ISSN 2618-7957

КА «Гонец-М1» Разработчик и производитель: АО «РЕШЕТНЁВ»



Технологическая платформа



№1 (47) 2024



Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: tp.iss-reshetnev.ru



ІІ ОТРАСЛЕВАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОЗВЕЗДИЕ РОСКОСМОСА: ТРАЕКТОРИЯ НАУКИ»

В 2023 году Госкорпорация «Роскосмос» провела вторую отраслевую научно-практическую конференцию «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» в г. Красноярске. Участников конференции принял Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева – один из лидирующих университетов в научно-образовательной сфере ракетно-космической отрасли, входящий в число опорных университетов Госкорпорации «Роскосмос».

Конференция начала свою работу 4 октября. Именно в этот день в 1957 году СССР был запущен первый искусственный спутник Земли.

Основными задачами прошедшей конференции стали:

• Обсуждение механизмов координации деятельности организаций Госкорпорации «Роскосмос» и опорных образовательных организаций высшего образования Госкорпорации «Роскосмос» при решении актуальных задач при выполнении научных, инновационных и образовательных проектов, а также формировании инженерных команд (проектных групп).

• Определение перспективных наукоемких проектов в области создания технологий гражданского и двойного назначения. Привлечение организаций высшего образования, научных и инновационных организаций к решению перспективных задач и реализации перспективных проектов для формирования опережающего научно-технического задела организаций ракетно-космической промышленности.

• Обсуждение направлений деятельности в области диверсификации, импортозамещения и импортонезависимости в ракетно-космической отрасли.

В ходе конференции обсуждались проблемные вопросы и актуальные задачи по следующим направлениям:

• Комплексные геоинформационные и телекоммуникационные сервисы на основе перспективных космических систем.

• Автоматические космические аппараты и космические системы.

• Передовые производственные технологии поточного производства космических аппаратов и космическое приборостроение.

• Перспективные материалы, конструкции и технологии для ракетно-космической техники.

• Интеллектуальные робототехнические системы и комплексы космического назначения. Технологии и комплексы промышленной робототехники в интересах ракетно-космической промышленности.

• Единая цифровая среда для проектирования и производства ракетно-космической техники.

• Управление развитием персонала и подготовка инженерных кадров для опережающего развития ракетно-космической отрасли.

• Созвездия малых космических аппаратов – перспективные технологические и научные миссии. Пути развития технологии «CubeSat».

В рамках конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» было проведено более 10 мероприятий, в числе которых пленарное заседание, секции по восьми научно-техническим направлениям, круглый стол по теме «Создание опережающего научно-технического задела в организациях Госкорпорации «Роскосмос».

В конференции участвовали руководители, генеральные конструкторы и ведущие специалисты Госкорпорации «Роскосмос» и её организаций: АО «ЦНИИмаш», АО «РЕШЕТНЁВ», ПАО «РКК «Энергия», АО «КОМПОЗИТ», АО «Российские космические системы», АО «ОКБ «Факел», АО «НПО Энергомаш», АО «ГНЦ «Центр Келдыша», АО «СС «Гонец» и другие, а также представители университетов, вошедших в состав космического научно-образовательного инновационного консорциума «Созвездие Роскосмоса»: МГУ им. М. В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, МФТИ, СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, ТУСУР, ГУАП, ВГТУ и ряда других.

Пленарные доклады были представлены директором департамента перспективных программ и проекта «Сфера» Госкорпорации «Роскосмос» С. Ю. Прохоровым, генеральным конструктором по автоматическим космическим системам и комплексам – заместителем генерального директора АО «ЦНИИмаш» В. В. Хартовым, генеральным директором АО «РЕШЕТНЁВ» Е. А. Нестеровым, директором административного департамента Госкорпорации «Роскосмос» Д.А. Шишкиным, ректором МАИ М.А. Погосяном, ректором МГТУ им. Н.Э. Баумана М. В. Гординым, заместителем генерального директора, главным конструктором АО «Корпорация «ВНИИЭМ» В.Я. Гечой, директором Института космических исследований РАН А.А. Петруковичем.

В настоящий специальный выпуск журнала «Космические аппараты и технологии» вошли избранные труды участников конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки».

Желаю всем участникам отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки», которую Госкорпорация «Роскосмос» планирует проводить ежегодно на площадках ведущих технических университетов России, трудовых и научных успехов, реализации перспективных наработок и развития кадрового потенциала в интересах ракетно-космической отрасли.

А.В. Блошенко

Исполнительный директор Госкорпорации «Роскосмос» по перспективным программам и науке



Том 8

№ 1 (47) 2024

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край Железногорск

Космические аппараты и технологии

Главный редактор Тестоедов Николай Алексеевич академик РАН, д-р техн. наук, профессор, председатель редакционного совета (Железногорск)

Заместитель главного редактора Халиманович Владимир Иванович канд. физ.-мат. наук, профессор

Ответственный секретарь Леонидов Николай Владимирович (Железногорск)

Редакционный совет Алифанов Олег Михайлович академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва) Аннин Борис Дмитриевич академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск) Васильев Валерий Витальевич академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Хотьково) Попов Гарри Алексеевич академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва) Шабанов Василий Филиппович академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск) **Махутов Николай Андреевич** кор. РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва) чл.-кор. Р Петрукович Анатолий Алексеевич АН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва) Шайдуров Владимир Викторович ор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск) Беляев Борис Афанасьевич д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Гарин Евгений Николаевич д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Косенко Виктор Евгеньевич д-р техн. наук, профессор (Железногорск) Красильщиков Михаил Наумович д-р техн. наук, профессор (Москва) Медведский Александр Леонидович д-р физ.-мат. наук (Жуковский) Надирадзе Андрей Борисович д-р техн. наук, профессор (Москва) Овчинников Сергей Геннадьевич д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск) Панько Сергей Петрович д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Пчеляков Олег Петрович д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск) Хартов Виктор Владимирович д-р техн. наук, профессор (Ќоролёв) Чеботарев Виктор Евдокимович д-р техн. наук, профессор (Железногорск) Чернявский Александр Григорьевич Королёв)

Редакционная коллегия

Головёнкин Евгений Николаевич *д-р техн. наук. профессор (Железногорск)* Двирный Валерий Васильевич д-р техн. наук, профессор (Железногорск) Лопатин Александр Витальевич д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Охоткин Кирилл Германович д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск) Пономарев Сергей Васильевич д-р техн. наук (Томск) Матвеев Станислав Алексеевич канд. техн. наук (Санкт-Петербург) Непомнящий Олег Владимирович ка́нд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Симунин Михаил Максимович канд. техн. наук, доцент (Красноярск) Смотров Андрей Васильевич канд. техн. наук (Жуковский)

Сухотин Виталий Владимирович канд. техн. наук, доцент (Красноярск) Хартов Станислав Викторович канд. техн. наук (Красноярск)

Ежеквартальный научный журнал

Издается с 2012 года

ISSN 2618-7957

Издатель и учредитель: Ассоциация «Технологическая платформа «Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Космические аппараты и технологии» рецензируемый научный журнал технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система». До 2018 года издавался под названием «Исследования наукограда».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС77-72862 от 22.05.2018 г.)

Импакт-фактор РИНЦ за 2022 г. – 0,305.

«Космические аппараты и технологии» публикуют оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической технике:
- космическое приборостроение:
- космические услуги;
- инновации космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (двойное слепое) рецензирование. Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе. Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, www.cyberleninka.ru, www.readera.org

По решению Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал «Космические аппараты и технологии» 11 июля 2019 года вошел в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Адрес учредителя, редакции и издателя: 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224

e-mail: spacecrafts.technologies@yandex.ru http://www.journal-niss.ru

Подписной индекс журнала в каталоге «Пресса России» 39491 Тираж 200 экз. Заказ 21317 Дата выхода в свет 29.03.2024

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом Сибирского федерального университета 660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а Тел.: (391) 206-26-16; http://bik.sfu-kras.ru E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Свободная цена

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

Spacecrafts & Technologies

Chief Editor Testoyedov Nikolay A. Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor, Chairman of Editorial Board (Russian Federation)

Deputy Chief Editor

Khalimanovich Vladimir I. PhD in Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Executive Secretary

Leonidov Nikolai V. (Russian Federation)

Editorial Board

Alifanov Oleg M. Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Annin Boris D.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Popov Garry A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Shabanov Vasily Ph. Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Vasiliev Valery V.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federa Makhutov Nikolay A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Petrukovich Anatoly A. Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Shaidurov Vladimir V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Belyaev Boris A.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Chebotarev Victor E. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Garin Eugene N. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Khartov Victor V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Kosenko Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Krasilshchikov Michael N.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Medvedtskiy Alexander L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation) Nadiradze Andrey B.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Ovchinnikov Sergey G. Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Panko Sergey P.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Pchelyakov Oleg P. Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Cherniavsky Alexander G. (Russian Federation)

Editorial Council

Golovenkin Eugene N. Doctor of Engineering, Professor, Pr

rofessor (Russian Federation) Dvirny Valery V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Lopatin Alexander V. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Okhotkin Kirill G.

Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Russian Federation)

Ponomarev Sergey V. Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

Khartov Stanislav V.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Matveev Stanislav A. PhD in Engineering (Russian Federation)

Nepomnyashy Oleg V.

PhD in Engineering, Associate P ofessor (Russian Federation Simunin Mikhail M.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Smotrov Andrey V.

PhD in Engineering (Russian Federation) Sukhotin Vitalu V

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Scientific quarterly journal Published since 2012

ISSN 2618-7957

Publisher and Founder: Association «Technology Platform «National Information Satellite System»

«Spacecrafts & Technologies» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System». Until 2018 was published under the title «The Research of the Science City».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications

(PI certificate no. FS77-72862, May 22, 2018).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal sections:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services:
- Innovations of the space industry.

«Spacecrafts & Technologies» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrarv.ru. www.cyberleninka.ru, www.readera.org

В номере

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

С.В. Белов, А.В. Бельков, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ НАНОСПУТНИКА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

- И.М. Андрианов, И.Г. Киселёв, М.Н. Андрианов ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РЭЛЕЕВСКОМ КАНАЛЕ ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С РАЗНЕСЁННЫМ ПРИЁМОМ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ СЛОЖЕНИИ ВЕТВЕЙ РАЗНЕСЕНИЯ
 - Е.А. Богданова, И.Ю. Пономарев, А.В. Наседкин ОСВОЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АО «ОКБ «ФАКЕЛ»
 - **П.В. Белоусов, Ю.Б. Томилина, В.А. Дидык, А.А. Пухов** РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

космическое приборостроение

А.И. Горностаев МЕРЫ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПОМЕХ НА УРОВНЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

ИННОВАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Р.С. Куликов, С.В. Вишняков, А.П. Малышев, М.А. Орлова, Т.А. Бровко «ПОТОК» – РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ПЛАТФОРМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

7 S.V. Belov, A.V. Belkov, A.P. Zhukov, M.S. Pavlov, S.V. Ponomarev NANOSATELLITE THERMAL STATE UNDER NONSTATIONARY HEAT GENERATION FROM PAYLOAD RADIO-ELECTRONIC ELEMENTS

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN SPACE EQUIPMENT

- 17 I.M. Andrianov, I.G. Kiselev, M.N. Andrianov INCREASING THE RELIABILITY AND SPEED OF DATA TRANSMISSION IN THE RAYLEIGH CHANNEL THROUGH THE USE OF COMBINING INTERMITTENT DATA TRANSMISSION WITH DIVERSITY RECEPTION WITH OPTIMAL ADDITION OF DIVERSITY BRANCHES
- 26 **E.A. Bogdanova, I.Y. Ponomarev, A. V. Nasedkin** DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF PROMISING TECHNOLOGIES IN JSC EDB FAKEL
- 34 P.V. Belousov, Y.B. Tomilina, V.A. Didik, A. A. Puhov
 DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR CREATING THE WORKING SURFACE OF A LARGE-SIZED
 TRANSFORMABLE REFLECTOR

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

42 A.I. Gornostaev MEASURES FOR ATTENUATION OF INTERFERENCE AT THE LEVEL OF DESIGN OF THE TEMPERATURE CONTROL INTERFACE MODULE FOR SPACECRAFT MEASURING INSTRUMENTS

INNOVATIONS OF THE SPACE INDUSTRY

57 **R.S. Kulikov, S. V. Vishnyakov, A. P. Malyshev, M.A. Orlova, T. A. Brovko** «POTOK» – DISTRIBUTED PLATFORM FOR MODELING DIGITAL TWINS OF THE GLONASS УДК 536.3+629.783

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ НАНОСПУТНИКА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

С.В. Белов[∞], А.В. Бельков, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев

Национальный исследовательский Томский государственный университет г. Томск, Российская Федерация

Цель работы – оценка тепловых режимов работы радиоэлектронных компонент наноспутника в условиях орбитального полета. В статье представлены результаты численного исследования теплового состояния наноспутника CubeSat с форм-фактором 1U при его движении по низкой околоземной орбите высотой 300 км в дни осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния. Тепловая численная модель наноспутника учитывает тепловые потоки от Солнца и от поверхности Земли, атмосферный нагрев не учитывается. Кроме того, принимается во внимание нестационарность тепловыделения на радиоэлектронных компонентах полезной нагрузки наноспутника, а также переизлучение энергии внутри его корпуса. Геометрический и конструктивный облик наноспутника, теплофизические свойства материалов и оптические свойства свободных поверхностей, режимы работы полезной нагрузки определены на основе данных, полученных из литературных источников. Результаты численного моделирования показывают, что температура радиоэлектронных компонент зависит от мощности собственного тепловыделения, теплового излучения соседних плат, орбитального движения наноспутника по околоземной орбите, его положения на орбите Земли. Динамика температуры радиоэлектронных компонент определяется действующим на них режимом тепловыделения. Хотя в условиях поставленной задачи температуры большинства радиоэлектронных компонент находятся в допустимых эксплуатационных пределах, действие коротких импульсных тепловых нагрузок большой мощности может приводить к перегреву компонент полезной нагрузки.

Ключевые слова: наноспутник, CubeSat, тепловой поток, тепловыделение, движение по орбите, численное моделирование.

Введение

Наноспутники являются быстро развивающимся классом космических аппаратов (КА), возможности которых позволяют использовать их для научных, мониторинговых, образовательных целей. По современной классификации [1] (таблица 1) к наноспутникам относятся КА с массой от 1 до 10 кг.

В настоящее время разработка наноспутников основывается на наиболее распространенном стандарте CubeSat [2]. Данный стандарт предлагает блочную концепцию КА с базовым типоразмером 100×100×100 мм и массой до 2 кг (формТаблица 1 Классификация спутников по массе, кг

Большие	Средние	Мини	Микро	Нано	Пико
1000<	500-	100-	10-	1-	<1

фактор 1U). В соответствии со стандартом CubeSat на основе типоразмера 1U могут формироваться КА до 12U и массой до 24 кг (таблица 2). Как видно из таблицы 2, к наноспутникам относятся КА с форм-факторами от 1 до 3U.

Особенностями наноспутников являются относительно небольшие затраты на проектирование, производство и выведение на орбиту. Корпуса таких КА негерметичны, а в полезной нагрузке используются самые доступные радиоэлектронные

[⊠] belovsv@niipmm.tsu.ru

[©] Ассоциация «ТП «НИСС», 2024



Таблица 2 Форм-факторы и массы КА по стандарту CubeSat

Форм-фактор	1U	1.5U	2U	3U	6U	12U
Масса, кг	2,0	3,0	4,0	6,0	12,0	24,0

комплектующие, не сертифицированные для условий космического полета [3]. Работоспособность таких комплектующих сохраняется в температурном диапазоне от –40 до 85 °C, аккумуляторной батареи от –20 до 60 °C [4]–[7].

Одной из основных задач, возникающих при разработке наноспутника, является обеспечение температурного режима полезной нагрузки [7–12]. Если для КА с форм-фактором 1U доступны пассивные методы терморегулирования [6], то для КА с форм-фактором ≥ 2U допустимы более эффективные методы, например использование тепловых труб [12].

В условиях орбитального полета КА подвергается тепловому нагреву со стороны внешних источников излучения, а на радиоэлектронных элементах полезной нагрузки происходит выделение тепловой энергии при значительном уровне мощности. Под воздействием этих факторов в элементах конструкции КА формируется нестационарное, неоднородное поле температуры.

Цель настоящей работы – оценка теплового режима радиоэлектронных компонент наноспутника с форм-фактором 1U при его движении по заданной орбите и при известных режимах работы полезной нагрузки. Следует отметить, что данная работа является развитием [13] в направлении более точного описания внутренних тепловых источников. В [13] радиоэлектронные компоненты явно не рассматривались, тепловыделение на электронных платах полагалось одинаковым, постоянным, равным усредненной величине, и распределялось равномерно по объему плат. В настоящей работе тепловыделение сосредоточено в объемах радиоэлектронных компонент, которые размещены на платах и имеют с ними тепловой контакт.

1. Постановка задачи

Рассматривается наноспутник CubeSat с формфактором 1U (рисунок 1). Конструкция КА включает: рельсы 1, которые вместе с соединительными элементами 2 образуют силовой каркас; платы 4–8, связанные с корпусом элементами крепления 3; стенки корпуса 9, закрепленные на силовом каркасе. На стенках 9 располагаются панели солнечных батарей. Начало системы координат, связанной с КА, находится в геометрическом центре корпуса.

Функционально платы 4–8 включают: приемникпередатчик, бортовой компьютер, систему навигации; аккумуляторную батарею и систему управления электропитанием (СУЭ); систему управления движением (СУД). Расстояние между платами составляет около 15 мм.

Электронные компоненты полезной нагрузки представляются параллелепипедами, которые контактируют своими гранями с платами (рисунок 1), тепловое сопротивление между компонентами и платами считается пренебрежимо малым. При этом другие связи, например паяные соединения, не рассматриваются. Тепловая мощность, выделяющаяся на радиоэлектронной плате, равномерно распределяется по объему соответствующих параллелепипедов. Платы 4–8 и стенки корпуса 9 не имеют теплового контакта с рельсами 1. Остальные элементы конструкции КА соединены между собой плотно, так что в местах соединения не вносится дополнительного теплового сопротивления.

КА движется вокруг Земли по круговой орбите, имеющей высоту 300 км. Орбита КА лежит в плоскости орбиты Земли. Ось У системы координат, связанной с КА, направлена к центру Земли, ось X совпадает с направлением движения



Рисунок 1. Схема КА CubeSat (форм-фактор 1U): 1 – рельс; 2 – соединительный элемент каркаса; 3 – элемент крепления плат; 4 – приемник-передатчик; 5 – бортовой компьютер; 6 – система навигации; 7 – аккумуляторная батарея и СУЭ; 8 – СУД; 9 – стенка корпуса

КА. Рассматриваются дни осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния, которые различаются величиной солнечной постоянной.

Тепловое состояние КА определяется поглощенным излучением от внешних источников и тепловыделением от внутренних источников. Полагается, что КА в момент времени t=0 оказывается на орбите с однородным распределением температуры T_0 , т.е. влияние на тепловое состояние КА процесса его выведения на орбиту не рассматривается.

Обозначим через r радиус-вектор точки с координатами (x, y, z), а также $x=x_1, y=x_2, z=x_3$. Тогда температурное поле в КА в момент времени t описывается уравнением

$$c\rho T_t = k \cdot T_{ii} + q_V \tag{1}$$

с начальными условиями

$$T(t=0,r) = T_0, (r), r \in V$$
(2)

и граничными условиями

$$k \cdot T_{,n} = q_{rad(out)}, \ r \in S_{out}, \tag{3}$$

$$k \cdot T_{,n} = q_{rad(in)}, \ r \in S_{in}, \tag{4}$$

где V – объем, занимаемый KA; T=T(t, r) – температура материала KA; S_{out} , S_{in} – внешние и внутренние поверхности, ограничивающие V; n – вектор нормали к поверхности; c=c(r), $\rho=\rho(r)$ и k=k(r) – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность сплошной среды; $q_V=q_V(r)$ – плотность внутренних тепловых источников; $q_{rad(out)}$ и $q_{rad(in)}$ – результирующие плотности потоков излучения на поверхности S_{out} и S_{in} , которые представляют собой разности между поглощенными и излученными ими потоками энергии; i – индекс компоненты x_i , i=1,2,3.

Величина *q_{rad(out)}* из (3) равна

$$q_{rad(out)} = q_{sun} + q_{alb} + q_{earth} + q_{aer} - q_{sat}.$$
 (5)

 q_{sun} – падающий на КА поток излучения от Солнца, $q_{sun} = \alpha_{out} Q_{sun} (\bar{n} \cdot \bar{n}_{sun}) \varphi$, где Q_{sun} – солнечная постоянная, 1357 Вт/м² (осеннее равноденствие) и 1411 Вт/м² (зимнее солнцестояние); \bar{n} – вектор нормали к внешней поверхности корпуса КА; α_{out} – коэффициент поглощения внешней поверхности корпуса КА; \bar{n}_{sun} – вектор, направленный на Солнце; φ – параметр затенения (затенение φ =0, нет затенения φ =1).

 q_{alb} – излучение, отраженное от Земли, $q_{alb}=\alpha_{out}$ $Q_{sun}\Phi_{sat-earth}b$, где $\Phi_{sat-earth}$ – фактор видимости [14]; b– коэффициент альбедо, b = 0.3.

 q_{earth} – поток теплового излучения от Земли, $q_{earth}=\alpha_{out} Q_{earth} \Phi_{sat-earth}$, где Q_{earth} – плотность инфракрасного излучения Земли, 237 Вт/м².

 q_{aer} – поток, обусловленный аэродинамическим нагревом. На орбитах с высотами ≥ 300 км величиной q_{aer} можно пренебречь [7].

 $q_{sat} = \sigma_0 (\epsilon_{out} T^4 - \alpha_{out} T_{\infty}^4)$, где $T_{\infty} -$ температура от-

крытого космоса, 2.7°К, ε_{out} – коэффициент излучения внешней поверхности корпуса КА.

Полный расчет величины $q_{rad(in)}$ из (4) с учетом многократных отражений и поглощений излучения на внутренней поверхности S_{in} является сложной задачей. Поэтому используется упрощенный подход, приведенный в [14], в котором реальные поверхности условно считаются диффузносерыми. В этом случае коэффициенты излучения ε и поглощения α полагаются равными.

2. Геометрические, теплофизические и конечно-элементные параметры

Конечно-элементная модель имеет следующие геометрические параметры: рельсы 1 (рисунок 1) и соединительные элементы 2 имеют сечение 8,5×8,5 мм, рельсы имеют длину 113,5 мм; толщина стенок корпуса 9 составляет 1,27 мм, на их внешних поверхностях находится фотоэлектрический слой толщиной 80 мкм; толщина плат равна 1,6 мм.

На рисунке 2 показано расположение радиоэлектронных компонент на платах.

Размеры радиоэлектронных компонент: 5×5×1 мм, 8×8×1,5 мм, 10×7×1,5 мм, 10×10×1 мм, 10×10×1,5 мм, 15×15×2 мм, 20×20×2 мм. Размеры аккумуляторной батареи 60×60×9 мм.

Физические, термические и оптические свойства материалов, необходимые для решения задачи (1)–(4), приведены в таблице 3. Все характеристики (кроме корпусов электронных компонент) взяты из [13]. В качестве свойства корпусов электронных компонент использовались свойства полимерного компаунда для производства корпусов транзисторов [15], а оптические свойства поверхностей соответствуют свойствам черной эпоксидной краски [16].

Плотность внутренних тепловых источников q_V из (1) определялась по зависимостям мощности нестационарного тепловыделения на платах радиоэлектронных систем КА из [17], графики которых показаны на рисунке 3. На этих графиках единица времени равна времени одного оборота КА вокруг Земли. Для круговой орбиты с высотой 300 км время одного оборота вокруг Земли составляет 5.422·10³ с. Ввиду того, что в [17] были представлены зависимости, ограниченные временным интервалом 0 об. $\leq t \leq 3$ об., они были экстраполированы на 3 об. $< t \leq 8$ об. Данный интервал времени, как показали расчёты, достаточен для получения температурного поля конструкции, которое не зависит от числа оборотов, совершенных КА.

