



**Конкурс междисциплинарных научных
проектов исследовательских коллективов МГУ имени М.В. Ломоносова,
выполняющихся в интересах Междисциплинарных научно-образовательных
школ Московского университета**



**Результаты работы за 2024 год
проект 24-Ш01-04**

Разработка интеллектуальных моделей и алгоритмов функционирования наземно-космической системы для эффективного мониторинга высокоскоростных маневрирующих объектов в условиях деструктивного воздействия факторов космического фона

Фундаментальные и прикладные исследования космоса

Москва, 2024 г.

1. О проекте

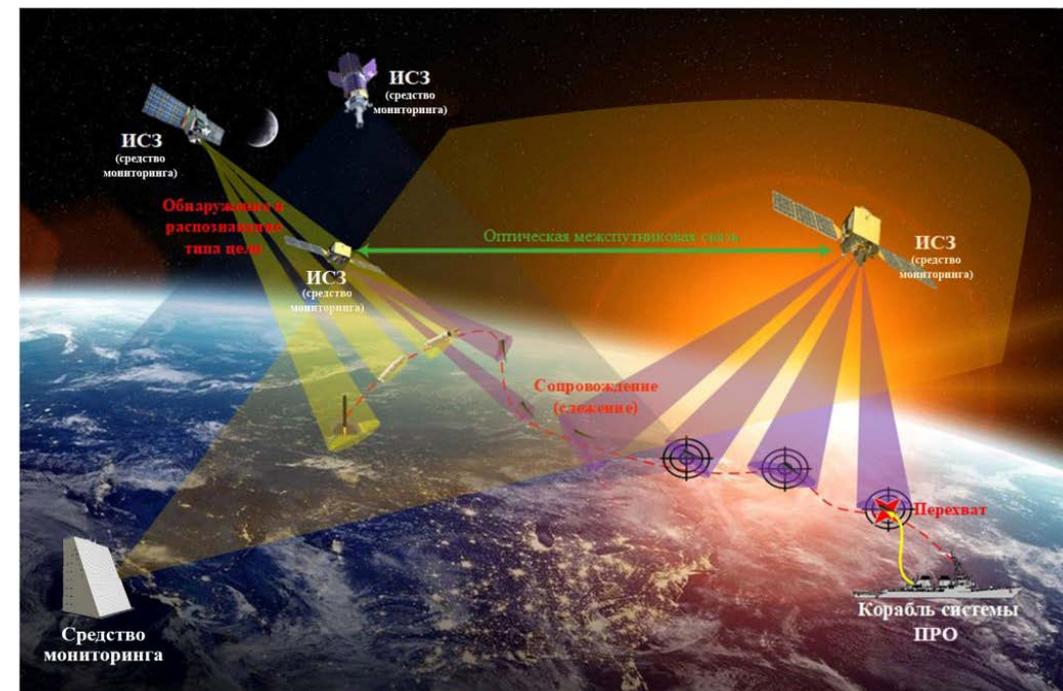
Проект 24-Ш01-04 посвящен исследованию и разработке комплекса моделей и алгоритмов функционирования наземно-космической системы (НКС) для эффективного мониторинга высокоскоростных маневрирующих объектов (ВМО).

В качестве объекта исследования рассматриваются средства мониторинга наземного и космического базирования, объединенные в единую систему.

Основная цель проекта – исследования и разработка моделей и алгоритмов функционирования НКС для эффективного и успешного обнаружения и сопровождения любых космических объектов, в особенности ВМО.

Актуальность проекта обусловлена появлением новых типов ВМО, необходимости их обнаружения в условиях неопределенности траектории движения и высокой сложности их моделирования.

Проект соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.



Система мониторинга космического пространства (СМКП), состоящая из наземных и космических средств мониторинга

Планируемые результаты проекта:

2024

1. Разработка моделей деструктивных воздействий на изменение функциональных параметров НКС при мониторинге ВМО

2. Разработка интеллектуальных моделей траекторий движения ВМО в условиях неопределенности процессов в околоземном пространстве

2025

3. Разработка алгоритмов мониторинга ВМО на основе нейросетевых методов анализа многомерных временных рядов и разнородных измерений

4. Разработка алгоритмов оптимального управления временным и энергетическим параметрами НКС при мониторинге ВМО

Термины и определения:

ВМО - высокоскоростные маневрирующие объекты

НКС – наземно-космическая система

Факультет космических исследований МГУ



Булатов Марат Фатыхович
(соруководитель)
д.ф.-м.н., профессор,
главный научный сотрудник

Участники:

Шафир Р.С. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;
Захаров А.С. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;
Мацеевич С.В. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики.

