	1200	1500	1800	1800	1800			
∞7,0 м	2 канала	2×1200	2×1200	2×1200	2×1500	2×1500			
<i>α</i> 0.0 γ	1 канал	1500	1800	1800	1800	1800			
25,0 M	2 канала	2×1200	2×1200	2×1500	2×1500	2×1500			



Рис. 12. Структурная схема экспериментальной установки 32 APSK, LDPC 7/8, $f_{\text{симв видео}} = 300$ МГц, $f_{\text{симв эфир}} = 1500$ Мсимв/с, $f_{\text{инф}} = 1312,5$ Мбит/с

Как видно из рисунка, при проведении эксперимента использовались:

– два высокоскоростных модулятора с видом модуляции до **32 APSK, LDPC 7/8,** $f_{\rm симв\ видео}=300\ {\rm M}\Gamma$ ц;

– два переносчика спектра 1,2 МГц в *X*-диапазон;

- два приемных устройства;

- два высокоскоростных демодулятора;

 передающий и приемный комплексы с поляризационной развязкой;

- анализатор спектра;

 управляющий компьютер с программным обеспечением (ПО) оценки качества принятого сигнала (сигнал/шум, сигнальное созвездие и вероятность ошибки).

Таким образом, суммарная информационная скорость равнялась — $f_{\rm инф \Sigma} = 2625$ Мбит/с, соответственно суммарная символьная скорость в эфире — $f_{\rm симв \ эфир \Sigma} = 3000$ МГсимв/с (при отсутствии корректирующего кодирования равна информационной).

Организация эксперимента основывалась на оптимизации в использовании частотно-энергетических ресурсов проектируемой радиолинии по результатам [9, 10].

Полученная в результате эксперимента достоверность приведена на рис. 13. Величина $E_{\rm bit}/N_0$ измерялась на выходе приемника и представляет собой отношение сигнала к сумме шума выставленного на выходе имитатора и помехи от второго поляризационного канала.

Как видно из рис. 13, энергетические потери при использовании кодирования из-за влияния второго поляризационного канала составляют 0,2–0,3 дБ, что можно считать вполне приемлемой величиной для реальной радиолинии.

Заключение

Таким образом, в соответствии с постановкой задачи [1, 2] и последних результатов в части использования поляризационного уплотнения, в статье изложены предварительные результаты анализа возможностей построения сверхскоростной радиолинии (вплоть до 3 Гбит/с) с ориентацией на выделенные частотные ресурсы в Х-диапазоне. Для оценки таких возможностей использовались ланные успешных испытаний (более 1 Гбит/с) [4,7], а также данные стендовых испытаний (несколько менее 3 Гбит/с). Очевидно, что для выполнения требований [1,2] по реализации информативности более 10 Гбит/с необходимо использовать рассмотренные в статье методы и оценки, однако с ориентацией на свободные частотные



Рис. 13. Зависимость вероятности ошибки от энергетики в канале $\log P_{err} = f(E)$

ресурсы в *Ка*-диапазоне в сочетании с методом частотного уплотнения.

Ожидается, что при решении этой задачи будут существенно превышены характеристики сходного по назначению объекта WorldView-3 (США), обеспечивающего максимальную на текущий момент скорость передачи информации с КА ДЗЗ (до 1200 Мбит/с) [6].

Список литературы

- Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 82 с. www.gisa.ru file766.doc.
- Райкунов Г., Любченко Ф., Карелин А. Векторы развития космической системы дистанционного зондирования Земли в России // Аэрокосмический курьер, 2012, № 6.
- 3. Бахтин А.А., Омельянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ технических характеристик, ограничиваю-

щих пропускную способность радиолинии Космос-Земля // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: Сб. трудов. М., 2014.

- 4. Березкин В.В., Ершов А.Н., Петров С.В., Петров А.В. От одного бита до гигабита (Краткий очерк истории развития пропускной способности цифровых радиолиний АО «Российские космические системы» и их внедрения) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 2. С. 98–101.
- 5. Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А. и др. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2016, т. 15, № 2. С. 30–35.
- 6. WorldView-3 (WV-3) // Sharing Earth Observation Recources: https://directory.eoportal.org/web/ eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3 (Дата обращения 05.06.2020).
- 7. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ //

Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 56-64.

- 8. Киселев А., Нагорнов В., Бобков В., Ефимов М. Поляризационная развязка: Взгляд эксперта // Сопnect! Мир связи. 2004. № 2. https://pro-connect.ru/ article.asp?id=4488 (Дата обращения 05.06.2020).
- 9. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Особенности расчета и проектирования высокоско-

ростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 1. С. 52–57.

 Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Методы проектирования и аппаратной реализации цифровых фильтров для высокоскоростной радиолинии в системах ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 25–31. РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 21–32

—— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ———

УДК 621.396.62 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.21.32

Особенности применения полноповоротных антенных систем в наземных комплексах радиомониторинга

С.В.Кожевников, к. т. н., office@stc-spb.ru

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

С. Д. Кирилюк, office@stc-spb.ru

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

С. С. Тимофеев, office@stc-spb.ru

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

А. Н. Глуздов, contact@spacecorp.ru

Космические войска, Министерство обороны, Москва, Российская Федерация

H.E. Теплоухова, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются технические решения и алгоритмы функционирования антенных систем в части наведения на низкоорбитальные космические аппараты (КА) и их сопровождения.

Выполнено расчетное моделирование для двухзеркальной антенной системы с эллиптическим фокусом (АДЭ) с диаметром зеркала 3,5 м на частоте 8,5 ГГц, в том числе рассчитаны диаграммы направленности пятипортовой системы со смещенными облучателями. Показано, что дискриминационная характеристика получается с неявно выраженным нулем, что приводит к ошибкам наведения. Повысить точность наведения предложено за счет размещения периферийных облучателей непосредственно на контррефлекторе. Моделирование показало, что при такой структуре облучателей практически невозможно избавиться от боковых составляющих (дребезга диаграммы направленности) в секторах, близких к направлению нуля антенной системы.

Более перспективным оказалось использование щелевых облучателей на контррефлекторе антенной системы, что позволяет сформировать в районе малых углов отклонения достаточно гладкую пеленгационную характеристику.

Ключевые слова: наведение, сопровождение, искусственный спутник Земли, моноимпульсная система, пеленгационная характеристика, облучающая система

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 21–32

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ——

Application of Full Rotatable Antenna Systems in Ground-based Radio Monitoring Complexes

S. V. Kozhevnikov, Cand. Sci. (Engineering), office@stc-spb.ru Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

S. D. Kiriljuck, office@stc-spb.ru

Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

S.S. Timofeev, *office@stc-spb.ru*

Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

A. N. Gluzdov, contact@spacecorp.ru

Space Forces, Ministry of Defense, Moscow, Russian Federation

N. E. Teploukhova, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Technical solutions and algorithms for the functioning of antenna systems are considered in terms of pointing at low-orbit spacecraft (SC) and their tracking.

Computational modeling was performed for a two-mirror antenna system with an elliptical focus with a mirror diameter of 3.5 m at a frequency of 8.5 GHz, including radiation patterns of a five-port system with offset irradiators. It is shown that the discriminatory characteristic is obtained with an implicit zero, which leads to pointing errors. It was proposed to increase the accuracy of pointing by placing peripheral irradiators directly on the counterreflector. Modeling showed that with such a structure of irradiators it is almost impossible to eliminate the side components (jitter of the radiation pattern) in sectors close to the zero direction of the antenna system.

The use of slot irradiators on the counterreflector of the antenna system turned out to be more promising, which makes it possible to form a fairly smooth direction-finding characteristic in the region of small deviation angles.

Keywords: pointing, tracking, artificial Earth satellite, monopulse system, direction-finding characteristic, irradiating system

Введение

Для наземных комплексов радиомониторинга космических аппаратов (КА), находящихся на низко- и высокоэллиптических орбитах, требуется проектирование и производство соответствующих антенных систем. При этом возникает необходимость повышения эффективности систем автоматического сопровождения КА. Под эффективностью в данном случае понимается получение требуемого эффекта (точности наведения) при минимизации затрат в ходе реализации системы.

Анализ современных методов наведения

Современные методы наведения можно классифицировать по следующим группам [1]:

- ручное наведение;
- программное наведение;

автоматическое наведение по принимаемым сигналам;

- смешанное наведение.

Ручное наведение чаще всего используется при радиомониторинге геостационарных КА или в задачах привода в начальную точку ожидания для низколетных КА.

Программное наведение — это дискретное управление антенной по предварительно вычисленным траекторным параметрам. Как любое дискретное управление, этот метод основан на компенсации ошибки, возникающей в предыдущем шаге относительно последующего. Кроме программных ошибок, при этом возникают инструментальные ошибки наведения, обусловленные ограниченной точностью датчиков и несовершенством механизмов сопровождения — ошибки, вызываемые, в частности, инерционностью системы, люфтами в управляемых приводах и т. п. Создание безлюфтовых механизмов, особенно для антенн среднего и большого диаметра, существенно усложняет систему и повышает ее стоимость [2].

Снизить погрешность наведения, возникающую при программном методе, позволяет автоматическое наведение, которое на современных станциях приема сигналов КА реализуется различными способами.

Так, для КА на квазистационарных орбитах широко распространен метод сканирования пространства. При этом через установленные промежутки времени антенная система производит поиск максимума приема сигнала. Сканирование происходит обычно в пределах разрешенной ширины диаграммы направленности. Независимо от выбранной траектории сканирования, необходимо произвести отсчеты как минимум в четырех направлениях пространства: вверх-вниз, вправовлево и выбрать ориентацию с максимальным уровнем [3].

Для низколетящих КА такая система сопровождения оказывается нерациональной, поскольку требует для принятия решения многократных пробных движений рефлектора. При значительной инерционности массивной антенной системы работоспособность такой схемы сомнительна.

Упростить эту систему позволяет известный способ с вращающимся контррефлектором. При этом контррефлектор должен быть децентрализован: смещен относительно электрической оси антенны, а значит, принципиально будут иметь место потери в энергетике принимаемого сигнала. Кроме того, в принимаемом сигнале возникают дополнительные модуляционные искажения, отнюдь не улучшающие качество приема. Такой метод можно рекомендовать для решения задач обнаружения сигналов, но не для приема с последующей обработкой.

В связи с вышеизложенным в настоящее время оценивается целесообразность разработки моноимпульсной системы сопровождения в X-диапазоне частот. Сущность таких систем состоит в формировании за счет разнесенных диаграмм направленности пространственной пеленгационной характеристики, как показано на рис. 1, *a*. На рис. 1, *б* показан вариант облучающей системы для моноимпульсного наведения на КА [4,5].

Практически существуют как четырехпортовые, так и пятипортовые моноимпульсные системы. Однако практика их применения в *X*-диапазоне весьма ограничена в связи с существенными искажениями пеленгационной характеристики, обусловленными взаимным влиянием близко распо-



Рис. 1. *а* — Структурная схема построения моноимпульсного наведения; *б* — моноимпульсная система сопровождения КА

ложенных облучателей, несимметричных относительно оптической оси [6].

Для иллюстрации предварительных результатов далее использованы результаты моделирования диаграмм направленности [7]. Расчетное моделирование производилось в программе CST Studio Suite (ЦСТ Студио Сьют) для двухзеркальной антенной системы с эллиптическим фокусом (АДЭ) с диаметром зеркала 3,5 м на частоте 8,5 ГГц.

На рис. 2, *а* представлена трехмерная диаграмма направленности однопортовой системы, а на 2, *б* — та же характеристика в полярных координатах. Диаграммы направленности центрального облучателя пятипортовой системы представлены на рис. 3, *а* и 3, *б*.

Для центрального облучателя отличия несущественны, по крайней мере, до первого бокового лепестка.

Для смещенных облучателей в пятипортовой системе диаграммы направленности сильно искажаются (рис. 4).

На рис. 4, б и рис. 4, в в полярной системе показаны диаграммы направленности в главных плоскостях антенны — вертикальной и горизонтальной.



Рис. 2. Диаграммы направленности однопортовой системы

Облучатель находится ниже центрального. Поэтому в вертикальной плоскости диаграмма направленности несимметричная, а в горизонтальной симметричная, но с провалом по центру. Те же особенности и у диаграмм направленности остальных (кроме центрального) облучателей.

При таких диаграммах направленности дискриминационная характеристика получается с неявно выраженным нулем, что приводит к ошибкам наведения.

Повышение точности наведения

Повысить точность наведения предлагается за счет размещения периферийных облучателей непо-

средственно на контррефлекторе. На рис. 5 представлен вариант такого контррефлектора.

Как видно из рис. 6, основная диаграмма направленности антенны с модифицированным контррефлектором практически не изменилась.

Несколько менее изрезанными в области «рабочих» углов оказались и другие диаграммы антенны. На рис. 7 они приведены при облучателе, расположенном ниже фокальной оси антенны.

На рис. 7, б и 7, в представлены диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Моделирование показало, что при такой структуре облучателей практически невозможно избавиться от боковых составляющих (дребезга диаграммы направленности) в секторах, близких





Рис. 3. Диаграммы направленности центрального облучателя 5-портовой системы

к направлению нуля антенной системы. Кроме того, для выделения нужной составляющей поля оказалось необходимым применение ортомодов для каждого из облучателей.

Более перспективным стало использование щелевых облучателей на контррефлекторе антенной системы. На рис. 8, *a* (вид со стороны рефлектора) и 8, *б* (вид с противоположной стороны) приведены изображения контррефлектора АДЭ с щелевыми облучателями. Поиск оптимального размещения и формы апертуры облучателей привели к структуре из четырех радиально направленных щелей, максимально приближенных к центру контррефлектора размером $2\lambda \times 0.3\lambda$ (λ — длина волны).

Диаграмма направленности центрального облучателя практически не меняется — потери составляют не более 0,5 дБ, а диаграммы направленности щелевых облучателей имеют гладкую характеристику в районе малых углов.



Рис. 4. Диаграммы направленности смещенных облучателей 5-портовой системы



Рис. 5. Контррефлектор с облучающими системами

Для подстройки антенной системы между командами наведения представляют интерес именно малые углы. На рис. 9, *а* и 9, *б* приведены диаграммы направленности двух противоположных щелевых облучателей.

Разность этих диаграмм позволяет сформировать в районе малых углов отклонения достаточно гладкую пеленгационную характеристику, приведенную на рис. 10, которая получена численным вычитанием диаграмм направленности, как показано на рис. 9, б и 9, а.

Недостатком пассивных моноимпульсных систем является возможность увода антенной системы при наличии более мощного ложного сигнала, попадающего в диаграмму направленности антенной системы. Устранить эту проблему должен позволить комбинированный метод наведения, когда в пределах расчетных данных антенная система наводится по полученным параметрам, а непрерывное уточнение производится моноимпульсным методом. Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис. 11.

Заключение

В наземных комплексах радиомониторинга КА, находящихся на низко- и высокоэллиптических орбитах, применяются полноповоротные трехосевые антенные системы с диаметром рефлектора от 1 м до 5 м. При этом антенные системы с диаметром рефлектора более 3 м, как правило, являются двухзеркальными. В настоящее время для таких антенн ведутся работы по повышению точности сопровождения КА. Предложены рекомендации, направленные на повышение точности сопровождения КА на низко- и высокоэллиптических орбитах.



Рис. 6. Диаграммы направленности центрального облучателя с модифицированным контррефлектором



Рис. 7. Диаграммы направленности с облучателем на контррефлекторе







Рис. 9. Диаграммы направленности двух противоположных щелевых облучателей



Рис. 10. Пеленгационная характеристика



Рис. 11. Комбинированный метод наведения приемной антенной системы

Список литературы

- 1. Большая энциклопедия нефти и газа (наведение — антенна): сайт. URL: http://www.ngpedia.ru/ id168115p1.html (Дата обращения 16.05.2020).
- 2. Бобков В.Ю., Званцугов Н.С. Системы наведенияантенн ООО «Технологии радиосвязи» // Первая миля, 2010, т. 17, № 2. С. 42–45.
- 3. Галкин А.П. Основы радиотехнических систем. Учеб. пособ. Владимир: Владимирский государственный университет, 2004.

- 4. *Родс Д.Р.* Введение в моноимпульсную радиолокацию. М.: Сов. радио, 1960. 158 с.
- 5. *Белоцерковский Г.Б.* Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Сов. радио, 1975. 336 с.
- 6. *Травкин Д*. Моноимпульсный метод автосопровождения КА // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание», 2017, № 6 (122). С. 51.
- 7. *Фрадкин А.З.* Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977. 440 с.: ил.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 33–38

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ———

УДК 621.396.67 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.33.38

Исследование эффективности применения киральных метаматериалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов

С.Б.Филиппов, к.т.н., fsb-progress@yandex.ru

АО «Ракетно-космический центр "Прогресс"», Самара, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы применения искусственных композитных материалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов. Приведены формулы для расчета параметров киральности метаматериалов и электродинамические модели подложек. Показана эффективность использования кирального заполнения в конструкции двухзаходной конической логоспиральной антенны, позволяющего снизить массогабаритные характеристики. Выполнена задача по математическому моделированию, и приведены результаты расчета электрических характеристик двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением в программном комплексе FEKO. Приведена оценка перспективности использования данных антенн для радиотехнических систем космических аппаратов.

Ключевые слова: метаматериалы, киральные среды, поляризация, электродинамическая модель, диаграмма направленности, резонансные свойства

Effectiveness Research of Chiral Metamaterials in the Structures of Antennas of Spacecraft Radio Engineering Systems

S. B. Philippov, Cand. Sci. (Engineering), fsb-progress@yandex.ru JSC "Rocket and Space Center "Progress", Samara, Russian Federation

Abstract. The article considers the prospects of using artificial composite materials in antenna design of radio engineering systems of spacecraft. The formulas are given to calculate chirality parameters of metamaterials and electrodynamic models of substrates are presented. The efficiency of using chiral filling in the design of the two-wire conical log-spiral antenna, which allows reducing weight and size characteristics, is shown. The task of mathematical simulation was completed and the calculation results of electrical characteristics, two-wire conical log-spiral antenna with chiral filling are presented in the FEKO software complex. The assessment of the prospects of employing these antennas for radio engineering systems of spacecraft is given.

Keywords: metamaterials, chiral media, polarization, electrodynamic model, directional diagram, resonant properties

С.Б.ФИЛИППОВ

Введение

Одной из важных задач, решаемых современной радиоэлектроникой при разработке радиотехнических систем космических аппаратов (РТС КА), является развитие теории и техники антенн. Как правило, разработка антенн, которые обеспечивали бы необходимые электродинамические характеристики, начинается с расчетов по классическим инженерным формулам, согласно которым такие антенны рассматриваются в различных приближениях, основанных на физике происходящих в антенне процессов [1, 2]. Однако использование антенн, устанавливаемых на КА, определенных частотных диапазонов (в частности, метрового диапазона) встречает затруднения, связанные с различными ограничениями, такими как размеры и конфигурации самого аппарата, зоны полезного груза, компоновка научной и целевой аппаратуры, невозможность применения раскрывающихся устройств и т.д.

В 1967 г. В.Г. Веселаго [3] рассмотрел киральные отрицательные среды и предложил интересные варианты использования этих материалов, связанные с аномальным преломлением. Создание подобного материала, например, для антенн диапазонов ОВЧ или УВЧ, в силу известного принципа электродинамического подобия потребует реализации структур с аналогичными электрическими размерами элементов, которые будут иметь существенно большие, абсолютные (геометрические) размеры включений [4]. Тем не менее электрические размеры включений остаются весьма малыми и, как показывают результаты исследований, применение метаматериалов в антенной технике позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели, а также добиться более высокой направленности антенн [5-7]. С другой стороны, метаматериалы также не свободны и от недостатков [8]. Наиболее важными факторами, ограничивающими возможности метаматериалов, являются высокие потери, узкая полоса частот, а также анизотропное поведение. Однако в настоящее время активно проводятся исследования так называемых «управляемых» метаматериалов [9], представляющих собой слой из диэлектрического материала с внедренными элементами, материальные параметры которого зависят от внешних электрических и магнитных полей (феррит, сегнетоэлектрик и т.п.). Использование данных «управляемых» метаматериалов в конструкции антенн позволит управлять ее характеристиками при помощи внешних электрических и магнитных полей. Поэтому дальнейшее совершенствование конструкций антенн на основе метаматериалов является перспективным, о чем свидетельствует активность публикаций в журналах и материалах конференций за последнее годы.

В данной статье представлены результаты построения математической модели и анализ характеристик двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением для повышения эффективности функционирования РТС КА. Разработка таких математических моделей позволит создавать принципиально новые конструкции антенн, отличающиеся по своим габаритам и оптимальным диаграммам направленности в определенном частотном диапазоне.

Киральные среды и их структура

Среди метаматериалов следует выделить киральные среды, представляющие собой диэлектрический контейнер, в котором равномерно распределены проводящие включения зеркально-ассиметричной формы. В качестве таких включений могут выступать спирали, S-элементы, Ω-частицы, разомкнутые кольца и др. Данные среды обладают рядом уникальных свойств, основными из которых являются кросс-поляризация падающего поля, благодаря которому в среде происходит бифуркация нормальных волн на волны с лево- и правокруговыми поляризациями. Двумя основными типами киральных сред являются биизотропные (изотропные киральные) материалы, в которых зеркально-асимметричные элементы ориентируются произвольным образом, тем самым обеспечивая изотропию среды для волн с право- и левокруговыми поляризациями, и бианизотропные (анизотропные киральные) среды, в которых элементы ориентированы одинаково, создавая оси анизотропии [10,12]. На рис. 1 приведена электродинамическая модель подложки из биизотропного материала (все элементы — спирали, ориентированы хаотично), а на рис. 2 — электродинамическая модель подложки из бианизотропного материала (все элементы — спирали, направлены вертикально).


Рис. 1. Электродинамическая модель подложки из биизотропного материала



Рис. 2. Электродинамическая модель подложки из бианизотропного материала

В качестве однородного диэлектрического контейнера, в котором определенным образом размещаются описанные проводящие включения, обычно используется материал с небольшой диэлектрической проницаемостью, например пенополистирол.

Для определения дисперсии макроскопических параметров киральной структуры используется модель Максвелла Гарнетта. Выражения для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости и параметра киральности приведены ниже [11]:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_c + \frac{\beta_0^2}{4\pi^2(f_0^2 - f^2)},\tag{1}$$

$$\chi(f) = A_0 \frac{\beta_0^2 f}{2\pi c (f_0^2 - f^2)},\tag{2}$$

где ε_c — диэлектрическая проницаемость контейнера, в котором размещены проводящие включения зеркально-ассиметричной формы;

 β_0 — параметр, имеющий размерность частоты и связанный с внутренними процессами в киральной структуре;

 A_0 — расстояние между соседними проводящими включениями;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$
 — скорость света в вакууме;
 f_0 — резонансная частота киральной с

 f_0 — резонансная частота киральной структуры.

Резонансная частота макроскопических параметров кирального материала (метаматериала) в целом определяется резонансными свойствами проводящих включений, лежащих в основе данного метаматериала, в соответствии с формулой Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},\tag{3}$$

где L — индуктивность киральных элементов; C — емкость киральных элементов.

Перспективы развития конструкций антенн на основе киральных метаматериалов

Как отмечается в [12], «особое место в антенной технике занимают микрополосковые антенны (МПА), обладающие рядом несомненных достоинств: малые габариты, относительная простота и дешевизна изготовления и т. д. Обычно подложка у таких антенн изготавливается из высокочастотного диэлектрика, однако такой подход для дальнейшего улучшения массогабаритных и электрических характеристик практически исчерпал себя. В связи с этим предлагается в качестве подложки МПА, на которой расположен плоский излучатель, использовать киральный метаматериал на основе спиралей. Применение такой подложки позволит сместить резонансы по частоте, а также существенно снизить добротность, то есть сократить габариты, а также позволит расширить диаграмму направленности МПА и увеличить коэффициент заполнения».

Один из наиболее важных вопросов в теории киральных сред касается методов их электродинамического анализа и построения адекватных математических моделей. Под адекватностью будем понимать корректность качественного и количественного отображения математической моделью процессов, происходящих в метаматериале. Хорошая математическая модель может существенно сократить время и ресурсы, затрачиваемые на создание метаматериала с заданными свойствами.

Резонансные свойства киральных сред могут оказаться полезными с точки зрения формирования пространственных и импедансных характеристик антенн в нескольких относительно узких полосах частот, соответствующих частотам приема и передачи используемых РТС КА. Достаточно перспективным направлением в современных РТС КА представляется использование конструктивных решений двухзаходной конической логоспиральной антенны (ДКЛСА) с киральным заполнением (в данном случае супербиизотропным — правые спирали), модель которой представлена на рис. 3.