Задача (1)–(4) решается численно, методом конечных элементов. Для этого использовался конечно-элементный программный пакет



Рисунок 2. Расположение радиоэлектронных компонент на платах

Таблица 3

TD 1				
Lennomuzuu	геские срои	CTD9 M9TP	DUADOD U	TODENVUOCTEU
TCHIJOWHSH	ICCRIC CDON	UIDa Maiu	DHAJIOD H	HUDUUAHUUIUK
			1	

Элемент конструкции	<i>k</i> , Вт/(м·К)	<i>с</i> , Дж/(кг·К)	r	3	α
Силовой каркас	140,0	948	2810	0,4	0,4
Солнечная батарея	45,5	327	6250	0,85	0,91
Электронная плата	0,64	975	2120	0,22	0,85
Батарея	23,0	1110	2247	0,7	0,85
Электронные компоненты	0,8	2000	1500	0,9	0,85

SIEMENS-NX, в котором реализованы процедура решения уравнения теплопроводности и метод вычисления $q_{rad(out)}$ и $q_{rad(in)}$. Конечно-элементная модель содержала 20000 элементов.

3. Результаты

На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования динамики температуры электронных компонент полезной нагрузки наноспутника: передатчика, приемника, аккумуляторной батареи, компьютера, навигационной системы, СУД. Рассматривались случаи без тепловыделения и с тепловыделением на полезной нагрузке для осеннего равноденствия и для зимнего солнцестояния.

Результаты показывают, что увеличение солнечной постоянной при переходе от осеннего равноденствия к зимнему солнцестоянию увеличивает температуру радиоэлектронных компонент в пределах 12,5–13,5 °С. Орбитальное движение приводит к осцилляциям температуры с периодом, равным одному орбитальному обороту. Это особенно заметно в случае отсутствия тепловыделения. При этом величина осцилляций зависит от положения платы в общем пакете плат. Так, для осеннего равноденствия величина осцилляций составила: передатчик и приемник – 13,7 °C, компьютер – 10,8 °C, навигационная система – 8,5 °C, аккумуляторная батарея – 5,8 °C, СУД – 11,2 °C. Наибольшие осцилляции наблюдаются на крайних платах, на внутренних платах осцилляции меньше, что объясняется их экранировкой от стенок корпуса.

При внутреннем тепловыделении температуры радиоэлектронных компонент значительно увеличиваются. Величина температурного прироста определяется средней мощностью тепловыделения. Наиболее интенсивно температура увеличивается на первом обороте вокруг Земли. Последующая температурная динамика определяется режимом работы платы, влиянием соседних плат, орбитальным движением КА. Почти во всех случаях, кроме платы с навигационной системой

С.В. Белов, А.В. Бельков, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев

Тепловое состояние наноспутника при нестационарном тепловыделении на радиоэлектронных...



Рисунок 3. Тепловые мощности радиоэлектронных систем КА

(рисунок 4), изменение температуры во времени приобретает периодический характер. Наиболее сложная картина наблюдается для платы с навигационной системой. Такая температурная динамика объясняется действием на плату мощных импульсов тепловыделения (рисунок 3), а также тепловым влиянием соседних плат.

Результаты расчетов показывают, что при внутреннем тепловыделении температура аккумуляторной батареи лежит в пределах от 0 до 44 °C. Температуры электронных компонент плат бортового компьютера, навигационной системы, СУД находятся в пределах 0 до 69 °C. Эти значения температур не выходят за температурные пределы, которые приведены в разделе «Введение». В то же время передатчик и приемник работают с перегревом. Температурные пики приемника при осеннем равноденствии превышают 90 °C, а температурный минимум составляет 75 °C. При зимнем солнцестоянии максимальная температура достигает 102,6 °C, а минимальная 81 °C. Для передатчика при зимнем солнцестоянии пиковые значения температуры превышают 114 °С, а температура в минимуме 48 °С. Такие температурные скачки связаны с импульсным характером тепловыделения на передатчике, причем расположение температурных пиков во времени (рисунок 3, передатчик) совпадает с расположением пиков тепловыделения (рисунок 2). Кроме того, приемник и передатчик располагаются вблизи, на одной плате и влияют друг на друга.

Распределения температур на плате 4 (рисунок 1) с приемником-передатчиком и на плате 7 (рисунок 1) с аккумуляторной батареей и СУЭ в моменты температурного максимума и минимума показаны на рисунках 5 и 6. Рисунок 5а соответствует состоянию КА, когда последний выходит из тени. Компоненты приемника горячие, так как он постоянно работает (рисунок 3). Через пол-оборота включается передатчик и его компоненты нагреваются (рисунок 5б), при этом частично подогреваются и компоненты приемника.



Рисунок 4. Температуры радиоэлектронных компонент полезной нагрузки КА: 1 – осеннее равноденствие, без тепловыделения; 2 – зимнее солнцестояние, без тепловыделения; 3 – осеннее равноденствие, с тепловыделением; 4 – зимнее солнцестояние, с тепловыделением

Температурное пятно на рисунке ба обусловлено тем, что КА вышел из тени (батарея еще холодная) и направлен своим ребром (нижнее правое на рисунке ба) в сторону Солнца. Через полоборота освещается грань корпуса КА, которая на рисунке 5б расположена вверху, батарея разогрета, так как в течение этого времени КА освещался Солнцем.

Заключение

Проведенное исследование показало, что температура радиоэлектронных компонент полезной нагрузки наноспутника CubeSat с форм-фактором 1U определяется следующими факторами: мощностью собственного тепловыделения; тепловым влиянием соседних плат; собственным движением по околоземной орбите, положением на земной орбите. В основном температурная динамика радиоэлектронных компонент зависит от действующего режима тепловыделения. Во всех расчетных случаях температуры радиоэлектронных компонент бортового компьютера, системы навигации, аккумуляторной батареи и СУЭ и СУД находятся в допустимых эксплуатационных пределах. Под действием импульсных тепловых нагрузок большой мощности компоненты системы приемник-передатчик испытывают кратковременный перегрев.

По сравнению с работой [13] получено существенно более детальное описание теплового со-

С.В. Белов, А.В. Бельков, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев

Тепловое состояние наноспутника при нестационарном тепловыделении на радиоэлектронных...



Рисунок 5. Распределение температур на плате 4, день зимнего солнцестояния, элементы: 1 – приемник, 2 – передатчик; а – *t*=7,25 об., б – *t*=7,91 об.



1 -батарея; a - t = 7,31 об., 6 - t = 7,91 об.

стояния наноспутника CubeSat с форм-фактором 1U. Решение подобных задач требует точного знания: конструкции корпуса КА; теплофизических свойств материалов и поверхностей; внутренней материальной структуры радиоэлектронных компонент и способа их крепления к платам.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020–0036).

Список литературы

- [1] Гансвинд И. Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 82–88. doi: 10.31857/S 0205-96142019582-88
- [2] Спецификация проекта CubeSat, версия 14.1. Программа CubeSat, Калифорнийский политехнический институт [Электронный ресурс]. URL: https://static1.squarespace.com /static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc 9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022–02–09.pdf (дата обращения: 19.12.2023).
- [3] Абламейко С.В., Саечников В., Спиридонов А. Малые космические аппараты: Минск: БГУ. 2012. 159 с.
- [4] Наноспутниковая платформа CubeSat «OrbiCraft-Pro» [Электронный ресурс]. URL: https://sputnix.ru/tpl/docs/ Описание%20ОрбиКрафт-Про%20(рус.).pdf (дата обращения: 19.12.2023).
- [5] Ратинам А. Проектирование и разработка UWE-4: интеграция электродвижительных установок, структурный анализ и анализ орбитального нагрева: диссертация на степень магистра наук. Лиссабон, 2019. DOI: 10.13140/ RG.2.2.34427.72485.



- [6] Рейес Л. А. и др. Тепловое моделирование наноспутника CIIIASat: инструмент выбора теплозащитного покрытия // Прикладная теплотехника. 2020. Т. 166. С. 114651. DOI: 10.1016 /j.applthermaleng. 2019.114651
- [7] Яковлев О. Я., Малыгин Д.В. Внешнее тепловое моделирование спутниковой платформы «Синергия» // Космические аппараты и технологии. 2019. № 3 (29). С. 155–163. doi 10.26732/2618-7957-2019-3-155-163
- [8] Соболев Д. Д., Симаков С. П. Исследование теплового состояния наноспутника SamSat-M // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики-2020. С. 136–137. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-2-85-96
- [9] Фомин Д. и др. Трёхмерные неоднородные тепловые поля электронной платы полезной нагрузки «Фотон-Амур 2.0», разработанной для наноспутников // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 2. С. 74–82. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82
- [10] Болтов Е. А. и др. Проектирование системы обеспечения теплового режима модуля аккумуляторных батарей наноспутника формата CubeSat // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 1 (39). С. 29–37. DOI: 10.26732/j.st.2022.1.04
- [11] Корпино С. и др. Тепловой расчет и анализ наноспутника на низкой околоземной орбите // Acta Astronautica. 2015. Т. 115. С. 247–261. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.05.012
- [12] Юй В., Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование системы терморегулирования наноспутника с помощью контурных тепловых труб в условиях орбитального полета // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 23–35. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-23-35
- [13] Белов С.В. и др. Тепловое состояние малого спутника при различной плотности расположения электронных плат // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 82. С. 66–81. DOI: 10.17223/19988621/82/6
- [14] Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат. 1979. 216 с.
- [15] Кузнецов Г.В., Белозерцев А. Численное моделирование температурных полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. № 1. С. 150–154.
- [16] Инженерный справочник. Таблицы DPVA.XYZ [Электронный pecypc]. URL: https://dpva.xyz/Guide/ GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAnd Temperature/EmmisionCoefficients/EmmisionCoefficientsTable01/(дата обращения:19.12.2023).
- [17] Давыдов Д. и др. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства SamSat // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 459–465. DOI: 0.17586/0021-3454-2016-59-6-459-465

NANOSATELLITE THERMAL STATE UNDER NONSTATIONARY HEAT GENERATION FROM PAYLOAD RADIO-ELECTRONIC ELEMENTS

S.V. Belov, A.V. Belkov, A.P. Zhukov, M.S. Pavlov, S.V. Ponomarev Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics

of Tomsk State University Tomsk, The Russian Federation

The purpose of the work is to assess the thermal operating conditions of the radio-electronic components of a nanosatellite under orbital flight conditions. The following article presents the numerical research results involving the thermal state of 1U CubeSat nanosatellite in the course of its motion at low-Earth orbit (at the height of 300km) during autumnal equinox and winter solstice days. The nanosatellite numerical thermal model includes the heat rate from the Sun and Earth surface, and, at the same time, excluding atmospheric temperature rise. Moreover, nonstationary heat generation from nanosatellite payload of radio-electronic elements, as well as energy re-radiation within the nanosatellite casing itself are taken into account. The

14

С.В. Белов, А.В. Бельков, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев

Тепловое состояние наноспутника при нестационарном тепловыделении на радиоэлектронных...

nanosatellite geometry, structure, thermal-physical material properties and free surface optical properties as well as its payload operational mode estimations are based on reliable literature references. The numerical model results indicate the fact that the radio-electronic element temperature depends on its heat generation rate output, thermal radiation of adjacent circuit boards, low-Earth orbital nanosatellite motion and its orbital position. Radio-electronic element temperature dynamics is determined by the acting heat generation regimes. Although, under conditions of the formulated problem, the temperature of most radio-electronic elements is within the acceptable operation limits, nevertheless, rapid high-level thermal load impact could result in excessive heating of the payload elements.

Keywords: nanosatellite, CubeSat, heat transfer rate, thermal radiation, orbital motion, numerical modeling.

References

- [1] Gansvind I. Small satellites in remote sensing of the Earth // News, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. Vol. 56.
 P. 1177–1181. // DOI: 10.1134/S0001433820090108
- [2] CubeSat Design Specification Rev. 14.1 The CubeSat Program, Cal Poly SLO Available at https://www.nasa.gov/ wp-content/uploads/2018/01/cubesatdesignspecificationrev14_12022-02-09.pdf. (accessed: 19.12.2023).
- [3] Ablameyko S. V., Saechnikov V., Spiridonov A. Malie kosmicheskie apparati [Small spacecraft]: Minsk, BSU, 2012, 159 p.
- [4] Nanosputnikovaya platforma CubeSat «OrbiCraft-Pro» [Nanosatellite platform CubeSat «OrbiCraft-Pro»] Available at https://sputnix.ru/tpl/docs/Описание%20ОрбиКрафт-Про%20(pyc.).pdf (accessed: 19.12.2023).
- [5] Rathinam A. Design and Development of UWE-4: Integration of Electric Propulsion Units, Structural Analysis and Orbital Heating Analysis: Thesis for Master of Science Degree. Lisboa, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.34427.72485.
- [6] Reyes L.A. et al. Thermal modeling of CIIIASat nanosatellite: A tool for thermal barrier coating selection // Applied Thermal Engineering, 2020, vol. 166, pp. 114651. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114651
- [7] Yakovlev O. Y., Maligin D. External thermal modeling satellite platform «Synergy» // Spacecrafts & Technologies, 2019, vol. 29, Issue 3, pp. 155–163. DOI:10.26732/2618-7957-2019-3-155-163
- [8] SobolevD. D., SimakovS. P. Thermalanalysis of the nanosatellite SamSat-M//ThermalProcesses in Technology, pp. 85–96. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-2-85-96
- [9] Fomin D. et al. Three-dimensional inhomogeneous thermal fields of the "Photon-Amur 2.0" payload electronic board developed for nanosatellites // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2021, vol. 20. Issue 2, pp. 74–82. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82
- [10] Boltov E. A. et al. Design of a CubeSat thermal control system for battery module // Spacecrafts & Technologies, 2022, vol. 6, Issue 1, pp. 29–37. DOI: 10.26732/j.st.2022.1.04
- [11] Corpino S. et al. Thermal design and analysis of a nanosatellite in low earth orbit // Acta Astronautica, 2015, vol. 115, pp. 247–261. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.05.012
- [12] Wang Y., Denisov O. V., Denisova L. V. Simulation of the thermal control system of nanosatellite using the loop heat pipes under the orbital flight conditions // RUDN Journal of Engineering Research, 2021, vol. 22, Issue 1, pp. 23–35. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-23-35
- [13] Belov S. V. et al. A thermal state of a small satellite at various packing density of electronic circuit boards // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2023, 82, pp. 66–81. DOI: 10.17223/19988621/82/6
- [14] Wong H. Heat transfer for engineers. Addison-Wesley Longman Ltd. December 1, 1977.
- [15] Kuznetsov G.V., Belozercev A. Numerical simulation of the temperature fields of power transistors taking into account the discontinuities of the transfer coefficients // News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering, 2005, vol. 308, Issue 1, pp. 150–154.
- [16] Injenerniy spravochnik. Tablitsi DPVA.XYZ [Engineering reference book. DPVA.XYZ tables]. Available at https://dpva.xyz/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/EmmisionCoefficients/Emmision CoefficientsTable01/ (Accessed: 19.12.2023).
- [17] Davydov D. et al. Electrical power subsystem design for SamSat nanosatellite // Izv. vuzov. Priborostroenie, 2016, vol. 59, Issue 6, pp. 459–465 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6459-465



Сведения об авторах

Белов Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Научноисследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 2006 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Бельков Алексей Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 2006 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Жуков Андрей Петрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научноисследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Новосибирский государственный университет в 1983 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, численное моделирование.

Павлов Михаил Сергеевич – старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 2006 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, композиционные материалы.

Пономарев Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1971 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника. УДК 621.396.946

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РЭЛЕЕВСКОМ КАНАЛЕ ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С РАЗНЕСЁННЫМ ПРИЁМОМ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ СЛОЖЕНИИ ВЕТВЕЙ РАЗНЕСЕНИЯ

И.М. Андрианов , И.Г. Киселёв, М.Н. Андрианов

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук г. Москва, Российская Федерация

В работе рассмотрен метод повышения достоверности передачи данных в условиях рэлеевских замираний сигнала с использованием режимов комплексирования прерывистого излучения и когерентного разнесённого приема фазоманипулированных сигналов с оптимальным сложением. Основная цель исследования – повышение помехоустойчивости передачи данных в рэлеевском канале при неизменных мощности передатчика и скорости передачи данных. Исследование было выполнено методом математического моделирования в средах MathCad (система компьютерной алгебры)/Matlab. Показана применимость метода не только для систем радиодиапазона, но и для квантовых устройств передачи данных, в частности инфракрасного диапазона, работающих в условиях флуктуаций тропосферного канала, на линии связи «космический аппарат – наземная станция слежения». Основные итоги работы: показано преимущество комплексирования прерывистого излучения и разнесённого приема сигналов при неизменной мощности передатчика для повышения надёжности функционирования автономных систем; определена зависимость вероятности ошибки от уровня порога при фиксированной мощности передатчика; сделана оценка оптимального порогового уровня передающего устройства по критерию минимизации вероятности ошибки; показано, что при оптимальном уровне порога обеспечивается не только минимальная вероятность ошибочного приёма данных, но и снижается энергетический расход передатчика.

Ключевые слова: прерывистая связь, комплексирование, разнесённый приём, оптимальное сложение, оптимальный уровень порога.

Введение

В современных системах подвижной радиосвязи, в частности сотовой связи четвертого и пятого поколений, чётко прослеживается тенденция увеличения скорости и достоверности передачи сообщений.

При этом, с одной стороны, ведутся работы по переносу несущей частоты в область более высокочастотного, в том числе миллиметрового, диапазона. Это позволяет, во-первых, получить более высокую направленность излучения применением технологии VSAT [1], во-вторых, в указанных диапазонах, ввиду их относительной незанятости, возможно более просто реализовать высокоскоростную передачу данных в широкой полосе частот.

С другой стороны, для подвижной сотовой связи прослеживается тенденция увеличения количества сот на единицу площади зоны обслуживания при одновременном снижении их размеров (микро-, пикосоты и.т.д.). Особенно указанная тенденция актуальна в больших городах, мегаполисах. Кроме того, в структуре формируемого глобального инфокоммуникационного пространства, наряду с важной составляющей космической системы передачи данных, сегмент подвижной сотовой связи занимает значимое место [2].

Andrianov.IM@roscosmos.ru

[©] Ассоциация «ТП «НИСС», 2024



Применение сигналов общеизвестных сигнально-кодовых конструкций вида: PM-N, N-QAM, где N составляет 16, 32, 64 и более, малоэффективно, поскольку, с одной стороны, снижается помехоустойчивость передачи данных даже в невозмущённом канале, с другой стороны, для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (N-QAM) в рэлеевском канале при значительном варьировании амплитуды сигнала передача данных крайне неэффективна [3].

Поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть достоверность передачи (вероятность ошибочного приёма) данных в рэлеевском канале при модуляции сигнала ФМ-2 / ФМ-4 (QPSK) с постоянной огибающей.

При организации высокоскоростных квантовых систем передачи данных на линии связи «космический аппарат – наземная станция слежения» возможны ситуации, при которых линия связи в тропосферном канале составляет несколько километров, вместе с тем при определённых углах места антенны количество независимых флуктуаций в рассматриваемом канале становится большим [4, 5] относительно количества флуктуаций в канале с логнормальным распределением. Указанные флуктуации огибающей сигнала подчиняются распределению Рэлея.

Цель статьи: демонстрация разработанного метода повышения помехоустойчивости (достоверности) передачи данных в рэлеевском канале при неизменных мощности передатчика и скорости передачи данных.

Работа была выполнена коллективом сотрудников Астрокосмического центра ФИАН при содействии специалистов Госкорпорации Роскосмос.

> 1. Достоверность передачи данных в рэлеевском канале при комплексировании прерывистой передачи сигнала с разнесённым когерентным приёмом при оптимальном сложении ветвей разнесения

Плотность распределения вероятностей отношения сигнал / шум (ОСШ) в канале с замираниями сигнала по закону Рэлея при разнесенном приеме с оптимальным сложением (ОС) ветвей разнесения имеет вид [6] (1)

$$f_M(\gamma) = \frac{1}{(M-1)!} \frac{\gamma^{M-1}}{\gamma_0^M} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right), \qquad (1)$$

где M – число ветвей разнесения, γ_0 , γ – соответственно среднее и мгновенное значение ОСШ.

При этом вероятность ошибки комплексирования разнесенного приема с прерывистой связью, определяемая усреднением вероятности ошибки в гауссовом шуме по статистике рэлеевских замираний выше уровня порога, составит (2)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2 \cdot \eta_{M}(z)} \int_{z}^{\infty} erfc \sqrt{\alpha \gamma} \cdot f_{M}(\gamma) d\gamma, \qquad (2)$$

где z – уровень порога; $\eta_M(z)$ – коэффициент использования радиолинии; $\alpha = 1$ для фазоманипулированных сигналов. Коэффициент использования радиолинии определяет соотношение времени передачи данных к общему времени сеанса связи.

При этом различают общую и мгновенную скорости передачи данных. Общая скорость соответствует количеству бит, соотнесённых к общему времени сеанса связи. Мгновенная скорость определяет скорость передачи данных в заданный момент времени.

Поскольку рассматривается случай прерывистой передачи сообщений, то данные передаются не непрерывно, а только в моменты времени при установлении уровня амплитуды сигнала выше заданного порога. При разнесённом приёме (при объединении *M* ветвей разнесения) коэффициент использования радиолинии определится как (3, 3.2)

$$\eta_M(z) = \frac{1}{(M-1)!} \frac{1}{\gamma_0^M} \cdot \int_{z}^{\infty} \gamma^{M-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) d\gamma, \quad (3)$$

но поскольку [7]

$$\int_{u}^{\infty} x^{\nu-1} \exp\left(-\mu x\right) dx = \frac{1}{\mu^{\nu}} \cdot \Gamma(\nu, \mu u), \qquad (3.1)$$

выражение (3) превращается в (3.2)

$$\eta_M(z) = \frac{1}{(M-1)!} \cdot \Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_0}\right).$$
(3.2)

В важном частном случае, когда M = 1 и поскольку $\Gamma(I, x) = exp(-x)$ [8], выражение (3.2) примет вид (3.3)

$$\eta_{M=1}(z) = \exp\left(-\frac{z}{\gamma_0}\right). \tag{3.3}$$

В случае, когда уровень порога нормирован к среднему значению ОСШ на входе приемника $(z = k \cdot \gamma_0)$, выражение (3.2) примет вид (3.4)

$$\eta_M(z) = \frac{1}{(M-1)!} \cdot \Gamma(M,k). \tag{3.4}$$

Вероятность ошибки в рассматриваемом случае составит (4)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2 \cdot \gamma_{0}^{M} \cdot \eta_{M}(z) \cdot (M-1)!} \cdot \frac{1}{\sum_{z}^{\infty} erfc \sqrt{\alpha \gamma} \cdot \gamma^{M-1} \cdot exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right) d\gamma,}$$
(4)

Повышение достоверности и скорости передачи данных в рэлеевском канале...

