

## СЕТЬ НКУ ДКА – ГЛОБАЛЬНАЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ УПРАВЛЕНИЯ, НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ДАЛЬНОГО КОСМОСА

## NKU DKA NETWORK – GLOBAL RADIO INTERFEROMETRIC NETWORK FOR CONTROL, NAVIGATION AND COMMUNICATIONS WITH DEEP SPACE SPACECRAFT

**А.О. Жуков<sup>1</sup>**,  
профессор,  
доктор технических наук,  
aozhukov@mail.ru;  
**A.O. Zhukov**

**К.А. Иванов<sup>1</sup>**,  
ivanow@okbmei.ru;  
**K.A. Ivanov**

**М.К. Бондарева<sup>1</sup>**,  
доцент,  
доктор технических наук,  
mkbond@mail.ru;  
**M.K. Bondareva**

**Е.В. Окунев<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук,  
kve0r@rambler.ru;  
**E.V. Okunev**

**А.А. Демичев<sup>2</sup>**,  
flaing@yandex.ru;  
**A.A. Demichev**

*В статье показаны основные этапы, решения и результаты крупного проекта АО «ОКБ МЭИ» по созданию глобальной радиоинтерферометрической сети.*

*Ключевые слова:*  
радиоинтерферометрическая сеть;  
дальние космические аппараты;  
коррелятор;  
многоканальный широкополосный конвертор;  
наземный комплекс управления.

DOI: 10.26162/LS.2024.47.15.016

### ВВЕДЕНИЕ

Космическая деятельность является важнейшим признаком общего технологического, экономического и военно-политического развития ведущих стран мира, в значительной степени определяет их положение в мировом сообществе. На современном этапе вызовы, бросаемые безопасностью Российской Федерации и беспрецедентное санкционное давление, приводят к переоценке многих аспектов в развитии комплексов связи. Сейчас нужны нетривиальные подходы, технологии и решения по созданию высокоэффективных конкурентоспособных комплексов связи, нацеленных на перспективу, которые реализуются российскими высокотехнологичными предприятиями (Белькович И.В. и др., 2018; Жуков А.О., 2022; Попков Д.В. и др., 2022).

Именно таким крупным проектом является создание глобальной радиоинтерферометрической сети

*The article shows the main stages, decisions and results of a major project of JSC «OKB MEI» to create a global radio interferometric network.*

*Key words:*  
radiointerferometric network;  
long-range spacecrafts;  
correlator;  
multichannel wideband convertor;  
terrestrial control unit.

для решения задач обеспечения навигации, связи и управления космическими аппаратами дальнего космоса, включая приём научной информации (сеть НКУ ДКА).

Данный проект реализуется АО «ОКБ МЭИ» поэтапно в рамках существующей ФКП-2025 и планируемой ФКП-2036. Результатом реализации проекта является создание сети НКУ ДКА, предназначенной для обеспечения непрерывного и устойчивого управления, связи и навигации российской орбитальной группировкой пилотируемых и автоматических космических аппаратов, в том числе при выполнении программ освоения дальнего космоса на траекториях полёта к Луне, Марсу, другим небесным телам Солнечной системы, международными космическими аппаратами, объектами напланетной и межпланетной инфраструктуры, а также для обеспечения

<sup>1</sup> АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», Россия, г. Москва.  
Special research bureau of Moscow power engineering institute, JSC, Russia, Moscow.

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН, Россия, г. Москва.  
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

проведения фундаментальных научных исследований в дальнем космосе.

Полёты на Луну и к другим планетам Солнечной системы – сложнейшая задача, которая требует решения проблемных вопросов существующих средств НКУ ДКА (Казмерчук П.В. и др., 2024; Гордиенко Е.С. и др., 2023; Жуков А.О. и др., 2022; Охлопков К.А. и др., 2020; Иванов К.С. и др., 2015; Васильев М.А. и др., 2020; Жуков А.О. и др., 2023; Иванов И.Г. и др., 2021). Для нивелирования проблем необходимо развитие структуры и систем НКУ ДКА за счёт модернизации, унификации новых методов и средств, расширения структуры и перехода к сетевой многоантенной схеме управления, навигации и связи (Карцан И.Н., 2022; Жуков А.О. и др., 2023). То есть необходимо создание сети НКУ ДКА на базе передовых технологий.