С помощью программы математического моделирования (FEKO) были рассчитаны импедансные и направленные характеристики данной антенны, в частности коэффициент отражения (рис. 4), а также диаграмма направленности и коэффициент усиления (рис. 5). Так же для сравнения была рассчитана диаграмма направленности (с аналогичными геометрическими размерами) двухзаходной конической логоспиральной антенны без кирального заполнения.

Заключение

На основании рассчитанных характеристик были сделаны следующие выводы:

 использование кирального заполнения улучшает согласование на рабочих частотах антенны, при этом позволяет снизить габариты антенны.
 В частности, рабочая частота снижается с 640 МГц до 510 МГц;

– использование кирального заполнения позволяет обеспечивать работу антенны еще как ми-



Рис. 3. Модель двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением

нимум на одной частоте. Кроме того, значительно расширяется рабочая полоса частот антенны;

 коэффициент усиления у антенны с киральным заполнением больше, чем у классической антенны, при этом ширина диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ уменьшается незначительно.

Применение антенн на основе метаматериалов возможно для бортовой аппаратуры автоматической идентификации судов (БА АИС). В настоящее время для данных систем устанавливаются антенны линейной вертикальной поляризации, обеспечивающие связь «судно-судно», «судно-маяк». В связи с установкой БА АИС на КА, возможно, потребуется разработка новых конструкций ДКЛСА УКВ-диапазона уменьшенных габаритов на основе киральных метаматериалов, способных обеспечить связь «судно-КА», «судно-судно», «судно-маяк» с одинаковой (круговой) поляризацией.



Рис. 4. Коэффициент отражения на фидер



Рис. 5. а) Диаграмма направленности двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением на частоте 510 МГц; б) диаграмма направленности двухзаходной конической логоспиральной антенны без кирального заполнения на частоте 640 МГц

Список литературы

- Сверхширополосные антенны: Сб. статей / Пер. с англ. С. В. Попова и В. А. Журавлева; под ред. Л. С. Бененсона. М.: МИР, 1964. 416 с.
- 2. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1973. 460 с.
- Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // Успехи физических наук, 1967, т. 92, вып. 3. С. 517–526.
- 4. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля, 2010, № 3-4. С. 44-60.
- 5. Авдюшин А.С., Власов М.Ю., Пастернак Ю.Г. Применение метаматериалов в антенной технике // Вестник ВГТУ, 2013, т. 9, вып. 3–1. С. 132–135.
- 6. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология, бизнес, 2009, № 7. С. 70–79.
- 7. Wang L., Wang L., Le-Wei Li J. A series-fed metamaterial microstrip antenna array of broadband and high-

gain // 2012 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, 2012. P. 1–2. DOI: https://doi.org/10.1109/iWEM.2012.6320361.

- Митра Р. Критический взгляд на метаматериалы // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, № 9. С. 1051–1058.
- 9. *Pozar D.* Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, vol. 35, № 6. P. 613–621. DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.1987. 1144161.
- Bi K., Guo Y., Liu X. et al. Magnetically tunable Mie resonance-based dielectric metamaterials // Sci. Rep., 2014, vol. 4. P. 7001.
- Неганов В.А., Осипов О.В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
- Бузов А. Л., Клюев Д. С., Нещерет А.М., Неганов В.А. Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2017, т. 20, № 3-1. С. 15–20.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 39–49

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

УДК 528.88(15) DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.39.49

Методологические аспекты создания сервисов многоцелевой аэрокосмической системы прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

О.А.Алексеев, д. т. н., профессор, centr31@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В.Б.Серебряков, centr31@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П.А.Тищенко, centr31@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Н.В.Разумова, к.г.н., доцент, centr31@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А.Д.Линьков, centr31@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены научно-методические и научно-технические аспекты создания основных элементов Многоцелевой аэрокосмической системы прогнозного мониторинга (МАКСМ) чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера на территории России и стран СНГ в виде ее информационных сервисов мониторинга и прогнозирования ЧС. Рассмотрено проводимое в МАКСМ многоэтапное информационное преобразование мониторинговых сигналов в прогнозы ЧС. Предложен состав векторов прогнозов ЧС, формируемых в сервисах МАКСМ. Определены условия, обеспечивающие своевременность и качество прогнозов. Предложена обобщенная функциональная структура МАКСМ, реализующая решение целевых задач мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений, наводнений, природных пожаров и техногенных катастроф, а также решение задач управления элементами системы и обеспечения их функционирования. Предложена техническая структура МАКСМ, отражающая взаимодействие целевых аппаратно-программных комплексов сервисов с остальными элементами системы. Показано место сервисов в системе и взаимодействие их с другими элементами. Определена роль сервисов МАКСМ в проводимых в системе преобразованиях мониторинговой информации. Сформулированы основные целевые задачи сервисов МАКСМ. Рассмотрен состав информационного ресурса, используемого сервисами МАКСМ для решения задач по назначению, перечислены возможные источники мониторинговых данных. Определен функционал сервисов, обеспечивающий интеграцию в них доступных информационных ресурсов при взаимодействии с источниками мониторинговых данных и потребителями прогнозной информации, при решении задач тематической обработки мониторинговой информации, при решении управляющих и обеспечивающих задач. Обозначен состав средств сервисов МАКСМ, необходимых для реализации универсального и гибкого функционала формирования запросов к данным из внешних источников, структурирования и систематизации получаемых пространственных данных, их загрузки и наглядного отображения.

Ключевые слова: Многоцелевая аэрокосмическая система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций, сервис МАКСМ, интеграционный функционал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 39–49

___ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, _____ Обработка информации и системы телеметрии

Methodological Aspects of Creating the Services of the Multipurpose Aerospace Forecasting System for Natural and Anthropogenic Emergencies

O.A. Alekseev, Dr. Sci. (Engineering), Prof., centr31@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. B. Serebryakov, centr31@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

P. A. Tishchenko, centr31@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

N. V. Razumova, Cand. Sci. (Geography), associate Prof., centr31@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. D. Lin'kov, centr31@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article considers the scientific, methodological and engineering aspects of creating the basic elements of the Multipurpose Aerospace Forecast Monitoring System (MAFMS) for natural and anthropogenic emergencies in Russia and the CIS countries in the form of its information services for emergency monitoring and forecasting. The multi-stage information conversion of monitoring signals into emergency forecasts conducted at the MAFMS is considered. The composition of emergency forecast vectors generated by the MAFMS services is proposed. The conditions ensuring the timeliness and quality of forecasts are determined. The generalized functional structure of the MAFMS is proposed, which implements the solution of the objectives of monitoring and forecasting strong earthquakes, floods, natural fires and technological disasters, as well as solving the problems of controlling the elements of the system and ensuring their functioning. Proposed is the MAFMS technical structure, which reflects the interaction of target hardware and software systems of services with other elements of the system. The place of services in the system and their interaction with other elements is shown. The role of MAFMS services in the monitoring of the information transformation carried out in the system is determined. The main goals of the MAFMS services are formulated. The composition of the information resource used by the MAFMS services for solving objectives for the intended purpose is considered, possible sources of monitoring data are listed. Determined are the functional capabilities of the services, which ensure the integration of accessible information resources in them when interacting with sources of monitoring data and consumers of predictive information, when solving problems of thematic processing of monitoring information, when solving managing and supporting tasks. The composition of the MAFMS services necessary for the implementation of a universal and flexible functionality for generating queries to data from external sources, structuring and systematization of the spatial data received, their loading and visual display is indicated.

Keywords: Multi-purpose aerospace emergency monitoring and forecasting system, MAFMS service, integration functionality

Введение

Работы по созданию в России системы МАКСМ ведутся с начала XXI века. Первоначальное видение МАКСМ как международной (в широком смысле этого слова) системы [1-3] в силу ряда причин, в том числе и международного характера, трансформировалось, изменился и первоначальный состав решаемых системой задач. В настоящее время МАКСМ рассматривается как Многоцелевая аэрокосмическая система прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера на территории России и стран СНГ. В первую очередь МАКСМ нацелена на мониторинг и прогнозирование наиболее опасных и распространенных на территории России и стран СНГ природных ЧС: сильных (с магнитудой $M \ge 6$) землетрясений, наводнений, природных пожаров, а также техногенных катастроф в виде смещений и разрушений сложных инженерных сооружений. Помимо России в создании элементов МАКСМ принимают участие Беларусь, Армения и Казахстан.

Обоснован космический сегмент МАКСМ (привлекаемые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), радионавигационные системы, системы информационного обмена и связи), играющий, в силу глобального и оперативного характера действия космических средств, ведущую роль в мониторинге предвестников ЧС и обмене мониторинговой информацией [2,4].

Основными объектами рассмотрения на современном этапе создания МАКСМ становятся информационные сервисы мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера [5]. Сервисы осуществляют обработку мониторинговой информации и формирование прогнозов ЧС. Проблематика построения сервисов обусловлена разнообразием подходов к их разработке, большой разнородностью используемых ими мониторинговых данных, неполным учетом в существующих сервисах требований потребителей мониторинговой и прогнозной информации к информационным продуктам в условиях цифровой ориентации развития экономики России и стран СНГ.

В статье рассматриваются научно-методические и научно-технические аспекты построения сервисов мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера с учетом их места и роли в составе МАКСМ.

Основные информационные преобразования в МАКСМ

Для определения места и роли информационных сервисов в составе МАКСМ рассмотрим основные этапы преобразования исходной мониторинговой информации о предвестниках ЧС в прогнозы ЧС.

Результаты функционирования МАКСМ отобразим вектором прогнозов ЧС $\Pi(t + \tau_{\Phi})$:

$$\Pi^{T}(t+\tau_{\Phi}) =$$

$$= (\widetilde{G}^{T}(t_{\Pi}, r_{\Pi}, t+\tau_{\Phi}), T_{\Pi}(t+\tau_{\Phi}), R_{\Pi}^{T}(t+\tau_{\Phi}), \cdots,$$

$$\cdots, p_{l}(t+\tau_{\Phi}) \cdots),$$

где *t* — время, принадлежащее временному интервалу наблюдений предвестников ЧС;

 τ_{Φ} — интервал времени от начала наблюдений до момента формирования прогноза ЧС;

 $G(t_{\Pi}, r_{\Pi}, t + \tau_{\Phi}) = G(t_G, \tau_G) + \varepsilon(t + \tau_{\Phi})$ — вектор параметров прогнозируемой ЧС (например, один из параметров — магнитуда сильного землетрясения), являющихся функциями времени t_{Π} , принадлежащего прогнозируемому временному интервалу ЧС $T_{\Pi}(t + \tau_{\Phi}), t_{\Pi} \in T_{\Pi} = \overline{t_{\Pi\Pi}, t_{K\Pi}}; t_{\Pi\Pi}, t_{K\Pi}$ — соответственно прогнозируемые моменты времени начала и окончания ЧС и вектора координат $r_{\Pi}^T = (x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi})$, принадлежащего прогнозируемые моменты $T_{\Pi} = (R_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}, t_{\Pi}), r_{\Pi} \in R_{\Pi}^T = (R_{X\Pi}, R_{Y\Pi}, R_{Z\Pi}), R_{X\Pi} = \overline{x_{\min\Pi}, x_{\max\Pi}}, R_{Y\Pi} = \overline{y_{\min\Pi}, y_{\max\Pi}}, R_{Z\Pi} = \overline{z_{\min\Pi}, z_{\max\Pi}};$

 $G(t_G, r_G)$ — вектор истинных, но неизвестных значений параметров ЧС, являющихся функциями времени t_G , принадлежащего временному интервалу ЧС T_G : $t_G \in T_G = \overline{t_{HG}}, \overline{t_{KG}}, t_{HG}, t_{KG}$ соответственно истинные, но неизвестные моменты времени начала и окончания ЧС и вектора координат $r_G^T = (x_G, y_G, z_G)$, принадлежащего пространственной области R_G с истинными, но неизвестными значениями параметров $r_G \in R_G^T =$ $= (R_{XG}, R_{YG}, R_{ZG});$ $R_{XG} = \overline{x_{\min G}, x_{\max G}}, R_{YG} = \overline{y_{\min G}, y_{\max G}}, R_{ZG} = \overline{z_{\min G}, z_{\max G}},$ Значения параметров природных и техногенных процессов $G(t_G, r_G)$ для моментов времени t_G и вектора координат r_G приобретают такие критические значения, что делают ситуацию чрезвычайной;

 $\varepsilon_G(t+\tau_\Phi)$ — вектор погрешностей параметров прогнозируемой ЧС;

 $p_l(t+\tau_{\Phi}) - l$ -й параметр оценки качества прогноза, $l \in m_p$, где m_p – число используемых параметров, примерами которых являются оценки вероятностей оправдываемости прогноза по параметрам ЧС, по составляющим временного интервала и пространственной области проявления ЧС;

T — индекс операции транспонирования.

Сформированные в МАКСМ прогнозы ЧС служат основой для принятия решений $U(t + \tau_U)$ органами исполнительной власти федерального, регионального и местного уровней по предупреждению населения о ЧС и проведению необходимых мероприятий:

$$\Pi(t+\tau_{\Phi}) \to U(t+\tau_U),\tag{1}$$

где τ_U — интервал времени от начала наблюдений предвестников ЧС до момента завершения мероприятий по предотвращению возможных негативных последствий ЧС.

Своевременность прогнозирования и проведения мероприятий по предотвращению негативных последствий ЧС достигается при условии

$$t + \tau_{\Phi} < t + \tau_U < t_{\text{HG}}.\tag{2}$$

Высокое качество прогноза определяется следующими условиями:

$$\begin{aligned} \left\| \widetilde{G}(t_{\Pi}, r_{\Pi}, t + \tau_{\Phi}) - G(t_G, r_G) \right\| &\leq \varepsilon_{\Pi \underline{\mathcal{I}}}(t + \tau_{\Phi}), \\ T_{\Pi} \supset T_G, \quad R_{\Pi} \supset R_G. \end{aligned}$$
(3)

Здесь $\varepsilon_{\Pi \Pi}(t+\tau_{\Phi})$ — допустимое значение обобщенной погрешности сформированных при прогнозе оценок параметров ЧС;

 $\|\cdot\|$ — выбранная норма разности вектора оценок параметров $\widetilde{G}(t_{\Pi}, r_{\Pi}, t + \tau_{\Phi})$ прогнозируемой ЧС и вектора истинных значений параметров $G(t_G, r_G)$ ЧС.

Исходная информация для формирования прогнозов ЧС содержится в параметрах мониторинговых сигналов, излучаемых, отражаемых, пропускаемых или формируемых объектами мониторинга природного (участки поверхности Земли, области ее тропосферы, ионосферы, магнитосферы) и техногенного (сложные инженерные сооружения и др.) характера. Таким образом, для поддержки принятия решений (1) в системе MAKCM реализуется многоэтапное обобщенное информационное преобразование:

$$\begin{array}{ccc} S(t,r_S) & N(t,r_Q) \\ \downarrow & \downarrow \\ Q(G(t_G,r_G),t,r_Q) \rightarrow \widetilde{S}_{\Pi \mathrm{PM}}(\Lambda,t,r_Q) \rightarrow \\ \rightarrow \widetilde{\Lambda}(Q,t+\tau_\Lambda,r_Q) \rightarrow \widetilde{Q}(G,t+\tau_Q,r_Q) \rightarrow \Pi(t+\tau_\Phi), \end{array}$$

$$(4)$$

где $Q(G(t_G, r_G), t, r_Q)$ — вектор наблюдаемых параметров предвестников ЧС, зависящих от вектора параметров $G(t_G, r_G)$ готовящейся ЧС; времени t, принадлежащего временному интервалу наблюдения предвестников ЧС T_Q , $t \in T_Q = \overline{t_{HQ}}, \overline{t_{KQ}}, t_{HQ}, t_{KQ} -$ соответственно моменты времени начала и окончания наблюдения предвестников ЧС; вектора координат $r_Q^T = (x_Q, y_Q, z_Q)$, принадлежащего пространственной области R_Q наблюдения предвестников ЧС, $r_Q \in R_Q^T = (R_{XQ}, R_{YQ}, R_{ZQ}), R_{XQ} = \overline{x_{\min Q}}, \overline{x_{\max Q}}, R_{YQ} = \overline{y_{\min Q}}, \overline{y_{\max Q}}, R_{ZQ} = \overline{z_{\min Q}}, \overline{z_{\max Q}}, при этом <math>R_Q \supset R_G$ (пространственная область R_Q наблюдения предвестников ЧС должна включать в себя пространственную область R_G готовящейся ЧС);

 $S(t,r_S)$ — вектор сигналов естественного или/и искусственного происхождения, воздействующих на объекты наблюдения (измерения) (излучение Солнца, зондирующие сигналы активных космических средств ДЗЗ (радиолокационные средства, радиовысотомеры), сигналы спутниковых радионавигационных систем и другие), принадлежащий пространственной области R_S , включающей пространственную область R_Q , $R_S \supset R_Q$;

 $\tilde{S}_{\Pi PM}(\Lambda, t, r_Q)$ — вектор оценок, принятых в условиях помех (вектор $N(t, r_Q)$) мониторинговых сигналов (представлен без учета значений времени распространения сигналов по трассам КА– объект, объект–КА и другим трассам, которые существенно меньше значений временных интервалов последующих этапов обработки);



Рисунок. Техническая структура МАКСМ

 $\Lambda(Q, t + \tau_{\Lambda}, r_Q)$ — вектор оценок параметров сигналов, связанных с параметрами наблюдаемых предвестников ЧС;

 au_{Λ} — интервал времени от начала наблюдений предвестников ЧС до момента получения оценок параметров сигналов;

 $Q(G, t + \tau_Q, r_Q)$ — вектор оценок параметров наблюдаемых предвестников ЧС;

 au_Q — интервал времени от начала наблюдений предвестников ЧС до момента получения оценок их параметров.

Преобразование (4) должно осуществляться в соответствии с требованиями (2) и (3).

Условие (2) обеспечения своевременности формирования прогнозов с учетом преобразования (4) примет вид

$$t + \tau_{\Lambda} < t + \tau_Q < t + \tau_{\Phi} < t + \tau_U < t_{\text{HG}}.$$
 (5)

Научно-методические аспекты построения сервисов МАКСМ

Реализация основных преобразований исходной мониторинговой информации, отображаемых последовательностью (5), определяется выбором структуры МАКСМ. С функциональной точки зрения целевая часть МАКСМ предназначена для решения основной задачи — своевременного формирования качественных прогнозов ЧС. С учетом наиболее опасных и распространенных ЧС на территории России и стран СНГ в ее состав на первом этапе создания МАКСМ должны входить целевые средства мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений, мониторинга и прогнозирования наводнений, природных пожаров, а также техногенных катастроф. Это не препятствует последующему включению в состав МАКСМ средств мониторинга и прогнозирования других ЧС природного характера.

Как и в любой информационной системе, в состав МАКСМ должны входить средства управления ее элементами и обеспечения их функционирования.

Техническая реализация МАКСМ определяется ее технической структурой, приведенной на рисунке. Для качественного решения задач мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера целесообразно использовать доступный информационный ресурс имеющихся отечественных и зарубежных средств наземного и аэрокосмического мониторинга ЧС природного и техно-

генного характера и их предвестников, средств мониторинга иного назначения, средств сбора, предварительной обработки мониторинговой информации и хранения результатов ее обработки. Различная ведомственная принадлежность перечисленных средств не препятствует их рассмотрению как средств, функционально привлекаемых для решения задач MAKCM. В связи с этим к составу целевых средств подсистем MAKCM будем относить:

– бортовые целевые средства космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), а также летательных аппаратов (ЛА);
 КА глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS; КА связи и информационного обмена;

 наземные целевые средства измерений и наблюдений предвестников ЧС в составе станций (постов);

 аппаратно-программные комплексы (АПК) пунктов приема информации с КА и ЛА;

 АПК станций (постов) сейсмического, гидрометеорологического наблюдения, наблюдения за природными пожарами и состоянием техногенных объектов;

 – АПК центров сбора и предварительной обработки мониторинговой информации.

Собственно средствами целевых подсистем МАКСМ следует считать АПК информационных сервисов, решающих задачи сбора и тематической обработки данных мониторинга предвестников ЧС, формирования прогнозов ЧС, представления потребителям результатов прогнозов ЧС.

Хранение данных мониторинга ЧС и их предвестников, результатов прогнозов ЧС целесообразно осуществлять в распределенном хранилище данных MAKCM, техническую основу которого создают его АПК.

Управление функционированием элементов МАКСМ реализуют бортовые и наземные средства ее управляющей подсистемы (средства бортовых комплексов управления КА (ЛА), наземных комплексов управления (НКУ) КА (ЛА), комплексы средств автоматизации управления средствами пунктов, станций и центров, управляющие средства в составе сервисов).

Информационное взаимодействие элементов МАКСМ и другие виды их ресурсного обеспечения реализуют бортовые и наземные средства ее обеспечивающей подсистемы (бортовые и наземные средства информационного обмена, бортовые обеспечивающие комплексы КА (ЛА), обеспечивающие комплексы НКУ, пунктов и центров системы, обеспечивающие средства в составе сервисов). Среди средств информационного обмена элементов МАКСМ все большую роль приобретают средства сети Интернет.

В представленной технической структуре МАКСМ ее аэрокосмический целевой сегмент, средства в составе наземного целевого сегмента (исключая АПК сервисов) в основном реализуют следующую часть информационного преобразования (4):

$$\begin{split} S(t,r_S) & N(t,r_Q) \\ \downarrow & \downarrow \\ Q(G(t_G,r_G),t,r_Q) &\to \widetilde{S}_{\Pi \text{PM}}(\Lambda,t,r_Q) \\ \to \widetilde{\Lambda}(Q,t+\tau_\Lambda,r_Q) &\to \widetilde{Q}(G,t+\tau_Q,r_Q), \end{split} \tag{6}$$

затрачивая на его реализацию время τ_Q .

С учетом преобразования (4) в МАКСМ и преобразования (6) в ее предшествующих сервисам элементах запишем основное информационное преобразование, осуществляемое в информационных сервисах МАКСМ:

$$\widetilde{Q}(G, t + \tau_Q, r_Q) \to \Pi(t + \tau_{\Phi}).$$
 (7)

Преобразование (7) является успешным при выполнении условия (3) и условия обеспечения своевременности прогноза

$$t + \tau_Q < t + \tau_\Phi < t + \tau_U < t_{\text{HG}}.\tag{8}$$

Преобразование (7) предполагает наблюдение вариаций составляющих вектора $\widetilde{Q}(G, t + \tau_Q, r_Q)$ на временном интервале $\tau_Q - \tau_{\Phi}$, анализа полученных вариаций, определение прогнозируемых параметров ЧС по параметрам предвестников.

Если время $\tau_{qj} - \tau_{\lambda j}$, затраченное предшествующими сервисам элементами на решение задачи оценивания параметра предвестника $\tilde{q}_j(G, t + \tau_{qj}, r_{qj})$, связанного с прогнозируемым *j*-м параметром ЧС, не обеспечивает условие своевременности прогноза (8), целевые средства сервисов должны быть способны решить эту задачу с меньшим

временем, реализуя информационное преобразование

$$\begin{split} \widetilde{\lambda}_{j}(q_{j}, t + \tau_{\lambda j}, r_{qj}) \to \\ \to \widetilde{q}_{j}(G, t + \tau_{qj}, r_{qj}) \to n_{j}(t + \tau_{\Phi j}), \end{split} \tag{9}$$

где $\widetilde{\lambda}_j(q_j, t + \tau_{\lambda j}, r_{qj})$ и $\widetilde{q}_j(G, t + \tau_{qj}, r_{qj})$ — соответственно оценки параметра сигнала и параметра наблюдаемого предвестника, связанных с *j*-м параметром ЧС $n_j(t + \tau_{\Phi j})$;

 $au_{\lambda j}, au_{qj}, au_{\Phi j}$ — соответственно интервалы времени от начала наблюдений предвестников ЧС до момента получения оценок параметра сигнала и параметра предвестника, связанных с *j*-м параметром ЧС, а также до момента времени формирования оценки *j*-го параметра ЧС.

Примерами оценок параметров $\widetilde{\lambda}_j(q_j,t+\tau_{\lambda j},r_{qj}),\,\widetilde{q}_j(G,t+\tau_{qj},r_{qj})$ и $n_j(t+\tau_{\Phi j})$ могут служить:

 – оценка времени запаздывания радионавигационного сигнала, проходящего через ионосферу, полученная навигационной аппаратурой потребителя (НАП) информации систем ГЛОНАСС и GPS, располагающейся в зоне готовящегося землетрясения;

 оценка вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над местом готовящегося землетрясения, полученная по результатам обработки в сервисе оценок времени запаздывания сигнала;

 оценка времени начала землетрясения, полученная на основе анализа вариаций оценок вертикального полного электронного содержания ионосферы над местом готовящегося землетрясения перед его началом.