но из [9] известно выражение (5)

$$\int_{a}^{b} UdV = U \cdot V \Big|_{a}^{b} - \int_{a}^{b} VdU,$$
(5)

и в соответствии с (3.1) выражение (4) примет вид (6)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2 \cdot \gamma_{0}^{M} \cdot \eta_{M}(z) \cdot (M-1)!} \left\{ erfc\sqrt{\alpha \cdot \gamma} \cdot \frac{\Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_{0}}\right)}{\left(\frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{M}} - \int_{z}^{\infty} \left[-\frac{\Gamma\left(M, \frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right)}{\left(\frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{M}} \right] \cdot \frac{d\left(erfc\sqrt{\alpha \cdot \gamma}\right)}{d\gamma} d\gamma \right\}, \quad (6)$$

далее сокращением из (6) получаем (7)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2 \cdot \eta_{M}(z) \cdot (M-1)!} \left\{ erfc \sqrt{\alpha \cdot z} \cdot \Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_{0}}\right) - \int_{z}^{\infty} \left[-\Gamma\left(M, \frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right) \right] \cdot \frac{d\left(erfc\sqrt{\alpha \cdot \gamma}\right)}{d\gamma} d\gamma \right\},$$
(7)

поскольку из [9] известно, что

$$\frac{d\left(erfc\sqrt{\alpha\gamma}\right)}{d\gamma} = -\frac{\sqrt{\alpha}\cdot\exp(-\alpha\cdot\gamma)}{\sqrt{\pi}\cdot\sqrt{\gamma}},\tag{7.1}$$

а также из [10] известно, что

$$\Gamma(n+1,x) = n! \exp(-x) \cdot \sum_{m=0}^{n} \frac{x^{m}}{m!}, \ [n=0,1,2,3...]$$
(7.2)

и принимая, что М – целое число, возможно, исходя из (7.2), определить (7.3) и (7.4)

$$\Gamma\left(M,\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) = (M-1)! \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^m}{m!},\tag{7.3}$$

$$\int_{z}^{\infty} \Gamma\left(M, \frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right) \cdot \frac{d\left(erfc\sqrt{\alpha \cdot \gamma}\right)}{d\gamma} d\gamma = -\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot (M-1)! \cdot \int_{z}^{\infty} \frac{\exp\left[-\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right) \cdot \gamma\right]}{\sqrt{\gamma}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right)^{m}}{m!} d\gamma.$$
(7.4)

Затем выражение (7.4) можно преобразовать к (7.5)

$$-\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot (M-1)! \int_{z}^{\infty} \frac{\exp\left[-\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right) \cdot \gamma\right]}{\sqrt{\gamma}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right)^{m}}{m!} d\gamma = -\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot (M-1)! \sum_{m=0}^{M-1} \int_{z}^{\infty} \frac{\exp\left[-\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right) \cdot \gamma\right]}{\sqrt{\gamma}} d\gamma = -\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot (M-1)! \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{\gamma_{0}^{m}} \cdot \frac{\sum_{m=0}^{m-1} \frac{\sum_{m=0}^{m-1} \frac{1}{\gamma_{0}^{m}} \cdot \frac{\sum_{m=0}^{m-1} \frac{\sum_{m=0}^{m-1}$$

С учетом (3.1) выражение (7.5) преобразуется к (7.6)

$$-\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \left(M-1\right)! \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m+\frac{1}{2}\right), \left(\alpha+\frac{1}{\gamma_0}\right) \cdot z\right]}{\left(\alpha+\frac{1}{\gamma_0}\right)^{m+\frac{1}{2}} \cdot \gamma_0^m \cdot m!}.$$
(7.6)

19



Исходное выражение (7) преобразуется к (8)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2 \cdot \eta_{M}(z) \cdot (M-1)!} \left\{ erfc\sqrt{\alpha \cdot z} \cdot \Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_{0}}\right) - \int_{z}^{\infty} \left[-\Gamma\left(M, \frac{\gamma}{\gamma_{0}}\right) \right] \cdot \frac{d\left(erfc\sqrt{\alpha \cdot \gamma}\right)}{d\gamma} d\gamma \right\} = \frac{1}{2 \cdot \eta_{M}(z) \cdot (M-1)!} \left\{ erfc\sqrt{\alpha \cdot z} \cdot \Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_{0}}\right) - \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot (M-1)! \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m + \frac{1}{2}\right), \left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right) \cdot z\right]}{\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{m + \frac{1}{2}} \cdot \gamma_{0}^{m} \cdot m!} \right\},$$

$$(8)$$

20

с учетом (3.2) выражение (8) преобразуется к (9)

~

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ erfc\sqrt{\alpha \cdot z} - \frac{(M-1)!}{\Gamma\left(M, \frac{z}{\gamma_{0}}\right)} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m + \frac{1}{2}\right), \left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right) \cdot z\right]}{\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{m + \frac{1}{2}} \cdot \gamma_{0}^{m} \cdot m!} \right\}.$$

$$(9)$$

Выражение (9) описывает вероятность ошибки при комплексировании разнесенного приема с прерывистой связью, с когерентной демодуляцией, при оптимальном сложении ветвей разнесения в рэлеевском канале.

В важном частном случае, когда
$$M = 1$$
 и с учетом того, что $\Gamma(1, x) = \exp(-x)$ и $\Gamma\left(\frac{1}{2}, x\right) = \sqrt{\pi} \cdot erfc(\sqrt{x})$

[10], получим частный случай выражения (9), а именно выражение (9.1), описывающее вероятность ошибки одиночной прерывистой связи с когерентной демодуляцией в рэлеевском канале. Выражение (9.1) было получено ранее в монографии [11].

$$P_{M=1}(\gamma_0) = \frac{1}{2} \cdot \left[erfc\sqrt{\alpha \cdot z} - \exp\left(\frac{z}{\gamma_0}\right) \cdot \frac{erfc\left(\sqrt{z\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_0}\right)}\right)}{\sqrt{1 + \frac{1}{\alpha \cdot \gamma_0}}} \right].$$
(9.1)

При нулевом пороге (z = 0), с учетом того, что erfc(0) = 1; $\Gamma(x,0) = \Gamma(x)$ и для целых $M \Gamma(M) = (M-1)!$, получим также частный случай выражения (9), а именно выражение (9.2), описывающее вероятность ошибки разнесенного приема с когерентной модуляцией при оптимальном сложении ветвей разнесения в рэлеевском канале без прерывистой связи.

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{m + \frac{1}{2}} \cdot \gamma_{0}^{m} \cdot m!}$$
(9.2)

В случае, когда $z = k \cdot \gamma_0$, выражение (9) преобразуется к (10)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2} \cdot \left[erfc\sqrt{\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0}} - \frac{(M-1)!}{\Gamma(M,k)} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m + \frac{1}{2}\right), \left(\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0} + k\right)\right]}{\left(\alpha + \frac{1}{\gamma_{0}}\right)^{m + \frac{1}{2}} \cdot \gamma_{0}^{m} \cdot m!} \right].$$
(10)

В рассматриваемых условиях данные передаются только в наиболее благоприятные моменты, когда мгновенные значения ОСШ на входе приемника больше заданного уровня порога ($z = k\gamma_0$), порог (z) нормирован на γ_0 . Отношение времени передачи данных к общему времени сеанса связи определяет (3–3.4) коэффициент использования радиолинии ($\eta_M(z) = \eta_M(k\gamma_0)$). При этом очевидно, что с ростом M коэффициент использования радиолинии, а вместе с ним и скорость передачи данных возрастают.

Выражение (10) получено для случая неизменности энергии сигнала на входе приемника от уровня порога. В указанном случае в уравнении (4) нижний предел интегрирования (z) определён как $k \cdot \gamma_0$ при неизменности среднего значения ОСШ (γ_0). Для того чтобы передать весь массив данных только в наиболее благоприятные моменты, меньшие длительности общего сеанса связи, необходимо мгновенную скорость передачи данных увеличить обратно пропорционально коэффициенту использования радиоли-

нии
$$\left(\eta_M(z) = \eta(k \cdot \gamma_0) = \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}\right)$$
, длительность

бита при этом уменьшается и для обеспечения неизменности энергии бита на входе приемника целесообразно повысить мощность передатчика обратно пропорционально коэффициенту использования радиолинии. Другим способом фиксации энергии бита на входе приемника от уровня порога является неизменность мгновенной скорости передачи данных. Длительность бита, мощность передатчика и, соответственно, энергия бита остаются в указанном случае фиксированными, однако при этом снижается объём переданных данных прямо пропорционально коэффициенту использования радиолинии. В обоих случаях энергия бита сигнала на входе приемника и среднее значение ОСШ (γ_0) фиксированы при любом уровне порога и соответствуют энергии бита сигнала и среднему значению ОСШ без прерывистой связи.

При неизменной мощности передатчика от уровня порога вследствие увеличения мгновенной скорости передачи данных (уменьшении длины бита) пропорционально коэффициенту использования радиолинии энергия сигнала на входе приемника снижается прямо пропорционально коэффициенту использования радиолинии. Для этого случая в (4) нижний предел интегрирования

(z) определён как
$$k \cdot \gamma_0 \cdot \eta(k \cdot \gamma_0) = k \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}$$

среднее значение ОСШ может уменьшаться пропорционально коэффициенту использования радио-

линии $\gamma_0 \cdot \eta(k \cdot \gamma_0) = \gamma_0 \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}$. При этом выра-

жение (9) преобразуется к (11)

$$P_{M}(\gamma_{0}) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ erfc \sqrt{\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}} - \frac{(M-1)!}{\Gamma(M,k)} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m + \frac{1}{2}\right), \left(\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!} + k\right)\right]}{\sqrt{\left(\alpha + \frac{(M-1)!}{\gamma_{0} \cdot \Gamma(M,k)}\right)}} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}\right]^{m} \cdot m!} \right\}.$$
 (11)



Рисунок 1. Вероятности ошибок прерывистой/ без прерывистой связи с разнесенным приемом (*M*=4) в сравнении с вариантом одиночной (*M*=1) связи без прерываний



Вероятности ошибок для когерентного приема сигналов ФМ-2 / ФМ-4 в рэлеевском канале для прерывистой связи при уровне порога, равном среднему значению ОСШ (γ_0) при фиксированной энергии сигнала на входе приемника от уровня порога, при фиксированной мощности передатчика (пунктирная кривая) и без прерывистой связи, приведены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что различия в режимах прерывистого излучения при фиксированных энергии бита сигнала и мощности передатчика незначительны. Поэтому режим прерывистого излучения при неизменной мощности передатчика предпочтительнее, поскольку фиксация его параметров обеспечивает более надёжное длительное автономное функционирование передающего устройства, увеличивает вероятность его безотказной работы.

Аналогичная зависимость для комплексирования прерывистой связи в рэлеевском канале с разнесенным приемом при сложении ветвей разнесения по алгоритму автовыбора с некогерентной демодуляцией сигналов представлена в [12].

2. Оптимальный уровень порога

Представляет интерес расчет зависимости вероятности ошибок от нормированного уровня порога (*k*) при фиксированной мощности передатчика и увеличении скорости передачи данных (уменьшении длины бита) обратно пропорционально коэффициенту использования радиолинии (12)

r

В (12) γ_0 фиксировано. Оно соответствует среднему значению ОСШ без прерывистой связи. Реальное значение ОСШ на входе приемника может снижаться с уменьшением коэффициента использования радиолинии в соответствии с (3.4). Вероятности ошибок комплексирования прерывистой связи с разнесённым приёмом при оптимальном сложении ветвей разнесения с когерентной демодуляцией от нормированного уровня порога (*k*) при фиксированной мощности передатчика в соответствии с (12) представлены на рисунке 2 в сравнении с одиночной прерывистой связью с когерентной демодуляцией.

На рисунке 2 M – число ветвей разнесения. Красная кривая, соответствующая одиночной (M=1) прерывистой связи с когерентной демодуляцией, имеет высокую вероятность ошибок относительно вероятности ошибок комплексирования прерывистой связи со счетверённым (M=4) разнесенным приемом при оптимальном сложении ветвей разнесения с когерентной демодуляцией сигнала (синяя кривая).

Увеличение уровня порога обеспечивает более благоприятные условия передачи данных, поэтому, несмотря на снижение энергии сигнала с выхода передатчика, вследствие уменьшения длительности бита при фиксированной мощности, вероятность ошибки снижается. При дальнейшем возрастании уровня порога наступает баланс, когда благоприятные условия передачи данных уже не могут компенсировать снижение энергии бита,

$$P_{M}(k) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ erfc \sqrt{\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}} - \frac{(M-1)!}{\Gamma(M,k)!} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\Gamma\left[\left(m + \frac{1}{2}\right), \left(\alpha \cdot k \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!} + k\right)\right]}{\sqrt{\left(\alpha + \frac{(M-1)!}{\gamma_{0} \cdot \Gamma(M,k)}\right)!}} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \gamma_{0} \cdot \frac{\Gamma(M,k)}{(M-1)!}\right]^{m} \cdot m!} \right\}.$$
 (12)



Рисунок 2. Вероятности ошибок комплексирования прерывистой связи со счетверённым (*M*=4) разнесенным приемом и одиночной (*M*=1) прерывистой связи от кратности уровня порога (*k*) при фиксированной мощности передатчика

длительность которого все время снижается. При определенном значении уровня порога фиксируется оптимальное (минимальное) значение вероятности ошибки (рисунок 2). Дальнейшее увеличение уровня порога, несмотря на благоприятные условия передачи (при всё более высоких значениях ОСШ), в результате еще большего снижения энергии бита повышает вероятность ошибки вплоть до значения 0,5.

Заключение

1. Определены плотности распределения вероятностей ОСШ, вероятностей ошибок, коэффициента использования радиолинии при комплексировании прерывистой связи с разнесённым когерентным приёмом сигналов при оптимальном сложении ветвей разнесения.

2. Определён оптимальный по критерию минимизации вероятности ошибки уровень порога при комплексировании прерывистой связи с разнесённым когерентным приёмом сигналов при оптимальном сложении. Установлено, что при оптимальном уровне порога обеспечивается не только минимальная вероятность ошибочного приёма данных, но и снижается энергетический расход передатчика.

3. Режим прерывистого излучения при неизменной мощности передатчика предпочтительнее в сравнении с режимом прерывистого излучения при неизменной энергии бита, поскольку фиксация его параметров обеспечивает более надёжное

Список литературы

[1] Шубин В.И. Многогранность развития VSAT в России // Век качества. 2010. № 2. С. 48–50.

- [2] Нагирная А.В. Принципы развития глобального информационного пространства // Фундаментальные исследования. 2013/ № 6. С. 1462–1467.
- [3] Сергиенко А.Б. Цифровая связь. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.
- [4] Махарьян Н., Девкота Н. и Ким Б.В. Воздействие атмосферы на оптические передачи спутниковой связи в открытом космосе на линиях вверх и вниз // Прикладные науки. 2022. № 12. С. 1–17.
- [5] Парих Дж. и Джейн В. К. Исследование статистических моделей атмосферного канала для оптической линии связи в свободном пространстве. Технологический институт, НИРМА, Ахмедабад – 382481, 8–10 декабря 2011 г. С. 1–7.
- [6] Лохвицкий М. С., Сорокин А. С., Шорин О. А. Мобильная связь: стандарты, структура, алгоритмы, планирование. М.: Горячая линия-телеком, 2023.
- [7] Плужникова Е. Л., Разумейко Б. Г. Математический анализ. Интегральное исчисление. М.: МИСиС, 2011.
- [8] Холодова С. Е., Перегудин С. И. Специальные функции в задачах математической физики. Санкт-Петербург: ИТМО, 2012.
- [9] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов, М.: Лань, 2022.
- [10] Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Образовательные проекты, 2019.
- [11] Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В., Финк Л. М. Теория передачи сигналов. М: Радио и связь, 1986.
- [12] Андрианов И. М. Разработка алгоритмов повышения эффективности систем с ортогональным частотным уплотнением и прерывистой передачей данных. Дис... канд. техн. наук по спец. «Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах). Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2012.

длительное автономное функционирование передающего устройства, увеличивает вероятность его безотказной работы. При этом различия вероятностей ошибок в режимах прерывистого излучения при фиксированных энергии бита сигнала и мощности передатчика (рисунок 1) незначительны.

4. Применение режима комплексирования прерывистой связи с разнесённым когерентным приёмом сигналов при оптимальном сложении ветвей разнесения эффективно в том числе для систем квантового диапазона. Системы передачи данных указанного диапазона могут реализовать транзакции в более широкой полосе частот, относительно систем радиодиапазона, с высокой пропускной способностью (до 100 Гбит/с и выше) на линии радиосвязи «околоземный космический аппарат – наземная станция слежения».

Благодарность

Работа посвящается нашему соавтору Киселёву Игорю Георгиевичу, военному связисту, проработавшему значительную часть своей ратной жизни в ФГБУ «16 Центральный научноисследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И. Белова». Он внёс большой вклад в укрепление технологической и оборонной мощи нашей страны. Игоря Георгиевича не стало 27 декабря 2023 года. Светлая память о нём сохранится в наших сердцах.

INCREASING THE RELIABILITY AND SPEED OF DATA TRANSMISSION IN THE RAYLEIGH CHANNEL THROUGH THE USE OF COMBINING INTERMITTENT DATA TRANSMISSION WITH DIVERSITY RECEPTION WITH OPTIMAL ADDITION OF DIVERSITY BRANCHES

I. M. Andrianov, I. G. Kiselev, M. N. Andrianov

Astro Space Center P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow, The Russian Federation

24

The paper discusses a method for increasing the reliability of data transmission under conditions of Rayleigh signal fading using the modes of combining intermittent radiation and coherent diversity reception of phase-keyed signals with optimal addition. The main goal of the study is to increase the noise immunity of data trans-mission in the Rayleigh channel while keeping the transmitter power and data transmission rate constant. The study was carried out using the method of mathematical modeling in the MathCad (computer algebra system)/Matlab environments. The applicability of the method is shown not only for radio range systems, but also for quantum data transmission devices, in particular in the infrared range, operating under conditions of fluctuations of the tropospheric channel, on the communication line between a spacecraft and a ground tracking station. Main results of the work: the advantage of combining intermittent radiation and diversity reception of signals at a constant transmitter power is shown to increase the reliability of the functioning of autonomous systems; the dependence of the error probability on the threshold level is determined for a fixed transmitter power; an assessment was made of the optimal threshold level of the transmitting device based on the criterion of minimizing the probability of error; it has been shown that at an optimal threshold level, not only the minimum probability of erroneous data reception is ensured, but also the energy consumption of the transmitter is reduced.

Keywords: intermittent communication, integration, diversity reception, optimal addition, optimal threshold level.

References

- [1] Shubin V.I. The versatility of VSAT development in Russia // Century of quality, 2010, 2, pp. 48–50.
- [2] Nagirnaya A. V. Global information space: Pattern of development Fundamental Research Issue № 6 (part 6) in 2013, pp. 1462–1467.
- [3] Sergienko A. B. Digital Communications. St. Petersburg.: Electrotechnical University "LETI", 2012.
- [4] Maharjan N., Devkota N. and Kim B. W. Atmospheric Effects on Satellite–Ground Free Space Uplink and Downlink Optical Transmissions Appl. Sci. 2022, no 12, pp. 1–17.
- [5] Parikh J. and Jain V.K. Study on statistical models of atmospheric channel for FSO communication link in Int. Conf. on Eng.-(NUiCONE), (Nirma University), 2011, pp. 1–7.
- [6] Lokhvitskiy M. S., Sorokin A. S., Shorin O.A. Mobile Communications: standards, structure, algorithms, planning. Moscow, Telecom hotline, 2023.
- [7] Pluznikova E. L., Razumeyko B. G. Mathematical analysis. Integral calculus. Moscow: MISIS, 2011.
- [8] Kholodova S.E., Peregudin S.I. Special function in problem of mathematical physics. St. Petersburg. ITMO, 2012.
- [9] Bronstein I., Semendaev K. Handbook on mathematics for engineers and student of technical colleges. Moscow, Len Public House, 2022.
- [10] Vigodsky M. Ya. Handbook of higher mathematical. Moscow, Public House education projects, 2019.
- [11] Zuko A., Klovskiy D., Nazarov M., Fink L. Signal transmission theory. Moscow, Public House radio and communications, 1986.
- [12] Andrianov I. M. Development of algorithms for improving the efficiency of systems with orthogonal frequency multiplexing and intermittent data transmission. Dissertation for the degree of Ph.D. in spec. «System analysis, management and information processing (in the field of technical knowledge). Radio engineering including systems and television devices», MSTU named after N.E. Bauman, Moscow, 2012.

И.М. Андрианов, И.Г. Киселёв, М.Н. Андрианов

Повышение достоверности и скорости передачи данных в рэлеевском канале...

Сведения об авторах

Андрианов Иван Михайлович – кандидат технических наук, главный специалист Госкорпорации «Роскосмос». Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 году. Область научных интересов: беспроводные системы связи, шумоподобные системы связи, статистическая радиотехника, ортогональное частотное уплотнение сигналов.

Киселёв Игорь Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Окончил Военную академию связи им. С.М. Будённого в 1971 году. Область научных интересов: радиосвязь, статистическая радиотехника, теория и техника разнесённого приёма, повышение помехоустойчивости передачи сигналов в каналах со случайными полями.

Андрианов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Астрономического центра Физического института РАН. Окончил Рязанский радиотехнический институт (РРТИ) в 1980 году, аспирантуру при ИРЭ РАН в 2001 году. Область научных интересов: статистическая радиотехника, теория вероятностей, математическая статистика, обработка сигналов, передача и приём радиосигналов в случайных полях.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

УДК 621.453/.457 + 658.5.012.

ОСВОЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АО «ОКБ «ФАКЕЛ»

Е.А. Богданова, И.Ю. Пономарев, А.В. Наседкин

Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро «Факел» г. Калининград, Российская Федерация

На предприятии осваивается ряд технологий получения функциональных материалов для термокаталитических и стационарных плазменных двигателей. В статье описываются достижения в части разработки катализатора разложения гидразина с высокими физико-химическими характеристиками. Активность катализатора оценивали методом хемосорбции водорода, максимальные значения были получены в области 700-750 °C и составили более 1000 мкмоль/г. Механическая прочность гранул определена в результате динамических и статических испытаний: 0,5 % и 16 МПа соответственно. Площадь удельной поверхности по данным одноточечного метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) составила порядка 110 м²/г. В рамках выполнения работ по получению нового низкотемпературного эмиссионного материала методом твердофазного сплавления были получены образцы электридной формы майенита, проведены лабораторные испытания, результаты которых свидетельствуют о достижении эмиссионного тока до 1 мА, но на данный момент не достигнута длительная стабильная работа эмиттера. В рамках работы по отработке нанесения барьерного покрытия нитрида гафния были получены и исследованы опытные образцы покрытий на штатных деталях катодного узла. Покрытие характеризуется равномерностью по толщине, однородностью по цвету, высокой адгезией к деталям. В продолжение темы планируется проведение огневых испытаний в составе двигателя.

Ключевые слова: катализатор разложения гидразина, электрид на основе майенита, низкотемпературный эмиттер, покрытие нитрида гафния.

Введение

ОКБ «Факел» занимает лидирующие позиции в отрасли по разработке, изготовлению и поставке термокаталитических и стационарных плазменных двигателей для коррекции и ориентации космических аппаратов. Планомерное развитие двигателестроения, наращивание компетенций и стремление к высоким характеристикам изделий требуют освоения и внедрения перспективных технологий.

Целью работы является разработка технологий изготовления функциональных материалов термокаталитических двигателей: катализатора разложения топлива, для стационарных плазменных двигателей: низкотемпературного эмиссионного материала, альтернативного штатному барьерного покрытия.

1. Катализатор разложения гидразина с высокими физикохимическими свойствами

В термокаталитических двигателях, выпускаемых ОКБ «Факел», гидразин разлагается при контакте с катализатором с выделением тепловой энергии. Катализатор представляет собой диспергированный на гранулах пористого алюмооксидного носителя активный компонент – иридий, с массовой долей около 30–35 % [1, 2]. К катализатору предъявляется ряд требований по физикохимическим характеристикам, в том числе по химической активности, площади удельной поверхности, термической стабильности и динамической и статической механической прочности [3-5]. Требовалось разработать технологию, обеспечивающую выполнение требований.