Военный учебный центр при МГУ



Тимошенко Александр Васильевич
(соруководитель)
д.т.н., профессор,
старший преподаватель

Участники:

Загер И.Б. – к.т.н., зам. нач. кафедры;
Перлов А.Ю. – к.т.н., старший преподаватель;
Львов К.В. – младший научный сотрудник Физического факультета МГУ.

Проект 24-Ш01-04 создает условия для трансформации технологий проектирования и созданного ФКИ научного задела в обеспечение способности государства эффективно отвечать на актуальные вызовы и угрозы, исследование которых является задачей ВУЦ МГУ в рамках реализации принципов фундаментальной инженерии.

2. Результаты и план работ

Основные результаты проекта, полученные за 2024 год.

Разработан алгоритм оперативного обнаружения маневра космического аппарата на основе моделей машинного обучения. По результатам экспериментальной отработки **удалось снизить время обнаружения маневра на 15%**.

На основе гибридной функции принятия решений оператора НКС МКП при сопровождении ВМО построен алгоритм поддержки принятия решений. Проведено моделирование на элементарных линейных гибридных функциях и показано, что подобный алгоритм позволит **сэкономить до 10 секунд** при принятии комплексного решения.

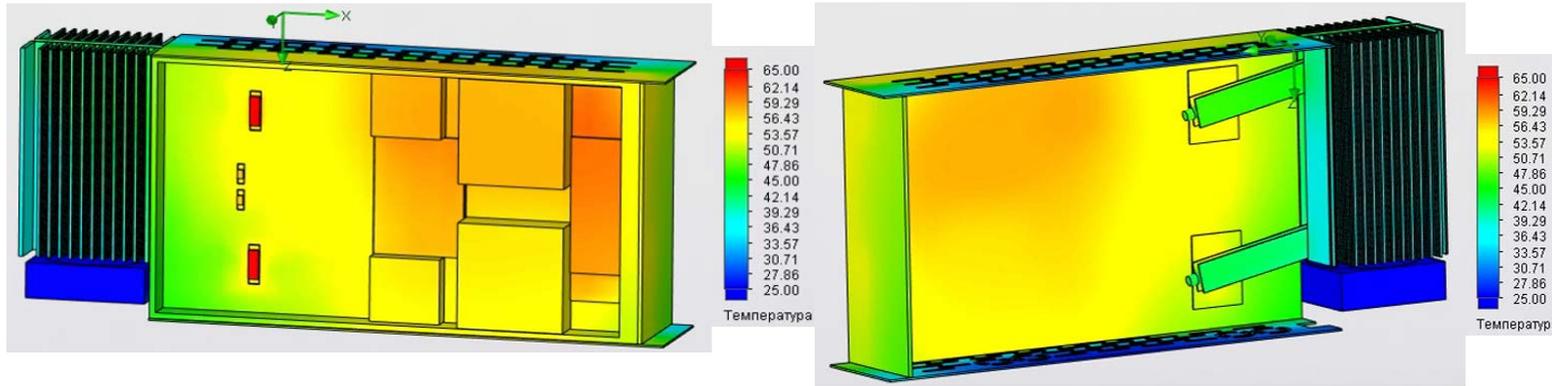
Разработан алгоритм управления сигналами НКС МКП в зависимости от риска потери управляемости ВМО. Проведено моделирование изменения риска выбора неоптимального сигнала и показано, что данная методика позволит **в 1,74 раза увеличить скорость** смены сигнала.

Построена оригинальная онтологическая модель НКС МКП для работы с космическими ВМО, отличающаяся от известных тем, что учитывает динамику стохастических деструктивных факторов и тепловых процессов, что позволяет определить тип и параметры оптимального сигнала. Проведен численный эксперимент по нахождению искажений АЧХ по данным телеметрии с приемного тракта. По результатам эксперимента получен массив **изменения чувствительности приемной системы до 12 дБ**, что отличается от заданных значений на 22%.