Необходимость реализации в сервисе преобразования (9) по отдельным параметрам ЧС проиллюстрируем следующим примером. Одним из информативных предвестников сильного землетрясения является детерминированная изменчивость плотности электронного содержания (ПЭС) ионосферы над областью его подготовки, проявляющаяся в интервале от 5 до 1 суток до землетрясения [6]. Анализ проводимого в сервисе в рамках преобразования (7) обобщенного визуального образа (маски) ионосферного предвестника позволяет определить время начала сильного землетрясения. Вариации ПЭС ионосферы можно построить по данным глобальных ионосферных карт ПЭС [7]. Вместе с тем данные этих карт доступны через сутки и более, что не обеспечивает своевременности прогноза времени начала землетрясения при появлении вариаций ПЭС ионосферы за сутки до землетрясения. Оперативно, с задержкой в несколько минут, можно получить информацию о времени запаздывания радионавигационного сигнала НАП в зоне готовящегося землетрясения по данным НАП [8–10]. Для прогнозирования времени начала землетрясения (преобразование (9)) в сервисе должен быть реализован алгоритм, например [11], преобразующий данные НАП в ПЭС ионосферы.

Своевременность решения задачи (9) прогнозирования *j*-го параметра ЧС сервисом обеспечивается при выполнении условия (5).

Таким образом, сервисы МАКСМ при формировании прогнозов ЧС должны обеспечивать своевременные (условия (8) и (5)) и качественные (условие (3)) информационные преобразования (7), (9).

Результаты анализа показывают, что для эффективного решения всего спектра задач мониторинга и прогнозирования ЧС в МАКСМ потребуется ежесуточно проводить более 100 сеансов приема данных с КА с обработкой в потоковом режиме (в темпе приема) около 15 Тбайт разнородной информации. Для результативного функционирования МАКСМ в целом основная доля работы по обработке этого объема информации на современном этапе развития должна приходиться на средства получения и предварительной обработки мониторинговой информации (преобразование (6)). По мере роста информационной производительности сервисов МАКСМ их доля работы по обработке мониторинговой информации может возрастать (переход от преобразования (7)) к преобразованию (9) для всех параметров ЧС и более глубоким преобразованиям).

Научно-технические аспекты построения сервисов МАКСМ

В широком смысле под информационными сервисами MAKCM будем понимать виды деятельности, направленные на удовлетворение потребностей органов власти и населения в информации об угрозах ЧС путем оказания услуг информационного характера, состоящих в предоставлении мониторинговой и прогнозной информации о ЧС. Эти услуги реализуются с использованием аппаратно-программных и сетевых средств сервисов, осуществляющих информационные преобразования (7), (9) и доведение мониторинговой и прогнозной информации о ЧС до потребителей. Аппаратно-программная реализация сервисов МАКСМ должна обеспечить в первую очередь решение следующих основных целевых задач:

46

 сбор и хранение данных мониторинга предвестников ЧС, сбор и хранение данных о произошедших ЧС, об их предвестниках и сформированных прогнозах ЧС;

 тематическая обработка информации о предвестниках ЧС и формирование их прогнозов;

представление потребителям данных о прогнозах ЧС.

Качественное и оперативное преобразование мониторинговой информации в сервисах МАКСМ достигается при рациональном использовании в них доступных информационных ресурсов. К информационным ресурсам, используемым в сервисах МАКСМ при решении целевых задач, относятся:

 доступные данные мониторинга различного уровня обработки в виде оценок параметров предвестников ЧС и оценок параметров мониторинговых сигналов, связанных с параметрами предвестников ЧС; доступные данные о произошедших ЧС и сформированных прогнозах ЧС;

 доступные к применению алгоритмы, функциональные модули тематической обработки мониторинговых данных и формирования прогнозов ЧС.

Уровни обработки данных мониторинга при дистанционном зондировании Земли различаются от уровней L0–L4 (растровые-векторные снимки) до уровней обработки в виде электронных карт. Все шире применяются операции, ориентированные на построение и работу с трехмерными представлениями наблюдаемых объектов и процессов.

Оперативная публикация данных, поступающих ежедневно с российских КА ДЗЗ «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Метеор-М», осуществляется через геопортал Роскосмоса. Российский сервис «Геокаталог» компании «Совзонд» обеспечивает возможности получения информации об архивной и опера-

тивной съемке с наиболее популярных КА, оборудованных мультиспектральными высокоразрешающими сенсорами. Сервис «Космоснимки» ИТЦ «СКАНЭКС» предоставляет снимки, полученные с 14 КА ДЗЗ, путем автоматизированного поиска и выбора снимков по диапазону дат съемки, условиям облачности, углу съемки, разрешению в пикселях. Разработанный КБ «Панорама» онлайн-банк данных цифровых карт и данных ДЗЗ обеспечивает сбор, хранение, поиск, выдачу пространственных данных и отображение состояния банка данных в виде электронных карт. Научным центром оперативного мониторинга Земли в составе АО «Российские космические системы» формируются базовые продукты [12], включающие результаты тематической обработки зарубежных и отечественных данных ДЗЗ.

Примером сервиса предоставления данных, формируемых средствами мониторинга предвестников ЧС наземного базирования, является сервис «Лесной дозор», обеспечивающий доступ к распределенной дистанционно-управляемой системе видеонаблюдения на вышках.

Для обеспечения полноты и повышения достоверности информации о предвестниках ЧС по данным ДЗЗ из космоса целесообразно наряду с информацией, предоставляемой российскими сервисами, использовать информацию оперативного космического мониторинга, источниками которой являются такие зарубежные сервисы, как NASA, NASA Firms, MADAS, Weather Channel. Информацию ДЗЗ из космоса предоставляют также сервисы USGS, Google Earth Engine, Google Earth Engine, Land Viewer, Remote Pixel, вместе с тем она менее оперативна, чем информация первой группы зарубежных сервисов.

Рассмотренные сервисы относятся к сервисам открытого доступа. Вопрос о выборе того или иного сервиса представления данных мониторинга предвестников ЧС для его взаимодействия с сервисом МАКСМ решается с учетом специфики целевых задач прогнозирования ЧС, информативности, объема и формы представления данных, наличия в сервисе МАКСМ средств их сбора, тематической обработки и представления результатов прогнозирования ЧС.

Данные мониторинга предвестников ЧС носят выраженный геоинформационный характер, обусловленный зависимостью параметров предвестников ЧС от географических координат и времени. Особенно сильно геоинформационная сущность проявляется в предвестниках ЧС природного характера. Вместе с тем разнообразие мониторинговых данных по содержанию и форме может служить сильным сдерживающим фактором их совместного использования в сервисах МАКСМ при решении целевых задач. В связи с этим функционал АПК сервисов МАКСМ должен осуществлять интеграцию разнообразных данных мониторинга предвестников ЧС, предоставляемых сервисам открытого доступа, путем решения следующих задач:

 обеспечение взаимодействия с внешними геоинформационными картографическими ресурсами и геосервисами открытого доступа, предоставляющими оперативную и архивную информацию о ЧС и их предвестниках;

 обеспечение взаимодействия по открытым стандартам с региональными и ведомственными информационными системами и сервисами, предоставляющими оперативную информацию о предвестниках ЧС;

 обеспечение возможности оперативного получения и отображения в геоинформационной среде видео-, фото- и аудиоинформации с мест возможной подготовки ЧС;

 предоставление операторам сервисов МАКСМ пространственной информации с помощью ГИС- и веб-технологий, сетевых клиент-серверных и геопортальных решений;

– создание, предварительная обработка, централизованное хранение данных мониторинга и результатов прогнозирования ЧС, а также предоставление авторизованного доступа к ним операторов сервисов MAKCM.

Использование и интеграция информационного ресурса в виде доступных к применению алгоритмов и функциональных модулей тематической обработки мониторинговых данных и формирования прогнозов ЧС требует от функционала АПК сервисов МАКСМ решения следующих задач:

 – формирование геоинформационного пространства оператора сервиса с необходимым и достаточным набором атрибутов для решения задач обработки мониторинговых данных с целью получения прогнозов ЧС; – создание и динамическое подключение доступных онлайн-сервисов тематической обработки мониторинговых данных;

 – создание и динамическое подключение функциональных модулей статистической, аналитической и математической обработки мониторинговых данных;

 обеспечение возможности привлечения доступных пользовательских функций для оперативного анализа геоинформационной обстановки, включая измерение расстояния между объектами, измерение длины, площади, периметра объекта.

Для поддержки целевых подсистем сервисов МАКСМ, при представлении ими потребителям данных о прогнозах ЧС функционал АПК сервисов должен решать следующие задачи:

 обеспечение операторов сервисов инструментальными возможностями для доведения целевой информации до различных групп потребителей;

 предоставление потребителям возможности создания и ведения собственных тематических геоинформационных проектов.

Функционал АПК сервисов МАКСМ, поддерживающий управляющие и обеспечивающие подсистемы сервисов, должен в целях интеграции используемых в сервисах информационных ресурсов решать следующие задачи:

 обеспечение формирования рабочего геоинформационного пространства оператора сервиса путем анализа исходных мониторинговых данных, управления ими при решении тематических задач, управления процессом применения специализированных модулей анализа и обработки данных;

– публикация данных на основе собственного встроенного сервера публикаций, а также при использовании популярных серверов публикации пространственных данных, например Geoserver, MapServer, ArcGIS Server;

контроль и управление регламентами решения тематических задач по формированию прогнозов ЧС;

 поддержка создания отчетной документации по результатам прогноза параметров ЧС и архивных материалов для их каталогизации в тематической базе данных прогнозов ЧС.

В зависимости от объема использования интеграционного функционала будем рассматривать

три вида сервисов МАКСМ: исследовательские, операционные и потребительские. В исследовательских сервисах интеграционный функционал задействуется в полном объеме для решения задач их развития. В операционных сервисах применяется отработанный в исследовательских сервисах функционал, позволяющий решать текущие задачи мониторинга и прогнозирования ЧС. В потребительских сервисах применяется ограниченный функционал, нацеленный на своевременное и качественное предоставление потребителям информации о результатах прогнозирования ЧС.

48

Реализация в сервисах МАКСМ перечисленного функционала, позволяющего проводить интеграцию используемых ими информационных ресурсов при решении целевых, управляющих и обеспечивающих задач, осуществима в условиях построения сервисов на единой геоинтеграционной платформе (ГИП).

Рассматривая в качестве ГИП разработанные в последние годы геоинформационные картографические сервисы, отметим, что они имеют определенный интеграционный функционал и вместе с тем не в полной мере обеспечивают гибкость при расширении доступа к новым источникам пространственных данных без участия разработчиков. Причина в том, что интеграционный функционал геоинформационных картографических сервисов, как правило, «жестко зашит» в их программных кодах. Это не позволяет подключать к ним новые ресурсы непосредственно их пользователями.

Анализ геоинформационных систем, обладающих функционалом интеграции информационных ресурсов, возможным для использования в сервисах МАКСМ, показывает, что наиболее близкой к реализации описанного интеграционного функционала является ГИП «Геотрон» [13]. В связи с этим построение сервисов МАКСМ разного вида и назначения целесообразно осуществлять на основе ГИП «Геотрон» (с учетом ее развития), что обеспечит информационное и функциональное единство сервисов.

Заключение

Предложенные функциональная и техническая структуры МАКС обеспечивают решение комплекса целевых задач (мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений, мониторинга и прогнозирования наводнений, природных пожаров, чрезвычайных ситуаций техногенного происхождения), задач управления элементами системы и снабжения их необходимыми ресурсами, определяют место сервисов в составе системы.

Сформирован функционал сервисов, обеспечивающий интеграцию в них доступных информационных ресурсов при взаимодействии с источниками мониторинговых данных и потребителями прогнозной информации при решении целевых, управляющих и обеспечивающих задач. Предложен состав средств сервисов MAKCM, необходимых для реализации их интеграционного функционала.

Построение сервисов МАКСМ различного вида и назначения на единой геоинтеграционной платформе обеспечит их информационное, функциональное единство и эффективное функционирование МАКСМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 075-11-2019-015 от 22 октября 2019 года. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58519X0008.

Список литературы

- Перминов А. Н. О перспективах пилотной реализации в России Международной аэрокосмической системы глобального мониторинга (проект МАКСМ): организационные, технические и финансовые аспекты // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. XII научно-практическая конференция. 17–18 октября 2012 г. Доклады и выступления. М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2012. С. 53–66.
- Жодзишский А.И., Разумов В.В., Гузовский С.Л. и др. Перспективы создания пилотной версии проекта «Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга» в России / Под ред. д. т. н., проф. О. А. Алексеева. М.: Тровант, 2014. 200 с.
- Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.
- 4. Алексеев О.А., Разумова Н.В., Цадиковский Е.И., Линьков А.Д. Рассмотрение методологии построе-

ния космической группировки мониторинга для прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, № 5. С. 29–38.

- Разумов В.В., Алексеев О.А., Разумова Н.В., Линьков А.Д. К проблеме создания сервисов аэрокосмической системы прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного характера на трансграничных территориях России // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг, 2019, вып. 4. С. 64–68.
- Давиденко Д.В., Пулинец С.А. Детерминированная изменчивость ионосферы в преддверии сильных (M ≥ 6) землетрясений в регионах Греции и Италии по данным многолетних измерений // Геомагнетизм и аэрономия, 2019, т. 59, № 4. С. 529–544.
- Глобальные ионосферные карты (GIM Global Ionospheric Maps) ПЭС в формате IONEX. http://cddis.nasa.gov/gps/products/ionex/ (Дата обращения 06.04.2020).

- 8. Данные приемников глобальных навигационных спутниковых систем (GPS/ГЛОНАСС) в формате RINEX. ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/rinex/ (Дата обращения 27.05.2020).
- 9. Данные приемников глобальных навигационных спутниковых систем (GPS/ГЛОНАСС) в формате RINEX. ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/ (Дата обращения 27.05.2020).
- 10. Файлы навигации. ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/ data/daily/ (Дата обращения 27.05.2020).
- 11. *Ciraolo L*. GNSS Derived TEC Data Calibration // Workshop on Science Applications of GNSS in Developing Countries. Trieste. April 23, 2012.
- Сервис «Банк базовых продуктов» НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы». http://bbp.ntsomz.ru/ (Дата обращения 27.05.2020).
- Серебряков В.Б. Геоинтеграционная платформа «Геотрон» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019610273 / Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09 января 2019 г.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 50–62

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

УДК 621.3.04975.02; 621.3.049.75.002.72 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.50.62

Решение прикладных задач,

связанных с методами обработки топологических компонентов посредством исследования их взаимных размещений

А. Н. Архангельский, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье [4] описаны методы обработки топологических компонентов (ТК), основанные на исследовании их взаимных размещений. К ТК относятся контактные площадки, проводники, области металлизации и т. д. В современных CAD/CAM-системах, предназначенных для проектирования и подготовки данных для изготовления печатных плат, существует множество задач, решение которых основывается на исследовании размещений ТК, например построение таблицы цепей на основании спроектированной топологии, контроль на предопределенные зазоры между ТК (DRC), подрезка контактных площадок, оптимизация толщин проводников и т. д. Эти задачи достаточно сложны, требуют значительных вычислительных ресурсов, алгоритмы их решения являются интеллектуальной собственностью фирм-разработчиков, что и определяет высокую стоимость этих систем. В статье на ряде конкретных примеров приводятся возможности предложенных методов для решения классических задач САD/САМ-систем.

Ключевые слова: печатные платы, топология, проводник, контактная площадка

Applied Problems Solution Based on Methods for Processing of Topological Components by Studying their Relative Locations

A. N. Arkhangel'skiy, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article [4] describes methods for processing topological components (TC) based on the study of their mutual placements. TC includes contact pads, conductors, areas of metallization, etc. In modern CAD/CAM systems suitable for the design and preparation of data for the manufacture of printed circuit boards, there are many tasks that are based on the study of the placement of TC, for example, building a table of circuits based on the designed topology, monitoring for predefined gaps between TC (DRC), trimming contact pads, optimizing the thickness of conductors, etc. These tasks are quite complex, require significant computing resources, and the algorithms for solving them are the intellectual property of developer firms, which determines the high cost of these systems. The article uses a number of specific examples to show the possibilities of the proposed methods for solving classical problems of CAD/CAM systems.

Keywords: printed circuit boards, topology, conductor, contact platform

Введение

Современные CAD/CAM-системы представляют собой программный продукт, обеспечивающий решение сложнейших задач, связанных с разработкой и подготовкой данных для печатных плат (ПП). К таким системам относятся Altium Designer [1], CAM-350 [2], Genesis 2000 [3] и еще целый ряд подобных разработок. В качестве примеров, решаемых в рамках CAD/CAM-систем, можно привести следующие задачи:

 формирование таблицы цепей на основании существующей топологии;

- контроль топологии на установленные зазоры (DRC);

- подрезка контактных площадок;

- оптимизация толщин проводников и т. д.

Подобных задач можно привести еще немало. Все эти задачи сложны сами по себе, и к тому же решение осложняется количеством топологических компонентов (ТК) на ПП, которое может достигать десятков тысяч. В работе [4] представлены методы обработки, позволяющие решать подобные задачи. Цель этой статьи — демонстрация возможностей методов для решения задач, связанных с обработкой топологий.

Приведем основные положения из [4], которые потребуются нам для изложения сути методов.

Под ТК *А* будем понимать односвязанную область, охватываемую замкнутым контуром без самопересечений и касаний. При этом контур состоит из векторов, расположенных на линиях, описываемых уравнениями первого порядка, то есть

$$A = U_1^N[R_i(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2})],$$
(1)

где R_i — вектор, (x_{i1}, y_{i1}) , (x_{i2}, y_{i2}) — координаты его начальной и конечной точек, при этом конечная координата R_i совпадает с начальной координатой R_{i+1} .

Под преобразованием ТК мы будем понимать построение описания ТК, зависящего от взаимного расположения компонентов и семантики преобразования.

Семантика преобразований, подлежащих рассмотрению в данной работе, представляет собой логические операции над множествами геометрических точек, входящих в ТК, а именно «объединение», «вычитание», «пересечение». Классическая трактовка этих операций приведена на рис. 1. На рис. 1, *а* приведены два ТК: *A*₁ и *A*₂. Результаты логических операций представлены на рис. 1, *б*, *в*, *г*.



Рис. 1. Интерпретация семантики логических операций

В рамках этих терминов в [4] определены алгоритмы выполнения логических операций и структуры данных, позволяющих их реализовать.

В [4] определена математическая модель (см. рис. 2), обеспечивающая выполнение логических операций над геометрическими фигурами, не обремененными какими-либо специфическими требованиями, связанными со спецификой ТК, размещаемых на ПП.

На рис. 2 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) — начальные и конечные точки вектора R_i ;

 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования размещения двух векторов;

A, B, C — коэффициенты уравнения прямой Ax + By + C = 0, проходящей через две точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, при этом $A = y_2 - y_1$; $B = x_1 - x_2$; $C = y_1 x_2 - x_1 y_2$.

Составляющая V_i зависит от взаимного размещения (ВР) и наполняется по мере их обработки.

При решении конкретных задач, связанных с проблемами проектирования и изготовления ПП, возникает необходимость расширения структуры данных.

Как правило, результаты проектирования ПП представляются в виде множества ТК, в число которых входят контактные площадки (КП), полигоны для описания областей металлизации, проводники



Рис. 2. Математическая модель, обеспечивающая выполнение логических операций над ТК

Тип: КП	Тип: проводник	Тип: полигон	Тип: отверстие
X_p, Y_p	$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$	$x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$	$X_{\text{II}}, Y_{\text{II}}$
Номер	Толщина	Указатель на E_i	x_{\min} , y_{\min} , x_{\max} , y_{\max}
$x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$	$x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$	N_cep	Диаметр
Указатель на E_i	Указатель на E_i	Резерв	Указатель на E_i
N_cep	N_cep	Резерв	Резерв
Резерв	Резерв		Резерв
Резерв	Резерв		
а	б	в	З

Рис. 3. Параметры структуры данных, необходимые для решения типовых задач обработки ТК

заданной ширины и отверстия сверления. На рис. 3 показаны примерные структуры данных, содержащие параметры, необходимые для решения типовых задач обработки ТК.

Далее рассмотрим назначение параметров:

а) для КП: X_p , Y_p — точка привязки КП;

«Номер» — номер КП в ряду КП. С номером, как правило, связана конфигурация КП;

 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР КП;

указатель на структуру V_i (см. рис. 2);

 $N_$ сер — номер цепи, к которой относится ТК. Необходимость в наличии этого параметра связана с тем, что ТК в ПП разбиваются на группы, каждая из которых имеет свой идентификатор — «N цепи». При этом, как правило, ТК из разных групп обрабатываются по разным правилам.

Резервные параметры приводятся лишь для показа того, что данная структура не является окончательной и изменяется в зависимости от задачи;

б) для проводников: $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ — координаты проводника;

«Толщина» — толщина проводника;

 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР проводника; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

в) для полигонов (области металлизации):

 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР полигонов; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

г) для отверстий: $(X_{\rm ц},Y_{\rm ц})$ — координата центра отверстия;

 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР отверстий;

«Диаметр» — диаметр отверстия; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

Для упрощения восприятия текста введем следующие определения.

Под структурой данных в дальнейшем тексте будем понимать конструкции, приведенные на рис. 3. Под математической моделью, или просто моделью, будем понимать конструкцию данных,

показанную на рис. 2. Все ТК описываются конструкциями данных (см. рис. 3), которые представляют собой охватывающий контур. При выполнении логических операций над ТК, порождающих исследование ВР, формируется математическая модель (см. рис. 2). Перейдем к рассмотрению конкретных задач.

Подготовка информации для выпуска конструкторской документации (КД)

Приведем типовую топологию, формируемую в процессе проектирования ПП. На рис. 4, *а* топология представлена множеством (КП) $(A_1, A_2, ..., A_n)$ и областями металлизации $(B_1, B_2, ..., B_m)$, при этом рядом с каждой КП для ее иден-





Рис. 4. *а*) Вид ТК после проектирования ПП; *б*) информация, выводимая в послойный чертеж

тификации на рисунке размещен прямоугольник, освобожденный от цвета фона ПП.

Такое представление ТК может применяться в ряде случаев при проектировании и изготовлении ПП. При подготовке информации для выпуска КД ЕСКД требуется связанные области металлизации изображать единым полигоном (см. рис. 4, *б*).

Исходная топология перерабатывается следующим образом. Изначально необходимо получить единый контур G_1 , охватывающий области металлизации. Это достигается посредством выполнения операции $G_1 = B_1 \cup B_2 \cup \ldots \cup B_m$.

Далее формируется топология $G_2,$ определяемая как $G_2=G_1\backslash A_1\backslash A_2\backslash\ldots\backslash A_n.$

Окончательное изображение G_3 определяется как $G_3=G_2\cup A_1\cup A_2\cup\ldots\cup A_n.$

Расширение проводников при сохранении установленных между ними зазоров

В работе [5] описывается программное обеспечение (ПО), которое расширяет проводники ПП без нарушения установленных зазоров. Необходимость подобных преобразований возникает при разработке ПП 5-го класса точности, имеющих ширину проводников 0,1 мм и менее. При этом довольно часто происходит стравливание меди с токопроводящих элементов малой ширины. Опция, расширяющая проводники, имеется в Genesis 2000 [3].

В рамках систем CAD/CAM проводники L1, L2 (см. рис. 5) представляются двумя координатами $K1 = (x_1, y_1)$, $K2 = (x_2, y_2)$, определяющими начальную и конечную точки проводника, а также «маской», перемещение которой из точки K1 в точку K2 и формирует проводник. Далее рассматривается ситуация, в которой «маска» принимает форму окружности. «Маска» имеет параметр диаметр D, определяющий ширину проводника.

Кроме того, при проектировании ПП устанавливается зазор Z (см. рис. 5) между токопроводящими элементами топологии. Изменение D не должно нарушать установленные зазоры. Очевидно, что расширение проводника разрешается далеко не везде. Поэтому перед расширением необходимо провести исследование ВР ТК и уже по его

результатам принимать решение о расширении проводника. Изначально задается значение D = D1, определяющее ширину проводников, которые подлежат расширению, и D = D2, определяющее финальную ширину проводников. При этом на значение D2накладывается ограничение (D2 - D1) < Z.



Рис. 5. Представление проводников в рамках систем CAD/CAM

В работе [5] рассматриваются три стратегии расширения, суть которых иллюстрирует рис. 6.

Первый способ, именуемый «центральной стратегией» расширения проводника, приведен на рис. 6, *a*.