Несколько опытных партий катализатора разложения гидразина были изготовлены с воспроизводимостью физико-химических характеристик

[🖂] catkuzmencko@yandex.ru

[©] Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

в соответствии с разработанной технологией методом многостадийной пропитки. Качественный состав носителя и полученного катализатора исследовали методом дифрактометрии, поверхность – методом сканирующей электронной микроскопии, площадь удельной поверхности – одноточечным методом БЭТ, анализ пористой структуры – методом Баррета-Джойнера-Халенды (ВЈН), химическую активность – методом термопрограммированного восстановления по хемосорбции водорода.

Механическую прочность гранул на раздавливание оценивали по значению усилия разрушения гранулы, отнесённому к площади. Унос массы в условиях истирания определяли на специальном стенде по стандарту ASTM D 4058–96 (Standard Test Method for Attrition and Abrasion of Catalysts and Catalyst Carriers) [6].

Общий внешний вид катализатора представлен на рисунке 1, вид поверхности гранул носителя и катализатора – на рисунке 2. В связи с тем, что форма гранул оказывает влияние на их механическую прочность, был выбран носитель сферической формы [7].

Фазовый состав катализатора был оценен по данным дифрактометрии (рисунок 3, 4): в части носителя катализатора определена фаза кубического оксида алюминия (по базе данных PDF2012: 00–001–1308), в части катализатора – кубической фазы иридия (03–065–1686). На дифрактограмме катализатора (рисунок 4) не наблюдаются фазы оксида алюминия, что может быть связано с нанометрической дисперсией активного компонента [8].

По данным исследований пористости (ВЈН) (рисунок 5) был определен средний диаметр пор катализатора и составил 9–10 нм, объем пор – примерно 0,3 см³/г, площадь, приходящаяся на стенки пор, – порядка 93 мл/г.

Площадь удельной поверхности носителя составляла 150 м²/г, после получения на его основе катализатора снизилась до 110 м²/г. Стойкость



Рисунок 1. Общий вид гранул катализатора разложения гидразина



Рисунок 2. Снимки сканирующего электронного микроскопа: а – поверхности носителя, б – поверхности катализатора



Рисунок 3. Дифрактограмма носителя катализатора



Рисунок 5. Данные порометрии катализатора разложения гидразина

к спеканию оценивали по изменению площади удельной поверхности носителя после выдержки при температуре 900 °C – значение уменьшилось примерно на 20 % (с учетом погрешности метода) и составило 86 м²/г.

Активность катализатора оценивали в температурном диапазоне от 150 до 1000 °С. Максимальное значение поглощения водорода образцом наблюдалось в области 734 °С и составляло 1135 мкмоль/г. При температурах от 500 до 900 °С хемосорбция катализатора по водороду составляла не менее 390 мкмоль/г.

Механическую прочность гранул оценивали как статическую, так и динамическую. При проведении испытаний на стенде по стандарту ASTM D 4058–96 был определен унос массы (динамическая механическая прочность), он составил 0,05 %. Механическая прочность (статическая) для партий катализатора составляла порядка 16 МПа, была определена как среднее значений усилия в момент разрушения, отнесенных к площади гранулы.

В результате была разработана технология изготовления катализатора с высокими физикохимическими свойствами, получены и исследованы опытные партии, успешно проведены приемосдаточные испытания термокаталитических двигателей с катализатором в составе камеры.

2. Низкотемпературный эмиссионный материал для катода стационарного плазменного двигателя

В настоящее время для катодов в стационарных плазменных двигателях (СПД) используют преимущественно эмиттеры из гексаборида лантана (рабочая температура 1400 °С) [9]. Достижение высокой температуры на эмиттере требует больших затрат электрической мощности при запуске СПД. Кроме того, более высокая температура требует применения тугоплавких материалов и более эффективных многослойных тепловых экранов. В процессе нагрева в конструкции такого катода возникают большие термические напряжения, которые при включении-выключении катода до 10000 циклов могут привести к возникновению трещин, потере герметичности и отказу.

На сегодняшний день проблема отсутствия маломощных катодов для СПД не позволяет использовать их в составе малых двигательных установок для микро- и наноспутников. Необходимость снижения рабочей температуры, затрат на изготовление, обеспечение свободы выбора материалов и допусков на конструкцию катода обусловливают необходимость получения перспективных материалов для катодов. На предприятии ведется разработка низкотемпературного эмиссионного материала на основе электридной формы майенита. В рамках проводимых работ образцы получали методом твердофазного сплавления оксидов кальция и алюминия в восстановительной среде [10, 11]. Механизм реакции, предположительно, следующий:

$$[Ca_{24}Al_{28}O_{64}]^{4+}(O^{2-})^2 + 2Me \rightleftharpoons$$

$$\rightleftharpoons [Ca_{24}Al_{28}O_{64}]^{4+}(e^{-})_4 + 2MeO.$$
[10]

Вакансии удалённых атомов кислорода занимают электроны, формирующие электронную проводимость полученного материала и определяют его эмиссионные свойства [11].

Полученный материал исследовали методом дифракции рентгеновских лучей для подтверждения требуемого фазового состава (рисунок 6): идентифицирована фаза кубического майенита (01–076–9899) [12]. сохранения функциональных свойств остаются неизвестными.

На предприятии планируется продолжение ведения работы в части разработки низкотемпературных эмиссионных материалов для маломощных катодов.

3. Барьерное покрытия нитрида гафния

На поверхность деталей для катодного узла СПД в ОКБ «Факел», которые контактируют с эмиттером из гексаборида лантана, наносят нитрид циркония по технологии газофазного осаждения для получения барьерного покрытия. Увеличение ресурса работы катодов и повышение мощности СПД требуют применения более стойких высокотемпературных покрытий.

На предприятии отрабатывается технология газофазного осаждения барьерных покрытий



Рисунок 6. Дифрактограмма полученного образца майенита

Для подтверждения эмиссионных свойств образцов материала была изготовлена специальная оснастка, представляющая собой катод, оснащенный нагревателем и термопарой, с посадочным местом для образца и анод, который электрически развязан от катода. Измерения проводились на вакуумном стенде при подаче ксенона. Оснастка помещалась в вакуумную камеру и подключалась к измерительной схеме стенда.

Работа начиналась при анодном напряжении порядка 100–150 В, при этом фиксировали различное значение эмиссионного тока для разных образцов и при разных включениях: от 0,3 мА до 1 мА. Несмотря на литературные данные о возможности запускать катод при температурах до 150 °C, на стенде на нагреватель подавали порядка 65 Вт, температура катода, при которой наблюдалась термоэлектронная эмиссия, составила 650–750 °C. Вследствие фазовых переходов или механического разрушения все испытанные образцы характеризовались потерей функциональных свойств [13, 14].

В ходе анализа проведённых измерений эмиссионного тока был сформирован вывод о нестабильной работе эмиттера при существующей схеме стенда. Тем не менее способы предотвращения или замедления фазовых переходов майенита для нитрида гафния в связи с тем, что температура плавления соединения, а, соответственно, и рабочая температура деталей с покрытием примерно на 300–350 °С выше нитрида циркония (в случае стехиометрического состава). В качестве исходного компонента применяли тетрахлорид гафния, который восстанавливали при высоких температурах в атмосфере водорода и осаждали на штатные детали [15, 16, 17]. Время осаждения было подобрано в соответствии с требованиями покрытий по толщине, а также в связи с учетом укрупнения зерна металла деталей, чтобы избежать ухудшения механических свойств.

В рамках работы были получены и исследованы опытные образцы деталей катодного узла СПД с барьерным покрытием. Поверхность образцов исследовали методами оптической и электронной микроскопии, толщину покрытия определили по данным металлографического анализа (рисунок 7, 8).

Топография поверхности характеризуется наличием фрагментированных участков, которые имеют разную ориентацию по плоскостям. Полученные образцы нитрида гафния равномерны по толщине покрытия, однородны по цвету, кроме того, экспериментально определена более высокая адгезия нитрида гафния в сравнении с нитридом циркония.





Рисунок 7. Изображения оптического микроскопа нитрида гафния: а – поверхности образца, б – толщина покрытия (металлография)



Рисунок 8. Изображение сканирующего электронного микроскопа покрытия нитрида гафния



Рисунок 9. Дифрактограмма покрытия нитрида гафния

По данным дифрактометрии было определено соответствие образцов покрытия требуемой фазе кубического нитрида гафния (01–070–2824) без примесей и посторонних фаз (рисунок 9).

Основными преимуществами покрытия нитрида гафния являются высокая температура плавления материала, технологичность, низкая токсичность исходного компонента. В процессе отработки технологии нанесения покрытия был выявлен недостаток – больший расход прекурсора.

В продолжение работы по теме планируется проведение испытаний катодного узла с деталями, покрытыми нитридом гафния в составе двигателя.

Заключение

В результате проведенных работ в части термокаталитических двигателей была разработана технология изготовления катализатора, обеспечивающая высокие физико-химические характеристики получаемого материала, в том числе химическую активность, селективность по температурам эксплуатации, высокие значения площади удельной поверхности и механической прочности. Планируется внедрение разработанной технологии в производственный цикл с последующим переходом по всей номенклатуре термокаталитиработанной технологии.

ала, который ожидается включить в конструкцию

упрощенного маломощного катода для ряда двига-

телей предприятия. Кроме того, для СПД с высо-

ким значением мощности планируется применять

функциональные покрытия нитрида гафния по от-

ческих двигателей на катализатор собственного производства.

В рамках работ по освоению технологий материалов для катода-компенсатора СПД получен задел для продолжения ведения работ по получению низкотемпературного эмиссионного матери-

Список литературы

- [1] Вучерер Э. Дж. и др. Улучшение и испытания катализатора S-405 // 49-я совместная конференция AIAA/ ASME/SAE/ASEE по движению. 2013. С. 4053.
- [2] Гайдей Т.П.и др. Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах. Санкт-Петербург: Политехника. 2019. С. 46–52.
- [3] Джанг И. Дж. и др. Иридиевый катализатор на основе макропористо-мезопористого оксида алюминия для разложения гидразина // Катализ сегодня. 2012. Т. 185. № 1. С. 198–204.
- [4] Хван К. Х. и др. Влияние разрушения слоя катализатора на термохимические явления в гидразиновом двигателе с использованием катализаторов Ir/Al2O3 // Исследования в области промышленной и инженерной химии. 2012. № 15. С. 5382–5393.
- [5] Гото Д. и др. Результаты испытаний на стойкость гидразинового двигателя на 1 Н // 47-я совместная конференция и выставка AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям. 2011. С. 5772.
- [6] Стандарт А. D 4058–96, 2001. Стандартный метод испытаний на истирание катализаторов и носителей катализаторов, Международный стандарт ASTM // Западный Коншохокен, Пенсильвания. 2000. Т. 19.
- [7] Исмагилов З. Р.и др. Алюмооксидные носители: производство, свойства и применение в каталитических процессах защиты окружающей среды // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 1998. № 50. С. 1–80.
- [8] Пакдехи С. Г., Расулзаде М. Сравнение каталитических свойств нанокатализаторов иридия и никеля при разложении гидразина // Процессы материаловедения. 2015. Т. 11. С. 749–753.
- [9] Лев Д. Р. и др. Последние достижения в исследованиях и разработке полых катодов для электродвигателей // Обзоры современной физики плазмы. 2019. Т. 3. С. 1–89.
- [10] Ким С.В. и др. Синтез стабильного при комнатной температуре электрида 12CaO·7Al₂O₃ из расплава и его применение в качестве эмиттера электрического поля // Химия материалов. 2006. Т. 18. № 7. С. 1938–1944.
- [11] Рэнд Л.П., Уильямс Дж.Д. Эмиттер полого катода из алюмината кальция // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Т. 43. № 1. С. 190–194.
- [12] Хан К. и др. Простой синтез композита, легированного катионами [Ca24Al28O64] 4+(4e-), с помощью цитратного золь-гель метода // Труды Дальтона. 2018. Т. 47. № 11. С. 3819–3830.
- [13] Дробный С. и др. Подробные измерения рабочих функций и разработка полого катода с использованием эмиссионного материала – электрида С12А7 // Материалы конференции по космическому движению, Севилья, 14–18 мая 2018 г.
- [14] Макдональд М.С., Карузо Н.Р.С. Инжекция и начальные эксплуатационные характеристики слаботочного полого катода C12A7 // 35-я Международная конференция по электрическим двигателям (IEPC), Атланта, США, 8–12 октября 2017 г.
- [15] Юнг Ю. М. и др. Измерение давления в точке образования пузырьков смеси тетрахлорида циркония и гафния для процесса очистки тетрахлорида циркония //Международный журнал химической инженерии и приложений. 2012. Т. 3. № 6. С. 427.
- [16] Окамото Х. Система Hf-N (гафний-азот) // Бюллетень фазовых диаграмм сплавов. 1990. Том 11. № 2. С. 146– 149.
- [17] Ма Ю. и др. Усовершенствованные неорганические нитридные наноматериалы для возобновляемой энергетики: мини-обзор методов синтеза // Рубежи в химии. 2021. Т. 9.

31

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF PROMISING TECHNOLOGIES IN JSC EDB FAKEL

E.A. Bogdanova, I.Y. Ponomarev, A.V. Nasedkin

JSC «EDB «Fakel» Kaliningrad, The Russian Federation

The enterprise is mastering a number of technologies for obtaining functional materials for monopropellant thruster and Hall-effect thruster. The article describes advances in the development of a catalyst for the decomposition of hydrazine with high physicochemical characteristics. The activity of the catalyst assessed by chemisorption H₂. The maximum values obtained in the range of 700–750 °C and amounted to more than 1000 µmol/g. The mechanical strength of the granules determined as a result of dynamic and static tests: 0.5 % and 16 MPa. The specific surface area according to the BET method was about 110 m²/g. As part of the work on a new low-temperature emissive material, samples of electrides mayenite obtained by solidphase synthesis. The results of laboratory tests indicate that the emission current has reached 1 mA, but at the moment long-term stable operation of the emitter has not been achieved. As part of the work on testing the application of a hafnium nitride barrier coating, prototypes of coatings on standard parts of the cathode assembly obtained and investigated. The coating is characterized by uniform thickness and color, and high adhesion to substrate. In continuation of the work, it is planned to conduct fire tests as part of the engine.

Keywords: hydrazine decomposition catalyst, mayenite electride, low temperature emitter, hafnium nitride coating.

References

- Wucherer E. J. et al. Improving and Testing S-405 Catalyst // 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013, pp. 4053.
- [2] Gaydey T.P. et al. Catalysts for decomposition of single-component fuels and products based on them used in engineering. // Saint Petersburg: JSC Publishing house Politehknika, 2019, pp. 46–52.
- [3] Jang I. J. et al. Macroporous-mesoporous alumina supported iridium catalyst for hydrazine decomposition // Catalysis today, 2012, vol. 185, no. 1, pp. 198–204.
- [4] Hwang C. H. et al. Effects of catalyst bed failure on thermochemical phenomena for a hydrazine monopropellant thruster using Ir/Al₂O₃ catalysts // Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, no. 15, pp. 5382–5393.
- [5] Goto D. et al. Endurance firing test results of the long life 1N hydrazine thruster // 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, pp. 5772.
- [6] Standard A. D 4058–96, 2001. Standard Test Method for Attrition and Abrasion of Catalysts and Catalyst Carriers, ASTM Int'l // West Conshohoken, PA. Viewed on Feb, 2009, vol. 19.
- [7] Ismagilov Z. R. et al. Aluminum oxide supports: production, properties and application in catalytic processes for environmental protection // Ecology. A series of analytical reviews of world literature, 1998, no. 50, pp. 1–80.
- [8] Pakdehi S. G., Rasoolzadeh M. Comparison of catalytic behavior of iridium and nickel nanocatalysts for decomposition of hydrazine // Procedia Materials Science, 2015, vol. 11, pp. 749–753.
- [9] Lev D. R. et al. Recent progress in research and development of hollow cathodes for electric propulsion // Reviews of Modern Plasma Physics, 2019, vol. 3, pp. 1–89.
- [10] Kim S. W. et al. Synthesis of a room temperature stable 12CaO·7Al₂O₃ electride from the melt and its application as an electron field emitter // Chemistry of materials, 2006, vol. 18, no. 7, pp. 1938–1944.
- [11] Rand L. P., Williams J. D. A calcium aluminate electride hollow cathode // IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, vol. 43, vol. 1, pp. 190–194.
- [12] Khan K. et al. Facile synthesis of a cationic-doped [Ca24Al28O64] 4+(4e-) composite via a rapid citrate sol-gel method // Dalton Transactions, 2018, vol. 47, no. 11, pp. 3819–3830.
- [13] Drobny C. et al. Detailed Work Function Measurements and Development of a Hollow Cathode using the Emitter Material C12A7 Electride // Proceedings of the Space Propulsion Conference, Sevilla, May 14–18. 2018.
- [14] McDonald M. S., Caruso N.R.S. Ignition and early operating characteristics of a low-current C 12A7 hollow cathode // 35th International Electric Propulsion Conference (IEPC), Atlanta USA, Oct 8–12. 2017.

- [15] Jung Y. M. et al. Measurement of bubble point pressures of zirconium and hafnium tetrachloride mixture for zirconium tetrachloride purification process // International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2012, vol. 3, no. 6, pp. 427.
- [16] Okamoto H. The Hf-N (hafnium-nitrogen) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1990, vol. 11, no. 2, pp. 146– 149.
- [17] Ma Y. et al. Advanced inorganic nitride nanomaterials for renewable energy: a mini review of synthesis methods // Frontiers in Chemistry, 2021, vol. 9.

Сведения об авторах

Богданова Екатерина Александровна – инженер-технолог, сектор перспективных технологий АО «ОКБ «Факел». Окончила БФУ им. И. Канта по направлению «Химия» (бакалавриат) в 2020 году, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Материаловедение и технологии материалов» (магистратура) в 2022 году. Область научных интересов: прикладное материаловедение, функциональные материалы.

Пономарев Игорь Юрьевич – начальник сектора перспективных технологий АО «ОКБ «Факел». Окончил Киевский политехнический институт по специальности «Химическая технология и инженерия». Область научных интересов: прикладное материаловедение, функциональные покрытия, автоматизация технологических процессов.

Наседкин Алексей Васильевич – кандидат технических наук, главный инженер АО «ОКБ «Факел». Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» в 2011 году. Область научных интересов: прикладное материаловедение, машиностроение в ракетно-космической отрасли, внедрение и оптимизация технологических процессов, технологический менеджмент.

УДК 629.78, 520.272.22

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

П.В. Белоусов[⋈], Ю.Б. Томилина, В.А. Дидык, А.А. Пухов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В конструкции крупногабаритных рефлекторов зонтичного типа для создания рабочей поверхности используется формообразующая структура. Формообразующая структура в раскрытом положении представляет собой систему натянутых нитей. На формообразующую структуру этапа изготовления оказывают воздействие внешние факторы, которые приводят к деградации шнуров. Возникающие деформации формообразующей структуры оказывают влияние на стабильность геометрических параметров, к которым предъявляются жесткие требования [1]. С точки зрения сокращения трудоемкости изготовление арок формообразующей структуры с элементами системы укладки целесообразно проводить на фрагменте формообразующей структуры – арочной системе. Алгоритм нового прикладного метода включает этапы монтажа и прочностных испытаний арок на специально разработанном стандартизированном оборудовании. Большой практический интерес представляет задача применения данной технологии и проведения подобных исследований путем разработки специальной технологической оснастки. В статье сформулированы требования к оснастке (СТО) и произведен расчет трудоемкости. Авторами предложена оригинальная конструкция технологической оснастки, разработана новая методика сборки рабочей поверхности крупногабаритного рефлектора, которая позволяет существенно сократить затраты на изготовление рефлектора. На текущий момент разработанная методика, выдержав все циклы испытаний и подтвердив свою работоспособность, ожидает практического внедрения в процесс изготовления рабочей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора.

Ключевые слова: трансформируемый рефлектор, зонтичный рефлектор, формообразующая структура, технологическая оснастка, метод.

Введение

В настоящее время, учитывая высокую интенсивность развития информационных и спутниковых технологий, возросла необходимость создания крупногабаритных трансформируемых рефлекторов (КТР) с высокой точностью отражающей поверхности с целью улучшения качества сигнала спутниковой связи, а также увеличения объемов передаваемой информации.

Для формирования отражающей поверхности с требуемой точностью в таких рефлекторах используется формообразующая структура (ФОС), в раскрытом положении представляющая собой системы размеростабильных нитей и шнуров [2, 3]. На рисунке 1 представлен общий вид конструкции КТР.

На шнуры формообразующей структуры в процессе изготовления рефлектора воздействуют различные внешние факторы, которые приводят к изменению геометрии ФОС, что в конечном итоге влияет на радиотехнические параметры [4].

Вопрос стабильности геометрических размеров ФОС на этапе изготовления имеет значимый характер как со стороны экономических показателей, так и прочностных характеристик конструкции.

1. Постановка задачи

Цель работы заключается в разработке новой методики, алгоритма и реализующего их технологического оснащения для создания рабочей

Rerf1@mail.ru

[©] Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

П.В. Белоусов, Ю.Б. Томилина, В.А. Дидык, А.А. Пухов

Разработка нового метода создания рабочей поверхности крупногабаритного трансформируемого...

поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора, которые, в свою очередь, должны сократить трудоемкость и улучшить основные конструктивные параметры при изготовлении КТР.

Практическое внедрение и опробование новой методики создания рабочей поверхности на фрагменте сектора ФОС должно поспособствовать усовершенствованию технологии изготовления крупногабаритного трансформируемого рефлектора в части оптимизации изготовления формообразующей структуры. На рисунке 2 представлен фрагмент конструкции сектора ФОС [5].

2. Описание метода создания рабочей поверхности КТР

К крупногабаритным трансформируемым рефлекторам зонтичного типа предъявляют повышенные требования по жесткости конструкции, стабильности ФОС и отсутствию колебаний, обусловленные необходимостью ориентации антенны и обеспечением высокой точности радиоотражающего сетеполотна [6, 7].

В настоящее время работы по изготовлению ФОС ведутся на рабочем месте замкнутого типа, что подразумевает монтаж арок тыльной ФОС непосредственно на силовые спицы. В процессе изготовления ФОС на арки необходимо смонтировать дополнительно систему укладки, в состав которой входят кольца и мишурная нить. После завершения монтажа ФОС на силовой каркас возникает необходимость в проведении статических испытаний по нагружению и выдержке конструкции – опрессовки.

Данный вид работ занимает значительный промежуток времени относительно общего временного ресурса, отведенного на изготовление КТР, и требует задействования большого количества специалистов для монтажа. В таблице 1 приведены основные параметры трудозатрат.

После каждого вида монтажа необходимо проводить работы по проверке геометрических параметров поверхности ФОС и регулировке



Рисунок 1. Общий вид крупногабаритного трансформируемого рефлектора



Рисунок 2. Конструкция сектора формообразующей структуры трансформируемого зонтичного рефлектора

ОСМИЧЕСКИЕ Аппараты и

Таблица 1

Основные параметры при изготовлении арочной системы ФОС

N⁰	Наименование работ	Затраченное время
1	Монтаж оттяжек с креплением мишурной нитью	6 н/ч
2	Монтаж системы укладки с креплением мишурной нитью	16 н/ч*
3	Проведение опрессовки после всех видов монтажей	0,4 н/ч
4	Регулировка элементов рабочей поверхности	до 48 н/ч
	Итого	22,4 н/ч

*при монтаже системы укладки на рабочем месте работы необходимо выполнять двумя исполнителями, во избежание перегибов шнура

по контрольным точкам в случае отклонения значений.

Измерения выполняются с использованием лазерной координатно-измерительной системы (лазерный радар), предназначенной для измерения координат контролируемых точек на формообразующей поверхности рефлектора [8].

На рисунке 3 приведены данные по изменению СКО при монтаже системы укладки (до проведения монтажа и после) [9, 10].

Из данных, полученных аналитическим путем и представленных на рисунке 3, следует, что при непосредственном монтаже арочной системы на силовые спицы среднеквадратичное отклонение приобретает значения, существенно отличающиеся от ранее полученных данных при измерении геометрии поверхности ФОС. Вследствие обработки результатов измерений и полученных данных возникает задача по регулировке профиля рабочей поверхности, которая может занять до б рабочих дней.