## 1. Основные этапы, решения и результаты развития наземного комплекса управления космическими аппаратами дальнего космоса

Целью создания сети НКУ ДКА является (Жуков А.О. и др., 2020; Иванов К.А. и др., 2022; Жуков А.О., 2023):

- обеспечение непрерывного и устойчивого управления российской орбитальной группировкой пилотируемых космических аппаратов, объектами напланетной и межпланетной инфраструктуры;

- обеспечение гарантированного доступа и необходимого присутствия России в окололунном пространстве и на Луне;
- использование автоматических космических аппаратов во внеземном пространстве со своей территории, в том числе при выполнении программ освоения дальнего космоса на траекториях полёта к Луне, Марсу, другим небесным телам Солнечной системы;
- обеспечение проведения фундаментальных научных исследований в дальнем космосе.

Сеть НКУ ДКА создаётся как синтезированная когерентная пространственно-временная радиоизмерительная система, представляющая собой глобальный радиотелескоп с незаполненной апертурой, и является одним из ключевых элементов пространственно-временной системы наземно-космической связи и навигации Российской Федерации (Жуков А.О., 2023). Это сеть наземных радиотехнических комплексов (НРТК) на базе антенных систем (АС) с диаметром зеркал 32 и 12 метров. Они размещаются в Центрах дальней космической связи Калязин (Тверская область), Школьное (Крым), Восточный (Циолковский), Южный (Чили) и объединены Центром управления и обработки данных сети (ЦУОДС) в Центре дальней космической связи Медвежьего Озера (Московская область). Это позволит обеспечить время радиосвязи с КА до 24 часов. Расположение средств сети НКУ ДКА до 2036 года показаны на рисунке 1.



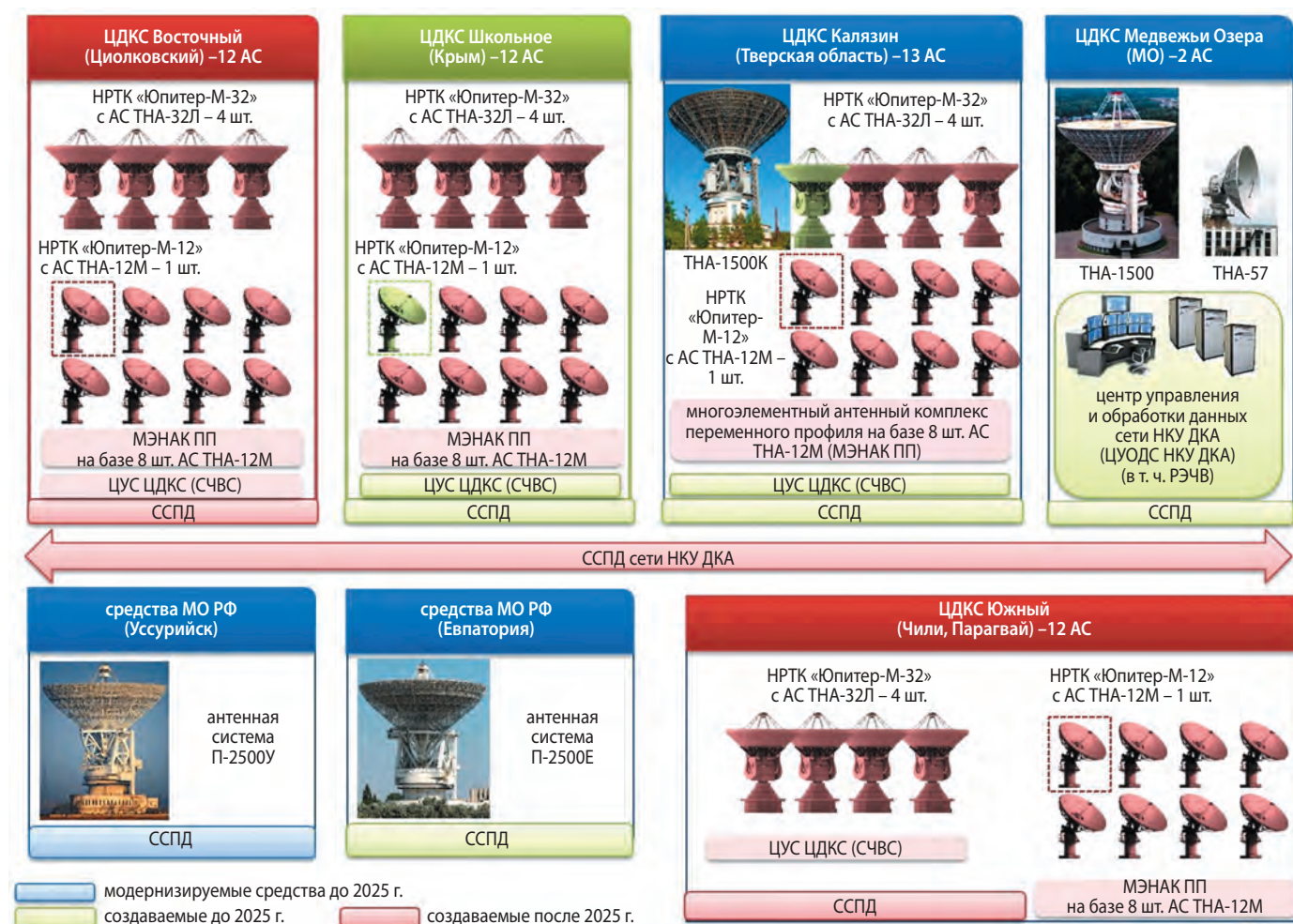
Интегрированная глобальная радиоинтерферометрическая сеть управления, навигации и связи с ДКА (сеть НКУ ДКА)  
Время радиосвязи с КА [24 часа].