Рис. 6. *а*) «Центральная стратегия» расширения проводника; *б*) «левосторонняя стратегия» расширения проводника; *в*) «правосторонняя стратегия» расширения проводника

В этом варианте проводник расширится в обе стороны от центральной линии (Цл) проводника.

«Левосторонняя стратегия» приведена на рис. 6, б.

В этом варианте производится расширение проводника слева от центральной линии проводника.

Ориентация размещения (левосторонняя/правосторонняя) определяется направлением от *K*1 к *K*2.

«Правосторонняя стратегия» приведена на рис. 6, в.

Этот способ осуществляет расширение проводника справа от центральной линии проводника.

При решении задачи расширения проводников задействованы все ТК, структура данных которых приведена на рис. 3. Независимо от типа ТК, их геометрия описывается контурами (1). Так, модель проводника представляется в виде охватывающего контура (см. рис. 7), при этом его элементами являются: вектор № 1 с координатами $K1 = (x_1, (y_1 + D/2))$ и $K2 = (x_2, (y_1 + D/2))$; векторы № 2, № 3, № 4, № 5, интерполирующие окружность с центром (x_2, y_2) и диаметром D; вектор № 6 с координатами $K1 = (x_2, (y_2 - D/2))$; векторы № 7, № 8, № 9, № 10, интерполирующие окружность центром (x_1, y_1) и диаметром D.



Рис. 7. Охватывающий контур для проводника

Естественно, что при размещении проводника под углом к осям координаты векторов пересчитываются в соответствии с этим углом.

Охватывающий контур ТК, описываемый как окружность, интерполируется вписанным восьмиугольником.

Введем следующие обозначения. Пусть $M = (m_1, m_2, \ldots, m_n)$ — массив всех ТК, присутствующих на ПП, а $P = (p_1, p_2, \ldots, p_m)$ — массив проводников заданной ширины, подлежащих расширению, причем $P \ni M$. Проводник p_i будем именовать «целью». Остальные ТК, расположение которых будет исследоваться на ВР, будем именовать «обработчиком». Перед формулированием алгоритма обработки опишем контуры, «цели» и «обработчика».

Охватывающий контур для ТК — «цели». Модель «цели» в рамках задачи расширения проводников и реализации «центральной стратегии» имеет вид, показанный на рис. 8. Как мы видим, эта модель отличается от модели на рис. 7 тем, что в качестве диаметра проводника используется значение D_n , являющееся результатом работы алгоритма (будем считать, что $D_n = D \cdot 1, 4$). Для реализации «левосторонней стратегии» модель смещается вверх от центральной линии (Цл) на расстояние $(D_n - D)/2$. Для «правосторонней стратегии» смещение осуществляется вниз.



Рис. 8. Охватывающий контур для «цели» при реализации «центральной стратегии»

При этом длина модели М будет равняться

$$\begin{split} M &= \\ &= \sqrt{(x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_1) + (y_2 - y_1) \cdot (y_2 - y_1)} + D. \end{split}$$

Охватывающий контур ТК проводника-«обработчика» с шириной D представляется в виде контура, охватывающего «трехслойный пирог», в центре которого размещен эквивалент проводника-«обработчика», а с краев — топология, охватываемая контуром, отстоящим от эквивалента на величину зазора Z (см. рис. 9).



Рис. 9. Охватывающий контур для проводника-«обработчика»

Для обработки ТК, геометрия которых описывается окружностью, охватывающий контур представляет собой вписанный в окружность восьмиугольник, при этом диаметр окружности D равняется диаметру ТК плюс два размера зазора Z (см. рис. 10).



Рис. 10. Охватывающий контур для ТК «обработчика», имеющего форму окружности

Охватывающий контур для отрезка, входящего в множество отрезков, описывающих полигон или прямоугольную КП, представляет собой модель проводника с шириной, равной нулю (см. рис. 11).



Рис. 11. Модель для отрезка, входящего в полигон

Прежде чем описывать алгоритм расширения проводников, рассмотрим механизм выполнения логической операции «вычитания» над ТК, модели которых приведены на рис. 8–11.

После проектирования ПП все ТК расположены друг от друга на расстоянии не менее чем величина зазора Z. При исследовании ВР моделей ТК, возникающих после расширении проводников, могут иметь место три ситуации:

отсутствие взаимодействия между ТК (рис. 12, *a*);

- пересечение ТК (рис. 12, б);
- касание ТК (рис. 12, *в*).



Рис. 12. Исходное представление ТК

Во всех вариантах проводник N1 является «целью», проводники N2, N3 - «обработчиками».Значение Z и ширина проводников равны 0,1 мм. Для всех вариантов расстояние между проводниками определяется значением R. Расширение произ-

водится до значения $D_n = 0,14$ мм. Несмотря на то, что в реальных расчетах ТК представлены в виде моделей, изображенных на рис. 8–11, для упрощения понимания алгоритма на рис. 12–14 изображения отрезков, интерполирующих «маску» в точках K1 и K2, будем представлять в виде дуг, а модели проводников-«обработчиков» — в виде прямоугольников.

Если указанные топологии представить в виде охватывающих контуров, мы получим результаты, показанные на рис. 13, *a*, *б*, *в*.



Рис. 13. *а*) Расстояние между «целью» и «обработчиками» 0,02 мм; *б*) «обработчик» заходит в «цель» на глубину 0,02 мм; *в*) «обработчик» касается «цели» на уровне 1 первого отрезка (см. рис. 7)

Результаты выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ представлены на рис. 14, *a*, *б*, *в*.

На рис. 14, a проводник-«цель» не претерпел изменений, поскольку не было контактирования с другими ТК, и поэтому первый проводник расширен до нужного размера с $D_n = 0,14$ мм.

На рис. 14, б в результате выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ отрезок N1 (см. рис. 7) в соответствии с семантикой операции преобразовался в девять отрезков и превратился в полигон.

Для реализации этого действия в модели сформируется новая цепочка из девяти отрезков, которая включается в контур проводника. Это достигается переустановкой существующих указате-



Рис. 14. Представление ТК после обработки

лей на вновь сформированные фрагменты топологии. После того, как проводник преобразовался в полигон, обработку можно считать завершенной, так как полигон является инструментом отображения топологии. Но возможен и другой вариант описания финальной топологии. Этот вариант заключается в следующем. Как видно из рис. 14, б, проводник N1 разбит на пять отрезков, каждый из которых имеет свою ширину, а именно три отрезка имеют ширину, равную 0,14 мм, и два отрезка ширину 0,12 мм. Эти пять отрезков с параметрами, определяемыми конфигурацией полигона, и замещают проводник N1. Такая схема замещения была применена в программе [5]. Очевидно, что читатель вправе сам выбрать способ, который больше всего его устраивает: представление результата в виде полигона или в виде набора отрезков.

На рис. 14, в в результате выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ отрезок N1 (см. рис. 7) в соответствии с семантикой операции преобразовался в пять отрезков, при этом все отрезки имеют одинаковую координату по оси Y. Далее возможно замещение отрезка N1 пятью отрезками либо проведение дополнительной проверки с целью его представления одним проводником.

Рассмотрим алгоритм расширения проводников, представленный на рис. 15.



Рис. 15. Алгоритм расширения проводников

После инициализации индекса i, обеспечивающего сканирование по множеству P, и индекса j, обеспечивающего сканирование по массиву M, формируются модели проводника-«цели» p_i и TK-«обработчика» m_i (см. блок 1 на рис. 15).

Затем исследуется ВР, которое реализуется посредством выполнения проверки $p_i \cap m_j = 0$, в результате чего определяется ВР ТК (см. блок 2 на рис. 15).

Если $p_i \cap m_j != 0$, то две ТК контактируют и в этом случае выполняются операции, представленные в 3-м блоке (см. рис. 15). При этом формируется ТК $C = p_i/m_j$, которая заменяет в множестве P компоненту p_i . Если ТК p_i и m_j не пересекаются, то увеличивается индекс j, что обеспечивает переход на следующий m_j и соответствующую проверку. Если выборка по P завершена, увеличивается i, что обеспечивает проверку для следующего проводника, подлежащего расширению. При достижении i значения n работа алгоритма завершается.

Другими словами, можно говорить, что работа алгоритма заключается в следующем: изначально все проводники-«цели» расширяются до финишного значения *D_n*, а затем TK-«обработчики» посредством логической операции «вычитание» убирают лишнюю топологию — металлизацию из проводников-«цели».

Очевидно, что, применяя модели «цели» и «обработчика», можно проводить и контроль DRC, предусматривающий контроль соблюдения зазоров между TK.

Компоновки ПП перед их выводом в поле фотошаблона

В работе [6] описывается ПО, предназначенное для компоновки ПП перед их выводом в поле фотопленки.

Согласно примеру, приведенному в [6], существует множество $M = (m_1, m_2, \ldots, m_9, m_K, m_{ABCD})$, состоящее из девяти ПП, одного технологического компонента-купона, обозначенного буквой K, и прямоугольника ABCD, представляющего собой «поле ФШ», при этом m_K принудительно размещен в его левом верхнем углу (см. рис. 16).

Как видно из рис. 16, все ПП размещены в пределах прямоугольника *ABCD*, при этом все элементы *M* описываются как ТК типа КП (см. рис. 3, *a*) прямоугольной формы. Посредством ПО, реализующего некий эвристический алгоритм, произведено автоматическое размещение пяти ПП с номерами 1, 4, 8, 7, 9.

Очевидно, что эвристические алгоритмы не в состоянии обеспечить оптимальную компоновку плат. Поэтому предлагается набор инструментов, который бы в ручном режиме позволил улучшить результаты компоновки.

Для этих целей разработано ПО, именуемое «компоновщиком». При этом инструменты должны обеспечивать перемещение, повороты, удаление, ввод новых ПП, не нарушая заранее установленных норм компоновки.

Рассмотрим эти инструменты.

Перемещение/поворот ПП. Для перемещения/поворота ПП пользователю предлагаются следующие команды: сдвиг влево (Сд_Л), сдвиг вправо (Сд_П), сдвиг вверх (Сд_В), сдвиг вниз (Сд_Н), длинный сдвиг влево (Сд_ЛД), длинный сдвиг вправо (Сд_ПД), длинный сдвиг вверх (Сд_ВД), длинный сдвиг вниз (Сд_НД), поворот (Пв).

Итак, после автоматической компоновки мы имеем следующие ТК:

– множество размещенных ПП $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD})$, в число которых входит как купон, так и «поле ФШ» (прямоугольник ABCD);

– множество не размещенных ПП $P = (p_2, p_3, p_5, p_6).$



Рис. 16. Расположение ПП после автоматического размещения

Для перемещения ПП s_i необходимо выполнить действия в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 17.



Рис. 17. Алгоритм сдвига ТК

На вход поступает номер *j*, который соответствует ПП, подлежащей перемещению, и направление сдвига Сд_X, где $X = J/\Pi/B/H$.

Затем (см. блок 2 на рис. 17) из множества S изымается s_i, поскольку эта ПП подлежит сдвигу, а также рассчитывается точка привязки (X_p, Y_p) после сдвига. Изначально ПП s_j имеет точку привязки $(X_{\rm H}, Y_{\rm H})$. Точка привязки (X_p, Y_p) вычисляется следующим образом:

– для Сд_П $X_p = X_{\rm H} + {\rm diskr}, \ Y_p = Y_{\rm H},$ при этом diskr — величина смещения;

- для Сд_Л $X_p = X_{\rm \scriptscriptstyle H} {\rm diskr}, \, Y_p = Y_{\rm \scriptscriptstyle H};$
- для Сд_В $X_p^P = X_{\rm H}^n$, $Y_p = Y_{\rm H} + {\rm diskr};$ для Сд_Н $X_p = X_{\rm H}$, $Y_p = Y_{\rm H} {\rm diskr}.$

Далее инициируются индекс сканирования по Si = 0 и признак конфликта К $\Phi = 0$, являющиеся одним из результатов работы алгоритма.

После этого (см. блок 3 на рис. 17) рассчитывается ТК $C = K\Pi(X_p, Y_p, j)$, являющаяся образом ПП s_i с точкой привязки (X_p, Y_p) и параметрами s_i .

Затем исследуются ВР ТыК С и s_i посредством выполнения операции $C \cap s_i != 0$.

Если имеет место контактирование С с какойлибо размещенной ПП, купоном или «полем ФШ», то старое значение s_i восстановится в S (см. блок 4 на рис. 17) и К $\Phi = 1$ (см. блок 5 на рис. 17), работа программы завершена.

Если контактирования не было, то вместо s_j в S записывается C (см. блок 6 на рис. 17), а КФ при этом равен 0. При этом s_j визуализируется в точке (X_p, Y_p) . Работа алгоритма завершена.

Длинный сдвиг отличается от просто сдвига тем, что движение ПП осуществляется до тех пор, пока плата не «наткнется» на какое-либо препятствие, в качестве которого может выступать другая ПП, купон или «поле ФШ». Алгоритм длинного сдвига приведен на рис. 18. Обработка поворота ПП идентична обработке сдвига и проводится по той же схеме, при этом формирование C производится заменой габаритов ПП GX и GY следующим образом: RAB = GX; GX = GY; GY = RAB.



Рис. 18. Алгоритм длинного сдвига

Удаление ПП осуществляется программными средствами и не требует механизмов исследования ВР ТК.

Размещение ТК в «поле ФШ»

Размещение геометрических фигур на некоторой площади является типовой задачей. Необходимость в решении этой задачи возникает при проектировании ПП, их изготовлении, при раскрое материалов [7] и т. д.

Итак, имеется множество размещенных ПП $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD})$ и (см. рис. 16) множество неразмещенных ПП $P = (p_2, p_3, p_5, p_6)$. Пусть $\{X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}\}$ — минимаксные координаты прямоугольника ABCD. Для уплотнения компоновки встает задача о проверке возможности дополнительного ввода в «поле ФШ» платы из множества P. Для этого в «поле ФШ» необходимо определить точку привязки для платы p_i , при этом она не должна конфликтовать с ТК из множества S.

Эта задача решается с помощью алгоритма, приведенного на рис. 19.



Рис. 19. Алгоритм поиска точки привязки ПП

Изначально устанавливаются i — индекс сканирования по множеству S, j — индекс сканирования по множеству P: i = 1; j = 1. Сканирование по j обеспечивает последовательность проверок из P.

Программа генерирует последовательность точек (X_p, Y_p) , которые возрастают по оси X от значения X_{\min} до X_{\max} посредством прибавления к X_p смещения dx. При достижении X_{\max} координата Y_p увеличивается на смещение dy, а $X_p = X_{\min}$. При достижении Y_p значения Y_{\max} происходит переход к проверке следующей платы из P.

Таким образом, точка привязки осуществляет движение, подобное движению телевизионного растра. Для каждой точки (X_p, Y_p) формируется

ТК $C = K\Pi(X_p, Y_p, j)$, которая является образом p_j в точке привязки (X_p, Y_p) . После чего исследуются ВР с размещенными ПП и купоном посредством выполнения операции $C \cap s_i != 0$. Если находится такая (X_p, Y_p) , у которой бы результат операции $C \cap s_j = 0$ для всех ПП, находящихся в «поле ФШ», то эта точка является точкой привязки p_j .

При реализации алгоритма необходимо правильно выбрать значение dx и dy. При их малых значениях можно получить значительное время обработки. Если же dx и dy будут велики, то это может привести к уменьшению вероятности нахождения свободного места для установки ПП. В [6] приведены результаты поиска места для ПП из множества P.

Подготовка «поля ФШ» перед размещением на нем изображения ПП

Процесс подготовки информации для изготовления ФШ описан в работе [8] и осуществляется следующим образом. Из заранее сформированного ряда заготовок по некоторым правилам выбирается одна из них, например заготовка, представленная на рис. 20. Как правило, выбор определяется технологическими требованиями, характером выводимой информации, порядковым номером слоя в ПП и т. д.

Такая заготовка представляет собой «поле Φ Ш», на котором размещается множество ТК $M = (m_1, m_2, \ldots, m_n)$. Тип M — полигон, который описывает контур, имеющий форму клина.

В программе «компоновщик» осуществлено размещение ПП (см. рис. 16), представленное в виде множества ПП: $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD}).$

Для этого варианта размещения проведена подготовка информации для изготовления ФШ (см. рис. 21). Как видно из рис. 21, в тех местах «поля ФШ», где располагаются ПП, должно произойти освобождение от изображений, принадлежащих заготовке. В дальнейшем на освобожденных местах разместятся ПП. В системе САМ-350 [2] существуют механизмы использования композитных слоев, которые позволяют решить эту задачу. В качестве альтернативного способа можно применить метод исследования ВР ТК. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие действия:

$$c_{1} = m_{1}/p_{1}/, \dots/p_{m}$$

$$c_{2} = m_{2}/p_{1}/, \dots/p_{m}$$

$$\dots$$

$$c_{n} = m_{2}/p_{1}/, \dots/p_{m}.$$



Рис. 20. Один из вариантов заготовки для формирования ФШ

Результат этих действий $C = c_1 \cup c_2 \cup \ldots \cup c_n$ ждающую корректность результата, при этом во представлен на рис. 21. всех вариантах прослеживается единый подход: за-

И далее в это обработанное «поле ФШ» загружаются изображения ПП (см. рис. 22).

Приведенные примеры, реализованные в виде программ, прошли опытную эксплуатацию, подтвер-

ждающую корректность результата, при этом во всех вариантах прослеживается единый подход: задача описывается некоторой последовательностью логических операций, выполняемых над ТК посредством методов [4], реализуется заложенная последовательность, обеспечивая выполнение задачи.



Рис. 21. Результат подготовки информации



Рис. 22. «Поле ФШ» с размещенными ФШ

Таким образом, можно констатировать, что предлагаемые методы в состоянии решать задачи, связанные обработкой топологий.

Список литературы

- 1. https://www.altium.com (Дата обращения 12.05.2020).
- 2. www.eurointech.ru/learn_cam350
- 3. Frontline: сайт. URL: www.frontline-pcb.com (Дата обращения 12.05.2020).
- 4. Архангельский А. Н. Методы обработки топологических компонентов при проектировании и изготовлении электронной аппаратуры // Информационные технологии, 2017, № 10.

- Архангельский А. Н., Летфуллин И. Р., Трофименко Р. В. Оптимизация топологии печатных плат при их изготовлении // Технологии в электронной промышленности, 2018, № 7. С. 34–36.
- 6. Архангельский А.Н., Летфуллин И.Р., Трофименко Р.В. Методы компоновки печатных плат в поле заготовки перед изготовлении фотошаблонов // Технологии в электронной промышленности, 2019, № 2. С. 27–31.
- Мухачева Э.А. Обзор и перспективы развития комбинаторных методов решения задач раскроя и упаковки // Материалы конференции «Дискретный анализ и исследование операций». Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2002. С. 80–87.
- 8. Архангельский А. Н., Летфуллин И. Р., Трофименко Р. В. Система подготовки данных на разногабаритные печатные платы // Технологии в электронной промышленности, 2019, № 1. С. 25–29.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 63–69

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

УДК 004.735 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.63.69

Протоколы динамической маршрутизации и коммутации, метод построения сети связи для нужд ракетно-космической отрасли

В.А.Селифанов, к.т.н., selifanov.va@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Мартыненко, martynenko.vv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. При построении систем связи и передачи данных (ССПД) в рамках развития ракетно-космической отрасли в процессе реализации опытно-конструкторских работ создают индивидуальные ССПД с низким уровнем заимствования и унификации. Целью данной статьи является разработка комплексного метода решения проблемы динамической оптимизации систем связи и передачи данных.

Для решения локальных задач на одном объекте дополнительно создаются новые узлы связи, покупаются или заимствуются каналы связи, которые функционируют в рамках своих информационных систем, что приводит к росту неоправданных затрат. Создание единой сети передачи данных с динамической маршрутизацией позволит оптимизировать затраты и решить проблемы отсутствия четко выраженной топологии сети передачи данных, оперативного выбора кратчайшего пути между узлами сети, избежать образования петель в маршрутизации и возникновения пересечения адресных пространств внутри сетей комплексов технических средств и предприятий ракетно-космической промышленности, обеспечить комплексирование созданных информационных систем с модернизируемыми.

Для решения проблем оптимизации сети передачи данных предлагается использовать комплексный метод с применением протоколов динамической маршрутизации OSPF, MP-BGP и технологии *MPLS*. Данный метод дает возможность организовать виртуальные распределенные сети на базе единой физической сети, исключая их взаимное влияние друг на друга, и обладает рядом преимуществ. Оптимальное комплексирование повысит надежность проектных решений.

Ключевые слова: комплексный метод, OSPF, MP-BGP, динамическая маршрутизация, MPLS

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 63–69

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

Protocols of Dynamic Routing and Switching, a Method for Construction of a Communication Network for the Needs of the Rocket and Space Industry

V.A. Selifanov, Cand. Sci. (Engineering), selifanov.va@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V.V. Martynenko, martynenko.vv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. During the construction of communication and data transmission systems (CDTS) as a part of the development of the rocket and space industry in the course of R&D work one creates individual CDTS with a low level of borrowing and unification.

In order to solve local problems, new communication nodes are additionally created at one site, and communication channels are bought or borrowed, which operate within the framework of their information systems. This increases unnecessary costs. The creation of a single data network will optimize the costs of the company.

The purpose of this article is to familiarize specialists of rocket and space industry organizations with methods of solving the problem of dynamic optimization of CDTS.

The sources of the problem are:

- Absence of a clear topology of data transmission system;

- Need to quickly select the shortest path between network nodes;

- Possibility to form loops in routing;

- Intersection of address spaces within networks of hardware complexes and space-rocket industry enterprises;

- Integration of created information systems with the ones that can be modernized.

In order to solve the problem of dynamic optimization of the data network, it is proposed to use an integrated approach using OSPF, MP-BGP, dynamic routing protocols, and the *MPLS* technology.

This approach allows creating dedicated virtual distributed networks based on a single physical network eliminating their mutual influence on each other.

Optimal integration will increase the reliability of design solutions.

Keywords: complex method, OSPF, MP-BGP, dynamic routing, MPLS

В настоящее время спецификой ракетно-космической отрасли является то, что в ней отсутствует единое масштабируемое информационное пространство для обеспечения информационного обмена между различными группами специалистов за счет предоставления им коллективного доступа к необходимым сетевым сервисам, различным приложениям и отраслевым информационным системам. Отсутствие единого информационного пространства снижает темпы разработки новых изделий и ограничивает возможности взаимодействия сотрудников организаций ракетно-космической промышленности. Кроме того, при создании сетевой инфраструктуры наземных измерительных комплексов часто возникает необходимость создавать отдельные сети передачи данных из-за отсутствия технической возможности использовать существующие.

Таким образом, при проектировании единой сети передачи данных между организациями ракетно-космической промышленности, измерительными пунктами и другими организациями и средствами, участвующими в информационном обмене внутри отрасли, возникает ряд проблем, требующих решения.

Исторически сложилось, что для управления космическими аппаратами строились отдельные независимые комплексы, предусматривающие полный спектр необходимых средств: средства связи, наблюдения и обработки информации. Использование этих ресурсов в иных комплексах зачастую требовало значительной модернизации и внесения изменений в режимы их работы, что зачастую становилось более затратным, чем создание новых, поэтому разработчики предпочитали строить системы полностью под свои нужды. Например, существуют комплексы, в которых маршрутизация осуществляется программными средствами самостоятельно, путем замены шлюза по умолчанию в широковещательной сети, что накладывает ограничения на используемые каналы передачи данных. Отдельные комплексы требуют гарантированной скорости передачи данных, что при отсутствии средств управления потоком трафика делает невозможным совместное использование каналов передачи данных.

Кроме того, в документе RFC 1918 выделены определенные диапазоны IP-адресов для использо-

вания в частных IP-сетях, что нередко приводит к пересечению адресных пространств различных комплексов.

При этом значительная часть измерительных пунктов располагается в удаленных труднодоступных местах, что делает необходимостью совместное использование каналов передачи данных, т. к. строительство дополнительных линий потребует чрезмерно больших затрат.

В подобных условиях целесообразно применять технологию *MPLS* (*Multiprotocol Label Switching*), которая строится на базе IP-сетей и протоколов динамической маршрутизации, комбинирует их преимущества и предоставляет универсальную среду для построения независимых разнородных сетей, использование которой не требует доработки абонентских технологий обработки информации и средств передачи данных.

На основе технологии *MPLS* реализуется возможность построения независимых виртуальных сетей с независимой адресацией в двух вариантах:

- MPLS L3 VPN. Позволяет создавать виртуальные изолированные сети 3 уровня модели OSI с произвольным количеством подключений.
- *MPLS L2 VPN*. Позволяет создавать виртуальные подключения 2 уровня: как точка-точка, так и точка-многоточка.