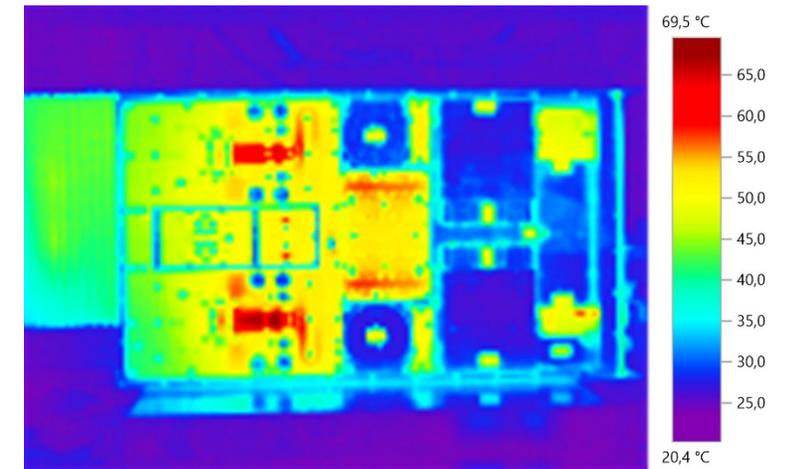
Разработан ряд направлений и практических рекомендаций по совершенствованию методик применения САПР для моделирования теплового режима сложных РЭС для работы НКС МКП с ВМО. По результатам моделирования **рассчитано 8 переходных параметров** для иерархической тепловой модели РЭС с воздушным типом охлаждением.

В 2024 году (**2-4 кварталы**) по тематике проекта **опубликовано 13 статей**, из которых **4** входят в базу SCOPUS, **6** входят в базу RSCI, **4** статьи категории K1 из перечня ВАК, участники приняли участие в **международных конференциях IEEE**.

Результаты исследования процессов нагрева блоков НКС

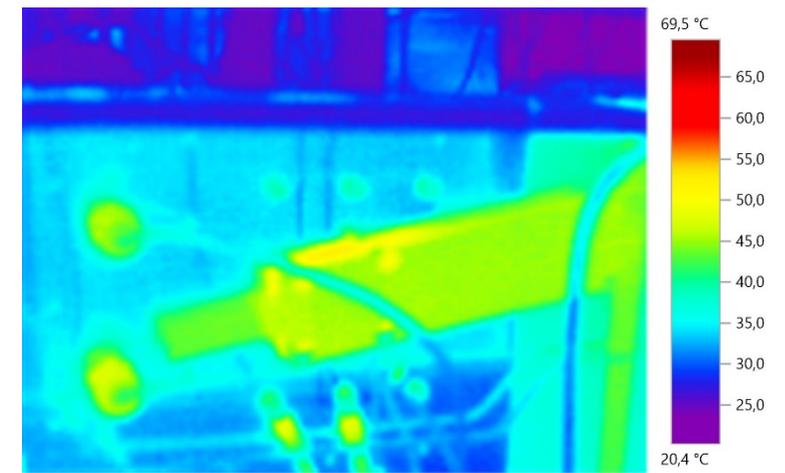


Температурное распределение по узлам блока НКС (открытый корпус)



Температурная карта (вид спереди).
Съемка тепловизором

Узел блока РИС	Расчетное Значение, °C	Измеренное значение, °C	Абсолютная погрешность, K	Относительная погрешность, %
Нагрузка	43,48	42,80	0,68	1,56
Циркулятор	55,90	54,20	1,70	3,05
Тепловая трубка	46,60	45,60	1,00	2,14
Плата усиления	60,28	72,50	12,22	16,86
Корпус транзистора	66,62	59,10	7,52	11,28



Температурная карта. Вид сзади (тепловая трубка). Съемка тепловизором

Вывод: натурные испытания подтвердили корректность тепловой модели блока НКС. Наиболее существенное расхождение было выявлено на плате усиления, что связано с не учетом топологии печатной платы при моделировании. Для повышения точности требуется дальнейшее совершенствование модели.