\* Для уточнения расположения ЦДКС в Южной Америке необходимо проведение рекогносцировочных работ и выпуск ДЭП к ОКР «НКУ ДКА-2025».

**рисунк 1.** Расположение средств сети НКУ ДКА до 2036 года



# СЕТЬ НКУ ДКА – ГЛОБАЛЬНАЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ УПРАВЛЕНИЯ, НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ДАЛЬНОГО КОСМОСА



**рисунок 2.** Состав сети НКУ ДКА до 2036 года

Сроки создания (модернизации, в т.ч. продления назначенного срока службы) и состав сети НКУ ДКА до 2036 года показаны на рисунке 2.

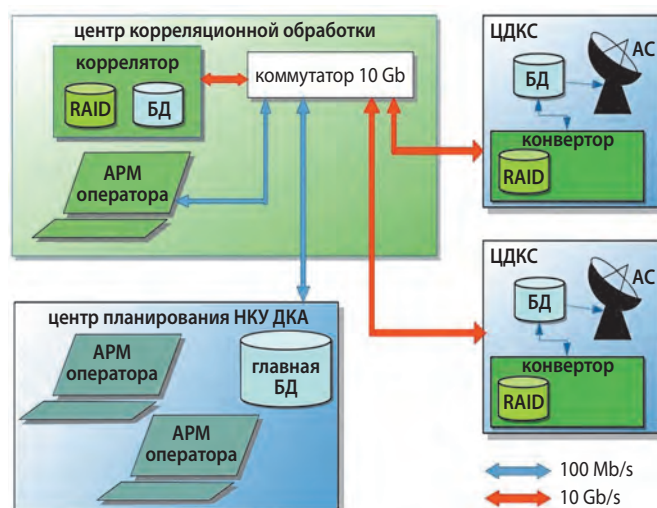
Одним из ключевых элементов сети ДКС является Центр корреляционной обработки. В рамках создания центра разработаны:

- система частотного преобразования, оцифровки и регистрации данных – многоканальный широкополосный конвертор;
- коррелятор для спектрально-корреляционной обработки данных.