Данная технология успешно применяется крупными операторами связи для предоставления услуг клиентам, однако построение сети связи только на основе сетей операторов ограничивается наличием специфических требований надежности и безопасности в ракетно-космической отрасли, не допускающих применение общедоступных каналов передачи данных без резервирования и использования сертифицированных средств защиты информации, а также предусматривающих собственный контроль над такими средствами.

Описание функционирования технологии L2 VPN достаточно объемно и выходит за рамки данной статьи, подробно этот вопрос рассматривается авторами А.Б. Гольдштейном и Б.С. Гольдштейном [1].

В своей книге В. Олифер и Н. Олифер [2] исчерпывающе описали изменения, которые произошли в области развития сетей за последнее время.

	OSPF IS-IS		iBGP		
Тип протокола	Link-State/IGP	Link-State/IGP	Distant-Vector/EGP		
Скорость сходимости	Высокая Высокая		Средняя		
Уровень	Сетевой	Канальный	Прикладной		
Фильтрация маршрутов	ов Поддерживает на граничных не поддерживает на граничных маршрутизаторах		Поддерживает		
Административная дистанция	110	115	200		
Объем служебного трафика	Низкий	Низкий	Низкий		
алансировка нагрузки Одинаковые метрики		Одинаковые метрики	Различные метрики		
Бесклассовая адресация	Поддерживает				

Таблица. Сравнение протоколов динамической маршрутизации

Очень подробно разъяснены принципы работы аппаратного и программного обеспечения компьютерных сетей различного типа известными экспертами в области информационных технологий Э.С. Таненбаумом, Д. Уэзероллом [3].

Интересную информацию о взаимосвязи маршрутизации и математических методов исследования можно почерпнуть из диссертации кандидата технических наук Д. С. Царева [4].

Для более глубокого понимания проблематики целесообразно ознакомиться с трудами авторов из следующих источников [5–9].

Прежде всего стоит отметить, что необходимым условием функционирования MPLS является наличие IP-связности между всеми маршрутизаторами, входящими в состав MPLS-сети. Применять для этого возможно как статическую, так и динамическую маршрутизацию, однако в связи с территориальной распределенностью узлов такой сети, наличием резервирования и использованием различных типов каналов связи у нее не будет четко выраженной топологии, что дает предпосылки к образованию петель и усложняет выбор кратчайшего пути между ее узлами. Решается эта проблема с использованием протоколов динамической маршрутизации. При рассмотрении используемых на сегодня протоколов динамической маршрутизации, сразу следует исключить проприетарные протоколы зарубежных компаний в связи с политикой импортозамещения. Из оставшихся протоколов наибольшее распространение получили OSPF, IS-IS и BGP.

В нашем случае для организации сетевой связности наилучшим образом подходит протокол OSPF, так как он основан на алгоритме состояния сетевых соединений и обладает высокой скоростью сходимости. При выборе маршрута используется метрика, основанная на пропускной способности соединения, а наилучший путь выбирается на дереве кратчайших путей, построенных с помощью алгоритма Дейкстры.

Остановимся подробнее на базовых определениях *MPLS*, а также дадим краткое описание функционирования *MPLS L3 VPN*.

MPLS — технология коммутации по меткам. В данной технологии решение о направлении пакета в определенный интерфейс принимается маршрутизатором на основании метки — короткого идентификатора, который добавляется между заголовком пакета и заголовком кадра протокола канального уровня. Меток может быть несколько, в этом случае они формируют стек.

На любом маршрутизаторе *MPLS* для каждой входящей метки в таблице маршрутизации *FIB* (*Forwarding Information Base*) существует определенная исходящая метка. Каждый маршрутизатор *MPLS*, принимая пакет, удаляет установленную (входящую) метку и при передаче следующему узлу добавляет новую (исходящую). Таким образом пакет передается от маршрутизатора к маршрутизатору до узла назначения, где метка окончательно удаляется и пакет подвергается дальнейшей обработке. Маршрутизаторы, участвующие в коммутации пакетов по меткам, называются LSR (Label Switch Router), маршрут следования пакетов по меткам называется LSP (Label Switch Path).

Таким образом, чтобы сформировать *LSP*, все *LSR* должны заполнить свои таблицы маршрутизации метками.

Механизм распространения меток по сети MPLS основывается на протоколе LDP (Label Distribution Protocol) и понятии FEC (Forwarder Equivalence Classes), который представляет собой некую характеристику пакетов, соответствующих определенному LSP. То есть все пакеты с одинаковым FEC будут направляться по одному LSP. В наиболее простом случае FEC представляет собой IP-адрес или префикс сети.

Каждый LSR распространяет между своими соседями перечень FEC, доступных через него, и получает от соседних LSR аналогичные сообщения. Для каждого FEC LSR выделяет уникальную метку, после чего сообщает FEC и выделенную метку своим соседям. LSR, получивший сообщение от соседа, сохраняет в своей таблице меток полученные данные, интерфейс, через который получено сообщение, выделяет собственную метку для данного FEC и передает остальным соседям сообщение с FEC и новой меткой.

Передача пакета по *LSP* производится только на основании верхней метки стека; остальные метки, а также содержимое пакета передаются без изменений. Такое поведение позволяет после снятия верхней метки на конечном *LSR* подвергать пакет дополнительной обработке. На этом и базируется технология *MPLS L3VPN*.

Для реализации отдельных VPN используются так называемые виртуальные маршрутизаторы. Различные производители телекоммуникационного оборудования называют их по-разному, но суть от этого не меняется. В рамках данной статьи используем термин VRF (Virtual Routing and Forwarding instance). VRF — сущность, фактически представляющая собой виртуальный маршрутизатор. Так, для каждой VPN, организованной в сети MPLS, создается отдельный VRF, выполняющий независимую от других VRF маршрутизацию.

Когда интерфейс граничного *LSR* назначается конкретному *VRF*, для него создается метка *MPLS*,

после чего созданная метка и подсети, сопоставленные данному интерфейсу, а также адрес *LSR* распространяются в *MPLS*-сети.

При обмене пакетами маршрутизатор, через который пакет попадает в *MPLS*-сеть, называется *Ingress LSR*, а маршрутизатор, через который пакет покидает ее, — *Egress LSR*.

Ingress LSR, получив пакет, находит в таблице маршрутов VFR необходимую запись и добавляет в стек меток метку, соответствующую нужному маршруту. После чего находит в таблице меток FEC, соответствующий адресу Egress LSR и добавляет в стек соответствующую ему метку (транспортную метку), после чего отправляет пакет в соответствующий интерфейс.

Далее пакет следует по *LSP* до *Egress LSR*, который, определив, что пакет предназначен ему, снимает транспортную метку и обнаруживает под ней еще одну метку, в соответствии с этой меткой он направляет пакет в нужный интерфейс.

Из приведенного описания очевидно, что инкапсуляция пакетов протоколов верхнего уровня в пакеты *MPLS*, а также использование сертифицированных средств защиты информации ограничивает допустимые размеры пакетов, передаваемых по такой сети.

Для определения допустимых размеров пакетов был произведен расчет. Расчет проводился исходя из использования АПКШ «Континент». В случае применения иного средства размеры заголовков пакетов могут быть иными. Размеры заголовков пакетов используемых сетевых протоколов взяты в соответствии со стандартом IEE 802.3, а также RFC 768, RFC 791, RFC3032 и приведены на рис. 1.

Исходя из этих данных размер МТU можно рассчитать по формуле:

$$\begin{split} L_{\rm MTU} &= 1500 - (L_{\rm IP} + L_{\rm UDP} + L_{\rm OH} + \\ &+ L_{\rm Eth} + 4N_{\rm MPLS} + L_{\rm FCS}), \end{split}$$

где L_{MTU} — размер MTU

*L*_{IP} — длина заголовка IP;

 $L_{\rm UDP}$ — длина заголовка UDP;

 $L_{\rm OH}$ — длина заголовка протокола туннелирования (*overhead*);

 $L_{\rm Eth}$ — длина заголовка кадра Ethernet;

 $N_{\rm MPLS}$ — размер стека меток *MPLS*;

1500									
Заголовок IP	Заголовок UDP	Заголовок туннеля	Заголовок Ethernet	Метка <i>MPLS</i>	Метка <i>MPLS</i>	Данные	FCS		
20	8	70	14	4	4				
120						1376	4		

Рис. 1. Размеры заголовков пакета



Рис. 2. Схема макета стенда

 $L_{\rm FCS}$ — длина поля контрольной суммы Ethernet.

Таким образом, в наложенной защищенной сети размер МТU не должен превышать 1376 байт, это необходимо учитывать при настройке активного сетевого оборудования.

Для распространения маршрутной информации *VRF* между маршрутизаторами используется протокол MP-BGP.

Для того чтобы отличать маршруты, принадлежащие различным VRF, каждый из маршрутов дополняется уникальным идентификатором Route Distinguisher (RD), идентифицирующим конкретный VRF.

Таким образом каждый Ingress и Egress LSR анонсирует через атрибуты Extended Community MP-BGP маршруты в виде Route Target (RT) — префиксов подсетей, дополненных уникальным идентификатором. С целью изучения данного метода и подтверждения возможности его применения был собран макет, схема которого представлена на рис. 2. Для имитации сетей объекта с совпадающей адресацией были использованы АРМы, а в качестве арендуемых у операторов или собственных каналов связи — маршрутизатор.

В результате изучения функционирования макета работоспособность предлагаемой схемы полностью подтверждается. Технология *MPLS* полностью функциональна и может применяться для решения поставленных задач.

На сегодняшний день эксплуатируемые в ракетно-космической отрасли системы передачи данных являются набором сетей, использующих метод статической маршрутизации, частично применяющих протокол маршрутизации OSPF. Статические системы маршрутизации не могут реагировать на изменения в сети. Они непригодны для

современных крупных, постоянно изменяющихся сетей.

Комплексный подход с использованием динамической маршрутизации дополняет статический метод маршрутизации, при котором маршруты устанавливаются администратором сети и не меняются до тех пор, пока администратор сети не поменяет их вручную.

Предлагаемый метод комплексного подхода с использованием динамической маршрутизации гарантирует качественные характеристики каналов передачи данных. Разделение сетей с использованием технологии *MPLS* позволяет изолировать трафик одной сети от другой, избежать конфликтов IP-адресов и гибко управлять пропускной способностью каждой сети.

Заключение

Таким образом, метод комплексного подхода включает совместное применение протоколов, MP-BGP и технологии MPLS при построении единой сети передачи данных для нужд ракетно-космической отрасли. Данный метод позволяет, не привязываясь к определенной топологии, добавлять новые узлы и каналы связи без внесения существенных изменений в конфигурацию оборудования сети. Он дает возможность организовывать отдельные распределенные виртуальные сети для наземных измерительных комплексов и наземных комплексов управления, при этом исключив влияние одной виртуальной сети на другую путем гибкой настройки пропускной способности каждой сети. Это значительно сокращает затраты на организацию связи, так как отпадает необходимость постройки отдельной сети под новые задачи и пропускная способность каналов связи используется более эффективно.

Применение комплексного подхода позволяет:

 уменьшить время перехода на резервный канал при отказе основного канала передачи данных; отказаться от строительства индивидуальной физической сетевой инфраструктуры для решения индивидуальных задач при построении единого информационного пространства и управления космическими аппаратами;

 оптимизировать использование ресурсов (оборудования и каналов передачи данных);

- снизить стоимость;

 унифицировать контроль доступа к сетевым ресурсам для нужд ракетно-космической отрасли.

Оптимальное комплексирование повысит надежность проектных решений.

Список литературы

- 1. Гольдитейн А.Б., Гольдитейн Б.С. Технология и протоколы *MPLS*. СПб.: BHV-Петербург, 2005. 304 с.
- 2. Олифер В.Г., Олифер В.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 6-е изд. СПб.: Питер, 2016. 958 с.
- 3. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2019. 960 с.
- 4. *Царев Д.С.* Разработка алгоритма маршрутизации трафика в *MPLS*-сети: дисс. ... канд. тех. наук. Воронеж, 2010. 140 с.
- Cowley J. Communications and networking. An introduction Second edition. London: Springer-Verlag, 2012. 251 p.
- Minei I., Lucek J. MPLS-Enabled Applications: Emerging Developments and New Technologies. Wiley, 3-d edition, 2011. 628 p.
- Nor Musliza Mustafa. Routing Optimization in OSPF: A Matrix Usage Method for Load Balancing in Shortest Path Routing., LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 168 p.
- 8. *Rosen E*. RFC 8277 Using BGP to Bind MPLS Labels to Address Perfixes. RFC, DOI. 2017.
- 9. Zhang R., Bartell M. BGP Design and Implementation: Practical guidelines for designing and deploying a scalable BGP routing architecture. Indianapolis: Cisco Press, 2016. 672 p.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 70–77

____ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.3.049.776.21 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.70.77

Физико-технологические ограничения при проектировании многослойной коммутационной СВЧ-платы

А.А.Жуков, д.т.н., доцент, zhukov.aa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

Москва, Российская Федерация

А.Ю.Калашников, acпирант, kalashnikov.ay@spacecorp.ru AO «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М.К.Соловьев, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Проведена экспериментальная оценка диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм, полученного методом формирования из раствора с разнотолщинностью не хуже 10%. Экспериментально определена адгезионная прочность в системе «полиимидное покрытие-металлизация» на пластине из нитрида алюминия и микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr-Cu-Ni-Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия, оценена селективность травителя полиимида и проведен выбор режима жидкостного травления полиимидного покрытия на пластине из нитрида алюминия. Обобщены физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутационной СВЧ-платы космического назначения на основе полиимида. Полученные данные позволяют обоснованно подходить к моделированию и конструированию коммутационных СВЧ-плат на основе полиимида.

Ключевые слова: полиимиды, многослойный, СВЧ-плата, ограничения

Physical and Technological Limitations for the Construction of a Multilayer Switching Microwave Board

A. A. Zhukov, Dr. Sci. (Engineering), associate professor, zhukov.aa@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Moscow Aviation Institute (National Research Institute), Moscow, Russian Federation

A. Yu. Kalashnikov, postgraduate student, kalashnikov.ay@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. K. Soloviev, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The dielectric constant and the dielectric loss tangent of a polyimide coating with a thickness of 40 μ m to 160 μ m, obtained by the solution coating method with a thickness difference of no worse than 10%, were experimentally evaluated. The adhesive strength was experimentally determined in the system «polyimide coating–metallization» on a substrate of aluminum nitride and a microwelded gold wire to metallize the Cr–Cu–Ni–Au system formed on the surface of the polyimide coating, the selectivity of the polyimide etchant was evaluated, and the polyimide liquid etching mode was selected coatings on a substrate of aluminum nitride. The physical and technological limitations for the construction of a multilayer switching microwave board for space purposes based on polyimide are summarized. The data obtained allow a reasonable approach to modeling and designing switching microwave boards based on polyimide.

Keywords: polyimides, multilayer, microwave board, limitations
Введение

Развитие радио- и микроэлектронной техники сопровождается повышением требований к технологичности, надежности функционирования, уменьшению массы и объема, улучшению электрических характеристик изделий при одновременном росте функциональных возможностей. Данные требования справедливы и для микроэлектронных изделий СВЧ-диапазона, современный этап разработки которых связан с необходимостью внедрения в процесс их проектирования передовых технологий и конструктивных решений. Оптимизацией структуры отдельных элементов конструкции, размеров и подбора совокупности применяемых материалов можно существенно повысить уровень характеристик гибридных интегральных схем и микросборок СВЧ. СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией имеют сложную композиционную структуру чередующихся слоев проводников и диэлектриков, ввиду чего использование различных систем материалов в ней непременно связано с присущими им физико-технологическими ограничениями.

Надежность электронной аппаратуры во многом обеспечивается конструктивно-технологическими решениями [1]. Как показано в работе [2], рост функциональной сложности электронных устройств заставляет их разработчиков искать новые конструктивно-технологические решения проектирования и изготовления коммутационных плат. Использование в структуре платы толстых (10-30 мкм) пленок фоточувствительного органического диэлектрика [2] в качестве межуровневой и защитной изоляции позволяет снизить трудоемкость и себестоимость изготовления платы по сравнению с тонкопленочным прототипом. В работах [3, 4] показано, что в основе субмодуля многослойной кремниевой коммутационной платы в качестве СВЧ-межсоединений предполагается использование производных полимера типа бензоциклобутена. СВЧ-модуль, показанный в работе [5], представляет собой многослойную структуру, выполненную на жестком основании из нитрида алюминия. Теплопроводность AlN находится в диапазоне 170-220 Bт/(м·К), ее значение зависит от исходных порошковых материалов и способа производства пластины. ТКЛР нитрида алюминия равен 5,6 ppm/°С и близок к аналогичному параметру кремния (4,1 ppm/°С) и арсенида галлия (6,5 ppm/°С). Кроме того, этот материал может использоваться в толсто- и тонкопленочной технологии, для высокотемпературной пайки или пайки мягким припоем [6]. Ввиду тенденции к увеличению производительности и росту функциональной сложности электронных устройств остается необходимость разработки и применения новых конструктивно-технологических решений, а значит, существует актуальная задача обобщения физико-технологических ограничений при конструировании многослойной коммутационной СВЧ-платы для обеспечения обоснованного подхода к моделированию и конструированию СВЧ-плат на основе полиимида.

Цель работы — обобщение экспериментально определенных физико-технологических ограничений для обоснованного конструирования многослойной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 определить состав и структуру тестовых образцов;

- определить методы исследования;

 – разработать метод формирования полиимидного покрытия толщиной более 40 мкм с разнотолщинностью не хуже 10% (при диаметре пластины 76 мм);

 – экспериментально оценить диэлектрическую постоянную и тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм;

- оценить селективность травителя полиимида;

 выбрать режимы жидкостного травления полиимидного покрытия на пластине из нитрида алюминия;

 экспериментально определить адгезионную прочность в системе «полиимидное покрытие – металлизация» на пластине из нитрида алюминия и микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr–Cu–Ni–Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия;

 исследовать влияние режима термической обработки на стабильность свойств тестовой многослойной коммутационной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида.

Объекты исследования

Объектами исследования служили:

кремниевые пластины диаметром 76 мм [7] со сформированным полиимидным покрытием (для получения покрытия использовался лак АД-9103 ИС [8]);

– свободные пленки полиимида (ПИ) толщиной от 40 до 160 мкм (формирование пленок полиимида осуществляли дозированием материала на окисленную пластину с последующим центрифугированием и поливом [9], с дальнейшей термообработкой при 275 °C и механическим отделением).

 пластина из нитрида алюминия [10] со сформированной металлической маской (Cr-Cu);

пластина из нитрида алюминия [10] со сформированной тестовой структурой «полиимидное покрытие – металлизация». Толщина полиимидного покрытия составляет 45±5 мкм, а толщина металлизации — Cr-Cu 1 мкм. Размер контактной площадки — 1 × 1 мм.

Методы исследования

Визуальный осмотр тестовых образцов на наличие дефектов на поверхности, внешних признаков загрязнения, инородных включений, признаков отслоения проводящего рисунка проводился с помощью оптической и растровой электронной микроскопии.

Для определения элементного состава слоя на поверхности образца использовалась система анализа на основе энергодисперсионного спектрометра (eds).

Определение относительной диэлектрической проницаемости ε свободных пленок полиимидного покрытия проводили методом объемного резонатора при фиксированной резонансной частоте [11].

Профилометрию полученных образцов проводили при помощи стилусного профилометра с повторяемостью не хуже 0,6 нм, со скоростью не более 400 мкм/с, линейные измерения проводились методом непосредственной оценки с погрешностью не хуже 2 мкм.

Для определения агдезионной прочности микросоединения тестировались нормальным отрывом с использованием установки тестирования микросоединений, позволяющей осуществлять тестирование в диапазоне от сотен миллиграммов до сотен килограммов с точностью $\pm 0,1\%$ от номинальной нагрузки.

Результаты и обсуждение

Для получения полиимидных покрытий менее 40 мкм центрифугированием известны технологические ограничения [12]. Для получения полиимидных покрытий толщиной более 40 мкм и с разбросом толщины покрытия не хуже 10% был разработан способ формирования толстого полимерного покрытия из раствора [9].

Значения толщины и разброса толщины полиимидных покрытий: для толщины полиимидного покрытия 50 ± 2 мкм разнотолщинность составляет не более 9%.

Для экспериментальной оценки диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм формированием толстого полимерного покрытия из раствора [9] были получены покрытия толщиной 42 мкм, 110 мкм, 158 мкм на окисленных кремниевых пластинах. Произведена термообработка при 275 °С в течение 30 мин с нагревом до заданной температуры не быстрее 1 °С/мин и проведены измерения. После измерения было произведена дополнительная термообработка при 275 °С в течение 60 мин с нагревом до заданной температуры не быстрее 1 °С/мин. Результаты измерения диэлектрической постоянной (ε) и тангенса угла диэлектрических потерь (tg δ) ($f = 10 \Gamma \Gamma \mu$) до и после дополнительной термообработки, проведенные при 25 °С, представлены в табл. 1.

В результате повторной термообработки наблюдается снижение диэлектрической постоянной и уменьшение разброса значений диэлектрической постоянной в зависимости от толщины образца, снижается значение тангенса угла диэлектрических потерь, что может быть связано с процессами удаления влаги и повышения степени имидизации полиимида [13].

Оценку селективности жидкостного травителя полиимида проводили, определяя разницу в скоро-

Таблица 1. Результаты измерения диэлектрической постоянной $(tg \delta)$ и тангенса угла диэлектрических потерь $(tg \delta)$ ($f = 10 \Gamma \Gamma \mu$) обработанных и необработанных при температуре пленок полиимида различной толшины

Параметр	Пленка ПИ 40 мкм	Пленка ПИ 110 мкм	Пленка ПИ 160 мкм
ε	3,68	4,02	4,58
tg δ	0,00071	0,00035	0,00065
ε после 60 мин при 275 °С	3,56	3,85	3,88
tgδ после 60 мин при 275 °С	0,00015	0,0002	0,0004

сти травления полиимидного покрытия и пластины из нитрида алюминия [10] при температурном режиме жидкостного травления полиимида. В состав травителя входят водный раствор гидроксида калия, моноэтаноламин, триэтаноламин. Для исследования взята пластина из нитрида алюминия диаметром 76 мм со сформированной металлической маской на основе системы металлизации Cr–Cu, толщина слоя металлизации составляет 3,5 мкм (рис. 1, *a*). Для определения равномерности травления пластина из нитрида алюминия условно разделена на 3 зоны (рис. 1, *б*).



Рис. 1. Изображение пластины AlN с металлической маской (*a*) и пластины, условно разделенной на 3 зоны (*б*)

Воздействие жидкостным травителем полиимида производилось при температуре 50 °C.

На рис. 2, *а* показано изменение толщины одной стороны пластины из нитрида алюминия при варьируемом времени травления в травителе

полиимида, на рис. 2, б представлено изменение толщины пластины в трех зонах.

Экспериментально определенная скорость травления пластины нитрида алюминия составила 0,07 мкм/мин при температуре травителя 50 °С. В табл. 2 показана расчетная величина подтрава пластины из нитрида алюминия в результате травления слоя полиимида, толщиной 44 мкм.

Таблица 2. Расчетная величина подтрава пластины из нитрида алюминия в результате травления слоя полиимида толщиной 44 мкм

Материал	Толщина слоя, мкм	Время травления, мин	Скорость травле- ния, мкм/мин
Слой полиимида	44	17	2,6
Нитрид алюминия (одна сторона)	1,19	17	0,07

Таким образом, экспериментально определено, что скорости травления отличаются более чем в 37 раз при оптимальном режиме травления полиимида (T = 50 °C), изменение толщины пластины в трех зонах имеет линейный характер и происходит равномерно. При формировании рисунка в слое полиимида толщиной 44 мкм подтрав пластины с одной стороны составит 1,19 мкм.

Исследование адгезионной прочности системы «пластина-полимер-металлизация» проводилось с помощью измерения величины усилия нормального отрыва проволоки, присоединенной методом пайки к поверхности контактной площадки, находящейся на слое полимера и выполненной из металлизации системы Cr–Cu на пластине нитрида алюминия. На рис. 3 представлен общий вид образца до пайки проволоки (a) и схематичное изображение контактной площадки, находящейся на слое полиимида (б).

В табл. З представлены результаты измерений величины усилия нормального отрыва и среднее значение усилия отрыва проволоки, припаянной к поверхности контактной площадки.