Также не стоит пренебрегать фактором усталости шнуров ФОС, возникающим из-за многочисленных внешних воздействий при монтаже (перегибания). На рисунке 4 приведены примеры деградации шнуров.

На данных деформированных образцах (рисунок 4) был проведен ряд эмпирических исследований на предмет изменения прочностных характеристик шнуров в процессе нагружения конструкции.

Определение разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве проводилось по ГОСТ 2552 и ГОСТ 16218.5. Испытания проводили на универсальных машинах Instron 5965 и Instron 5982 с записью диаграмм «нагрузкадеформация». Скорость движения подвижного зажима – 100мм/мин. Начальная длина образца – длина рабочего участка без учета концов, зажатых в зажим. Расчёт относительного удлинения при разрыве (ε) проводили по формуле [11]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} * 100\%$$

где Δl – абсолютное удлинение при разрыве, мм; l_0 – начальная длина образца, 300 мм.

Испытания проводились на образцах в исходном состоянии в нормальных условиях при температуре (23±2) °С.



Рисунок 3. Данные по отклонениям рабочей поверхности до монтажа системы укладки и после

П.В. Белоусов, Ю.Б. Томилина, В.А. Дидык, А.А. Пухов

Разработка нового метода создания рабочей поверхности крупногабаритного трансформируемого...







Рисунок 4. Примеры перегибов на шнурах

Таблица 2

Разрывная нагрузка и относительное удлинение при разрыве образцов шнура

№ образца	Нагрузка, кгс	Деформация, %	Характер разрушения
1	12,83	1,25	
2	16,74	1,47	полное разрушение в месте дефекта
3	23,33	2,05	Полное разрушение в рабочей зоне в месте завязывания шнура в узел на бирке
4	23,76	1,79	Полное разрушение в рабочей зоне

Полученные данные по одному из проведенных экспериментов представлены в таблице 2.

Из анализа полученных результатов следует, что приложенные к опытным образцам силы, приводящие их к напряженно-деформированному состоянию, существенно снижают прочностные характеристики шнуров в местах перегиба.

С целью оптимизации процесса и предотвращения изломов (перегибов) шнуров предлагается монтаж арок тыльной ФОС проводить не на рабочем месте, непосредственно воздействуя на ФОС, а разработать специализированную оснастку. На данном СТО будут проведены монтажные работы по сборке арок тыльной ФОС, включая установку оттяжек, мишурной нити, колец системы укладки и проведение испытаний по опрессовке конструкции.

Для реализации предложенного решения на этапе проектирования была разработана 3D-модель технологической оснастки, представленная на рисунке 5. В данной конструкции в узлах крепления (3) воспроизведена фиксация тыльного арочного шнура (2) за жесткие спицы силового каркаса, положение которых остается постоянным даже при изменении усилия натяже-

ния тыльного шнура. Для исключения возможности проскальзывания шнуров в местах заделки был установлен коуш (4), формирующий петлю с плавным изгибом. В местах свободных концов оттяжек (1) установили груз массой 0,3 кгс, имитирующий нагружение тыльной ФОС. После завершения этапа сборки сегмента ФОС проводятся статические испытания (опрессовка), где концы оттяжек (1) послужат точкой приложения силы.

3. Изготовление опытного образца и расчет экономических затрат

Для проверки правильности принятых конструктивных решений был изготовлен опытный образец, представленный на рисунке 6. На данном образце был поставлен ряд экспериментов, на основании которых были проведены расчеты и получены аналитические данные.

Для наглядного представления результатов исследования приведена таблица 3, в которой дан сравнительный анализ затраченного времени на изготовление и испытание арочного фрагмента ФОС при условии использования опытного образ-



Рисунок 5. 3D-модель оснастки: 1 – свободные концы оттяжек, 2 – арочный шнур, 3 – узел крепления тыльного шнура, 4 – коуш



Рисунок 6. Изготовленный опытный образец: 1 – технологическая оснастка, 2 – арочная система

Таблица 3

Основные параметры при изготовлении арочной системы

Nº	Наименование работ	Затраченное время с технологической оснасткой	Затраченное время без технологической оснастки
1	Монтаж оттяжек с креплением мишурной ни- тью	4 н/ч	6 н/ч
2	Монтаж системы укладки с креплением ми- шурной нитью	4 н/ч	16 н/ч*
3	Опрессовка после всех монтажей	0,2 н/ч	0,4 н/ч
4	Регулировка рабочей поверхности	нет необходимости	до 48 н/ч
	Итого	8,2 н/ч	22,4 н/ч

*при монтаже системы укладки на рабочем месте работы необходимо выполнять двумя исполнителями, во избежание перегибов шнура

ца оснастки на рабочем месте сборки КТР одним исполнителем.

часов. В конечном итоге мы получаем разницу по времени в 3 раза.

Как видно из таблицы 3, время, затраченное одним исполнителем на монтаж одной арки с помощью оснастки, уменьшается в 2,5 раза в сравнении с используемой в настоящий момент технологией. Также к критерию оптимизации производственного процесса относится и время, затраченное на регулировку поверхности ФОС. Расчетное время, при условии выполнения операции шестью исполнителями в течение 5 дней, составляет дополнительно как минимум 48 нормо- приводит к уменьшению деградации шнуров.

В перерасчете на общее число арок тыльной формообразующей структуры крупногабаритного трансформируемого рефлектора мы имеем эффективную экономию времени, сокращение трудоемкости производственного процесса и, как следствие, экономических затрат. При этом к минимуму сводятся механические воздействия на шнуры, что, в свою очередь, положительно влияет на стабильность геометрических параметров и в перспективе

Разработка нового метода создания рабочей поверхности крупногабаритного трансформируемого...

Заключение

В статье выполнен обзор применяемой на данный момент технологии изготовления ФОС крупногабаритного трансформируемого рефлектора, в качестве оптимизации процесса рассмотрен новый метод создания рабочей поверхности КТР. В ходе решения поставленной задачи разработана 3D-модель оснастки, на основе которой был изготовлен опытный образец. Продемонстрировано использование изготовленного макета оснастки для обеспечения сборки отдельной арочной системы, который успешно прошел опробование при изготовлении тыльной ФОС. Проведен анализ результатов экспериментов по влиянию перегибов шнуров на структуру и требуемые параметры конструкции, аналитически подтверждена правильность метода и рассчитана его относительная трудоемкость, что свидетельствует о рациональности применения данной технологии изготовления.

Список литературы

- [1] Пономарев С.В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4(16). С. 110–119.
- [2] Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 38.
- [3] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012, 744 p.
- [4] Возов В. В., Шендалев Д. О., Черкашина Е. К., Шальков В. В. Разработка формообразующей структуры с треугольными фацетами для крупногабаритного трансформируемого рефлектора // Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. 2011. Ч. 1. С. 50–51.
- [5] Голдобин Н.Н. Особенности проектирования формообразующей структуры крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Молодежь. Техника. Космос: / БГТУ «Военмех». СПб. 2014. С. 61–64.
- [6] Шендалёв Д.О. Проектирование формообразующей структуры раскрываемой антенны // Решетневские чтения: материалы XIII Междунар. науч. конф. (10–12 нояб. 2009, г. Красноярск): в 2 ч.; под общ. ред. Ю.Ю. Логинова / Сиб. гос. аэрокосмический ун-т. Красноярск. 2009. Ч. 1. С. 96.
- [7] Голдобин Н.Н., Тестоедов Н.А. Алгоритм построения периферийного шнура фронтальной сети для трансформируемого сетчатого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 100–106.
- [8] Гришанов В. Н., Ойнонен А. А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного университета. 2012. № 1(32). С. 24–35.
- [9] Шевчугов В.О., Шальков В.В. Разработка параметрической модели фронтальной сети формообразующей структуры рефлектора с трапецеидальной формой фацет // Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. 2018. Ч. 1. С. 185–188.
- [10] Голдобин Н. Н. Методика оценки формы радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 106–111.
- [11] Кабанов С.А., Емельянов В.Ю., Митин Ф.В. Оптимизация динамики системы создания формы крупногабаритных трансформированных антенн космического базирования // Вопросы радиоэлектроники. 2016. Серия ОТ. Вып. 8. С. 48.

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR CREATING THE WORKING SURFACE OF A LARGE-SIZED TRANSFORMABLE REFLECTOR

P.V. Belousov, Y.B. Tomilina, V.A. Didik, A.A. Puhov

JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite System» Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, The Russian Federation

In the design of large-sized umbrella-type reflectors, a form-building structure is used to create the working surface. The form-building structure in the open position is a system of tensioned threads. The formative structure of the manufacturing stage is influenced by external factors that lead to degradation of the cords. The resulting deformations of the formative structure affect the stability of the geometric parameters, which are subject to strict requirements [1]. From the point of view of reducing labor intensity, it is advisable to manufacture arches of the formative structure with elements of the laying system on a fragment of the formative structure – the arched system. The algorithm of the new applied method includes the stages of installation and strength testing of arches on specially designed standardized equipment. Of great practical interest is the task of applying this technology and conducting similar research through the development of special technological equipment. The article formulates the requirements for equipment (STO) and calculates the labor intensity. The authors proposed an original design of technological equipment, developed a new method for assembling the working surface of a largesized reflector, which can significantly reduce the cost of manufacturing the reflector. Currently, the developed methodology, having passed all test cycles and confirmed its performance, awaits practical implementation in the process of manufacturing the working surface of a large-sized transformable reflector.

Keywords: transformable reflector, umbrella reflector, form-building structure, technological equipment, method.

References

- Ponomarev S. V. Transformable reflectors of spacecraft antennas // Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics, 2011, no. 4(16), pp. 110–119.
- [2] Lopatin A. V., Rutkovskaya M.A. Review of the designs of modern transformable space antennas (part 1) // Bulletin of SibSAU, 2007, no. 2, pp. 38.
- [3] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012, 744 p.
- [4] Vozov V.V., Shendalev D.O., Cherkashina E.K., Shalkov V.V. Development of a form-building structure with triangular facets for a large-sized transformable reflector // Reshetnev Readings: materials of the XV International. scientific-practical Conf., 2011, Part 1, pp. 50–51.
- [5] Goldobin N.N. Features of designing the form-building structure of a large-sized transformable reflector of a spacecraft // Molodezh. Technique. Space: / BSTU "Voenmech". SPb, 2014, pp. 61–64.
- [6] Shendalev D.O. Design of the formative structure of the deployable antenna // Reshetnev Readings: materials of the XIII International. scientific conf. (November 10–12, 2009, Krasnoyarsk): at 2 o'clock; under general ed. Yu. Yu. Loginova / Sib. state Aerospace University Krasnoyarsk, 2009. Part 1, pp. 96.
- [7] Goldobin N. N., Testoyedov N. A. Algorithm for constructing a peripheral cord of a frontal network for a transformable mesh reflector of a spacecraft // Vestnik SibSAU, 2014, no. 2(54), pp. 100–106.
- [8] Grishanov V.N., Oinonen A.A. Modern laser measuring systems in the production cycle of space technology // Bulletin of Samara State University, 2012, no. 1(32), pp. 24–35.
- [9] Shevchugov V.O., Shalkov V.V. Development of a parametric model of the frontal network of the form-building structure of a reflector with a trapezoidal facet shape // Reshetnev Readings: materials of the XXII Intern. scientificpractical Conf., 2018, Part 1, pp. 185–188.
- [10] Goldobin N.N. Methodology for assessing the shape of the radio-reflecting surface of a large-sized transformable reflector of a spacecraft // Vestnik SibSAU, 2013, Issue 1(47), pp. 106–111.
- [11] Kabanov S.A., Emelyanov V. Yu., Mitin F.V. Optimization of the dynamics of the system for creating the shape of large-sized transformed space-based antennas // Questions of radio electronics, 2016. OT series. Issue 8, pp. 48.

П.В. Белоусов, Ю.Б. Томилина, В.А. Дидык, А.А. Пухов

Разработка нового метода создания рабочей поверхности крупногабаритного трансформируемого...

Сведения об авторах

Белоусов Павел Васильевич – мастер производственного участка КТР АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский федеральный государственный университет в 2018 году. Область научных интересов: механические устройства трансформируемых конструкций космических аппаратов.

Томилина Юлия Борисовна – инженер по качеству 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончила Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва в 2012 году. Область научных интересов: механические устройства трансформируемых конструкций космических аппаратов.

Дидык Виталий Александрович – мастер производственного участка КТР АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский университет систем управления и радиоэлектроники в 2019 году. Область научных интересов: механические устройства трансформируемых конструкций космических аппаратов.

Пухов Алексей Александрович – инженер 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва в 2021 году. Область научных интересов: анализ радиотехнических параметров космических аппаратов. УДК 629.7.05

МЕРЫ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПОМЕХ НА УРОВНЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.И. Горностаев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

При разработке интерфейсных модулей контроля температур, используемых в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов, важно правильно обосновать комплекс мер по обеспечению их помехоустойчивости, принимаемых на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и интерфейсного модуля контроля температур. Такое обоснование предполагает оценку эффективности возможных способов ослабления помех на каждом уровне проектирования. Статья посвящена рассмотрению мер по ослаблению помех на уровне проектирования интерфейсного модуля контроля температур, которые следует принимать для обеспечения требуемой помехоустойчивости интерфейсного модуля контроля температур в комплексе с мерами, принимаемыми на других уровнях проектирования. Показано, что для обеспечения требуемой помехоустойчивости на уровне проектирования интерфейсных модулей контроля температур необходимо предусмотреть обоснованные меры по ослаблению помех как в аналоговых устройствах, так и в цифровых устройствах. В обоих случаях возможно ослабление помех частично введением в устройства помехоподавляющих фильтров и частично использованием общей шины питания в качестве электростатического экрана. Кроме того, возможно дополнительное повышение точности измерений путем проведения на заданном интервале времени многократных измерений и усреднения полученных результатов измерений с помощью цифрового фильтра.

Ключевые слова: помехоустойчивость, ослабление помех, эквипотенциальная точка, экранирование, помехоподавляющий фильтр, многократные измерения, цифровой фильтр.

Введение

При разработке интерфейсных модулей контроля температур (ИМКТ) для измерительных приборов, реализуемых по магистрально-модульному принципу построения на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) с последовательным периферийным интерфейсом (ППИ) и используемых в составе измерительных систем на космических аппаратах (КА) различного назначения, возникает необходимость решения задач обеспечения помехоустойчивой работы ИМКТ на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и ИМКТ [1–3]. Как показано в [3], на функциональные устройства измерительного прибора, включающего в себя ИМКТ, ЦПМ, модуль питания (МП) и межмодульные интерфейсы, в условиях сложной электромагнитной обстановки (ЭМО) на КА воздействует следующая совокупность помех:

 внешние кондуктивные помехи в виде напряжений синфазных и дифференциальных составляющих помех во входных цепях МП и ЦПМ и во входных цепях каналов измерения ИМКТ;

 внутренние коммутационные помехи в МП
 в виде наведенных синфазных напряжений в цепях гальванической развязки между входными и выходными шинами источника вторичного электропитания (ИВЭП), вызванных переключением в ИВЭП мощных транзисторов;

[🖂] galiv@iss-reshetnev.ru

[©] Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

 – электромагнитные помехи в виде наведенных на внутренних цепях функциональных устройств напряжений и токов, возникающих под воздействием образующихся внутри экранирующих рамок модулей вторичных электромагнитных полей.

Все эти составляющие помех проникают различными путями в измерительный тракт ИМКТ и приводят к искажению результатов измерений.

Из проведенного в [3] анализа возможных мер по ослаблению помех на уровне проектирования измерительного прибора следует, что они направлены на ослабление помех в МП, ЦПМ и межмодульных интерфиксах с ИМКТ. Однако эти меры не обеспечивают ослабление дифференциальных и синфазных составляющих помех во входных цепях ИМКТ и ослабление наведенных помех во внутренних цепях ИМКТ, возникающих в результате образования внутри экранирующей рамки ИМКТ вторичного электромагнитного поля. Поэтому проблему обеспечения помехоустойчивости ИМКТ в составе измерительного прибора необходимо также решать принятием дополнительных мер по ослаблению помех на уровне проектирования ИМКТ.

Цель настоящей статьи – показать возможные меры по ослаблению проникающих в измерительный прибор помех, которые могут быть приняты для обеспечения помехоустойчивой работы ИМКТ на уровне проектирования ИМКТ.

1. Общие меры по ослаблению действующих на ИМКТ помех

При проектировании вариантов исполнения ИМКТ, реализуемых отдельно для трехпроводной и для четырехпроводной схем подключения термопреобразователей сопротивления (ТС), изначально учитывают, что на них распространяются общие меры по ослаблению помех, предусмотренные в рамках комплексной системы защиты для обеспечения стойкости бортовой аппаратуры (БА) на уровне проектирования измерительного прибора, в соответствии с которыми конструкция ИМКТ должна быть выполнена на основе унифицированной модульной рамки, обеспечивающей надежный электрический контакт со смежными элементами корпуса измерительного прибора по всему периметру соединения [3]. Проектирование ИМКТ ведут с учетом общих требований по защите от статического электричества в соответствии с ОСТ 92-1615-2013 [4].

Конструктивно рассматриваемый ИМКТ может быть исполнен в виде двухсторонней унифицированной модульной рамки (рисунок 1) с на-



Рисунок 1. Пример конструктивного исполнения ИМКТ для трехпроводной схемы подключения ТС



клеенными на каждой из сторон основания рамки печатными платами и размещенными на них компонентами электронных устройств.

Нижний край модульной рамки используют для образования посадочной стороны измерительного прибора. Со стороны, противоположной посадочной, на модульной рамке размещают соединители с экранирующим корпусом, которые используются для подключения бортовых кабелей. С торцевых сторон модульной рамки размещают соединители без экранирующего корпуса, которые используются для подключения межмодульных кабелей, и технологические соединители, которые применяются для тестового контроля при автономных испытаниях. Посадочные места на модульной рамке, которые предназначены для установки соединителей и не используются, для исключения проникновения электромагнитных помех через отверстия закрывают металлизированными пластинами.

Конструкция унифицированной модульной рамки позволяет обеспечить уравнивание электрических потенциалов стыкующихся в измерительном приборе всех модульных рамок и крышек путем их надежного соединения как между собой, так и с общими кронштейнами (эквипотенциальное соединение).

Такое конструктивное исполнение ИМКТ за счет образования в измерительном приборе непрерывной экранирующей оболочки обеспечивает эффективное ослабление проникающих в ИМКТ внешних электромагнитных помех в широком диапазоне частот. Однако при оценке опасности проникновения внешних электромагнитных помех в ИМКТ и определении необходимости принятия дополнительных мер по их ослаблению учитывают, что с увеличением частоты помехи эффективность общего экранирования уменьшается.

При разработке электрической схемы ИМКТ для защиты от воздействия электростатических разрядов (ЭСР) учитывают необходимость устанавливать во входных каскадах каналов измерения компоненты, ограничивающие напряжение или ток через интегральные микросхемы (в случаях, когда они не имеют собственной входной защиты и когда это технически возможно). В качестве таких компонентов могут быть использованы защитные диоды, резисторы и т.д. [5, 6].

При разработке печатных плат ИМКТ для исключения возможности возникновения ЭСР учитывают необходимость применения нанопроводящего диэлектрика, позволяющего защитить печатные узлы БА от внутренней электризации [7].

Следует отметить, что наличие в измерительном приборе непрерывной экранирующей оболочки и наличие в ИМКТ во входных каскадах каналов измерения защитных компонентов не препятствует проникновению в ИМКТ внешних кондуктивных помех, действующих как во входных цепях каналов измерения, так и в цепях интерфейсов питания аналоговых и цифровых устройств и интерфейса ППИ. Проникновение в ИМКТ помех по всем этим путям может быть опасным в широком диапазоне частот. В этом случае для оценки опасности проникновения помех в ИМКТ и определения необходимости принятия дополнительных мер по их ослаблению оценивают эффективность ослабления кондуктивных помех для каждого пути проникновения отдельно.

2. Аналитическая модель воздействия помех на ИМКТ

Для оценки эффективности принимаемых мер по ослаблению внешних электромагнитных и кондуктивных помех и определения необходимости принятия дополнительных мер по их ослаблению на уровне проектирования ИМКТ следует использовать полную аналитическую модель воздействия помех на ИМКТ. Однако в данной статье рассмотрим упрощенную аналитическую модель воздействия внешних электромагнитных и кондуктивных помех на ИМКТ (без подробной детализации элементов конструкции ИМКТ и без учета размещения с двух сторон ИМКТ рамок смежных модулей), приведенную на рисунке 2.

В такой модели анализу воздействия помех подвергаются многоканальная схема измерения (МСИ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство сбора цифровых данных (УСЦД) и контроллер интерфейса (КИ), синхронизация работы которых производится по сигналам управления СУ1 и СУ2, автоматически формируемым в каждом цикле измерений $T_{\rm ци}$ при запуске диаграммы опроса каналов измерений в процессе чтения цифровых данных из ИМКТ по интерфейсу ППИ [3].

Согласно приведенной на рисунке 2 упрощенной аналитической модели энергия электромагнитного поля, прикладываемая к корпусу рамки ИМКТ от внешних источников помех ($W_{\Pi, \mu M \kappa T}$), приводит к образованию во внутреннем пространстве рамки вторичного электромагнитного поля, энергия которого распределяется между аналоговыми ($W_{\Pi A}$) и цифровыми ($W_{\Pi G}$) устройствами ИМКТ. В результате вследствие электромагнитной индукции на внутренних цепях этих устройств (МСИ, АЦП, УСЦД, КИ) возникают напряжения и токи наведенных помех (на рисунке 2 не показаны). Эти помехи проникают в измерительный тракт ИМКТ и приводят не только к искажению формы аналогового сигнала на выходе МСИ (U_{MCH}), но и к нестабильности логических уровней цифровых сигналов на выходах АЦП (Данп) и УСЦД (D_{успл}), а также передаваемых через КИ по интерфейсу ППИ.

Меры по ослаблению помех на уровне проектирования интерфейсного модуля...



Рисунок 2. Упрощенная аналитическая модель воздействия помех на ИМКТ

Кроме того, на ИМКТ воздействуют внешние кондуктивные помехи:

- во входных цепях МСИ дифференциальные помехи U_{дп2} в каждом из N каналов измерений между сигнальными цепями U₊ и U₋, синфазные помехи U_{cn2} между общей шиной питания 0V и корпусом рамки и синфазные помехи U_{сп3} в каждом из N каналов измерений между сигнальной цепью U_{-} и общей шиной питания 0V;

 в цепях питания аналоговых устройств дифференциальные помехи Uдпинами питания $\pm A$ и AND и синфазные помехи U_{cnA} между шиной питания AND и корпусом рамки;

 в цепях питания цифровых устройств дифференциальные помехи U_{дп+D} между шинами питания +D и GND и синфазные помехи U_{cnG} между шиной питания GND и корпусом рамки.

Для исключения в аналоговом и цифровом контурах протекания токов нагрузки общих участков, которые могут привести к взаимопроникновению помех из одного контура в другой, шины питания AND и GND объединяют в ИМКТ с общей шиной 0V в эквипотенциальной точке (ЭПТ) [3].