Оснащение приёмных антенн радиоинтерферометрической аппаратурой позволит выполнить следующие задачи (Юдаев Д.Т. и др., 2021; Жуков А.О. и др., 2022; Карцан И.Н. и др., 2022; Иванов К.А. и др., 2022; Жуков А.О. и др., 2023; Жуков А.О. и др., 2020):

- измерение координат космических объектов с применением метода дифференциальной интерферометрии, в том числе в дальнем космосе;
- измерение координат с высокой точностью;
- увеличение чувствительности приёмной системы и дальности приёма за счёт сложения площадей антенн;

- поддержка космических миссий в части приёма и обработки телеметрической информации с КА;
- координатно-временное обеспечение, построение изображений радиоисточников, просветная локация и т.д.



**рисунок 3.** Структура центра корреляционной обработки в составе НКУ ДКА

Центр корреляционной обработки (ЦКО) является подсистемой НКУ ДКА и включает в себя системы (рисунок 3):

- подготовки экспериментов;
- регистрации данных (многоканальные широкополосные конверторы);
- корреляционной обработки (коррелятор).

Управляющие параметры:

- расписание эксперимента;
- целеуказания для систем наведения антенн;
- параметры регистрации сигнала для конверторов;
- настройки частотного плана радиотракта;
- указание на расположение экспериментальных данных;
- предварительно рассчитанные параметры для корреляционной обработки.

Управляющие параметры из системы подготовки экспериментов записываются в базу данных системы планирования НКУ ДКА и через механизм репликации транслируются непосредственно к исполнительным устройствам.

Выходные данные работы коррелятора (корреляционные отклики, ряды измеряемых задержек, частот и т.д.) также заносятся в базу данных экспериментов НКУ ДКА и становятся доступны пользователю для дальнейшей обработки.

Многоканальный широкополосный конвертор предназначен для регистрации и передачи экспериментальных данных. Оснащён двумя каналами: каналом регистрации и каналом воспроизведения, что позволяет суммировать площади и воспроизводить аналоговый сигнал. Управление работой конвертора осуществляется как в ручном режиме через удалённый терминал, так и в автоматическом режиме по заранее созданному расписанию.

Результаты исследований реализуются аппаратно-программно. На рисунке 4 показан интерфейс кон-

вертора с окном конфигурации записи (рисунок 4а) и спектром сигнала одного из каналов (рисунок 4б).

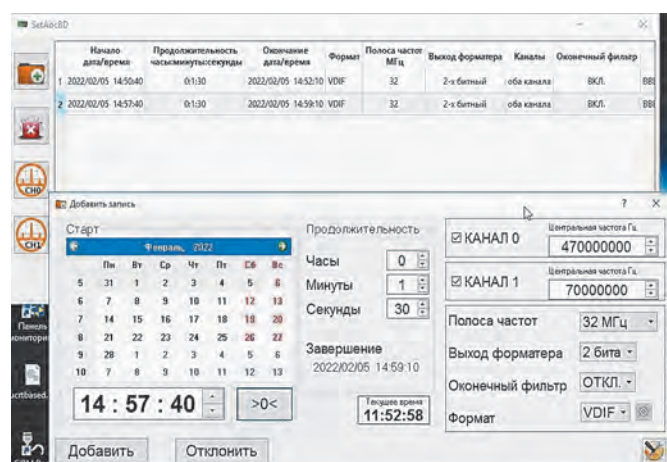
Коррелятор представляет собой программно-аппаратный комплекс с использованием технологий параллельного вычисления на графических ускорителях. На данном этапе реализованы алгоритмы двух типов коррелятора: XF (Взаимная корреляция потоков и БПФ результата перемножения потоков) и FX (БПФ каждого потока, перемножение спектров, построение корреляционной функции). Кроме того, исследовано несколько вариантов алгоритмов коррелятора для увеличения быстродействия, чувствительности и помехоустойчивости:

- алгоритм автоматического поиска корреляционного пика (без предварительной компенсации потока);
- алгоритм слеящего коррелятора с фазовой автоподстройкой (который используется в задачах апертурного синтеза (суммирования) площадей).

Новизной является и то, что программное обеспечение коррелятора разработано с учётом интеграции его в комплекс НКУ ДКА и построено по модульному принципу. Модульный принцип позволяет легко дополнять и развивать коррелятор, перестраивая его под различные задачи. Запуск и конфигурирование вычислительных модулей осуществляется посредством программной оболочки. С её помощью также реализуется взаимодействие коррелятора с базой данных параметров проводимых экспериментов.