Моделирование связи функциональных характеристик НКС и деструктивных воздействий

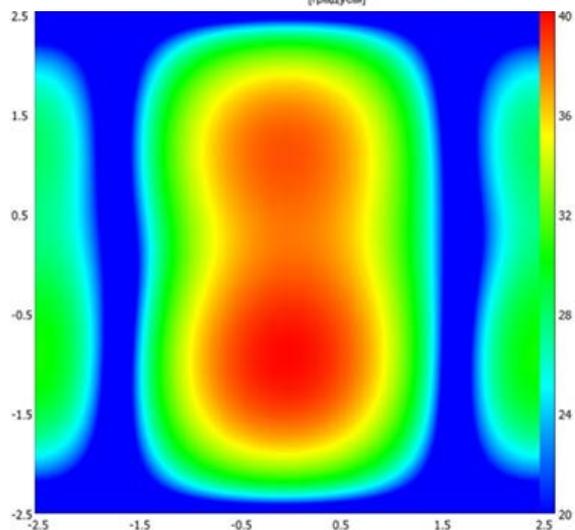
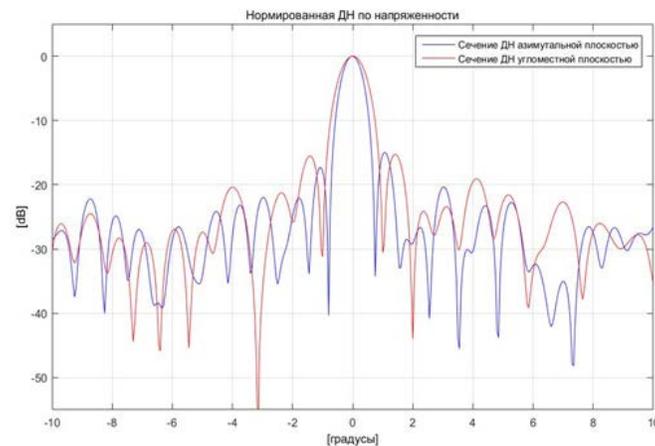
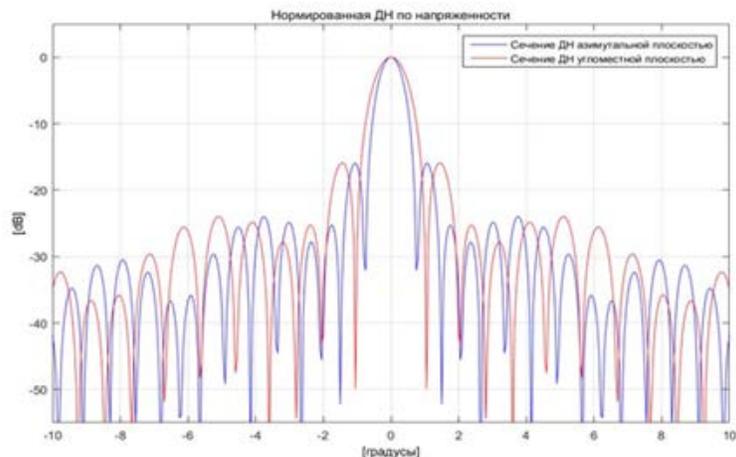


Диаграмма направленности и радиолокационное изображение без искажений фазовых характеристик

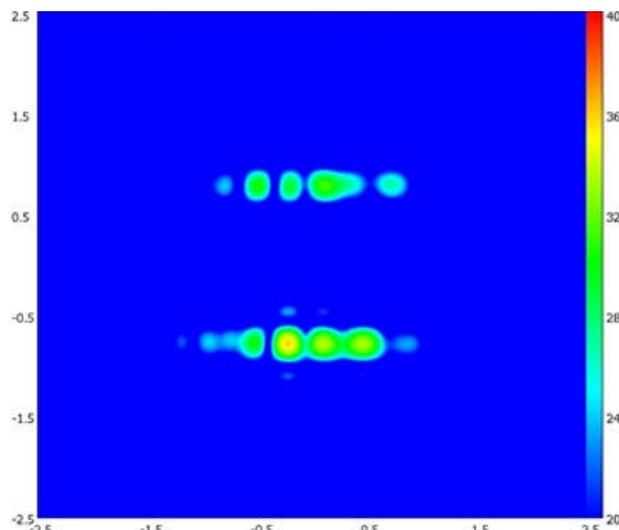


Диаграмма направленности и радиолокационное изображение с искажением от 10 до 20 градусов