Поскольку в ИМКТ шины питания 0V, AND и GND объединены ЭПТ, синфазные помехи во входных цепях (U_{cn2}) и в цепях питания (U_{cnA} , U_{спG}), действующие относительно корпуса рамки, приводят к возникновению в ЭПТ суммарных синфазных помех U_{сп.эпт}, уровень напряжения которых можно оценить по расчетному соотношению (геометрическая сумма независимых случайных величин):

$$U_{\text{cn.эпт}} = \sqrt{U_{\text{cn2}}^2 + U_{\text{cnA}}^2 + U_{\text{cnG}}^2}$$

Суммарные синфазные помехи U_{сп.эпт} возникают в ЭПТ при протекании токов помех через емкость изоляции Сиз и сопротивление изоляции $R_{\rm H3}$ между общей шиной питания 0V и корпусом рамки и непосредственно воздействуют как на внутренние цепи МСИ через паразитные емкости С_{п.мси} этих цепей с основанием корпуса рамки, так и на внутренние цепи АЦП, УСЦД и КИ через соответствующие паразитные емкости этих цепей с основанием корпуса рамки (на рисунке 2 не показаны). Эти помехи представляют собой наибольшую опасность для ИМКТ при воздействии на внутренние цепи МСИ, так как в этом случае прохождение помех на вход АЦП происходит через усилительные каскады МСИ, что приводит к их усилению.

Значения параметров внешних электромагнитных и кондуктивных помех, действующих на ИМКТ, могут превышать допустимые нормы, при которых обеспечивается требуемая помехоустойчивость ИМКТ, поэтому для оценки опасности проникновения помех в ИМКТ и определения необходимости принятия дополнительных мер по их ослаблению оценивают:

 в случае воздействия электромагнитных помех эффективность экранирования отдельных устройств принятыми в ИМКТ конструктивными решениями;

– в случае воздействия кондуктивных помех эффективность мер по ослаблению в отдельных устройствах дифференциальных и синфазных составляющих помех принятыми в ИМКТ схемотехническими решениями.

Для оценки эффективности экранирования отдельных устройств в ИМКТ используют затухание экранирования А₂, характеризующее величину затухания, вносимого экраном, а для оценки эффективности мер по ослаблению в отдельных устройствах дифференциальных и синфазных составляющих помех используют вносимое затухание A_{ϕ} , характеризующее величину затухания, вносимого помехоподавляющим фильтром (ПФ), которые были рассмотрены для решения аналогичных задач в [3].

Для всех случаев воздействия на ИМКТ внешних электромагнитных и кондуктивных помех проводят анализ результатов оценки опасности



их проникновения в ИМКТ в заданных частотных и временных диапазонах. Если в ИМКТ изначально предусмотренные меры по экранированию электронных устройств ИМКТ от воздействия электромагнитных помех и по ослаблению дифференциальных и синфазных составляющих кондуктивных помех окажутся недостаточно эффективными, то должны быть приняты дополнительные меры по ослаблению помех на уровне проектирования ИМКТ.

3. Дополнительные меры по ослаблению помех на уровне проектирования ИМКТ

На уровне проектирования ИМКТ проводят обоснование необходимости принятия дополнительных мер (рисунок 2) по ослаблению электромагнитных помех, которые проникают в ИМКТ в результате образования во внутреннем пространстве рамки ИМКТ вторичного электромагнитного поля, энергия которого распределена между аналоговыми (W_{п.А}) и цифровыми (W_{п.G}) устройствами, и по ослаблению кондуктивных помех, которые проникают в ИМКТ через входные цепи МСИ $(U_{\rm дп2}, U_{\rm cn2}, U_{\rm cn3})$ и цепи питания аналоговых ($U_{\rm дп\pm A}$, U_{cnA}) и цифровых ($U_{дn+D}$, U_{cnG}) устройств. При этом такое обоснование для кондуктивных помех, которые проникают в КИ ИМКТ через цепи интерфейса ППИ, не проводят, так как оно проводится на уровне проектирования измерительного прибора [3].

В случае необходимости в качестве дополнительных мер по ослаблению помех на уровне проектирования ИМКТ рассматривают как конструктивные решения (использование общих шин питания аналоговых и цифровых устройств в качестве электростатических экранов), так и схемотехнические решения (использование в аналоговых и цифровых устройствах в цепях проникновения помех помехоподавляющих фильтров). Кроме того, в качестве дополнительной меры для повышения точности измерения рассматривают статистические методы обработки цифровых данных, применяемые при многократных измерениях (фильтрация цифровых данных на выходе АЦП).

Рассмотрим более подробно, какие могут быть приняты дополнительные меры по ослаблению электромагнитных и кондуктивных помех отдельно для аналоговых и цифровых устройств ИМКТ и каким образом может быть организована фильтрация цифровых данных на выходе АЦП.

3.1. Ослабление помех

в аналоговых устройствах ИМКТ

К основным аналоговым устройствам ИМКТ относятся (рисунок 3):

– схема опроса каналов (СОК), инструментальный усилитель (ИУ) и выходной усилитель (ВУ), которые образуют МСИ, обеспечивающую опрос контролируемых напряжений во входных сигнальных цепях U_+ , U_- в N каналах измерений, и во внутренних цепях эталонных мер M_H , M_B для нижней и верхней калибровочных точек и их усиление до уровня $U_{\rm мси}$ на выходе МСИ в заданных диапазонах измерения;

– аналоговая часть АЦП, обеспечивающая прием с выхода МСИ усиленного напряжения $U_{\text{мси}}$ для преобразования в цифровой код.

Синхронизация работы аналоговых устройств в ИМКТ (в СОК – выбор номера опрашиваемого канала измерения, в ВУ – изменение коэффициента усиления при переходе на другой диапазон измерения) производится по сигналам управления СУ2 из УСЦД, автоматически формируемым



Рисунок 3. Дополнительные меры по ослаблению помех, принимаемые для аналоговых устройств ИМКТ

в пределах заданного цикла измерений $T_{\rm ци}$ при инициализации диаграммы опроса каналов поступающими из КИ сигналами управления СУ1. Конструкция ТС, подключаемых ко входам МСИ, согласно техническим условиям на их применение, позволяет использовать их в цепях постоянного и переменного тока с частотой до 100 Гц, поэтому в пределах заданного цикла измерений $T_{\rm ци}$ время опроса канала $T_{\rm ок}$ ограничено значением не менее 10 мс [8].

Опрос контролируемых напряжений U_x в СОК (во входных сигнальных цепях U_+ , U_- в N каналах измерений и во внутренних цепях эталонных мер М_н, М_в для нижней и верхней калибровочных точек), возникающих при протекании генерируемого в СОК измерительного тока І_и через ТС или эталонные меры (на рисунке 3 не показано), производится в зависимости от схемы подключения ТС ко входам МСИ либо с помощью двух источников измерительного тока (в случае использования трехпроводной схемы подключения), либо с помощью одного источника измерительного тока (в случае использования четырехпроводной схемы подключения) [9]. В обоих случаях в результате опроса на выходе СОК формируется относительно опорного напряжения U_{оп}, соответствующего нижней границе диапазона измерения, дифференциальное напряжение $\Delta U_x = (U_x - U_{on})$, которое усиливается в ИУ до промежуточного уровня напряжения $U_{\mu\nu}$ и затем в ВУ до нормированного уровня напряжения $U_{\rm By} = U_{\rm MCH}$, определяемого диапазоном измерения и шкалой преобразования АЦП.

Как показано на рисунке 3, проникновение помех в аналоговые устройства ИМКТ происходит в результате воздействия:

 дифференциальной и синфазной составляющих помех U_{дп2} и U_{сп3} во входных цепях МСИ;

— дифференциальных помех $U_{\text{дп}\pm A}$ в цепях двухполярного питания аналоговых устройств;

- синфазных помех U_{сп.эпт} в ЭПТ;

– электромагнитных помех, вызванных энергией вторичного электромагнитного поля $W_{\text{п.A}}$, направленной на аналоговые устройства.

Дифференциальные и синфазные помехи $U_{дп2}$ и U_{cn3} во входных цепях МСИ, действующие в широком диапазоне частот, непосредственно проникают в усилительный тракт МСИ вместе с полезным сигналом и суммируются с ним. Прохождение этих помех через СОК, ИУ и ВУ, характеризуемые передаточными функциями $K_{cok}(p)$, $K_{Hy}(p)$, $K_{By}(p)$, которые определяют верхнюю граничную частоту $f_{B.мсн}$ полосы пропускания МСИ, приводит к изменению их уровня на входе АЦП в соответствии с общей передаточной функцией усилительного тракта МСИ

$$K_{_{
m MCH}}(p) = K_{_{
m COK}}(p)K_{_{
m Hy}}(p)K_{_{
m By}}(p),$$
где $p = j2\pi f_{_{
m II}}, f_{_{
m II}}$ – частота помехи.

Для ослабления дифференциальных помех $U_{дn2}$, действующих на входах каждого канала МСИ между сигнальными цепями U_+ и U_- , в качестве дополнительных мер возможно введение в структуру МСИ в цепях прохождения контролируемых сигналов через СОК, ИУ и ВУ соответствующих помехоподавляющих фильтров П Φ_1 , П Φ_2 и П Φ_3 , сужающих полосу пропускания МСИ.

Поскольку ширина полосы пропускания МСИ характеризуется верхней граничной частотой $f_{\rm в.мси}$, которая связана с постоянной времени МСИ $\tau_{\rm мсн}$ соотношением $f_{\rm в.мси} = 1/2\pi\tau_{\rm мси}$, для определения полосы пропускания МСИ рассчитывают необходимое значение постоянной времени $\tau_{\rm мси}$. Расчет производят исходя из условия обеспечения в пределах заданного времени опроса канала $T_{\rm ок}$ (рисунок 4) в момент времени $t_{\rm уст}$ своевременного установления переходных процессов в усиленном сигнале $U_{\rm мси}$ на выходе МСИ, после завершения которых на интервале времени $\Delta t_{\rm H3M} = T_{\rm ок} - t_{\rm уст}$ возможно произвести измерения с требуемой точностью.



Рисунок 4. Иллюстрация к расчету постоянной времени МСИ по заданному времени установления переходных процессов в контролируемом сигнале

Для обеспечения измерения с требуемой точностью при заданном времени установления переходных процессов t_{ycr} определяют допустимое значение отклонения Δ_{ycr} контролируемого сигнала от установившегося уровня U_{ycr} . При повышенных требованиях к точности измерения допустимое значение отклонения Δ_{ycr} уменьшают и в зависимости от этого рассчитывают необходимое значение постоянной времени $\tau_{мси}$ из граничного условия:

$$t_{\rm yct} = (5-7) \ \tau_{\rm mcu},$$

где $\tau_{\text{мси}} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}$, τ_1 , τ_2 , τ_3 – постоянные

времени помехоподавляющих фильтров $\Pi \Phi_1, \Pi \Phi_2$ и $\Pi \Phi_3$.

Однако введение помехоподавляющих фильтров $\Pi \Phi_1, \Pi \Phi_2$ и $\Pi \Phi_3$ только ограничивает спектр



проникающих на выход МСИ помех, но не решает проблемы ослабления низкочастотных составляющих помех, попадающих в полосу пропускания МСИ, от уровня которых будет зависеть значение случайной погрешности измерения. Основными компонентами случайной погрешности измерения, вызванной низкочастотными составляющими помех, являются естественные помехи от работающей БА и от ЭСР на КА, проникающие во входные цепи МСИ, и помехи, вызванные белым и розовым шумами, возникающие во входных цепях при протекании через ТС генерируемого в МСИ измерительного тока *I*_и.

Ослабление этих помех в пределах полосы пропускания МСИ вызывает определенные трудности, так как они проявляются при измерении напряжения $U_{\rm мси}$ на интервале времени $\Delta t_{\rm изм}$ в виде фиксированного случайного отклонения (смещения) от точного значения. Такое случайное отклонение напряжения $U_{\rm мси}$ на интервале времени $\Delta t_{\rm изм}$ может быть как положительным, так и отрицательным, и при однократном измерении может варьироваться в пределах уровня амплитуды помехи, поэтому случайная составляющая погрешности измерения в этом случае будет максимальной.

Тем не менее частично точность измерения напряжения U_{мси} возможно повысить без ослабления уровня помех на входе АЦП, если на интервале времени $\Delta t_{\mu_{3M}}$ проводить многократные измерения, а полученные с выхода АЦП цифровые данные о результатах измерений усреднять в цифровых устройствах ИМКТ, используя статистические методы обработки цифровых данных [10]. В этом случае, учитывая относительно медленную скорость изменения отклонения напряжения U_{мси} от точного значения, следует использовать функцию усреднения для коррелированных измерений, описываемую через передаточную функцию цифрового фильтра (ЦФ) [11]. Более подробно применение ЦФ в цифровых устройствах ИМКТ для усреднения результатов измерения будет рассмотрено ниже в отдельном подразделе.

Кроме того, помехи, вызванные белым и розовым шумами, могут быть дополнительно ослаблены принятием мер по повышению соотношения сигнал/шум на чувствительных элементах TC при заданном времени опроса канала $T_{\rm ок}$ путем выбора оптимального значения измерительного тока $I_{\rm u}$, а также мер по уменьшению фиксированного смещения дифференциального напряжения ΔU_x на входе ИУ в МСИ, возникающего вследствие присутствия на чувствительных элементах TC в области низких частот двух разновидностей розового шума – фликкер-шума (flicker noise) и шума, вызванного случайными скачками тока (рорсогп noise), путем применения метода стабилизации прерыванием [12].

Также важно отметить, что следует по возможности избегать подсоединения к входным цепям МСИ помимо самих ТС любых компонентов, поскольку они являются дополнительными источниками помех. Особо следует обратить внимание на использование фильтрующих конденсаторов для подавления высокочастотных помех. При неправильном выборе типа конденсаторов в цепях фильтрации помех можно столкнуться с неожиданными паразитными эффектами [13]. Например, при использовании керамических конденсаторов можно столкнуться с эффектом диэлектрической абсорбции (памяти), которая может привести к значительным ошибкам в результатах измерений. Если избежать использования конденсаторов во входных цепях невозможно, следует вместо керамических применять пленочные конденсаторы, в которых эффект памяти практически отсутствует.

Для ослабления синфазных помех U_{cn3} , действующих на входах каждого канала МСИ между сигнальной цепью U_{-} и общей шиной 0V, возможно дополнительные меры не принимать, так как выпускаемые электронной промышленностью микросхемы ИУ имеют очень большой коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС), типовое значение которого составляет не менее 106 (120 дБ) при установленном с помощью внешнего резистора коэффициенте усиления ИУ, равном 100. При таком значении КОСС воздействие синфазных помех U_{cn3} практически не оказывает влияния на уровень напряжения $U_{мсн}$ на выходе МСИ.

Дифференциальные помехи U_{дп±A} на шинах двухполярного питания МСИ, также действующие в широком диапазоне частот, проникают в усилительный тракт МСИ опосредованно через внутренние цепи питания аналоговых устройств (цепи питания отдельных компонентов в СОК, ИУ и ВУ) и могут быть опасны как в пределах полосы пропускания МСИ, так и за ее пределами. Если низкочастотные помехи, действующие в полосе пропускания МСИ, непосредственно приводят к фиксированному смещению напряжения на входе АЦП, то высокочастотные помехи, действующие за пределами полосы пропускания МСИ, при проникновении в усилительный тракт вследствие нелинейности характеристик диодов, транзисторов и микросхем, используемых в аналоговых устройствах, могут быть нежелательным образом выпрямлены и перенесены в область более низких частот, попадающих в полосу пропускания МСИ, и также привести к фиксированному смещению напряжения на входе АЦП.

Для ослабления дифференциальных помех $U_{\text{дп±A}}$, действующих в цепях двухполярного питания каждого аналогового устройства между шинами питания ±A и AND, в качестве дополнительных мер возможно введение в цепи шин питания общего помехоподавляющего LC-фильтра $\Pi \Phi_0$,

позволяющего понизить уровень помех на его выходе до уровня $U_{\text{одп}\pm A}$. При этом общий вывод помехоподавляющего *LC*-фильтра П Φ_0 следует подключать к общей шине питания 0V, образованной после объединения входных шин питания AND и GND в ЭПТ, что позволит дополнительно повысить эффективность ослабления помех.

Однако ослабление дифференциальных помех $U_{\text{дп±A}}$ возможно также путем использования фильтров или конденсаторов развязки на каждом активном аналоговом устройстве МСИ (на рисунке 3 не показано), подключаемых к шинам питания \pm А и AND как можно ближе к этим устройствам. Наибольший эффект от такой развязки может быть получен в первом звене активных аналоговых устройств – в СОК (в стабилизаторе опорного напряжения и источниках измерительного тока), так как в этом случае снижается уровень проникающих на выход СОК дифференциальных помех, подверженных усилению при дальнейшем их прохождении через ИУ и ВУ на выход МСИ.

Синфазные помехи $U_{\text{сп.элт}}$ в ЭПТ, также действующие в широком диапазоне частот, аналогично проникают в усилительный тракт МСИ опосредованно через внутренние сигнальные цепи аналоговых устройств (цепи элементов обвязки микросхем в СОК, ИУ и ВУ) и могут быть опасны как в пределах полосы пропускания МСИ, так и за ее пределами. И в этом случае высокочастотные помехи, действующие за пределами полосы пропускания МСИ, могут быть нежелательным образом выпрямлены и перенесены в область более низких частот, попадающих в полосу пропускания МСИ, и также привести к фиксированному смещению напряжения на входе АЦП.

Для ослабления синфазных помех U_{сп.эпт}, действующих в ЭПТ и проникающих в аналоговые устройства, в качестве дополнительной меры возможно подключение помехоподавляющего *RC*-фильтра (параллельное соединение высокоомного резистора $R_{n\phi}$ и высоковольтного конденсатора $C_{n\phi}$) между общей шиной питания 0V и корпусом рамки ИМКТ. Наличие в таком фильтре высокоомного резистора $R_{\rm nb}$ препятствует в процессе эксплуатации ИМКТ в составе измерительного прибора возникновению больших значений статической разности потенциалов между гальванически развязанными общей шиной питания 0V и корпусом рамки (плавающего потенциала), а наличие высоковольтного конденсатора С_{пф} позволяет обеспечить снижение уровня помех во внутренних цепях аналоговых устройств при больших значениях статической разности потенциалов.

Однако использование помехоподавляющего *RC*-фильтра между общей шиной питания 0V и корпусом рамки для ослабления помех в ЭПТ недостаточно эффективно, так как в широком диапазоне частот сохраняются условия для их проникновения во внутренние сигнальные цепи СОК, ИУ и ВУ через соответствующие паразитные емкости $C_{п.сок}$, $C_{п.ну}$ и $C_{п.ву}$, распределенные по площади основания корпуса рамки, между различными точками которого может возникнуть разность потенциалов (например, при воздействии прямых ЭСР, при которых за счет растекания токов разряда возникают наведенные напряжения на поверхности основания корпуса рамки). Кроме того, эффективность такого фильтра с понижением частоты помехи уменьшается.

Для ослабления помех, проникающих во внутренние сигнальные цепи аналоговых устройств со стороны основания корпуса рамки, эффективной дополнительной мерой в широком диапазоне частот может быть использование общей шины питания 0V в качестве электростатического экрана. Такой экран выполняют конструктивно в виде сплошного проводящего слоя (полигона) в многослойной печатной плате, который располагается (на рисунке 3 обозначен как Экран А) между верхними слоями платы с печатными проводниками внутренних цепей аналоговых устройств и нижним непроводящим слоем платы, который приклеивается к основанию корпуса рамки [14].

Также возможно ослабление помех, проникающих во внутренние сигнальные цепи СОК, ИУ и ВУ через паразитные емкости Сп.сок, Сп.иу и Сп. ву, путем исключения в области размещения аналоговых устройств МСИ проводящего основания корпуса рамки и замены его на основание из непроводящего материала. В этом случае эффект ослабления помех достигается уменьшением паразитных емкостей $C_{\text{п.сок}}, C_{\text{п.ну}}$ и $C_{\text{п.ву}}$ за счет пространственного удаления проводящего основания корпуса рамки. Однако этот способ ослабления помех конструктивно более сложен и менее эффективен, поэтому применяется редко. Кроме того, нарушение непрерывности экранирующей оболочки в проводящем основании корпуса рамки приводит к увеличению уровня электромагнитных помех, вызванных направленной на аналоговые устройства МСИ дополнительной энергией вторичного электромагнитного поля *W*_{п.А} из соседней области внутреннего пространства корпуса рамки.

Электромагнитные помехи, вызванные направленной на аналоговые устройства энергией вторичного электромагнитного поля $W_{n.A}$, также действуют в широком диапазоне частот, но в области высоких частот далеко за пределами полосы пропускания МСИ, и также проникают в усилительный тракт МСИ опосредованно через внутренние сигнальные цепи аналоговых устройств (цепи элементов обвязки микросхем в СОК, ИУ и ВУ), но в виде наведенных напряжений и токов помех в сигнальных цепях аналоговых устройств и технологических цепях, используемых для тестового контроля аналоговых устройств. Эти по-



мехи также представляют опасность за пределами полосы пропускания МСИ, так как и в этом случае высокочастотные помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены и перенесены в область более низких частот, попадающих в полосу пропускания МСИ, и также привести к фиксированному смещению напряжения на входе АЦП.

Для ослабления электромагнитных помех, проникающих в наиболее чувствительные элементы аналоговых устройств МСИ, в качестве дополнительной меры возможно использование местных электростатических экранов, подключенных к общей шине питания 0V, или специальной экранирующей конструкции основания корпуса рамки в области размещения наиболее чувствительных элементов [15]. Однако оба этих способа экранирования для ослабления электромагнитных помех в МСИ обычно не применяют из-за дополнительных расходов защитных компонентов (например, экранирующие крышки, проводящие прокладки и др.), а ограничиваются лишь использованием схемотехнических решений, позволяющих обеспечить уменьшение чувствительности МСИ к электромагнитным помехам до необходимых норм.

Отдельно стоит отметить наличие в МСИ тестовых выводов, используемых при автономных испытаниях ИМКТ, которые могут иметь длину, соизмеримую с длиной волны электромагнитных помех, действующих в радиочастотном диапазоне. На таких выводах под воздействием электромагнитных помех могут генерироваться токи, которые будут вступать во взаимодействие с аналоговыми устройствами МСИ и также приводить к появлению на выходе МСИ фиксированного смещения напряжения, вызванного выпрямленными токами.

Для ослабления наведенных помех в цепях тестовых выводов следует уменьшать длину этих цепей, насколько это возможно, или дополнительно вводить в цепи тестовых выводов аналоговых устройств радиочастотные фильтры, которые будут мешать демодуляции нежелательных низкочастотных сигналов помех (в простейшем случае это могут быть включенные в цепи тестовых выводов защитные резисторы).

3.2. Ослабление помех

в цифровых устройствах ИМКТ

К основным цифровым устройствам ИМКТ относятся (рисунок 5):

 – цифровая часть АЦП, обеспечивающая преобразование напряжения на входе АЦП в цифровой код и формирование на его выходе цифровых данных о результатах измерений;

– УСЦД и КИ, обеспечивающие сбор цифровых данных о результатах измерений и их передачу в ЦПМ по интерфейсу ППИ.

Дополнительным цифровым устройством ИМКТ является ЦФ, который используется для усреднения цифровых данных, поступающих из АЦП при проведении многократных измерений.

Синхронизация работы основных цифровых устройств ИМКТ (в АЦП – запуск процесса преобразования поступающих из опрашиваемых каналов измерений на вход АЦП напряжений $U_{\rm мсн}$ в цифровой код, в УСЦД – регистрация в ячейках памяти поступающих с выхода АЦП цифровых данных $D_{\rm ацп}$ о результатах измерений) производится по сигналам управления СУ2 из УСЦД, автоматически формируемым в пределах заданного цикла измерений $T_{\rm ци}$ при инициализации диаграмы опроса каналов поступающими из КИ сигналами управления СУ1.

Опрос каналов измерений производится по сигналам управления СУ2 в пределах заданного цикла измерений $T_{\rm ци}$ последовательно. Во время опроса канала $T_{\rm ок}$ запуск процесса преобразования поступающего на вход АЦП напряжения $U_{\rm мси}$ в цифровой код и последующая перезапись цифровых данных $D_{\rm ацп}$ о результатах измерений с выхода АЦП в УСЦД производятся после завершения установления переходных процессов $(t_{\rm ycr})$ в контролируемом сигнале на интервале времени измерения $\Delta t_{\rm изм} = T_{\rm ок} - t_{\rm ycr}$.