Основные вычислительные модули реализованы на языке программирования «С» применением технологии для работы на графических процессорах. Они выполняют скоростную обработку данных по выбранным алгоритмам в зависимости от задачи (рисунок 5).

В рамках Проекта были проведены интерферометрические эксперименты – натурные эксперименты



а



б

а – окно конфигурации записи; б – спектр сигнала одного из каналов.

**рисунок 4.** Интерфейс конвертора с окном конфигурации записи и спектром сигнала одного из каналов



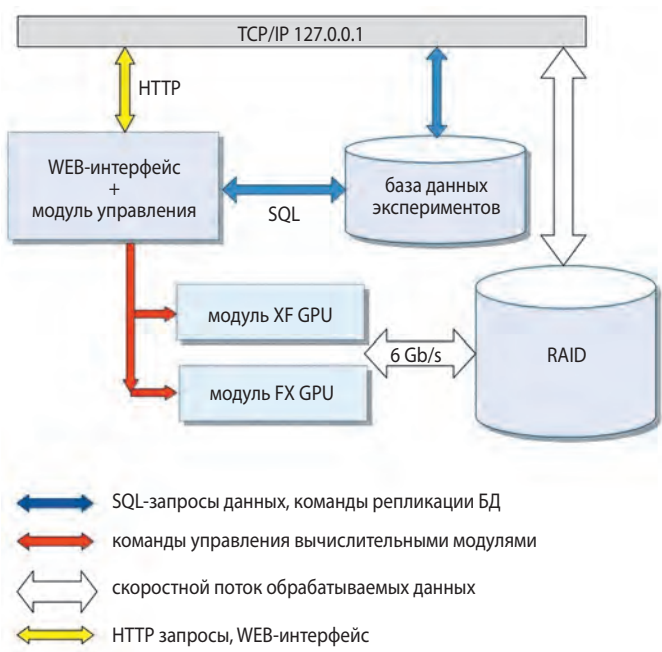


рисунок 5. Структура взаимодействия программных модулей и потоки данных

с применением антенн ТНА-1500 и ТНА-57 на полигонах «Калязин» и «Медвежьи Озера». В экспериментах принималось излучение КА «СПЕКТР-РГ» и «ЭКЗОМАРС» и излучение естественных радиоисточников. В ходе этих экспериментов проводилось тестирование широкополосных конверторов и алгоритмов корреляторов.

По результатам обработки результатов экспериментов были сделаны оценки длин проекций базовых линий интерферометра и величины инструментальной

задержки излучений. В том случае, когда объект располагается на большом расстоянии от Земли и волновой фронт излучения, приходящего на антенны, можно считать плоским, геометрическая задержка связана с искомыми параметрами и координатами источника на момент наблюдений. Обработка результатов сводилась к решению системы уравнений из 118 уравнений (по количеству замеров). В таблице 1 приведена небольшая часть исходных данных.

Расхождение полученных и заданных проекций базовых линий интерферометра составляет единицы метров, а дисперсии существенно меньше погрешности измерения задержки в линейной мере (31,25 нс, что соответствует 9,4 м). Такие результаты показывают реальную возможность повышения точности определения координат КА и точности работы навигационных систем.

Следующим экспериментом в рамках этого проекта был эксперимент по суммированию площадей – применялся метод увеличения чувствительности за счёт увеличения площади приёмной системы, который заключается в синфазном сложении сигналов, принятых двумя антеннами (рисунок 6). Сигнал принимался с КА «ЭКЗОМАРС (TGO)» антеннами ТНА-1500 и ТНА-57 на полигонах Калязин и Медвежьи Озера соответственно.

В результате эксперимента было получено приращение отношения энергии бита к плотности шума ( $E_b/N_0$ ) по отношению к среднему значению двух сигналов на 2,67 дБ. Такой результат показывает существенное увеличение чувствительности системы, что позволяет значительно увеличить дальность уверенного приёма информации от КА в космосе.