На рис. 4 представлены изображения контактной площадки после измерения усилия отрыва (рис. 4, *a*) и обратная сторона разрушенного адге-



Рис. 2. Изменение толщины пластины с одной стороны при варьировании времени травления (*a*) и график изменения толщины пластины в трех зонах (*б*)



 $\int \frac{1}{2} \int \frac$

Рис. 3. Общий вид образца до пайки проволоки (*a*), схематичное изображение контактной площадки, находящейся на слое полиимида (б)

стины со слоем полимера 45 мкм, полученное с помощью электронного микроскопа при увеличении в 50 раз:
 а) после измерения усилия отрыва; б) обратная сторона контактной площадки после отрыва (на проволоке)

№ измерения (отрыва)	Усилие нормального отрыва, кг/мм ²
1	1,99
2	1,77
3	2,37
4	2
5	2,17
6	2,67
7	2,48
8	2,53
9	2,21
10	1,75
11	1,98
Среднее значение	2,17

Таблица 3. Результаты измерения усилия нормального отрыва проволоки, припаянной к поверхности контактной площадки

зионного соединения контактной площадки, оставшаяся на проволоке после отрыва (рис. 4, б).

В табл. 4 показаны результаты eds-спектрометрии контактной площадки и с обратной стороны оторванной контактной площадки, оставшейся на проволоке после отрыва и схематичное изображение расслоения в системе «полиимидное покрытие– металлизация» в результате нормального отрыва.

По результатам eds-спетрометрии (табл. 4) видно, что на поверхности в месте отрыва контактной площадки находится полимер, в то время как на оторванной контактной площадке на проволоке, со стороны отрыва, находятся медь и хром.

Таким образом, методом нормального отрыва с погрешностью 0,1% от номинальной нагрузки измерена величина адгезии системы пластина– полимер-металлизация, где среднее арифметическое усилие нормального отрыва припаянной проволоки к поверхности металлической контактной площадки, сформированной на поверхности слоя полимера, нанесенного на пластину из нитрида алюминия, составило 2,17 кг/мм² по границе «полиимид-металлизация» для образцов, взятых с пластины со слоем полимера толщиной 45 мкм.

	Результаты измерения		Схематичное изображение отрыва
Место отрыва контактной площадки на образце (на пластине) Обратная сто- рона оторванной контактной пло- щадки (на про- волоке)	Эле- мент	Массо- вых %	
	С	36,48	
	Ν	35,03	Cu
	0	27,05	Cr
	Al	1,44	<mark>Полиимид</mark>
	Эле- мент	Массо- вых %	Пластина AIN
	Cr	29,65	
	Cu	70,35	

Таблица 4. Результаты eds-спектрометрии образцов пластины со слоем полимера 45 мкм

Результаты измерений СВЧ-параметров платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида после температурных воздействий, параметры и режимы стабилизирующей термообработки подробно рассмотрены в работе [14].

Для определения адгезионной прочности микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr-Cu-Ni-Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия, стабилизированного термообработкой [14], был выбран метод измерения усилия нормального отрыва. Микросварное соединение формировали ультразвуковым термокомпрессионным методом с мощностью ультразвука 80 ± 2 мА, силой прижатия капилляра 15 ± 1 г, длительностью микросварки 400 ± 5 мс, температурой нагрева пластины 150 ± 5 °C. Результаты измерения усилия нормального отрыва 25 мкм проволоки от поверхности металлизации системы Cr-Cu-Ni-Au, сформированной на полиимидном покрытии, представлены в табл. 5.

Среднее арифметическое значение усилия нормального отрыва для 25 мкм проволоки составило 7,46 г (усилие отрыва должно быть не менее 3,5 г в соответствии с ОСТ В 11 0998).

Исходя из проведенных экспериментальных исследований обобщенные физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимида представлены в табл. 6.

Таблица 5. Результаты измерения усилия нормального отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм от поверхности металлизации системы Cr-Cu-Ni-Au, сформированной на полиимидном покрытии

№ измерения	Усилие отрыва, г
1	10,359
2	10,331
3	6,3053
4	3,459
5	6,849
6	7,6349
7	7,134
8	7,66
Среднее	7,46

Выводы

Разнотолщинность, достигаемая при формировании полиимидного покрытия, не хуже 10%, что подтверждает возможность формирования межслойного диэлектрика многослойной СВЧ-платы на основе полиимида при расположении границ платы не менее чем в 10 мм от края пластины. Диэлектрическая постоянная и тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия для частоты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм имеют значение 3,6-3,9 и (2-4)·10⁻⁴ соответственно. Одновременное использование материалов нитрида алюминия и полиимида в структуре многослойной СВЧ-платы с количеством полиимидных слоев \geq 1 при толщине от 40 до 100 мкм представляется возможным, т.к. скорости травления отличаются более чем в 37 раз при оптимальном режиме травления полиимида. Среднее арифметическое значение величины адгезионной прочности металлизации к полиимидному покрытию на пластине из нитрида алюминия составляет 2,17 кг/мм² при толщине покрытия 45 мкм, при этом отрыв происходит по границе «полиимидное покрытие-металлизация». В результате проведения стабилизирующей термообработки обеспечивается получение стабильных

Таблица 6. Обобщенные физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимида

Nº	Физико-технологическое ограничение	Значение
1	Разнотолщинность покрытия по- лимиида толщиной более 40 мкм на пластине Ø76 мм	Не хуже 10%
2	Диэлектрическая постоянная по- лиимидного покрытия для часто- ты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм	3,6-3,9
3	Тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия для частоты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм	$(2-4) \cdot 10^{-4}$
4	Разность скоростей травления полиимида и нитрида алюминия	> 37
5	Среднее арифметическое значе- ние величины адгезионной проч- ности металлизации к полиимид- ному покрытию на пластине из нитрида алюминия при толщине покрытия 45 мкм	2,17 кг/мм ²
6	Результат проведения стабилизи- рующей термообработки много- слойной платы на основе поли- имида при частоте 10 ГГц	Стабильные СВЧ-характе- ристики; температурная независимость СВЧ-характе- ристик
7	Среднее значение усилия отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм	7 г

СВЧ-характеристик в многослойной плате на основе полиимида при частоте 10 ГГц и достигается температурная независимость СВЧ-характеристик многослойной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида. При оптимальном режиме микросварки среднее значение усилия отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм составляет более 7 г. Обеспечение оптимального режима создания микросварного соединения состоит в нагреве пластины до 150 °С, мощности ультразвука 80 мА, длительности микросварки 400 мс при силе прижатия капилляра 15 г. Таким образом, полученные данные позволяют обоснованно подходить к моделированию и конструированию коммутационных СВЧ-плат на основе полиимида.

Список литературы

- 1. Жарикова И.В., Невлюдова В.В. Системологический подход при исследовании параметров РЭС // Технология приборостроения, 2014, № 2. С. 40-43.
- 2. Спирин В.Г. Многоуровневые платы с толстопленочной полимерной изоляцией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2012. С. 3–7.
- Волосов А.В., Бавижев М.Д., Котляров Е.Ю., Панасенко П.В. Приемопередающий модуль Х-диапазона на кремниевой коммутационной плате // Наноиндустрия, 2018, № 82. С. 441–442.
- 4. Тишин А.С., Котляров Е.Ю. Малогабаритный приемопередающий субмодуль Х-диапазона // http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2976.pdf (Дата обращения 10.10.2019).
- Пурыжинский С.З. Разработка и создание действующих образцов цифровых и СВЧ-модулей с помощью 3DMS-технологии // Электронные компоненты, 2018, № 3. С. 80–83.
- 6. Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е. Неорганические пластины. Характеристики, критерии выбора // Электроника: наука, технология, бизнес, 2014, № 2. С. 204-216.
- 7. ТУ БПКЖ.90.01.000. Пластины монокристаллического кремния.

- 8. Лак электроизоляционный АД-9103 ИС: ТУ 6-19-247-84 с изм. 1-4.
- 9. Жуков А.А., Калашников А.Ю. Способ получения диэлектрического слоя на основе полимерного покрытия в изделиях микроэлектроники: Патент 2692373 РФ / Патентообладатель Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы»), № 2018128409/05; заявл. 03.08.2018; опубл. 24.06.2019. Бюл. № 18. 15 с.
- 10. ТУ 5961-122-07621739-2014. Пластины алюмонитридные.
- ГОСТ 8.623-2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частотт: национальный стандарт: дата введения 2008-06-01. Москва: Стандартинформ, 2016. 35 с.
- 12. Кручинин Д.Ю., Фарафонтова Е.П. Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей: Учеб. пособ. // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 51 с.
- 13. *Ghosh M.* Polyimides: Fundamentals and Applications // CRC Press, 1996. 912 p.
- 14. Жуков А.А., Калашников А.Ю., Поймалин В.Э. Характеристики многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля космического назначения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, № 4. С. 89–96.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 78–89

_____ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.383 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.78.89

Метрологический комплекс регистрации и измерения терагерцевого излучения на основе пленочных структур Сг-слюда-Al-VO_x и Cr-слюда-VO_x

А.С.Олейник, д.т.н., профессор, anatoly.semenovich@gmail.com Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация

> В. П. Мещанов, д. т. н., профессор, nika373@bk.ru ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов, Российская Федерация

Аннотация. Получены зависимости коэффициента поглощения пленок нихрома и хрома на уровне 0,5 в частотных диапазонах 102-110 ГГц, 206,6-223,6 ГГц и 102-116,6 ГГц, 206-226,6 ГГц. Указанные пленки используются в качестве поглотителя пленочных структур Сг-слюда-Al-VO_x и Сг-слюда-VO_x, в которых Al-VO_x выполняет функции термохромного слоя, а VO_x служит термочувствительным слоем, так как при нагреве VO_x одновременно скачкообразно изменяет свои оптические параметры и сопротивление. Структура Cr-слюда-Al-VO_x используется в качестве экрана метрологического комплекса (МК), на котором по цветовому рельефу изображения проводят экспрессный визуальный анализ пространственного распределения мощности (энергии) миллиметрового излучения. При выполнении поглотителя и термохромного слоев в виде пикселей размером 50×50 мкм² пространственное разрешение поля экрана составляет не менее 10 мм⁻¹, яркостный и цветовой контраст изображения — не менее 9,7 (три градации по яркости и цвету), постоянная времени экрана радиовизора — 2.1×10^{-8} с. На длинах волн 2,99-2,56 и 1,45-1,34 мм, при постоянном излучении обнаруживаемый поток энергии (первая градация яркости экрана), приходящийся на пиксель, составляет 15,5 × 10⁻³ Вт; в диапазоне длительности импульса 1-2,1 × 10⁻⁸ с он линейно изменяется от 15,5 × 10⁻³ до 22,3 × 10⁻⁷ Дж. Структура Сг-слюда-VO_x применяется в качестве приемной площадки многоэлементного приемника миллиметрового излучения. Разработан второй блок МК, включающий многоэлементный приемник, сопряженный с двухкоординатным приводом, интерфейс измерительной системы с программным обеспечением и персональный компьютер. МК формирует графически в виде 3D-профиля и в цифровом виде картину изображения объекта наблюдения в миллиметровом диапазоне на экране ноутбука. Обнаружительная способность измерительного канала МК в указанных частотных диапазонах составляет $1,83 \times 10^8$ см $\cdot \Gamma \mu^{/2} \cdot B \tau^{-1}$, а постоянная времени — $\sim 8,5 \cdot 10^{-8}$ с.

Ключевые слова: пленочные структуры, Cr-слюда-Al-VO_x, и Cr-слюда-VO_x, плазмонный резонанс, векторный анализатор цепей, миллиметровое излучение, радиовизор, анализатор излучения

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 78–89

_ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

Metrological Complex for Recording and Measuring Terahertz Radiation Based on Cr-mica-Al- VO_x and Cr-mica- VO_x Film Structures

A.S. Oleynik, Dr. Sci. (Engineering), Prof., anatoly.semenovich@gmail.com Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

V. P. Meshanov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., nika373@bk.ru

Joint Stock Company SPE "NIKA-Microwaves", Saratov, Russian Federation

Abstract. The dependence of the absorption coefficient of nichrome and chromium films at the level of 0.5 in the frequency ranges 102-110 GHz, 206.6-223.6 GHz and 102-116,6 GHz, 206-226,6 GHz was obtained. These films are used as an absorber of CR-mica-Al-VO_x and Cr-mica-VO_x film structures, in which Al-VO_x serves as a thermochromic layer, and VO_x serves as a thermosensitive layer, since when heated, VO_x simultaneously abruptly changes its optical parameters and resistance. The Crmica-Al-VO_x structure is used as a screen of the metrological complex (MC), on which an express visual analysis of the spatial distribution of power (energy) of millimeter radiation is performed based on the color relief of the image. When performing the absorber and thermochromic layers in the form of pixels with a size of $50 \times 50 \text{ mm}^2$, the spatial resolution of the screen field is not less than 10 mm⁻¹, the brightness and color contrast of the image is not less than 9.7 (three gradations in brightness and color), the time constant of the radiovisor screen is 2.1×10^{-8} s. At wavelengths of 2.99–2.56 and 1.45–1.34 mm, with constant radiation, the detectable energy flux (the first gradation of screen brightness) per pixel is 15.5×10^{-3} W, in the pulse duration range of 1–2, 1×10^{-8} s, it changes linearly from 15.5×10^{-3} to 22.3×10^{-7} J. The Cr-mica-VO_x structure is used as a receiving platform for a multi-element millimeter radiation receiver. A second MC has been developed that includes a multi-element receiver coupled to a two-coordinate drive, a measurement system interface with software, and a personal computer. The MC graphically generates a 3D profile and digitally generates a picture of the image of the observation object in the millimeter range on the laptop screen. The detection capacity of the MK measuring channel in the specified frequency ranges is 1.83×10^8 cm \cdot Hz1/2 \cdot W⁻¹, and the time constant is $\sim 8.5 \cdot 10^{-8}$ s.

Keywords: film structures, Cr-mica-Al-VO_x and Cr-mica-VO_x, plasmon resonance, vector chain analyzer, millimeter radiation, radiovisor, radiation analyzer

Введение

Анализ открытых источников научно-технической информации [1–4], отражающих направления развития радиоэлектронных систем военного назначения, показывает, что уже на протяжении последних двух десятилетий в ведущих зарубежных странах широкое применение находят коротковолновые части миллиметровых и длинноволновая часть субмиллиметровых радиоволн (соответственно длины волн 2,15–1,3 мм и 0,96–0,88 мм).

Согласно данным работы [5] окна прозрачности атмосферы Земли отвечают частотам 0,4, 0,65, 0,85 и 1,5 ТГц (затухание в атмосфере соответственно составляет 2, 5, 7, 13 дБ при давлении 1 мм рт.ст.). Частичная прозрачность атмосферы все же позволяет использовать на заданных расстояниях системы с повышенной безопасностью при передаче информации на терагерцевых частотах (скрытность передачи обеспечивается сильным затуханием излучения вне целевого объекта). Результаты современного состояния и тенденций развития приемников терагерцевого и ИК-излучения, созданных на основе широкого спектра чувствительных материалов и структур, обладающих особенностями многоэлементного исполнения различного типа архитектуры (например, регистрация терагерцевого излучения возможна с помощью неохлаждаемых многоканальных детекторов на основе HgCdTe), представлены в работе [6].

Целью данной работы является создание метрологического комплекса (МК) на основе пленочных структур металл-диэлектрик — термохромный слой и металл-диэлектрик — термочувствительный слой, обеспечивающего:

- экспрессную индикацию распределения уровней плотности мощности (энергии) терагерцевого излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц по яркостной и цветовой картине 2D-изображения сечения пучка;
- измерение величины мощности (энергии) терагерцевого излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц и формирование измеряемой информации в виде 3D-профиля в графическом и цифровом виде.

Чтобы обеспечить способность указанных пленочных структур изменять свое состояние с изменением интенсивности радиоизлучения, они должны удовлетворять следующим научно-техническим требованиям: обладать высокой степенью поглощения падающего электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц и минимально возможной теплоемкостью.

В указанных структурах роль поглотителя терагерцевого излучения выполняет металл-диэлектрик, термохромным слоем является $Al-VO_r$, а термочувствительным слоем служит VO_x. Это стало возможным на том основании, что при нагреве пленок VO_x до температуры фазового перехода полупроводник-металл (ФППМ) они скачкообразно, за 10-11 с, изменяют оптические и электрические характеристики. Для усиления изменения оптических свойств пленки VO_x изготавливаются на алюминиевом зеркале, при этом относительные изменения показателя преломления *n* при ФППМ для Al–VO_{*x*} составляет $\Delta n/n \ge 0,2$. Изменения величины удельного поверхностного сопротивления в пленках VO_r при ФППМ достигает двух порядков величины.

Существуют селективные и широкополосные поглотители терагерцевого излучения.

Селективный поглотитель представляет собой однослойную частотно-избирательную поверхность (ЧИП) емкостного типа, помещенную на слой диэлектрика, с толщиной меньше длины волны, с обратной металлизацией. На резонансной частоте при облучении поглотителя плоской электромагнитной волной имеет место эффект максимизации значения (удвоения) поверхностного электрического поля и зануление магнитного. Отсюда вытекает возможность достижения близкого к 100% поглощению падающей электромагнитной волны [7].

Работа широкополосных поглотителей основана на явлении поверхностного плазмонного резонанса, которое значительно расширяет возможность обнаружения регистрируемого излучения. Падающая электромагнитная волна воздействует на электрон проводимости металлической пленки, возбуждая в ней переменный ток, который порождает переменное электромагнитное поле. На границе между металлической пленкой и воздухом распространяется поверхностная волна и возникают условия плазмонного резонанса, при котором колебания электронов в проводящем слое поддерживаются внешним



Рис. 1. Коэффициент поглощения пленок Cr на слюдяных подложках в диапазоне частот 75–260 ГГц с величиной удельного поверхностного сопротивления 256 Ом

электромагнитным полем. При совпадении частоты внешнего поля с частотой локализованного поверхностного плазмона возникает резонанс, приводящий к резкому усилению поля на поверхности частицы и увеличению сечения поглощения [8]. В зависимости от задачи регистрации высокополосного или широкополосного сигнала используются селективные и неселективные поглотители.

Пленочные металлопоглотители ТГц-диапазона

Пленки хрома изготавливали методом термовакуумного напыления, контроль толщины пленок проводили резистивным методом, при котором каждой толщине соответствует определенная величина удельного поверхностного сопротивления. Калибровку резистивного метода проводили с помощью лазерного профилометра OLS 4000 Olimpus Lext. Для каждого металла фиксировали отрезок времени напыления, за который достигается определенная величина удельного поверхностного сопротивления, соответствующая толщине пленки 40 нм. Оценку толщины пленок менее 40 нм проводили путем сравнения времен табулированного и текущего времен напыления при заданной скорости испарения навески. С помощью метода векторного анализа электрических цепей проводилось измерение коэффициента поглощения пленочных слоев из хрома в миллиметровом диапазоне длин волн [9]. Установка состоит из векторного анализатора электрических цепей R&S ZVA-40 фирмы Rohde & Schwarz с измерительными каналами в диапазоне 75–260 ГГц, которые состоят из конверторов с соответствующими волноводно-лучеводными трактами.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов поглощения структуры нихром-слюда и хромслюда от частоты. Толщина пленки хром ~10 нм соответствует 256 Ом, при этом коэффициент поглощения в частотных диапазонах 100-117 ГГц и 205-223 ГГц находится на уровне 0,5.

Пленочные структуры Сг-слюда-Аl-VO_x и Сг-слюда-VO_x

Чтобы обеспечить способность указанных пленочных структур эффективно изменять свое состояние с изменением интенсивности радиоизлучения, отношение рабочих длин волн λ в диапазоне 2,99– 1,31 мм к толщине слюдяной подложки d должно удовлетворять соотношению $\lambda/d = 74-32$. Уменьшение d до 40 мкм обеспечивает уменьшение теплоемкости структуры и соответственно увеличение ее чувствительности и быстродействию.

Цветность, рав график <i>N</i>	ность, равноконтрастный график МКО [11]		Контраст		код по методу 3S [11]
до ФП	после ФП	яркостный цветовой		до ФП	после ФП
$U_0 = 0,158$ $V_0 = 0,296$	$\begin{array}{l} U_{\rm \varphi}=0,139\\ V_{\rm \varphi}=0,251 \end{array}$	2,8	9,7	Сине-зеленый	Синий

Таблица 1. Светотехнические параметры среды Al-VO_x

А. Оптические свойства АІ-VO_r

Экспериментально установлено, что стимулы, характеризующие цветовой тон, насыщенность цвета и яркость пленочной структуры Al-VO_r, имеют экстремальные значения в зависимости от толщины оксидного слоя на основе фазы VO₂. Технологический процесс изготовления двухстадийный: термовакуумным способом на диэлектрическую подложку напыляют слой Al, а на него наносят слой V толщиной d, затем производят окисление на воздухе при 480 °С структуры Al-V до формирования оксидного слоя ванадия толщиной 2d; в итоге формируется структура Al-VO $_x$ [10].

На рис. 2 приведена зависимость спектрального коэффициента отражения среды Al-VO_x с толщинами слоев 100-100 нм при температурах ФППМ [10].

В табл. 1 приведены данные цветового и яркостного контрастов и цветовые переходы среды



(1 — до и 2 — после ФППМ)

Al-VO_x (100-100) нм до и после $\Phi\Pi\Pi M$, рассчитанные по методу работы [11].

На рис. З приведена зависимость коэффициента контраста пленочной структуры Al-VO_r (100-100) нм на слюдяной подложке от температуры нагрева и на основании экспериментальных данных [12] приведены величины энергетической экспозиции, соответствующие определенной величине яркостного контраста. Технологический процесс обеспечивает изготовление пленочной структуры $Al-VO_x$ с заданной зависимостью яркостного контраста от температуры. На длинах волн 2,99-2,56 и 1,45-1,34 мм пленочные структуры Crслюда-Al-VO_x и Cr-слюда-VO_x обеспечивают поглощение 50% падающего на них излучения, причем 0,178 мВт/мм² плотности излучения вызывает нагрев структуры на 1 °С.

При этом 1-я, 2-я и 3-я градации яркости экрана радиовизора связаны с его нагревом до 58, 61 и 68 °С, при этом изменение коэффициента контраста экрана соответственно составляет 0,2, 0,4 и 0,6.



Рис. 2. Зависимость спектрального коэффициента от- Рис. 3. Зависимость яркостного контраста среды Al-VO_x ражения сред Al-VO_r с толщинами слоев 100-100 нм (100-100) нм от температуры, вызывающей 1-ю, 2-ю, 3-ю градации яркости изображения

Мощность потока непрерывного излучения, вызывающая указанные градации яркости экрана площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ относительно температур 58, 61 и 68 °C, соответственно составляет 6,2 мВт, 6,9 мВт, 8,1 мВт. Температура термостатирования 54 °C соответствует середине петли гистерезиса экрана радиовизора. Нагрев экрана относительно температуры термостатирования на 3,5, 7 и 13,5 °C вызывает 1-ю, 2-ю и 3-ю градации яркости изображения соответственно, при этом мощность потока излучения составляет 0,62 мВт, 1,24 мВт и 2,4 мВт. Структура Al–VO_x обладает одновременно

цветовым контрастом изображения (три градации цветности), что достаточно для цветового кодирования отражаемой информации, а угол обзора равен 130° [11].

Электрические свойства слоя VO_r

На рис. 4 приведена зависимость удельного поверхностного сопротивления термочувствительного слоя на основе пленки VO_x толщиной 60 нм от температуры [13].



Рис. 4. Зависимость удельного поверхностного сопротивления пленки VO_x толщиной 60 нм от температуры

В диапазонах температур (20–45) °С и (45– 69) °С прямую ветвь термического гистерезиса пленки VO_x можно представить с небольшой погрешностью в виде двух отрезков прямых AB и BC(кусочно-линейная аппроксимация характеристики) [14]. При этом величина температурного коэффициента сопротивления β , согласно [15], равна

$$\beta = \Delta R / R \cdot \Delta T,$$

где R — сопротивление пленки VO_x, ΔT — температурный диапазон. На участке AB $\beta_1 = 1,4$ %/°С, на участке BC $\beta_2 = 4$ %/°С, что обусловливает разную чувствительность приемника. При нагреве слоя VO_x в диапазоне (20–45) °С значение β_1 равно $\beta_1 = 1,4$ %/°С, а в диапазоне (45–69) °С величина β_2 составляет $\beta_2 = 4$ %/°С. В режиме термостатирования ($T_{\rm cr} = 45$ °С) реализуется режим внутренней памяти приемника. Технологический процесс изготовления обеспечивает формирование пленки VO_x с высокой воспроизводимостью зависимости удельного поверхностного сопротивления от температуры.