Рисунок 5. Дополнительные меры по ослаблению помех, принимаемые для цифровых устройств ИМКТ

Здесь возможны два варианта перезаписи цифровых данных в УСЦД – непосредственно цифровых данных $D_{\text{ацп}}$ с выхода АЦП при проведении однократных измерений или усредненных цифровых данных $D_{u\phi}$ с выхода ЦФ при проведении многократных измерений. Первый вариант достаточно прост в реализации, так как не предполагает перед перезаписью проведения с цифровыми данными вычислительных операций, однако не обеспечивает высокую точность измерений из-за наличия на входе АЦП фиксированного случайного отклонения (смещения) напряжения от точного значения. Второй вариант сложен в реализации, так как предполагает в ЦФ проведение вычислительных операций, обеспечивающих реализацию алгоритмов усреднения (фильтрации) цифровых данных. При этом для синхронизации работы АЦП и ЦФ в УСЦД должны формироваться дополнительные сигналы управления СУ2. В обоих случаях логические функции цифровых устройств и вычислительные операции с цифровыми данными могут быть для реализации на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

После завершения опроса всех каналов измерения сохраненный массив усредненных цифровых данных $D_{\rm усцд}$ в УСЦД за текущий цикл измерений $T_{\rm ци}$ передается через КИ по интерфейсу ППИ в ЦПМ для дальнейшей обработки.

Как показано на рисунке 5, проникновение помех в цифровые устройства ИМКТ происходит в результате воздействия:

— дифференциальных помех $U_{\text{дn+D}}$ в цепях питаниях цифровых устройств;

– синфазных помех $U_{cп.эпт}$ в ЭПТ;

— электромагнитных помех, вызванных энергией вторичного электромагнитного поля $W_{n.G}$, направленной на цифровые устройства.

Дифференциальные помехи $U_{\text{дп+D}}$ в цепях питания цифровых устройств (АЦП, ЦФ, УСЦД и КИ), действующие в широком диапазоне частот, проникают в цифровой тракт опосредованно через внутренние цепи питания отдельных логических элементов в микросхемах и приводят на высоких частотах к нестабильности логических уровней сигналов в цифровых устройствах.

Для ослабления дифференциальных помех $U_{\text{дп+D}}$, действующих в цепях питания цифровых устройств между шинами питания +D и GND, в качестве дополнительных мер возможно введение в цепи питания каждого цифрового устройства фильтров или конденсаторов развязки (на рисунке 5 не показано), подключаемых к шинам питания +D и GND как можно ближе к этим устройствам.

Синфазные помехи $U_{\text{сп.эпт}}$ в ЭПТ, также действующие в широком диапазоне частот, проникают в цифровые устройства аналогично, как и дифференциальные помехи, опосредованно, но через сигнальные цепи элементов обвязки цифровых микросхем, связанные с основанием корпуса рамки ИМКТ через соответствующие паразитные емкости (на рисунке 5 не показано), и также в условиях сложной ЭМО на КА могут привести на высоких частотах к недопустимой нестабильности логических уровней сигналов и возможным сбоям в работе цифровых устройств и, как следствие, к грубым ошибкам измерений.

Для ослабления синфазных помех $U_{\text{сп.эпт}}$, действующих в ЭПТ и проникающих в цифровые устройства, в качестве дополнительной меры возможно, как и в случае проникновения помех в аналоговые устройства, подключение между общей шиной питания 0V и корпусом рамки ИМКТ помехоподавляющего *RC*-фильтра (параллельное соединение высокоомного резистора $R_{\text{пф}}$ и высоковольтного конденсатора $C_{\text{пф}}$).

Однако при использовании такого помехоподавляющего *RC*-фильтра также сохраняются условия проникновения синфазных помех U_{сп.} эпт во внутренние сигнальные цепи цифровых устройств через соответствующие паразитные емкости (на рисунке 5 не показано), распределенные по площади основания корпуса рамки, между различными точками которого может возникнуть разность потенциалов. Поэтому для ослабления синфазных помех $U_{\text{сп.эпт}}$ в ЭПТ и в этом случае более эффективной дополнительной мерой может быть использование общей шины питания GND в качестве электростатического экрана. Такой экран аналогично, как и для аналоговых устройств, выполняют конструктивно в виде сплошного проводящего слоя (полигона) в многослойной печатной плате, который располагается (на рисунке 5 обозначен как Экран G) между верхними слоями платы с печатными проводниками внутренних сигнальных цепей цифровых устройств и нижним непроводящим слоем платы, который приклеивается к основанию корпуса рамки. При этом отдельно выполненные Экран G для цифровых устройств и Экран А для аналоговых устройств для исключения возможного взаимопроникновения кондуктивных помех из одного контура протекания тока нагрузки в другой следует объединять в ЭПТ.

Электромагнитные помехи, вызванные направленной на цифровые устройства энергией вторичного электромагнитного поля $W_{n.G}$, также действуют в широком диапазоне частот и аналогично, как и в аналоговых устройствах, проникают в цифровой тракт опосредованно через внутренние сигнальные цепи цифровых устройств (цепи элементов обвязки микросхем в АЦП, ЦФ, УСЦД и КИ) в виде наведенных в сигнальных цепях напряжений и токов помех. Эти помехи также в условиях сложной ЭМО на КА могут привести к недопустимой нестабильности логических уровней сингалов и возможным сбоям в работе цифровых устройств.



Для ослабления электромагнитных помех в цифровых устройствах в качестве дополнительной меры для наиболее чувствительных элементов также возможно использование местных электростатических экранов, но подключенных к общей шине питания GND, или специальной экранирующей конструкции основания корпуса рамки в области размещения наиболее чувствительных элементов. Однако из-за пониженной восприимчивости цифровых микросхем к электромагнитным помехам такие экраны обычно не используют.

3.3. Фильтрация цифровых данных на выходе АЦП

Цифровые данные (сигналы), полученные в ИМКТ с выхода АЦП при многократных измерениях в процессе опроса канала в пределах заданного времени измерения $\Delta t_{\rm H3M} = T_{\rm ok} - t_{\rm ycr}$, для уменьшения влияния случайных помех на точность измерения должны подвергаться цифровой обработке с помощью линейного ЦФ. Такой ЦФ должен иметь избирательные свойства фильтра нижних частот и обеспечивать реализацию его передаточной функции, которая описывается комплексной частотной характеристикой с заданной полосой пропускания от 0 до верхней граничной частоты $f_{\text{в.цф}}$, соизмеримой с верхней граничной частотой *f*_{в.мси} полосы пропускания МСИ в аналоговом тракте ИМКТ. При этом цифровая обработка сигналов (ЦОС) должна проводиться на ограниченном интервале времени измерения $\Delta t_{\rm изм}$ с конечным числом *n* отсчетов, взятых в равномерно распределенных на временной шкале точках с периодом (интервалом) дискретизации $T = \Delta t_{\text{изм}}/n$.

При указанных условиях для проведения ЦОС следует использовать линейный рекурсивный ЦФ, работа которого описывается в общем случае линейным разностным уравнением [16]:

$$y[n] = \sum_{i=0}^{M} a_i x[n-i] + \sum_{k=1}^{N} b_k y[n-k],$$

где x[n], y[n] – дискретные сигналы на входе и выходе ЦФ соответственно; n – текущий номер отсчета сигнала, включая нулевой отсчет (n = 0, 1, 2, ...); M и N – большее из чисел является порядком ЦФ; a_i, b_k – коэффициенты ЦФ.

Согласно приведенному уравнению линейный рекурсивный ЦФ при канонической форме реализации (с минимальным количеством элементов задержки) представляет собой последовательное соединение двух фильтров (рисунок 6) – фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтра), соответствующего рекурсивной части уравнения с коэффициентами b_k , которая работает с «прошлыми» значениями выходного сигнала, и фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра), соответствующего рекурсивной характеристикой (КИХ-фильтра), соответствующего рекурсивной характеристикой (КИХ-фильтра), соответствующего рекурсивной характеристикой (КИХ-фильтра), соответствующего сигнала, и фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра), соответствующего



Рисунок 6. Состав ЦФ, используемого в ИМКТ для усреднения результатов измерений

нерекурсивной части уравнения с коэффициентами *a_i*, ограниченной в работе текущими и «прошлыми» значениями входного сигнала.

В таком ЦФ цифровые данные $D_{\text{ацп}}$ с выхода АЦП в виде входного сигнала x[n] поступают на вход БИХ-фильтра и преобразуются в промежуточные цифровые данные $D_{\text{п}}$, затем с выхода БИХ-фильтра эти данные в виде промежуточного сигнала s[n] передаются на вход КИХ-фильтра и преобразуются в цифровые данные $D_{\text{цф}}$, поступающие с выхода ЦФ в виде выходного сигнала y[n]. Последовательная обработка цифровых данных БИХ-фильтром и КИХ-фильтром происходит на рабочей частоте F, поступающей в ЦФ из УСЦД совместно с другими сигналами управления СУ2, обеспечивающими синхронизацию процесса ЦОС в заданном интервале времени измерения $\Delta t_{\text{изм}}$.

Далее после завершения процесса ЦОС усредненные цифровые данные $D_{\mu\phi}$ передаются в УСЦД для формирования с выхода УСЦД массива усредненных цифровых данных D_{ycud} по всем опрашиваемым каналам за текущий цикл измерений $T_{\mu\mu}$.

Последовательное соединение БИХ-фильтра и КИХ-фильтра, характеризуемых передаточными функциями $H_{\text{бнх}}(z)$ и $H_{\text{ких}}(z)$, обеспечивает в ЦФ реализацию алгоритмов ЦОС в соответствии с общей передаточной функцией

$$H_{\mathrm{II}\phi}(z) = H_{\mathrm{SHX}}(z)H_{\mathrm{KHX}}(z),$$

где $z = e^{pT}$, $p = j2\pi f_{n}$, f_{n} – частота помехи, T – интервал дискретизации.

Требуемый вид графиков зависимостей амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик передаточной функции $H_{ub}(z)$ и, соответственно, эффективность ЦОС в заданных условиях эксплуатации на заданном интервале времени измерения $\Delta t_{\rm изм}$ определяются расчетными значениями параметров ЦФ (n, F, M, N, a_i, b_k), которые обычно при разработке алгоритмов ЦОС в ПЛИС задают фиксированно. Однако в случае изменения условий эксплуатации ИМКТ для обеспечения гибкой настройки характеристик ЦФ и модифицирования способа ЦОС возможно значения коэффициентов a_i и b_k и рабочей частоты F задавать программными средствами ЦПМ. В таком случае

в состав ЦФ помимо БИХ-фильтра и КИХ-фильтра потребуется дополнительно ввести устройство задания параметров, в которое при обмене информацией ИМКТ с ЦПМ через КИ будут записываться новые значения параметров [17].

Следует отметить, что в условиях сложной ЭМО на КА в отдельных случаях (например, при возникновении ЭСР) возможно проникновение в измерительный тракт ИМКТ нерегулярных импульсных помех, которые в пределах заданного цикла измерений Т_{пи} даже при принятых дополнительных мерах по ослаблению помех в аналоговых и цифровых устройствах могут вызвать в процессе опроса каналов на интервале времени измерения $\Delta t_{\mu_{3M}}$ либо недопустимое кратковременное увеличение фиксированного смещения напряжения на входе АЦП, либо недопустимую нестабильность логических уровней сигналов. В обоих случаях это приведет к формированию на выходах цифровых устройств недостоверных цифровых данных, в результате чего могут возникнуть грубые ошибки измерений (промахи). Использование ЦФ для усреднения результатов измерений при многократных измерениях на ограниченном интервале времени измерения $\Delta t_{\rm изм}$ не всегда может обеспечить устранение промахов в цифровых данных $D_{\rm ub}$ на выходе ЦФ, поэтому при завершении цикла измерений Т_{ии} сохраненный в УСЦД массив усредненных цифровых данных D_{усцд} может быть передан из ИМКТ в ЦПМ с грубыми ошибками.

Однако, учитывая нерегулярный характер проникающих в измерительный тракт ИМКТ импульсных помех, в периодически передаваемых в ЦПМ массивах усредненных цифровых данных $D_{\text{усцл}}$ на промежутке времени, ограниченном несколькими циклами измерений Т_{пи}, в каждом канале измерения могут возникать только одиночные промахи, возможно их исключение из результатов измерений при дальнейшей обработке цифровых данных [18]. Для этого дополнительно прибегают к специальным статистическим методам обработки цифровых данных, позволяющим производить анализ нескольких массивов усредненных цифровых данных *D*_{успл} на достоверность по заданным критериям при малом числе измерений (обычно для уменьшения суммарного времени измерений при анализе цифровых данных на достоверность ограничиваются минимум 3-5 массивами), которые реализуются программными средствами ЦПМ на уровне проектирования измерительного прибора.

Заключение

Проведенный анализ воздействующих на аналоговые и цифровые устройства ИМКТ внешних кондуктивных и электромагнитных помех, которые проникают по шинам питания, по входным цепям каналов измерения, по интерфейсу ППИ и по внутренним цепям аналоговых и цифровых устройств, показал, что для их ослабления на уровне проектирования ИМКТ кроме общих конструктивных мер, обеспечивающих образование непрерывной экранирующей оболочки, следует принимать дополнительные меры:

для ослабления помех, проникающих по шинах питания аналоговых и цифровых устройств, следует использовать как общий ПФ, подключаемый к входным шинам питания ИМКТ, так и фильтры или конденсаторы развязки на каждом активном устройстве, подключаемые к шинам питания как можно ближе к этим устройствам;

 для ослабления синфазных и дифференциальных помех, проникающих по входным цепям каналов измерения ИМКТ, следует использовать как ИУ с большим КОСС, так и ПФ в каждом аналоговом устройстве, ограничивающие полосу пропускания усилительного тракта ИМКТ;

 для ослабления синфазных помех на общей шине питания в ЭПТ, проникающих во внутренние цепи аналоговых и цифровых устройств через основание корпуса рамки ИМКТ, следует использовать помехоподавляющий *RC*-фильтр, подключаемый между общей шиной питания и корпусом рамки ИМКТ;

 для ослабления наведенных помех во внутренних сигнальных цепях аналоговых и цифровых устройств, вызванных проникновением помех через паразитные емкости с основанием корпуса рамки ИМКТ, а также проникновением электромагнитных помех, вызванных энергией вторичного электромагнитного поля во внутреннем пространстве корпуса рамки ИМКТ, следует использовать электростатические экраны, выполненные в виде сплошного проводящего слоя общей шины питания (полигона) в многослойной печатной плате, и в виде местных экранирующих крышек, подключенных к общей шине питания, или специальной экранирующей конструкции основания корпуса рамки в области размещения наиболее чувствительных элементов.

Кроме того, для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения, вызванной фиксированным случайным отклонением (смещением) напряжения на входе АЦП от точного значения, в ИМКТ при опросе каналов дополнительно следует производить многократные измерения и полученные с выхода АЦП для каждого канала цифровые данные о результатах измерений усреднять с помощью ЦФ.

Также для исключения из переданных из ИМКТ в ЦПМ для дальнейшей обработки массивов усредненных цифровых данных возможных одиночных грубых ошибок измерений (промахов), которые в условиях сложной ЭМО на КА могут возникать на интервале времени в пределах нескольких циклов измерений, дополнительно сле-



дует прибегать к специальным статистическим мых программными средствами ЦПМ на уровне методам обработки цифровых данных, реализуе- проектирования измерительного прибора.

Список литературы

- [1] Горностаев А.И. Особенности обеспечения помехоустойчивости интерфейсных модулей контроля температур в измерительных приборах космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 2. C. 89–101. doi: 10.26732/j.st.2021.2.04.
- [2] Горностаев А.И. Меры по ослаблению помех на уровне проектирования измерительной системы космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 4. С. 287–302. doi: 10.26732/j.st.2022.4.08
- [3] Горностаев А.И. Меры по ослаблению помех на уровне проектирования измерительного прибора космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2023. Т. 7. № 4. С. 268–278. doi: 10.26732/j.st.2023.4.05
- [4] ОСТ 92-1615-2013. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Общие требования по защите от статического электричества. Зарегистрирован в ЦКБС ФГУП ЦНИИ машиностроения. 2013.
- [5] Ромадина И. Электронные компоненты компании ON Semiconductor для защиты электрических цепей от импульсного перенапряжения // Компоненты и технологии. 2009. № 12. С. 73–76.
- [6] Малинова О.Е. Классификация средств внешней защиты электронных схем от ЭСР // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». 2016. Т. 1: С. 110–115.
- [7] Белик Г.А. Метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к возникновению ЭСР: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04. М. 2013. 123 с. [Электронный ресурс]: URL: hse.ru/ data/2014/02/10/1341505747/belik_dissertacia_f.pdf (дата обращения: 14.01.2024).
- [8] Горностаев А.И. Проблемы унификации многоканального интерфейсного модуля контроля температур для измерительных приборов космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 1. C. 41-51. doi: 10.26732/2618-7957-2019-1-47-57.
- [9] Горностаев А.И. Оптимизация структуры унифицированного многоканального интерфейсного модуля контроля температур для измерительных приборов космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183.
- [10] Денисенко В. Повышение точности путем многократных измерений. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. 2009. № 4. С. 96-99.
- [11] Денисенко В. Повышение точности путем многократных измерений. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2010. № 1. С. 98-102.
- [12] Понятие 1/f-шума и методы его устранения [Электронный pecype]. URL: radioprog.ru/post/868 (дата обращения: 14.01.2024).
- [13] Паразитные эффекты в конденсаторах [Электронный ресурс]. URL: reom.ru/stati/7/ (дата обращения: 14.01.2024).
- [14] Александров В. Как снизить электромагнитные помехи при проектировании? // Электронные компоненты. 2011. № 3. C. 10–13.
- [15] Рентюк В. Дополнительные конструктивные элементы помогают решать проблемы ЭМС // Компоненты и технологии. 2021. № 8. С. 90-96.
- [16] Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. 2009. 190 с.
- [17] Тульский И.Н., Власова Ю.Е. Устройство обработки аналоговых сигналов с применением цифровой фильтрации. Пат. № 2777306, Российская Федерация, 2022. Бюл. № 22.
- [18] Руди Д.Ю., Попова М.В., Петров С.И. Грубая погрешность и критерии их исключения [Электронный реcypc]. URL: elar.urfu.ru/bitstream/10995/40261/1/eksie 2016 49.pdf?ysclid=lrc3zhb4iy400569740 (дата обращения: 14.01.2024).

54

MEASURES FOR ATTENUATION OF INTERFERENCE AT THE LEVEL OF DESIGN OF THE TEMPERATURE CONTROL INTERFACE MODULE FOR SPACECRAFT MEASURING INSTRUMENTS

A.I. Gornostaev

JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite System» Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, The Russian Federation

When developing temperature control interface modules used as part of spacecraft onboard equipment, it is important to correctly substantiate the set of measures to ensure their noise immunity, taken at the design levels of the measuring system, measuring device and temperature control interface module. Such a justification involves an assessment of the effectiveness of possible interference mitigation techniques at each design level. The article is devoted to the consideration of interference mitigation measures at the design level of the temperature control interface module, which should be taken to ensure the required noise immunity of the temperature control interface module in combination with measures taken at other design levels. It is shown that to ensure the required noise immunity at the design level of temperature control interface modules, it is necessary to provide reasonable measures to mitigate interference in both analog devices and digital devices. In both cases, it is possible to reduce interference partly by introducing noise suppression filters into the devices and partly by using the common power bus as an electrostatic shield. In addition, it is possible to further increase the accuracy of measurements by performing multiple measurements over a given time interval and averaging the obtained measurement results using a digital filter.

Keywords: noise immunity, attenuation of interference, equipotential point, shielding, noise filter, multiple measurements, digital filter.

References

- Gornostaev A.I. Osobennosti obespecheniya pomekhoustoychivosti interfeysnykh moduley kontrolya temperatur v izmeritel'nykh priborakh kosmicheskikh apparatov [Features of ensuring noise immunity of interface modules for temperature control in measuring instruments of spacecraft] // Spacecraft & Technologies, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 89–101. doi: 10.26732/j.st.2021.2.04. (In Russian)
- [2] Gornostaev A.I. Mery po oslableniyu pomekh na urovne proyektirovaniya izmeritel'noy sistemy kosmicheskikh apparatov [Measures for attenuation of interference at the level of design of the measuring system of spacecraft] // Spacecraft & Technologies, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 287–302. doi: 10.26732/j.st.2022.4.08. (In Russian)
- [3] Gornostaev A.I. Mery po oslableniyu pomekh na urovne proyektirovaniya izmeritel'nogo pribora kosmicheskikh apparatov [Measures for attenuation of interference at the level of design the measuring device of spacecraft] // Spacecraft & Technologies, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 268–278. doi: 10.26732/j.st.2023.4.05. (In Russian)
- [4] OST 92–1615–2013. Mikroskhemy integral'nyye i pribory poluprovod-nikovyye. Obshchiye trebovaniya po zashchite ot staticheskogo elektrichestva [Integrated microcircuits and semiconductor devices. General requirements for protection against static electricity]. Registered at the Central Design Bureau of the Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Mechanical Engineering. 2013. (In Russian)
- [5] Romadina I. Elektronnyye komponenty kompanii ON Semiconductor dlya zashchity elektricheskikh tsepey ot impul'snogo perenapryazheniya [ON Semiconductor Electronic Components to Protect Electrical Circuits from Surge Overvoltage] // Components and Technologies, 2009, no. 12, pp. 73–76. (In Russian)
- [6] Malinova O. E. Klassifikatsiya sredstv vneshney zashchity elektronnykh skhem ot ESR [Classification of means of external protection of electronic circuits from ESD // Proceedings of the international symposium "Reliability and quality"], 2016, vol. 1, pp. 110–115. (In Russian)
- [7] Belik G.A. Metod povysheniya ustoychivosti pechatnykh uzlov BREA kos-micheskikh apparatov k vozniknoveniyu ESR [Method for increasing the resistance of printed circuit assemblies of BREA spacecraft to the occurrence of ESD]: Cand. Diss. – Moscow, 2013, 123 p. (In Russian). Available at: hse.ru/data/2014/02/10/1341505747/belik_ dissertacia_f.pdf (accessed 14.01.2024).