таблица 1 – Пример части исходных данных

исходные параметры: проекции базовой линии Медвежьи Озера – Калязин и инструментальная задержка		результат расчёта	разность между известными значениями и измеренными
$B_x$ , м	-97356,151	-97354,41±5,4	1,74 м
$B_y$ , м	-79864,808	-79863,31±5,2	1,49 м
$B_z$ , м	83142,091	83145,26±7,3	3,17 м
$d\tau_{ин}$ , мкс		-0,186±0,019	

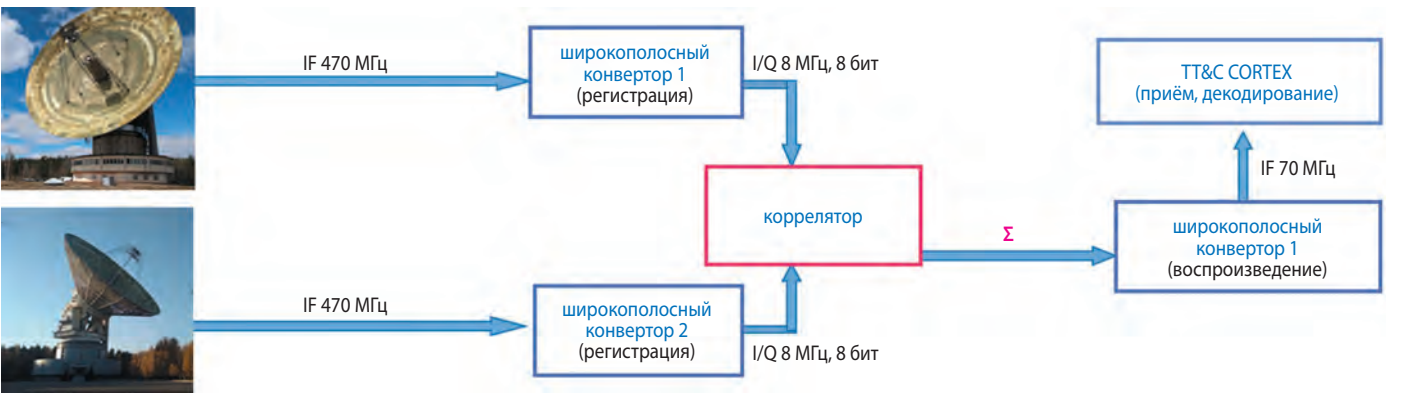


рисунок 6. Эксперимент по суммированию площадей

## заключение

АО «ОКБ МЭИ» в рамках ФКП-2025 успешно выполнены основные работы по созданию ключевых элементов радиоинтерферометрической сети для решения задач обеспечения навигации, управления КА и приёма научной информации, в том числе при выполнении программ освоения дальнего космоса на траекториях полёта к Луне, Марсу, другим небесным телам Солнечной системы, международными космическими аппаратами, объектами напланетной и межпланетной инфраструктуры, а также задачи обеспечения проведения фундаментальных научных исследований в дальнем космосе.

Полученные результаты позволяют:

- проводить интерферометрические эксперименты, как по приёму сигналов КА, так и по излучению различных космических радиоисточников;
- увеличить дальность и надёжность приёма информации от КА в космосе за счёт увеличения чувствительности системы;
- разработать требования к высокоскоростным линиям передачи данных для построения систем РСДБ и пространственно-временных систем реального времени;
- реализовать технологию распределённого управления оборудованием ЦКО через имеющуюся локальную сеть с невысокой пропускной способностью;
- измерять координаты космических объектов с высокой точностью с применением метода дифференциальной интерферометрии, в том числе и определения координат и траекторий дальних космических миссий;
- измерять координаты приёмных станций с высокой точностью при наблюдении источников;
- увеличивать чувствительность приёмных систем и дальность приёма за счёт сложения площадей антенн;
- поддерживать космические проекты в части приёма и обработки телеметрической информации, получаемой от КА, координатно-временного обеспечения, построения изображений радиоисточников и РСДБ-локации, просветной локации и т.д.;
- оценить реальную возможность повышения точности определения координат КА и эффективности работы навигационных систем;
- создать ключевые элементы пространственно-временной системы реального времени;
- повысить качество управления КА и приёма научной информации, а также точность решения задач навигации орбитальных и наземных объектов.

Сейчас продолжается развитие НКУ ДКА, экспериментальные исследования и поиски дополнительных нетривиальных методов практического применения полученных результатов.