Эксплуатационные параметры структуры Cr-слюда-Al-VO_r

Экран радиовизора представляет собой слюдяную подложку, покрытую с облучаемой стороны поглощающим слоем из Cr или сплава нихрома, а с лицевой стороны — термохромным слоем на основе Al-VO_x. Толщина слюдяной подложки h (мкм) должна составлять не менее 40 мкм, при этом сохраняется достаточная жесткость подложки. Чтобы увеличить быстродействие радиовизора, поглощающий и термохромный слои выполняются в виде отдельных пикселей, которые заполняют площадь экрана. Поглощающий и термохромный пиксели расположены друг против друга по разные стороны диэлектрической подложки. Расстояние между пикселями на плоскости подложки равно размеру указанных пикселей, что исключает взаимное тепловое влияние пикселей друг на друга.

Быстродействие радиовизора зависит от эффективной теплоемкости структуры при заданной величине теплопотерь [15]:

$$C_{\mathrm{э}\phi\phi} = C_{\mathrm{Al-VO}_x} + C_{\mathrm{слюда}} + C_{\mathrm{Cr}}$$

Материал подложки пленочных слоев	Плотность γ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности k, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость с _р , Дж/кг·К	Коэффициент температуропроводности <i>А</i> , м ² /с
Слюда	$2,8\cdot 10^3$	0,238	879	$9,6 \cdot 10^{-6}$
Al	$2,7\cdot 10^3$	210	900	$8,6 \cdot 10^{-5}$
VO ₂	$4,3\cdot 10^3$	9,7	706	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Cr	$7,1 \cdot 10^{3}$	67	837	$1,12 \cdot 10^{-5}$
NiCr	$8,34\cdot 10^3$	15,3	418,6	$4,\!38\cdot10^{-6}$
Ni	$8,9 \cdot 10^{3}$	90,9	440	$2,32 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. Теплофизические коэффициенты структуры Cr-слюда-Al-VO_x

где $C_{\text{Al-VO}_x}$ — теплоемкость регистрирующих пикселей; $C_{\text{слюда}}$ — теплоемкость подложки; C_{Cr} — теплоемкость пикселя из хрома (Cr).

Теплоемкости слоев рассчитывались по формуле:

$$C = S \cdot h \cdot \rho \cdot C_{\rm VII}$$

где S — облучаемая площадь, м²; h — толщина слоя, м; ρ — плотность слоя, кг/м³; $C_{\rm yg}$ — удельная теплоемкость слоя, Дж/кг·К.

Постоянная времени устройств была рассчитана по методике работы [15]:

$$\tau = C_{\mathrm{s}\phi\phi}/\chi,$$

где $C_{\rm эф\phi}$ — теплоемкость единицы поверхности пленочной структуры; $\chi = \chi_0 + 4\varepsilon\sigma T^3$. Здесь χ — константа охлаждения, представляющая собой потери тепла с единицы поверхности структуры, χ_0 — потери тепла за счет теплопроводности, $4\varepsilon\sigma T^3$ — потери тепла за счет излучения; $\varepsilon = 0.5$ коэффициент излучения структуры, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ BT/(м²·K⁴) = 11,45 BT/(м²·K). В табл. 2 приведены теплофизические параметры пленочных слоев экрана радиовизора [16].

При размерах поглощающих и термочувствительных пикселей пленочной структуры $50 \times 50 \text{ мкm}^2$ и $100 \times 100 \text{ мкm}^2$ постоянная времени составляет $2,1\cdot10^{-8}$ с и $0,68\cdot10^{-5}$ с соответственно, при этом сохраняется слитность отображаемой информации, а разрешающая способность экрана от 10 мм⁻¹ до 5 мм⁻¹.

Пленочный поглотитель из Cr толщиной ${\sim}10$ нм, расположенный на слюдяной подложке

толщиной $4 \cdot 10^{-5}$ мкм, обеспечивает тепловой поток, под действием которого подложка и расположенный на ее обратной стороне термохромный слой из Al-VO_x с совокупной толщиной ~200 нм нагревается от 20 до 45 °C.

Источник теплоты можно считать поверхностным. Для оценки величины энергетической экспозиции в зависимости от длительности импульса излучения, вызывающей изменение цвета экрана радиовизора, использовали соотношение [17]:

$$T(z,t) = (2g \cdot \sqrt{at}/\lambda) \cdot \operatorname{ierfc}[z/2/\sqrt{at}],$$

где g — плотность потолка теплоты, Br/m^2 ; a — коэффициент температуропроводности, m^2/c ; t — время нагрева, c; λ — коэффициент теплопроводности, $Br/(M \cdot K)$; ierfc(x) — интегральная функция от функции ошибок Гаусса; z — толщина подложки, м.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные значения нагрева на 1 °С структур Сгслюда–Al–VO_x и Сг–слюда–VO_x на длинах волн 1,31–1,45 и 2,56–2,99 мм в зависимости от длительности импульса излучения. Так как подавляющий вклад в теплоемкость указанных структур вносит слюдяная подложка толщиной 40 мкм, их энергетическая чувствительность одинакова. Разница между расчетными и экспериментальными данными составляет ~20%, что вполне допустимо для диапазона миллиметрового излучения.

При размерах пикселей экрана радиовизора $50 \times 50 \text{ мкm}^2$ и $100 \times 100 \text{ мкm}^2$ поток излучения, вызывающий 1-ю, 2-ю и 3-ю градации яркости изображения каждого пикселя, составляет соответственно 16, 17,8, 20 мкВт и 64, 71, 80 мкВт. В диапа-

зонах длительности импульса излучения $(1-2,1) \times \times 10^{-8}$ с и $(1-8,59) \cdot 10^{-8}$ с для указанных пикселей экрана радиовизора энергия излучения, вызывающая 3-ю градацию яркости изображения, соответственно составляет $2 \cdot 10^{-5} - 2,9 \cdot 10^{-9}$ Дж и $8 \cdot 10^{-5} - 11,5 \cdot 10^{-9}$ Дж.

Эксплуатационные параметры структуры Cr-слюда-VO_x

Основными фундаментальными шумами теплового приемника являются джонсоновские шумы [15]:

$$U_T^2 = 4kTR = 1,88 \cdot 10^{-15} \text{ Bt},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж ·К⁻¹ — постоянная Больцмана; T = 22 °С — температура термочувствительного слоя; $R = 1,16 \cdot 10^5$ Ом — величина сопротивления термочувствительного слоя.

Схема измерения приемника осуществляет подключение каждого пикселя в мостовую схему, которая питается от источника стабилизированного постоянного тока напряжением 9 В. В исходном состоянии мост сбалансирован. Параметры мостовой схемы R_k — сопротивление компенсационного элемента: R_k = 1,16 · 10⁵ Ом; R_1 — сопротивление измеряемого пикселя при нагреве его на 1 °С, R_1 = = 1,14 · 10⁵ Ом; R_2 , R_4 — сопротивления подстроечных элементов, R_2 = R_4 = 9 · 10⁴ Ом; V_0 = 9 В.



Рис. 5. Нагрев экрана радиовизора на 1 °С в зависимости от длительности импульса излучения

При нагреве на 1 °С измерительного пикселя мост разбалансируется. Напряжение разбалансировки с вывода моста можно определить как [18]:

$$V_c = V_0 \left(\frac{R_k}{R_k + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = 0,045 \text{ B}.$$

Параметры вольтовой чувствительности, порог чувствительности и обнаружительную способность теплового приемника определяли согласно работе [19].

Вольтовая чувствительность приемника определяется согласно выражению

$$S_u = V_c/F$$
, B/Bt,

где $V_{\rm c}$ — напряжение разбаланса моста, V; F = 17,8 мВт/см² — мощность источника излучения, обеспечивающего нагрев слоя VO_x размером 1 × × 1 см² на 1 °C относительно комнатной температуры. Для длин волн регистрируемого излучения (2,99–2,56) и (1,44–1,34) мм, $S_u = 2,52$ В/Вт.

Пороговая чувствительность приемника на длинах волн (2,99–2,56) и (1,44–1,34) мм:

$$\Phi_{\pi} = \sqrt{U_T^2} / S_u =$$

= $\sqrt{1, 8 \cdot 10^{-15}} / 2,52 = 1,725 \cdot 10^{-8} \text{ Bt}.$

Удельная обнаружительная способность приемника определяется по формуле

$$D = rac{S_{
m np} \sqrt{\Delta f}}{\Phi_{
m n}} = 1,83 \cdot 10^8 \ {
m cm} \cdot {\Gamma \mu^{1/2} {
m Br}^{-1}},$$

где $S_{\rm np}$ — площадь приемника 1 см²; Δf — полоса пропускания 10 Гц; $\Phi_{\rm n}$ — пороговая чувствительность приемника, Вт.

Первый блок МК

Радиовизор с экраном на основе структуры металл-диэлектрик — термохромный слой обеспечивает высокую степень поглощения падающего излучения, а также обеспечивает изменение интенсивности цветовой окраски экрана радиовизора в зависимости от величины падающей мощности

излучения. Первый блок МК обеспечивает визуализацию поперечного сечения падающего излучения в соответствующем цвете в зависимости от мощности излучения.

В работе [20] разработано устройство визуализации инфракрасного и терагерцевого излучений, которое содержит плоский корпус с расположенной в нем опорной рамкой в виде двух диэлектрических колец. Корпус включает два окна для регистрации излучения и закреплен на держателе со стойкой. Между диэлектрическими кольцами размещен инфракрасный ТГц-конвертер, представляющий собой диэлектрическую подложку с нанесенной двухслойной пленочной структурой Al-VO_r, которую опоясывает с зазором пленочный нагреватель. На противоположной стороне диэлектрической подложки, под пленочной структурой Al-VO_x, расположена сетка из алюминия толщиной не более 100 нм с квадратными отверстиями. Длина стороны сетки прямо пропорциональна длине волны излучения, распространяющегося в диэлектрической подложке. На свободной части поверхности диэлектрической подложки расположен термодатчик. Технический результат заключается в расширении динамического диапазона устройства (при падении излучений со стороны слоя Al-VO_x — на длинах волн 0,3-3,5 мкм и 5,0-10,6 мкм, а со стороны сетки — на длинах волн 1140-1690 мкм и 9,0-14,5 мкм).

На рис. 6 показан продольный разрез разработанного радиовизора миллиметрового излучения (*a*) и общий вид конструкции устройства (*б*) [21]. Структура (металл-диэлектрик — термохромный слой) на слюдяной подложке 5 марки CT-1 размером $60 \times 60 \times 0,04$ мм была размещена внутри опорной рамки 4, состоящей из двух диэлектрических колец. Рамка 4 находится внутри плоского цилиндрического корпуса 1 с прозрачными для видимого и регистрируемого излучения окнами 3, выполненными из слюдяных подложек марки CT-1. Корпус совмещен со стойкой 9.

На рис. 7 представлены фотографии визуализации поперечного сечения магнетрона импульсного действия с рабочей длиной волны 2 мм в магнитоэкранированном исполнении с волноводным выводом излучения. Радиовизор помещался на расстоянии 2 см от выхода рупорного перехода магнетрона



Рис. 6. Конструкция устройства (а — поперечный разрез, б — общий вид): 1 — цилиндрический корпус, 2 — крышка, 3 — прозрачные окна, 4 — опорная рамка, 5 — слюдяная подложка, 6 — пленочный поглотитель, 7 — термохромный слой, 8 — держатель, 9 — стойка, 10 — массив пикселей

с рабочей длиной волны 2 мм. Время экспозиции составляло от 0,5 до 5 с.

Второй блок МК

Второй блок МК терагерцевого излучения включает: многоэлементный неохлаждаемый тепловой приемник, интерфейс измерительной системы с необходимым программным обеспечением и персональный компьютер.

Приемник снабжен двухкоординатным приводом, обеспечивающим формирование 2D-изображения объекта наблюдения. Интерфейс измерительной системы обеспечивает передачу полученных данных в память персонального компьютера.

Разработанный многоэлементный приемник, выполненный в малогабаритном металлостеклянном корпусе, описан в работах [22, 23]. Измерительные каналы приемника сделаны из поглощающих и термочувствительных пикселей, расположенных друг против друга по разные стороны диэлектрической подложки.



Рис. 7. Фотографии экрана визуализатора под воздействием излучения магнетрона с рабочей длиной волны 2 мм

При размерах поглощающего и термочувствительного пикселей $0,15\times0,15~\text{мm}^2$ постоянная времени приемника равна $1,93\times10^{-7}$ с.

Регистрация терагерцевого излучения также может производиться с помощью других приемников терагерцевого излучения, созданных на основе широкого спектра чувствительных материалов и структур, например неохлаждаемых многоканальных детекторов на основе HgCdTe [6].

Разработан интерфейс измерительной системы, который обеспечивает детальное исследование энергетических параметров пучка терагерцевого излучения. Интерфейс измерительной системы регистрирует излучение и передает данные в компьютер. Программа обработки измерительной информации обеспечивает преобразование числовых значений напряжений с измерительных каналов приемника в вертикальный рельеф значений столбцов по поверхности приемной площадки приемника и их цветовую кодировку.

Экспрессный контроль распределения плотности энергии (мощности) по сечению радиолуча включает следующие этапы [24]:

- интерфейс измерительной системы последовательно преобразует изменение сопротивлений измерительных каналов приемника в соответствующие значения напряжений и выводит их на экране монитора в виде столбцов разной высоты и чисел оцифровки;
- программа обработки информации обеспечивает цветовую кодировку каждого столбца на

экране монитора в соответствии с энергией (мощностью) излучения.

В итоге устройство визуализации и измерения миллиметрового излучения на экране монитора выводит измерительную информацию в виде 3D-профиля (вертикального рельефа столбцов разной высоты и окраски на плоскости приемной площадки приемника) с параллельной оцифровкой столбцов.

Измерительная информация на экране монитора отличается высокой яркостью и контрастностью цветопередачи изображения.

Заключение

В предлагаемом метрологическом комплексе используются два блока пассивного метода радиовидения. Экран радиовизора первого блока, лицевая сторона которого покрыта поглощающим слоем, а обратная — термохромным, реализует экспрессный визуальный контроль за распределением плотности мощности потока излучения по цветовой картине экрана (3 градации яркости и цветности изображения). При размерах экрана от 50×50 мм² до $90 \times 90 \text{ мм}^2$ он обладает равномерной зоной чувствительностью и может эксплуатироваться как в помещении, так и при высоком уровне внешней освещенности. Быстродействие и пространственное разрешение экрана зависит от размеров пикселей канала визуализации. Экран радиовизора, выполненный в виде описанных пикселей,

обладает рекордной чувствительностью и быстродействием, обеспечивающим экспрессный контроль объектов наблюдения. Во втором блоке метрологического комплекса используются многоэлементные тепловые приемники, обеспечивающие измерение распределения плотности мощности по сечению и потоку излучения. Устройство измерительной системы преобразует измерительную информацию в виде 3D-профиля графической цветовой и цифровой картины изображения на экране монитора. Число измерительных каналов в приемниках обеспечивает соответствующее разрешение, а скорость опроса каналов приемника определяет скорость ввода информации на экран монитора.

Список литературы

- Изюмов Д.Б., Кондратюк Е.Л. Зарубежный опыт использования терагерцевого частотного диапазона при соблюдении образцов вооружения, военной и специальной техники // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 1(22). С. 153–168.
- Быстров Р.П., Гуляев Ю.В., Гвоздев А.Е., Немцов А.В., Шеремет И.Б. Тенденции развития радиоэлектронных систем военного назначения. М.: Типография 3 ЦНИИ Минобороны РФ. 2012. 312 с.
- Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ВИНИТИ РАН, 2010, № 3–8.
- 4. Program controls for advanced research projects of the United States Department of defense (DARPA) for the period from 2000 to 2017 (for example, Defense Advanced research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2018 President's Budget Submission. February 2017).
- Ермолаев Д. М., Таланов А. А., Романюк В. А. Перспективы применения терагерцевых частот в космических системах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 46–52.
- 6. *Rogalski A*. Infrared and Terahertz Detectors. Third Edition. CRC Press, 2019. 1044 p.
- 7. Кузнецов С.А., Аржанников А.В. Электродинамическая оптимизация ультратонких резонансных по-

глотителей для болометрических детекторов субмиллиметрового диапазона // Вестн. Новосиб. гос. ун-та, 2015, т. 10, вып. 4. С. 5–20.

- 8. Лагарьков А.Н., Кисель В.Н. Метаматериалы: Фундаментальные исследования и перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология, 2018, № 1. С. 10–20.
- Хибель М. Основы векторного анализа цепей / Пер. с англ. С. М. Смольского; под ред. У. Филипп. М.: ИД МЭИ, 2009. 500 с.
- Патент № 2321035 Российской Федерации, МПК G02F01/00. Преобразователь изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра: № 2006124292/28: заявл. 06.07.2006: опубл. 27.03.2008 / А.С. Олейник. Бюлл. № 9.
- Олейник А.С. Отображение и запоминание оптической информации на пленках диоксида ванадия: монография / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратов, Саратовский гос. технический ун-т, 2006. 202 с.
- Олейник А. С., Медведев М.А., Еремин В.П. и др. Устройство визуализации инфракрасного и миллиметрового излучений // Российские нанотехнологии, 2018, т. 13, № 7–8. С. 66–74. ISSN 1992-7223.
- Патент № 2623573 Российской Федерации, МПК С23С14/24, С23С14/08, С23С14/58, Н01С17/10. Способ изготовления пленочного материала на основе смеси фаз VO_x, где x = 1,5-2,02: № 2016117223: заявл. 29.04.2016: опубл. 27.06.2017 / А.С. Олейник. Бюлл. № 18.
- Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособ. для техн. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.
- 15. *Марков М.Н.* Приемники инфракрасного излучения. М.: Наука, 1968. 168 с.
- 16. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- 17. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
- Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособ. / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
- 19. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные

устройства. Термины и определения. Введен Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 25 апреля 1983 года № 2043. Дата введения 01.07.84.

- Патент № 2638381 Российской Федерации, МПК G01J5/20. Устройство визуализации инфракрасного и терагерцевого излучения: № 2016129851: заявл. 20.07.2016: опубл. 13.12.2017 / А.С. Олейник, М.А. Медведев. Бюлл. № 35.
- Патент № 2687992 Российской Федерации, МПК G01J1/02, G01J3/02. Устройство визуализации инфракрасного и миллиметрового излучения: № 2018117856: заявл. 14.05.2018: опубл. 14.05.2019 / А.С. Олейник, М.А. Медведев,

В. П. Еремин, Н. А. Коплевацкий, В. П. Мещанов. Бюлл. № 14.

- 22. Олейник А.С., Потапов А.А. Селективный многоэлементный приемник миллиметрового излучения с резонансным метапоглотителем // Радиотехника, 2019, т. 83, № 8 (12). С. 54–59. ISSN 0033-8486.
- Патент № 2701187 Российской Федерации, МПК G01J3/20. Приемник терагерцевого излучения на основе пленки VO_x: № 2019107281: заявл. 14.03.2019: опубл. 25.09.2019 / А.С. Олейник, М.А. Медведев, В.П. Мещанов, Н.А. Коплевацкий. Бюлл. № 27.
- 24. Олейник А.С., Салихов Р.Н. Анализатор параметров непрерывного и импульсного лазерного излучения на основе пленки VO_x // Датчики и системы, 2018, № 1 (221). С. 52–56. ISSN 1992-7185.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 90–96

___ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ -

УДК 620.192.63 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.90.96

Анализ влияния внутренних дефектов на надежность танталовых конденсаторов

А. Н. Алыков, ncseo@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. Ю. Булаев, ncseo@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Т. Ю. Корбанкова, ncseo@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Я. Кулибаба, ncseo@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Входной контроль танталовых чип-конденсаторов у изготовителя радиоэлектронной аппаратуры затруднителен по причине того, что они поставляются в пластиковых транспортировочных лентах. Для обеспечения возможности обнаружения внутренних дефектов конденсаторов предлагается использовать рентгеноскопию. Данный метод позволяет провести внутренний визуальный контроль всех элементов в ленте, не нарушая целостность упаковки. В ходе исследовательской работы были установлены основные типы внутренних дефектов танталовых чип-конденсаторов. Для выявления связи между надежностью элементов и наличием дефектов были проведены дополнительные испытания, результаты которых подтвердили эффективность рентгеноскопии. Кроме того, некоторые типы дефектов невозможно выявить по отличающимся электрическим параметрам в данный момент, но вопрос, связанный с надежностью конденсаторов с такими дефектами и возможностью их применения в бортовой аппаратуре, остается открытым.

Ключевые слова: танталовые чип-конденсаторы, рентгеноскопия, внутренние дефекты, надежность, испытания

Impact Analysis of Internal Defects of Tantalum Capacitors on their Reliability

A. N. Alykov, contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. Yu. Bulaev, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

T. Yu. Korbankova, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Ya. Koulibaba, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Input control of tantalum chip capacitors is difficult for the electronic equipment manufacturer due to the fact that they are supplied in plastic transporting tapes. To detect internal defects of capacitors it is proposed to use X-ray radioscopy. This method allows performing an internal visual control of all elements in the tape without disturbing the integrity of the package. During the research, the main types of internal defects of tantalum chip capacitors were found. Additional tests were carried out to identify the link between the reliability of the elements and the presence of defects, the results of which confirmed the effectiveness of X-ray radioscopy. In addition, some types of defects cannot be detected by different electrical parameters at the present moment, but the issue of the reliability of capacitors with such defects and the possibility of their application in on-board equipment remains open.

Keywords: tantalum chip capacitors, X-ray radioscopy, internal defects, reliability, testing

Введение

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) широко применяются танталовые чип-конденсаторы. Учитывая высокие требования к надежности бортовой аппаратуры (БА) ракетно-космической техники, большое количество применяемых конденсаторов в составе приборов, а также риск поставки контрафактной продукции, до этапа монтажа следует проводить входной контроль данных изделий. Однако проведение сплошного (для 100% изделий) входного контроля танталовых чип-конденсаторов затруднено, так как данные элементы поставляются в пластиковых транспортировочных лентах для автоматизированного монтажа. Испытания в таком случае могут проводиться на выборке, что снижает достоверность результатов, так как отдельные конденсаторы могут содержать внутренние дефекты. Более того, основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать вывод, что не все внутренние дефекты, влияющие на надежность элемента, можно обнаружить путем контроля электрических параметров.

Для решения этой проблемы предлагается использовать рентгеноскопию. Данный метод позволяет провести внутренний визуальный контроль всех элементов в ленте, не нарушая целостности упаковки.

Главная цель данной работы — повышение качества отбраковки танталовых чип-конденсаторов, используемых в БА. Для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи по исследованию танталовых чип-конденсаторов: формирование выборки конденсаторов с различными дефектами, разработка программы и проведение испытаний, обработка результатов. Практической ценностью проведенных исследований является подтверждение возможности использования рентгеноскопии при испытаниях конденсаторов на надежность.

В НЦ СЭО АО «Российские космические системы» было проведено экспериментальное исследование танталовых конденсаторов с использованием рентгеноскопии.

Все обнаруженные внутренние особенности танталовых чип-конденсаторов были разделены на группы:

- повреждения анодного тела (сколы, трещины);
- неоднородности в материалах внешних выводов;
- брызги сварки;
- деформация внутренних элементов;
- некачественная сварка анода с внешним выводом (утонение, разрыв);
- посторонние частицы вблизи анодного тела.

Примеры обнаруженных внутренних особенностей представлены на рис. 1, a — конденсатор со сколом на анодном теле, на рис. 1, б — конденсатор с деформированными внутренними элементами (изгиб внутреннего вывода анода).

Однако по причине отсутствия актуальной нормативно-технической базы по данному направлению сложно судить о том, являются ли выявленные особенности дефектами, и об их количественном влиянии на надежность конденсаторов.



Рис. 1. Примеры обнаруженных внутренних особенностей танталовых чип-конденсаторов

Поэтому в НЦ СЭО были инициативно проведены дополнительные испытания танталовых чип-конденсаторов с внутренними особенностями (потенциальными дефектами), обнаруженными при помощи рентгеноскопии.

Программа дополнительных испытаний

В большинстве случаев причиной забракования конденсаторов является отклонение информативных параметров (ток утечки, эквивалентное последовательное сопротивление, емкость) от номинальных значений в результате воздействия влажности, напряжения, температуры и т.п. Поэтому для выявления зависимости дрейфа электрических параметров (по которой можно косвенно судить о показателях надежности) от типов обнаруженных дефектов были проведены испытания, типичные для зарубежных и отечественных испытательных центров. Основываясь на научно-техническом заделе и статистике результатов отбраковки, в НЦ СЭО была сформирована программа испытаний (табл. 1).

После каждого вида воздействия проводился контроль внешнего вида и дрейфа электрических параметров, таких как ток утечки, емкость, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), тангенс угла диэлектрических потерь.