Вывод: Под действием расфазировки, возникшей из-за воздействия деструктивных факторов, боковые лепестки диаграммы направленности увеличились на 3 дБ, что привело к разрушению радиолокационного изображения (падению интенсивности на 34 дБ)

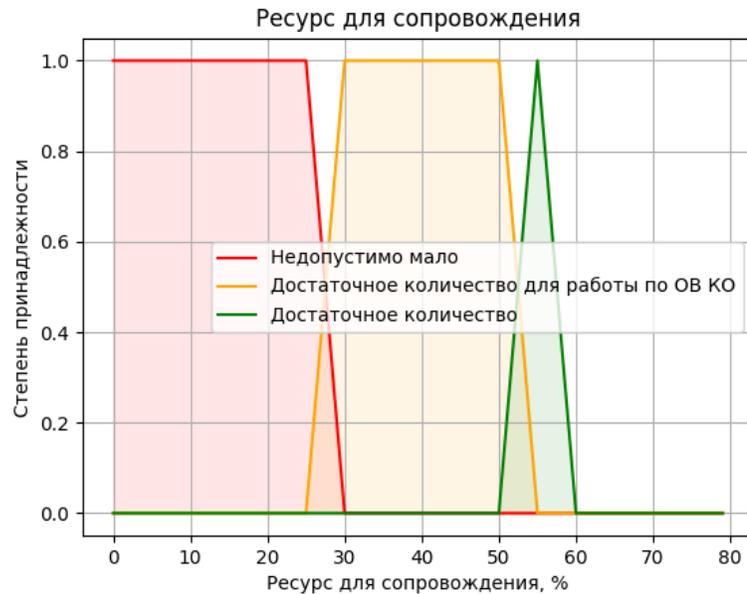
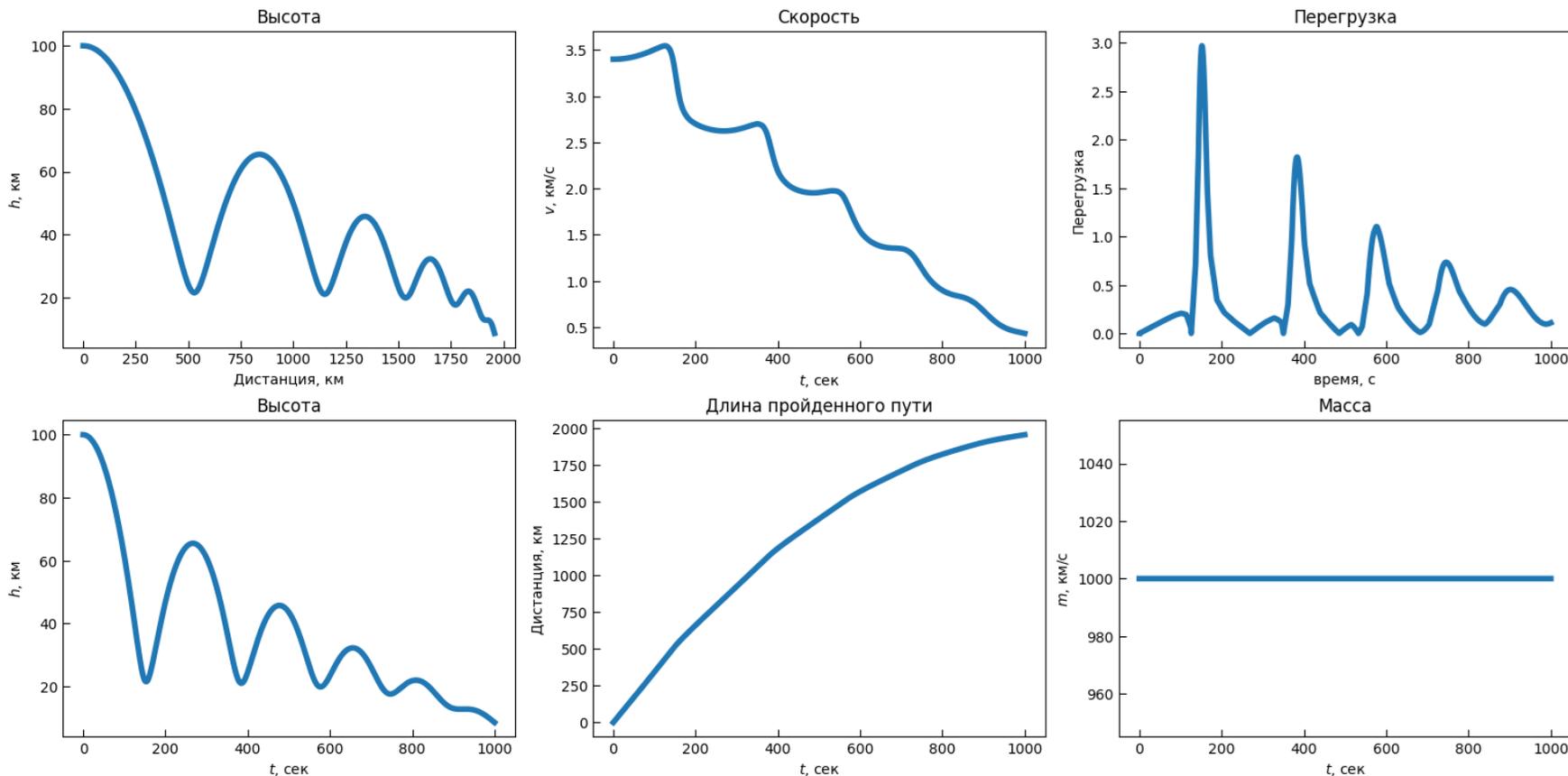