## список литературы

*Белькович И.В., Гладких Н.В., Жуков А.О. и др.* Направления совершенствования развития наукоемких предприятий ракетно-космической отрасли России: учеб. пособие для сотрудников АО «ОКБ МЭИ». М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2018. 145 с.

*Бондарева М.К., Васьков С.В., Салов В.В.* Комплексирование методов верификации навигационных решений при навигационно-баллистическом обеспечении управления космическими аппаратами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 49-56.

*Васильев М.А., Бондарева М.К.* Методика расчета коэффициента достаточности наземных средств для управления космическими аппаратами // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 176, № 3. С. 19-22.

*Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В., Розин П.Е.* Анализ траекторий выведения КА на высокие орбиты искусственного спутника луны с использованием двухимпульсного торможения // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 2. С. 27-37.

*Жуков А.О.* Цифровая трансформация высокотехнологичных производственных систем // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сб. науч. трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 16–18 ноября 2022 года. Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений». 2022. С. 53-59.

*Жуков А.О., Валяев И.Н., Коваленко В.П. и др.* Синтез оптимального алгоритма обработки случайных сигналов при фазовой пеленгации // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2020 года. М.: АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2020. С. 140-142.

*Жуков А.О., Валяев И.Н., Минин И.В., Погорелов М.П.* Базовая модель корреляционно-фазового пеленгатора // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: материалы VII Всероссийской научно-практической

конференции, Москва, 29 декабря 2021 года. М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2022. С. 436-444.

Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2020 года. М.: Акционерное общество «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2020. С. 63-71.

Жуков А.О., Иванов К.А., Бондарева М.К. и др. Наземный комплекс управления космическими аппаратами дальнего космоса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 99-108.

Жуков А.О., Иванов К.А., Дугин Н.А. и др. Перспективы развития систем сложения сигналов на базе современных технологий РСДБ // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2021 года. М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2022. С. 445-448.

Жуков А.О., Кучеров Б.А. Анализ видов ограничений, учитываемых при планировании задействования технических средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2021 года. М.: АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2022. С. 300-309.

Жуков А.О., Минин И.В., Валяев И.Н. и др. Мониторинг космических объектов с использованием перспективных радиотехнических средств // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2020 года. М.: Акционерное общество «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2020. С. 153-161.

Иванов И.Г., Бондарева М.К., Иванов К.А. Система оценки технического состояния средств наземного комплекса управления космическими аппаратами // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. тезисов конференции II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2021 года. М.: Акционерное общество «Особое конструкторское бюро

Московского энергетического института», 2021. С. 199-206.

Иванов К.А., Жуков А.О., Горовой Д.С. и др. Наблюдения космических аппаратов методом Delta-Dor // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2021 года. М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2022. С. 454-463.

Иванов К.С., Бондарева М.К. Метод идентификации дефектов бортовых программных комплексов анализа информации космических аппаратов дальних космических миссий // Идентификация систем и задачи управления: труды X международной конференции: Proceedings of the X International Conference. Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», Москва, 26–29 января 2015 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. С. 967-978.

Казмерчук П.В., Вернигора Л.В. Оптимизация межпланетных траекторий и гравитационных манёвров КА с малой тягой методом линеаризации. Часть 1 // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 2. С. 50-56.

Карцан И.Н., Жуков А.О., Кузнецов Д.Г. Контроль радиотехническими и оптическими средствами за космическими объектами // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 2021 г. М.: АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2022. С. 45-58.

Охлопков К.А., Иванов И.Г., Бондарева М.К., Головин Н.М. Анализ существующих и перспективных технологий управления орбитальными группировками космических аппаратов // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сб. тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 01 октября 2020 года. М.: Акционерное общество «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», 2020. С. 215-219.

Попков Д.В., Ведров А.А., Жуков А.О. Цифровая трансформация производственной системы высокотехнологичных оборонных предприятий: проблемы и перспективы. М.: ФГБНУ «Аналитический центр», 2022. 217 с.

*Статья поступила в редакцию 12.08.2024*

*Статья после доработки 17.09.2024*

*Статья принята к публикации 17.09.2024*