Одним из эффективных испытаний конденсаторов являются испытания на воздействие импульсным током. Импульсный заряд-разряд позволяет выявить дефекты, проявляющиеся при переходных процессах (включение/выключение цепей питания). Протекание импульсного тока может активировать дефекты в приграничных слоях диэлектрика, а также при достаточно большом токе препятствовать процессу самовосстановления [1]. Кроме того, условия применения танталовых конденсаторов в РЭА могут быть более жесткими, чем при проведении испытаний на производстве с учетом наличия в испытательных стендах токоограничивающих резисторов и индуктивности проводов [2]. Например, конденсатор с емкостью 15 мкФ, номинальным напряжением U ном = 10 В и эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) $R = 0.5 \, \text{Ом}$ для обеспечения двойного запаса по напряжению применяют в цепи с напряжением Uреал = 5 В. Соответственно ток заряда конденсатора может достигать Iреал = Uреал/R = 5/0,5 == 10 А. При тестировании конденсаторов на производстве при номинальном напряжении используется, как правило, токоограничивающее сопротивление *R*огр = 1 Ом и максимальный ток заряда конденсатора в таком случае не превышаet Itect = UHOM/(R orp + R) = 10/(1 + 0.5) = = 6,7 А [3]. Кроме того, согласно документации на отечественные конденсаторы необходимо ограничивать ток заряда до 1 А для любых конденсаторов вне зависимости от его характеристик и условий применения. Таким образом, ток заряда в реальном устройстве может в разы превышать значение тока при тестировании. В этом случае дефекты,

Порядок проведения	Тип испытания	Условия проведения
1	Термоциклирование	100 термоциклов от минимальной до максимальной температуры хранения
2	Испытания на воздействие повы- шенной влажности	1 сутки при относительной влажности 85%, темпера- туре 85 °C
3	Испытания на вибропрочность	С ускорением до 20 g на частотах 20-2000 Гц по 4 часа в двух плоскостях
4	Заряд-разряд импульсным током	5 циклов с номинальным напряжением
5	Термоциклирование	250 термоциклов от минимальной до максимальной температуры хранения
6	Испытания на безотказность	14 суток при номинальном напряжении и максималь- ной рабочей температуре

Таблица 1. Программа испытаний

проявляющиеся при больших токах, не будут выявлены при тестировании, но могут привести к выходу конденсатора из строя в приборе. Таким образом, для более детального исследования необходима коррекция общепринятых методик тестирования в части приближения токоограничивающего резистора к реальным значениям в аппаратуре.

Более того, дефекты, влияющие на ESR и импульсный заряд конденсатора, могут остаться незамеченными при испытаниях на частоте, приведенной в спецификации. Для решения данной проблемы и приближения условий тестирования к эксплуатационным предлагается отслеживать динамический ток заряда [4]. Данный метод позволяет отбраковать конденсаторы, максимальный ток заряда которых не достигает необходимого значения, а также конденсаторы, сохраняющие большой ток утечки после заряда (рис. 2).



Рис. 2. Осциллограмма тока импульсного заряда конденсатора

В ходе испытаний в качестве возможного информативного параметра также рассматривались обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рис. 3). При прикладывании обратного напряжения на ВАХ можно заметить форму нелинейности и напряжение, при котором ток утечки резко увеличивается. Например, при испытаниях партии конденсаторов напряжение пробоя одного конденсатора значительно ниже, чем у остальных (для численного определения можно использовать правило « 3δ »); основываясь на том, что партия должна быть однородной, такой конденсатор можно отнести к потенциально ненадежным. Кроме этого, по разбросу ВАХ конденсаторов из одной выборки можно судить о качестве изготовления всей партии. Большой разброс может свидетельствовать о низкой технологичности процесса, о плохом качестве используемого сырья, о низкой культуре производства. На представленном на рис. З семействе обратных ВАХ для группы конденсаторов из одной партии отсутствуют кривые, значительно отличающиеся от других, разброс незначителен, из чего можно сделать вывод об однородности партии.

Результаты испытаний

По итогам проведенных испытаний были получены следующие результаты.

1. Конденсатор с некачественной сваркой вывода анода с внешним выводом (разрыв с правой стороны и сильное утонение с левой стороны (рис. 4, *a*)) отказал из-за увеличения эквивалентного последовательного сопротивления.

На рис. 5 представлена диаграмма дрейфа ESR: из каждой группы конденсаторов с определенным типом дефекта был выбран элемент с наибольшим ESR в выборке. В ходе испытаний конденсатор с разрывом сварки внешнего вывода отказал с превышением границы по ESR (0,9 Ом). Необходимо отметить, что до испытаний значение ESR было в пределах границ отбраковки.

2. Конденсаторы с посторонними частицами в компаунде вблизи танталового тела в среднем отказывали раньше остальных при испытаниях на безотказность (табл. 2).

3. Дефекты, связанные с некачественной сваркой (разрыв или утонение только с одной стороны (рис. 4, б)), брызгами сварки и неоднородностями, на внешних выводах не показали влияния на деградацию электрических параметров конденсатора.

4. Одна из партий конденсаторов отличалась большим количеством элементов с дефектами. В ходе испытаний на безотказность почти все конденсаторы данной партии, в отличие от других, отказали с образованием «короткого замыкания». Можно предположить, что данная партия не соответствовала характеристикам, указанным в документации на данный тип ЭРИ, а наличие большого количества внутренних дефектов свидетельствует о нарушении технологий производства.



Рис. 3. Обратный ток утечки конденсатора



Рис. 4. Конденсатор с некачественной сваркой вывода анода с внешним выводом: *a*) разрыв с правой стороны и сильное утонение с левой стороны; *б*) разрыв с левой стороны



Тип выборки	Кол-во конденсаторов в выборке, шт.	Кол-во отказавших конденсаторов, шт.
Повреждение анодного тела (сколы, трещины)	6	1
Деформация внутренних элементов (изгибы выводов, искаженная ориентация)	6	1
Посторонние частицы вблизи анодного тела	11	5
Неоднородности в материалах внешних выводов	2	0
Брызги сварки	12	1
Некачественная сварка анода к внешнему выводу (утонение)	7	0
Отсутствие сварки анода к внешнему выводу (разрыв)	1	1
Без дефектов	17	1

Таблица 2. Выборки конденсаторов по типам дефектов для испытаний на безотказность

Дефекты типа «повреждения анодного тела» и «деформация внутренних элементов» требуют более детального исследования. В дальнейшем планируется провести второй этап и добавить в программу испытания на удар и безотказность в динамическом режиме.

По полученным результатам дрейфа электрических параметров (ток утечки) был проведен дисперсионный анализ [5]. Гипотеза о равенстве средних значений токов утечки групп конденсаторов с различными дефектами была отклонена, т.е. влияние исследуемых дефектов конденсаторов на информативный параметр (ток утечки) статистически различно. Был использован метод линейных контрастов, который позволяет сравнить влияние каждого типа дефекта на информативный параметр. Для всех партий проверялись гипотезы равенства математического ожидания значений токов утечки конденсаторов без дефектов и конденсаторов с каждым видом дефекта. Результаты рассчитанных и критических (табличных) выборочных значений статистики представлены в табл. 3.

По полученным данным можно сделать вывод, что статистически различны средние значения токов утечки конденсаторов с дефектом «посторонние частицы» и бездефектных конденсаторов. Иначе говоря, конденсаторы с дефектом «посторонние частицы» значительно отличаются по информативному параметру «ток утечки» от бездефектных. Учитывая количество отказавших конденсаторов с данным типом дефекта при испытаниях на безотказность, а также повышенные токи утечки,

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа

№ пар-	Проверяемый дефект	Выборочное значение статистики	
тии		рассчи-	крити-
1	Посторонние частицы вблизи анодного тела	танное 2,1645	ческое
	Некачественная сварка	0,0246	,
	Брызги сварки	0,5220	
	Отсутствие сварки к внешним выводам	0,0426	
2	Неоднородности в материалах	0,5822	1,415
	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,9578	
3	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,5191	1,440
	Повреждение анодного тела	0,9627	
4	Деформация внутренних эле- ментов	0,1494	1,372
	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,3820	

можно резюмировать, что дефект «посторонние частицы» значительно влияет на надежность танталовых конденсаторов.

В рамках данной работы проводились испытания на безотказность с расчетом среднего срока службы по методике, основанной на прогнозировании отказа по результатам деградации информативных параметров.

Тип выборки	ESR до БО, Ом	ESR после БО, Ом	Верхняя граница ESR, Ом	Срок службы, ч	Срок службы, лет
Повреждения анодного тела	0,033	0,056		105 346	12,0
Деформация внутренних элементов	0,046	0,072		89 890	10,3
Посторонние частицы вблизи анод- ного тела	0,028	0,113	0,4	28 894	3,3
Бездефектные конденсаторы	0,039	0,040		2 383 345	272,1

Таблица 4. Результаты расчета срока службы

Расчет проводился по формуле $T = K_y \times \frac{(\Pi_{\text{кр.max}} - \Pi_{\text{до}}) \cdot T_{\text{БО}}}{\Pi_{\text{после}} - \Pi_{\text{до}}}$, где $K_y = 19,649$ — коэффициент ускорения для конденсаторов данного типа, $\Pi_{\text{кр.max}}$ — верхняя граница ESR, $T_{\text{БО}}$ — длительность испытаний в часах, $\Pi_{\text{до}}$ и $\Pi_{\text{после}}$ — значения информативного параметра до и после испытаний на безотказность.

В данном случае расчет проводился для одной партии конденсаторов после испытаний на безотказность (2 недели при максимальном напряжении и максимальной температуре) по информативному параметру «ESR» (верхняя граница 0,4 Ом при 100 кГц). Полученные результаты представлены в табл. 4.

Полученные результаты подтверждают критичность обнаруженных на рентгеноскопии внутренних дефектов танталовых чип-конденсаторов. Однако ввиду малого объема выборки и ограниченного времени испытаний полученные результаты нельзя применять для долгосрочного прогноза. Поэтому для уточнения показателей надежности планируется провести второй этап испытаний с увеличением количества испытуемых элементов и времени испытаний.

Выводы

Надежность танталовых чип-конденсаторов, используемых в космическом приборостроении, имеет достаточно сильное влияние на надежность бортовой аппаратуры в целом. В данной статье было показано влияние обнаруженных на рентгеноскопии дефектов на дрейф информативных параметров и, следовательно, на надежность конденсаторов. Были продемонстрированы отказы конденсаторов, отбракованных на рентгеноскопии, при различных внешних воздействиях. Кроме того, было доказано, что наличие большого количества внутренних дефектов может быть признаком контрафактной продукции. Следовательно, для повышения достоверности отбраковки потенциально ненадежных элементов предлагается проводить дополнительные испытания, в состав которых, кроме того, будут включены сплошная рентгеноскопия и испытания на импульсный заряд-разряд.

Список литературы

- Fritzler T., Azarian M.H., Pecht M.G. Scintillation Conditioning of Tantalum Capacitors With Manganese Dioxide Cathodes, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 01/2014; 14(2):630-638. https://ieeexplore.ieee.org/document/6782440 (Дата обращения 31.01.2020).
- Горбачев И.П., Сашов А.А. Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры // Ракетнокосмическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 94–101.
- Teverovsky A. Degradation of Leakage Currents and Reliability Prediction for Tantalum Capacitors / Annual Reliability and Maintainability Symposium Proceedings, 2016. 6 p. https://nepp.nasa.gov/files/28093/NEPP-CP-2016-Teverovsky-Paper-RAMS-TN26842.pdf (Дата обращения 31.01.2020).
- Zednicek T. Voltage Derating Rules for Solid Tantalum and Niobium Capacitors / Gill J. AVX technical paper, AVX ltd, Tantalum divisionpaigton, 2003. 8 p. https://www.avx.com/docs/techinfo/Tantalum-NiobiumCapacitors/voltaged.pdf (Дата обращения 31.01.2020).
- 5. Зарубин В.С., Крищенко А.П. Математическая статистика. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 421 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 97–99

____ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.382.8 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.97.99

О проблеме производства отечественных микросхем космического применения

Н.С.Данилин, д. т. н., профессор, danilin_ns@spacecorp.ru AO «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. М. Димитров, *д. т. н., профессор, ilias@coscom.ru* ООО «Космос Комплект», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема производства отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре и возможные пути решения этой проблемы.

Отмечается, что разработанный отечественными производителями «минимально необходимый и достаточный» набор микросхем для разработки космической аппаратуры пока не позволяет создавать инновационные по мировым понятиям изделия в этой области.

Для решения проблемы представляется целесообразным использование технологии «Система в корпусе», которая включает широкий набор ЭКБ — от однокристальной микросхемы до многокристальных модулей с интеграцией дискретных, фотонных и пассивных компонентов и др.

К настоящему времени компания «Космос Комплект» разработала более 30 типов кристаллов, которые отвечают самым жестким требованиям космической промышленности.

Ключевые слова: микроэлектроника, микросхема, космическая аппаратура, система в корпусе

Production of High-Quality Russian Microcircuits for Space Equipment

N. S. Danilin, Dr. Sci. (Engineering), Prof., danilin_ns@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. M. Dimitrov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., ilias@coscom.ru Limited Liability Company "Cosmos Complect", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of production of Russian microcircuits for use in space equipment and its possible solutions.

It is noted that the "minimal necessary and sufficient" chipset developed by Russian manufacturers for the development of space equipment does not yet allow the creation of innovative products in this field that would satisfy the international standards.

To solve the problem, it seems appropriate to use the "System in a package" technology, which includes a wide range of electronic components — from a single-chip microcircuit to multi-chip modules with the integration of discrete, photonic and passive components, etc.

To date, the company "Cosmos Complect" has developed more than 30 types of crystals that meet the most stringent requirements of the space industry.

Keywords: microelectronics, microcircuit, space equipment, system in package

Введение

Проблемы качества и долговечности электронной компонентной базы (ЭКБ), предназначенной для применения в космической индустрии, были в центре внимания научной и инженерной общественности постоянно. Эти проблемы активно решались в соответствии с динамикой технологического развития космического приборостроения.

Актуальность проблемы надежности ЭКБ резко возрастает в связи с развитием новой космической индустрии серийного массового производства малых космических аппаратов на основе стандартных модулей. При этом крайне важным является решение вопросов гарантирования надежности и долговечности малых спутников путем термального проектирования ввиду высокой плотности компоновки систем.

Надо отметить, что в американском космическом агентстве NASA структура обеспечения качества и надежности ЭКБ сыграла решающую роль в функционировании запущенных зондов «Вояджер», которые исправно функционируют уже в течение 30 лет и до сих пор передают сигналы на Землю.

«Белые пятна» в отечественной ЭКБ и перспективы их устранения

Рассмотрим наиболее актуальную проблему обеспечения надежности космических аппаратов, в первую очередь обеспечение надежности ЭКБ.

Прежде всего необходимо определить, что такое «белые пятна» в отечественной ЭКБ для космического применения. Это те микросхемы и электронные модули, которые нужны разработчикам аппаратуры, но которые нельзя найти у отечественных производителей. Выбор какого-то типономинала ЭКБ определяется требованиями к его техническим и надежностным параметрам, срокам поставки и периоду применения.

Известно, что разработчики ведущих мировых производителей космической и специальной аппаратуры пользуются широким набором типономиналов ЭКБ — около 5000.

Разработанный отечественными производителями «минимально необходимый и достаточный» набор микросхем для разработки космической аппаратуры пока не позволяет создавать инновационные по мировым понятиям изделия в этой области.

Причин для такого состояния дел несколько:

высокая стоимость опытно-конструкторских работ;

 длительные сроки проведения опытно-конструкторских работ и процесса внедрения результатов в производство;

 высокая себестоимость изделий ввиду малой востребованной серийности и нерегулярности закупочных запросов.

Технология «система в корпусе» и ее эффективность

Система в корпусе (СвК) включает широкий набор ЭКБ — от однокристальной микросхемы до многокристальных модулей с интеграцией дискретных, фотонных и пассивных компонентов, МЭМС и др. СвК собрана в одном стандартном или специализированном микроэлектронном корпусе и представляет собой законченное изделие [1–3].

Для практической реализации этой технологии необходимо только организовать банк полупроводниковых кристаллов и иметь доступ к участку сборки интегральных схем. Банк кристаллов предполагает наличие шкафов хранения кристаллов в азотной контролируемой среде (срок хранения до 20 лет), которые расположены в климатизированном помещении с чистотой среды 10000.

Для получения инженерного образца любой микросхемы потребуется опытно-конструкторская разработка в течение 1–3 месяца с участием схемотехника, технолога и конструктора. После проведения испытаний можно начинать сборку требуемого количества изделий. Весь вопрос в наличии подходящего кристалла, поскольку стандартный отечественный корпус почти всегда в наличии.

Накопление кристаллов в банке — процесс постоянный и целенаправленный. Это не разовое мероприятие, а объект специализированной деятельности по всему отечественному и мировому рынку. К примеру, компания «Космос Комплект» после организации своего банка кристаллов в 2015 г. за 5 лет работы накопила более 30 типов кристаллов с различным размером партии от 150 до 5000 шт., в том числе CO3У, MRAM, Flash, операционные усилители, контроллеры, микропроцессоры и др., которые отвечают самым жестким требованиям космической промышленности. Компания уже собрала на базе своего банка кристаллов и предлагает на отечественном рынке 8-канальный датчик тока с выходом по напряжению, 16M CO3У и 16M MRAM.

Имея кристаллы и налаженный процесс сборки в течение нескольких месяцев, возможно удовлетворить запрос разработчика аппаратуры на заказанную микросхему.

Технология СвК — самый эффективный на сегодня со всех точек зрения подход к реализации инновационной стратегии «системная микроминиатюризация» при разработке аппаратуры космического назначения. Ведь в одном корпусе можно собрать целые узлы и даже устройства с редуцированными габаритами, весом, энергопотреблением и одновременно с этим — со значительно увеличенной функциональностью на единицу конструктивного объема [4]. Следует также иметь в виду, что по оценкам экспертов в ближайшие годы суммарная потребность в электронных компонентах различного назначения может достигнуть сотен тысяч — миллионов комплектов ЭКБ ежегодно [5].

Выводы

На основании вышесказанного можно сделать несколько выводов:

– воспроизводить микросхемы, которые продаются на мировом рынке и которые востребованные в малом количестве и при большом числе типономиналов дорого и долго, а следовательно, и весьма нецелесообразно. При таком подходе блокируются большие отечественные ресурсы по проектированию и производству, что приводит к гарантированному отставанию и выпуску морально устаревших изделий. Целесообразно разрабатывать только новые для рынка изделия;

 нужно срочно определить структуры, которые целенаправленно и постоянно собирают кристаллы по всем отечественным и мировым рынкам и сохраняют в соответствующих банках. Заказы на кристаллы формируются исходя из текущих потребностей, установленными перспективными перечнями и потребностями перспективных исследований;

 к структурам, которые связаны с содержанием банков кристаллов, необходимо сформировать группы для разработки инженерных образцов по технологии СвК с последующей передачей в сборочное производство;

– при выполнении указанных рекомендаций получаем несколько эффектов: длительность цикла «проектирование-производство» партии микросхем от 6 до 12 мес, снижение себестоимости продукции в несколько раз, возможность начать производство новой партии микросхем в течении нескольких дней после заявки, возможность избежать неблагоприятного стечения обстоятельств на мировом рынке и др.;

 применение банков с кристаллами и технологию СвК нужно немедленно вводить в практику отечественной микроэлектроники, что обеспечит высокую экономическую эффективность воспроизведения стандартных для рынка микросхем и возможность реализации инновационных решений.

Список литературы

- Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Инновационные космические микросистемы в корпусе. М.: ИД «Спектр», 2011. 70 с.
- 2. Данилин Н.С. Системная микроминиатюризация и малые спутники. М.: ИД «Спектр», 2013. 54 с.
- Данилин Н. С., Димитров Д. М., Димитров М. Д., Сабиров И. Х. Практическая методология разработки систем в корпусе. М.: ИД «Спектр», 2019. 110 с.
- 4. Шведов С.В., Гришков В.Н. Проектирование аналогово-цифровых компонентов для «систем в корпусе» // Проблемы разработки перспективных микрои наноэлектронных систем (мэс), 2010, № 1. С. 503– 506.
- Немудров В., Борисов К., Завалин Ю., Корнеев И., Малышев И., Шиллер В. Системы на кристалле и системы в корпусе новые возможности для военной техники // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2014, № 1. С. 144–150.

Scientific and technical journal

ROCKET-SPACE DEVICE ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Vol. 7. No. 2. 2020

Founder:

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

Advisory Council

Chair

Chain, Tyulin A.E., Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Deputy Chairmen: Erokhin G.A., Cand. Sci. (Eng.), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow,

Russian Federation

Russian Federation Romanov A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, International Academy of Astronautics, Moscow, Russian Federation Nesterov E.A., Cand. Sci. (Econ.), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Members of the Advisory Council:

Artemyev V.Yu., Joint Stock Company "Scientific and Production Association of Measurement Equipment", Moscow, Russian Federation Akhmedov D.Sh., Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, SLLP "Institute of Space Systems and Technologies", Almaty, Republic

of Kazakhstan Baturin Yu.M., Doctor of Law, Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of Russian Academy of Sciences, Moscow,

Russian Federation Blinov A.V., Cand. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Federation Gabitov I.R., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., University of Arizona, the USA Zhantayev Zh.Sh., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Academician of Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, Joint-Stock Company "National Center of Space Research and Technology", Almaty, Republic of Kazakhstan

of Kazakhstan Zhmur V.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zhmur V.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow,

Or hazakristan
Or hazakristan
Zhmur VV., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation
Kolarchevsky N.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Kuleshov A.P., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, Russian Academy of Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation
Nosenko Yu.I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company "Research Institute of Precision Instruments", Moscow, Russian Federation
Perminov A.N., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Member of International Academy of Astronautics, Russian Engineering Academy, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
Pobedonostsev V.A., Dr. Sci. (Eng.), branch of Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation"—Institute of Space Device Engineering", Moscow, Russian Federation
Stupak G.G., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
Chebotarev A.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Stock Company "Special research bureau of Moscow power engineering institute", Moscow, Russian Federation
Chebytrikin A.N., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
Chebytkin A.N., branch of Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation"—"Institute of Space Device Engineering". Moscow, Russian Federation
Chetyrkin A.N., branch of Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation"—"Institute of Space Device Engineering". Moscow, Russian Federation

The publication frequency is four issues per year. The journal is included into the Russian Science Citation Index. The journal is included into the List of peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK RF). The opinions expressed by authors of the papers do not necessarily those of the editors. ISSN 2409-0239 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2 The subscription number of the journal in the united catalogue

The Russian Press" is 94086.

Editorial Board

Editor-in-Chief

Romanov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, International Academy of Astronautics, Moscow, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief. Fedolov S A., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Members of the Editorial Board:

Alekseyev O.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow,

Russian Federation Alybin V.G., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Russian Federation Belokonov I.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Samara National Research University, Samara, Russian Federation Betanov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Bugaev A.S., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Academician, Russian Academy of Sciences, Kotel nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russian Federation Vasilkov A.P., Ph. Doctor in Physics and Mathematics, Science Systems and Applications Inc., Maryland, the USA Vatutin V.M., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Danilin N.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian and International Engineering

Prostain ForceTaulon, (Eng.), Prof., Academician of Russian and International Engineering Academies, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Dortkin V.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow,

Russian Federation Zhodzishsky A.I., Dr. Sci. (Eng.), Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Zhukov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow,

Russian Federation Kolachevsky N.N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian

of Sciences, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation Federation Kukushkin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Corresponding Member of Russian Engineering Academy, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Mikhaylov V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow Aviation Institution, Moscow, Russian Federation Novikov D.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russian Federation Petrukovich A.A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation Povalyayev A.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Sederation

Russian Federation

Pullnets S.A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Russian Federation Rainer Sandau, Dr. Sci. (Eng.), Adjunct Professor, International Academy of Astronautics, Berlin,

Rainer Sandau, Dr. Sci. (Eng.), Adjunct Professor, International Academy of Astronautics, Johnn, Germany Rimskaya O.N., Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Strelnikov S.V., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company "Scientific Production Association Orion", Krasnoznamensk, Russian Federation Sychev A.P., Cand. Sci. (Eng.), Joint Stock Company "Research Institute of Precision Instruments", Moscow, Russian Federation Tislenko V.I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation Tokarev A.S. (Executive Secretary), Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation Tuzikov A.V., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Belarus, The State Scientific Institution "The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, Republic of Belarus

Joint Stock Company "Russian Space Systems", ul. Aviamotornaya 53, Moscow, 111250 Russia Tel. +7 (495) 673-96-29 www.spacedevice.ru e-mail: journal@spacecorp.ru

© Joint Stock Company "Russian Space Systems" © FIZMATI II



Moscow FIZMATLIT[®] 2020