- [8] Gornostaev A.I. Problemy unifikatsii mnogokanal'nogo interfeysnogo modulya kontrolya temperatur dlya izmeritel'nykh priborov kosmicheskikh apparatov [Problems of unification of multi-channel interface temperature control module for measuring instruments of spacecraft] // Spacecraft & Technologies, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 41–51. doi: 10.26732/2618-7957-2019-1-47-57. (In Russian)
- [9] Gornostaev A.I. Optimizatsiya struktury unifitsirovannogo mnogokanal'nogo interfeysnogo modulya kontrolya temperatur dlya izmeritel'nykh priborov kosmicheskikh apparatov [Optimization of the structure of the unified multichannel interface temperature control module for measuring instruments of spacecraft] // Spacecraft & Technologies, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183. (In Russian)
- [10] Denisenko V. Povysheniye tochnosti putom mnogokratnykh izmereniy. Chast' 2 [Increasing accuracy through multiple measurements. Part 1] // Modern automation technologies. 2009, no. 4, pp. 96–99. (In Russian)
- [11] Denisenko V. Povysheniye tochnosti putom mnogokratnykh izmereniy. Chast' 1 [Increasing accuracy through multiple measurements. Part 2] // Modern automation technologies. 2010, no. 1, pp. 98–102. (In Russian)
- [12] *Ponyatie 1/f-shuma i metody ego ustraneniya* [Concept of 1/f-noise and methods of its elimination]. Available at: radioprog.ru/post/868 (accessed 14.01.2024). (In Russian)
- [13] *Parazitnyye effekty v kondensatorakh* [Parasitic effects in capacitors]. Available at: reom.ru/stati/7/ (accessed 14.01.2024). (In Russian)
- [14] Aleksandrov V. *Kak snizit' elektromagnitnyye pomekhi pri proyektirovanii?* [How to reduce electromagnetic interference during design?] // Electronic components, 2011, no. 3, pp. 10–13. (In Russian)
- [15] Rentyuk V. Dopolnitel'nyye konstruktivnyye elementy pomogayut reshat' problemy EMS [Additional structural elements help solve EMC problems] // Components & Technologies, 2021, no. 8, pp. 90–96. (In Russian)
- [16] Kuryachy M. I. *Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Digital signal processing: textbook. manual for universities]. – Tomsk: Tomsk. state University of Control Systems and radio electronics, 2009, 190 p. (In Russian)
- [17] Tulsky I. N., Vlasova Yu. E. *Ustroystvo obrabotki analogovykh signalov s primeneniyem tsifrovoy fil'tratsii* [Device for processing analog signals using digital filtering]. Patent RU 2777306, 2022, bulletin no. 22.
- [18] Rudi D. Yu., Popova M. V., Petrov S. I. Grubaya pogreshnost'i kriterii ikh isklyucheniya [Gross error and criteria for their exclusion]. Available at: elar.urfu.ru/bitstream/10995/40261/1/eksie_2016_49.pdf?ysclid=lrc3zhb4iy400569740 (accessed 14.01.2024). (In Russian)

Сведения об авторе

Горностаев Алексей Иванович – кандидат технических наук, начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончил Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники в 1980 году. Область научных интересов: методы повышения надежности и принципы построения бортовой аппаратуры космических аппаратов, схемотехника аналоговых и цифровых электронных устройств, унификация функциональных узлов бортовой аппаратуры.

56

«ПОТОК» – РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ПЛАТФОРМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Р.С. Куликов, С.В. Вишняков, А.П. Малышев[⊠], М.А. Орлова, Т.А. Бровко

Национальный исследовательский институт «МЭИ» г. Москва, Российская Федерация

В настоящее время глобальная навигационная спитниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС находится на этапе модернизации. С целью рассмотрения и выбора наилучшего варианта развития системы необходимо создание инструмента для моделирования, который может обеспечить корректное воспроизведение и взаимодействие разнообразных и различных по своей структуре модернизируемых элементов и взаимосвязей между ними. Основной целью работы является изложение структуры и базовых принципов функционирования данного инструмента. Реализация данных принципов выполнена в открытой платформе «Поток», развиваемой по инициативе НИУ «МЭИ», позволяющей конфигурировать цифровые двойники системы ГЛОНАСС и моделировать систему в целом для решения широкого спектра задач. В статье рассмотрены и обоснованы заложенные в платформу принципы. Изложена схема организации платформы, техническая реализация платформы, а также фундаментальные требования к используемым в платформе компьютерным моделям. Организационной основой платформы является взаимодействие экспертного совета с сообществом разработчиков. Техническая реализация платформы состоит из распределённой вычислительной сети, репозитория компьютерных моделей, а также узла управления сеансом моделирования. Для описания разнообразных и разнородных элементов системы ГЛОНАСС используется понятие идеальной дискретной шкалы модельного времени. Все элементы системы ГЛОНАСС представлены в виде разностных уравнений, описывающих эволюцию состояния элементов во времени.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, цифровой двойник, распределённая платформа, компьютерное моделирование.

Введение

Развитие сложных систем, к которым относится и спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС, и введение в их состав новых элементов может проходить по множеству направлений, часть из которых друг друга взаимно исключают. Проектирование вариантов развития любой системы на ранней стадии проводится с помощью анализа и моделирования. На практике разработчиками используется широкий ассортимент частных моделей элементов системы ГЛОНАСС для той или иной предметной области:

– навигационных космических аппаратов (НКА) [1];

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

– функциональных дополнений [2];

- наземного комплекса управления [3];

 навигационной аппаратуры потребителей (НАП) [4] и многих других.

Различные модели одного и того же объекта ГНСС ГЛОНАСС по-разному учитывают различные факторы и дают различные результаты моделирования, которые служат частными аргументами в пользу различных вариантов развития системы. В то же время в целях повышения объективности выбора наиболее целесообразных направлений развития системы ГЛОНАСС и их приоритизации требуется инструмент для единообразной оценки показателей качества той или иной конфигурации системы ГЛОНАСС в целом.

В настоящее время в процессе создания находятся две модели системы ГЛОНАСС, разрабатываемые в рамках государственных заказов,

MalyshevAP@mpei.ru



предназначенные для внутреннего пользования эксплуатирующими организациями, а также предлагаемая в данной статье распределённая платформа моделирования цифровых двойников системы ГЛОНАСС «Поток». Результаты работы ведомственных моделей планируется учитывать при выборе путей развития системы ГЛОНАСС, а открытая платформа «Поток» предназначена для широкого круга разработчиков в качестве повседневного инструмента для предварительной оценки влияния тех или иных технических решений на показатели качества системы ГЛОНАСС. Для обеспечения работы и взаимодействия широкого круга потребителей необходимо заложить в платформу технические, технологические и организационные возможности. Таким образом, целью работы является формулирование и обоснование ключевых особенностей работы платформы «Поток».

1. Организационные особенности

Организационная работа платформы основана на непрерывном взаимодействии широкого круга сообщества разработчиков и экспертного совета платформы через открытый репозиторий платформы и банка цифровых двойников системы.

Экспертный совет, формируемый при платформе, состоит из специалистов и представителей заинтересованных организаций. Задачами совета являются формирование запроса к сообществу разработчиков на создание моделей элементов системы ГЛОНАСС, экспертиза размещённых в репозитории программных модулей и конфигурирование цифровых двойников, рекомендуемых для решения тех или иных задач моделирования.

Программные модули, создаваемые сообществом разработчиков, сохраняются в общедоступном репозитории; каждый пользователь платформы имеет возможность разместить в репозитории собственный программный модуль, созданный в соответствии с требованиями руководства разработчика. Поскольку один и тот же элемент системы ГЛОНАСС может быть описан с той или иной степенью подробности, репозиторий будет содержать множество программных модулей. Из размещённых в репозитории различных программных модулей пользователем конфигурируется тот или иной вариант цифрового двойника системы ГЛОНАСС, который сохраняется в банке цифровых двойников, в целом проводится сеанс моделирования. Общая организационная схема платформы «Поток» представлена на рисунке 1.

В репозитории общедоступного открытого варианта платформы «Поток» размещаются программные модули, не содержащие сведений ограниченного доступа. Для работы со сведениями ограниченного доступа по договорённости с заинтересованными организациями возможен вариант платформы, разворачиваемый в безопасной локальной информационно-вычислительной сети.

2. Технические особенности

Платформа «Поток» обладает рядом технических и технологических особенностей, позволяющих выполнять моделирование большого числа объектов с учетом множественных взаимосвязей между ними. Рассмотрим описание математических моделей и их программную реализацию для возможности использования на платформе.

Для возможности корректного описания взаимодействия различных разнородных элементов



Рисунок 1. Организационная схема платформы «Поток»

Р.С. Куликов, С.В. Вишняков, А.П. Малышев, М.А. Орлова, Т.А. Бровко

ГНСС ГЛОНАСС, имеющих собственный ход часов, например, несколько НАП, разнесенных в пространстве, или НКА с собственным бортовым синхронизирующим устройством, требуется ввести абстрактную величину, относительно которой будет описываться ход часов всех моделируемых элементов. Такой абстрактной величиной на платформе «Поток» является понятие идеальной шкалы времени (ШВ) t^{ud} [5] моделирования, являющейся количественным описанием непрерывного физического «идеального» времени t [6]. Такое понятие позволяет корректно описывать состояния объектов и их взаимодействие на один и тот же момент времени $T(t^{ud})$ идеальной ШВ, как показано в работе [7].

Процедура моделирования проводится в дискретном виде с фиксированным интервалом времени T_{MOO} между *i*-1 и *i* тактами, что выполняется соотношением (1):

$$T_{MOO} = T(t_{i-1}^{uO}) - T(t_i^{uO}), \qquad (1)$$

где $T(t_{i-1}^{u\partial}), T(t_i^{u\partial})$ – моменты времени в идеальной ШВ.

Значение T_{Mod} устанавливается индивидуально для каждого сеанса моделирования на платформе. При этом формальные ограничения на значение T_{Mod} отсутствуют и определяются требуемой точностью моделирования и решаемой задачей.

Описание состояния объектов в единой ШВ позволяет воспроизводить различные эффекты, связанные со средой распространения радиосигналов и имеющие пространственно-временную корреляцию, такие как задержка прохождения радионавигационных сигналов в ионосфере [8] и их многолучевое распространение [9]. Поскольку данные эффекты зависят от трассы прохождения сигнала и не зависят от параметров, например НАП, при описании эффектов, связанных с распространением радиосигналов, для двух НАП, находящихся в одной точке, в их индивидуальных ШВ результат будет отличаться.

Рассмотрим обобщенное описание моделируемых элементов системы ГЛОНАСС. Каждый моделируемый объект на платформе описывается собственным вектором состояния (ВС) x. Системы уравнений, описывающие эволюцию ВС на i такт моделирования, в общем виде описываются выражением (2):

$$x_i = \mathbf{f}(x_{i-1}) + \mathbf{g}(e_{i-1}) + \mathbf{h}(r_{i-1}),$$
 (2)

где **f**(x_{i-1}), **g**(e_{i-1}), **h**(r_{i-1}) – векторные функции от векторных аргументов, x_{i-1} , e_{i-1} , r_{i-1} – вектор состояния, вектор входных воздействий и вектор случайных возмущений соответственно на предыдущий такт моделирования в идеальной ШВ.

Вектор выходных воздействий объекта, описывающий воздействие данного объекта на другие и на систему в целом, в свою очередь, является функцией от вектора состояния x_i (3):

0

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{J}(\mathbf{x}_i),\tag{3}$$

где $\mathbf{J}(\mathbf{x}_i)$ – векторная функция векторного аргумента.

Вектор входных воздействий e_{i-1} является совокупностью выходных векторов o_{i-1} других объектов.

Предлагаемый вариант эволюции ВС (2) позволяет воспроизводить случайные отказы элементов системы, например, в результате сбоя в работе бортового программного и/или аппаратного обеспечения НКА [10] и отрабатывать алгоритмы автономного контроля целостности в НАП (англ. Receiver autonomous integrity monitoring, RAIM) [11].

Для моделируемых объектов, имеющих собственную ШВ, текущее значение времени в данной ШВ $T(t_i^{obbekm})$ должно входить в ВС x_i и выходной вектор объекта o_i . При необходимости допускается увеличение частоты дискретизации в (2), то есть введение дополнительных отсчетов между *i*-1 и *i* тактами внутри одного объекта. Повышение частоты дискретизации выполняется только для идеальной ШВ с последующим пересчетом данных моментов времени в собственную ШВ. Введение дополнительных отсчетов позволяет моделировать различные процессы с малым временем корреляции. Например, для отработки алгоритмов первичной обработки в НАП ГНСС [12].

Рассматривая выражения (2) и (3) можно отметить, что «эволюция» ВС каждого моделируемого объекта зависит только от входных аргументов на предыдущий момент времени $T(t_{i-1}^{uo})$ и не зависит от текущего состояния других моментов времени на текущий момент времени. Это позволяет рассматривать объекты как независимые на текущий такт моделирования, а также учитывать сложные перекрестные взаимосвязи элементов системы ГЛОНАСС, пример которых приведен на рисунке 2.

Данный подход имеет недостаток, связанный с незначительным усложнением математического описания моделей элементов системы ГЛОНАСС по сравнению с принятыми частными моделями [13–15].

3. Технологические особенности

С точки зрения вычислений «Поток» представляет собой распределенную кластерную систему, содержащую множество вычислительных узлов, объединенных в сеть.

Управлением системы занимается центральный вычислительный узел – сервер (узел) управления. Сервер управления выполняет следующие функции:



Рисунок 2. Архитектура системы ГЛОНАСС

- создание сети;
- настройка сети;
- подготовка к сеансу моделирования;
- управление сеансом моделирования.

При запуске очередного сеанса моделирования сервер управления создает для каждого пользователя платформы виртуальную сеть, внутри которой выполняется обмен данными между всеми вычислительными узлами сети и потребителем, как показано на рисунке 3.

Каждый вычислительный узел реализован в виде виртуальной машины и содержит в себе программный модуль того или иного элемента ГНСС ГЛОНАСС. Программные модули запускаются на различных компьютерах, виртуальных и/или реальных, связанных через Интернет. Программный модуль содержит реализацию математической модели на произвольном языке программирования, а также программные средства информационно-логического взаимодействия (ИЛВ) с платформой.

ИЛВ всех участников платформы осуществляется через виртуальную сеть, индивидуальную для каждого пользователя платформы. Обмен информацией между всеми участниками проводится через информационную шину, которая содержит в себе все выходные векторы от всех моделируемых объектов. Каждый программный модуль при



Управления

Рисунок 3. Структура сети платформы

начале очередного такта моделирования забирается с шины в соответствии со своей спецификацией.

После получения необходимых данных и формирования вектора входных переменных вычислительный узел осуществляет расчет в соответствии с заданной математической моделью объекта (2) и формирует вектор выходных переменных (3), отправляя его в узел управления.

После получения информации о результатах моделирования объектов, входящих в систему, узел управления выдает широковещательную команду для всех узлов на завершение такта моделирования. Затем передает все полученные данные пользователю для хранения и дальнейшей обработки и выдает команду для начала нового такта.

Таким образом, для размещения программной модели на платформе требуется разработать программный модуль, реализующий математическую модель, описанную в соответствии с (2), (3) и обеспечивающий ИВЛ с вычислительной сетью.

Заключение

Предложенные в работе базовые принципы работы платформы моделирования системы ГЛОНАСС позволяют сформировать задел для её развития и масштабирования. Дальнейшая работа будет распределена по трем направлениям. Первым направлением является реализация описанных в данной работе организационных мероприятий, в частности поиск заинтересованных лиц из сообщества разработчиков и формирование экспертного совета платформы. Второе направление – создание технологических решений, таких как обеспечение возможности подключения разработчиков и создание репозитория моделей. Последним направлением являются технические решения, определения параметров каждого элемента системы ГЛОНАСС, достаточного для выстраивания взаимосвязей между ними и наполнения репозитория моделей.

Список литературы

- [1] Ромм Я. Е., Джанунц Г. А. Моделирование движения навигационных спутников системы ГЛОНАСС на основе кусочно-интерполяционного решения задачи Коши для дифференциальной системы // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 88–101.
- [2] Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС информационно-аналитический центр координатновременного и навигационного обеспечения: официальный сайт. Системы функциональных дополнений ГНСС – 2022. – URL: https://glonass-iac.ru/guide/function_dop.php (дата обращения: 23.12.2023). Текст: электронный.
- [3] Бояркеева О.В. Применение методов имитационного моделирования для исследования точности беззапросных траекторных измерений по навигационным спутникам ГЛОНАСС: канд. дисс. Новосибирск. ФГУП «СНИИМ», 2011. 125 с.
- [4] Михайлова О.К., Корогодин И.В. Обработка сигналов с цифровой поднесущей двумя традиционными каналами коррелятора // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 5–17. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-01
- [5] ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника. 2020. 1072 с.: ил. ISBN 978–5–93108–198–4
- [6] Поваляев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника. 2008. 328 с., ил.
- [7] Малышев А. П., Пудловский В. Б., Куликов Р. С., Бровко Т. А., Чугунов А. А. Особенности построения шкалы моделирования цифрового двойника системы ГЛОНАСС. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: Тезисы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции. Москва: АО «Российские космические системы». 2023. 164 с.
- [8] Пудловский В.Б., Малышев А.П., Бровко Т.А. Описание составляющих погрешности псевдодальности в ГНСС для моделирования качества навигационного обеспечения. Метрология времени и пространства. Тезисы XI симпозиума, Менделеево. 2023 г.
- [9] Chen X., Morton Y.J., Yu W. and Truong T.-K. GPS L1CA/BDS B 1I Multipath Channel Measurements and Modeling for Dynamic Land Vehicle in Shanghai Dense Urban Area, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 14247–14263, Dec. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3038646.
- [10] Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Приложение С. Оценка текущих эксплуатационных характеристик и частоты отказов. Редакция 2.2 (6.2019). Королёв 2019 г.
- [11] Zhang L., Li J., Cui T. and Liu S. An adapted RAIM algorithm for urban canyon environment, 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS, Harbin, China, 2017, pp. 116–121, doi: 10.1109/CPGPS.2017.8075108
- [12] Перов А.И. Одноэтапный алгоритм оценивания угла ориентации базовой линии по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 11. С. 82–94. DOI: https://doi.org/10.18127/ j00338486-202311-14
- [13] Корогодин И.В., Днепров В.В. Имитационная модель радиочастотного блока и корреляционного канала навигационного приемника. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2015613724 от 24.03.2015



- [14] Коровин А. В. ГНСС-НВО. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2020617239 от 02.07.2020
- [15] Капулин Д.В., Дмитриев Д.Д., Кремез Н.С. Компьютерная модель ГНСС-приемника. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2017618401 от 13.06.2017

«POTOK» – DISTRIBUTED PLATFORM FOR MODELING DIGITAL TWINS OF THE GLONASS

R. S. Kulikov, S. V. Vishnyakov, A. P. Malyshev, M.A. Orlova, T. A. Brovko

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» Moscow, The Russian Federation

The GLONASS global navigation satellite system (GNSS) is currently at the stage of modernisation. In order to consider and select the best option for the development of the system, it is necessary to create a modelling tool that can ensure the correct reproduction and interaction of diverse and different in its structure modernised elements and interrelationships between them. The main purpose of the work is to outline the structure and basic principles of the functioning of this tool. The implementation of these principles is carried out in the open platform "Potok", developed on the initiative of the National Research University "MPEI", which allows to configure digital twins of the GLONASS system and to model the system as a whole to solve a wide range of problems. In the article the principles laid down in the platform are considered and justified. The scheme of the platform organisation, technical implementation of the platform, as well as fundamental requirements to the computer models used in the platform are stated. The organisational basis of the platform is the interaction of the expert council with the community of developers. The technical implementation of the platform consists of a distributed computing network, a repository of computer models, as well as a node for modelling session management. To describe the diverse and heterogeneous elements of the GLONASS system, the concept of an ideal discrete scale of modelling time is used. All elements of the GLONASS system are described in the form of difference equations describing the evolution of the state of the elements in time.

Keywords: GLONASS, digital twin, distributed platform, computer modelling.

References

- Romm Ya.E., Dzhanunts G.A. Modelling of the GLONASS navigation satellites motion on the basis of the piecewise interpolation solution of the Cauchy problem for the differential system (in Russian) // Modern high technology, 2023, no. 2, pp. 88–101.
- [2] Applied consumer centre GLONASS information-analytical centre of coordinate-time and navigation support: official site. GNSS augmentations (in Russian) 2022. URL: https://glonass-iac.ru/guide/function_dop.php (date of reference: 23.12.2023). Text: electronic.
- [3] Boyarkeeva O.V. Application of simulation modelling methods to study the accuracy of demand-free trajectory measurements by glonass navigation satellites: PhD Novosibirsk. FSUE "SNIIM", 2011, 125 p. (in Russian)
- [4] Mikhailova O.K., Korogodin I.V. BOC signals processings by two traditional correlator channels // Radiotexnika, 2021, vol. 85, no. 9, pp. 5–17. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-01 (in Russian)
- [5] GLONASS. Modernisation and prospects of development. Monograph / Edited by A.I. Perov. Moscow: Radiotexnika, 2020, 1072 p.: ill. ISBN 978–5–93108–198–4 (in Russian)
- [6] Povalyaev A.A. Satellite radio-navigation systems: time, clock readings, measurement formation and relative coordinates estimation. Moscow: Radiotexnika, 2008, 328 p., ill. (in Russian)

62

Р.С. Куликов, С.В. Вишняков, А.П. Малышев, М.А. Орлова, Т.А. Бровко

«Поток» – распределённая платформа моделирования цифровых двойников системы ГЛОНАСС

- [7] Malyshev A. P., Pudlovskiy V. B., Kulikov R. S., Brovko T. A., Chugunov A. A. Features of modelling time scale of a digital twin of GLONASS. Actual problems of rocket-space instrumentation and information technologies: Theses of reports of XI All-Russian scientific and technical conference. Moscow: AO "Russian Space Systems", 2023, 164 p. (in Russian)
- [8] Pudlovsky V.B., Malyshev A.P., Brovko T.A. (FSBEI HE NRU «MPEI» Description of pseudorange error components in GNSS for modelling quality of navigation support. Metrology of time and space. Abstracts of the XI symposium, Mendeleevo, 2023 r.
- [9] Chen X., Morton Y.J., Yu W. and Truong T.-K. "GPS L1CA/BDS B 1I Multipath Channel Measurements and Modeling for Dynamic Land Vehicle in Shanghai Dense Urban Area," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 14247–14263, Dec. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3038646.
- [10] Global navigation satellite system GLONASS, Open Service Performance Standard, Edition 2.2, Korolev 2019.
- [11] Zhang L., Li J., Cui T. and Liu S. "An adapted RAIM algorithm for urban canyon environment," 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS, Harbin, China, 2017, pp. 116–121, doi: 10.1109/CPGPS.2017.8075108.
- [12] Perov A.I. One-stage algorithm of the base line orientation angle estimation from the satellite radio-navigation systems signals (in Russian) // Radiotekhnika, 2023, vol. 87, no. 11, pp. 82–94. DOI: https://doi.org/10.18127/ j00338486-202311-14 (in Russian)
- [13] Korogodin I. V., Dneprov V. V. Simulation model of radio frontend and correlation channel of navigation receiver. ROSPATENT. Certificate № 2015613724 from 24.03.2015. (in Russian)
- [14] Korovin A. V. GNSS -NVO. ROSPATENT. Certificate № 2020617239 from 02.07.2020. (in Russian)
- [15] Kapulin D.V., Dmitriev D.D., Kremez N.S. Computer model of GNSS-receiver. ROSPATENT. Certificate № 2017618401 from 13.06.2017. (in Russian)

Сведения об авторах

Куликов Роман Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, директор института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2007 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 2010 году. Область научных интересов: системы автоматического управления, радионавигационные системы.

Вишняков Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, директор института информационных и вычислительных технологий НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2002 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 2005 году. Область научных интересов: цифровая обработка многомерных сигналов.

Малышев Александр Павлович – ассистент кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2023 году. Область научных интересов: радионавигационные системы, оптимальная обработка сигналов, математическое моделирование.

Орлова Маргарита Андреевна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем и сетей НИУ «МЭИ». Окончила НИУ «МЭИ» в 2018 году. Защитила кандидатскую диссертацию в 2022 году. Область научных интересов: вычислительные системы и комплексы, беспроводные локальные сети, виртуализация сетей и вычислительных ресурсов.

Бровко Татьяна Антоновна – ассистент кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ». Окончила НИУ «МЭИ» в 2021 году. Область научных интересов: радионавигационные системы, моделирование сложных систем.

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Космические аппараты и технологии»

Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:

- ракетно-космическая техника
- новые материалы и технологии в космической технике
- космическое приборостроение
- космические услуги
- инновации космической отрасли

Статья должна быть подготовлена в формате «Документ Word 97–2003» и направлена на электронную почту редакции spacecrafts.technologies@yandex.ru.

Вместе со статьей необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов авторам будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

Подписанный лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключения КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, а/я 57, Красноярский край, г. Железногорск. Ассоциация «ТП «НИСС».

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

Авторы должны руководствоваться приведенными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:

- Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населенный пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- Аннотация к статье. Объем аннотации: 150–180 слов.
- Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- Пристатейный список литературы, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008.
 Рекомендуется использование не менее 15 (минимум 10) источников не старше 15 лет.
- Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и список литературы на английском языке.
- В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, идентификатор ORCID).