График распределения ресурсов для сопровождения с помощью нечеткой логики

Вывод: Продемонстрирована достаточность использования 4-х этапов алгоритма распределения временного ресурса НКС: оценка временного ресурса, фазификация входных переменных, агрегирование подусловий, подзаключений и заключений и дефазификация логического вывода



Алгоритм по решению задачи о распределении временного ресурса



$$\frac{dv}{dt} = -\frac{C_d \cdot A}{2m} \cdot \rho v^2 - g \sin \gamma + \frac{P}{m}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{v \cos \gamma}{r_e + h} + (L/D) \cdot \left(\frac{C_d A}{2m} \right) \rho v \cos \sigma - g \frac{\cos \gamma}{v}$$

$$\frac{d\kappa}{dt} = (L/D) \cdot \left(\frac{C_d A}{2m} \right) \frac{\rho v \sin \sigma}{\cos \gamma}$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{v \cos \gamma \cos \kappa}{r_e}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{v \cos \gamma \sin \kappa}{r_e}$$

$$\frac{dh}{dt} = v \sin \gamma$$

$$\frac{dm}{dt} = -B P$$

Результаты моделирования ВМО с постоянной массой

Вывод: предложена модель траектории движения ВМО, которая позволяет в условиях ограниченных исходных данных по характеристикам данного типа объектов разрабатывать алгоритмы как оптимизации движения ВМО в условиях воздействия неконтролируемых факторов и неопределенности процессов в околоземном пространстве, так и так и алгоритмы их мониторинга СМКП

В ходе исследований в 2024 году были установлены проблемные вопросы, связанные с повышением эффективности сопровождения ВМО средствами НКС, в частности:

- неопределенность траектории движения ВМО в условиях нестационарных деструктивных воздействий различной природы;
- снижение точностных характеристик из-за аппаратных ошибок приемо-передающей системы по причине воздействия тепловых и стохастических факторов и изменения надежности аппаратуры, что приводит к отказам при сопровождении ВМО;
- необходимость поддержки принятия решений операторами НКС на основе человеко-машинных систем.

В результате возникла необходимость повышения информационного обеспечения НКС в части перехода к человеко-машинным системам проактивной поддержки принятия решений, а также проведения комплексного моделирования деструктивных факторов, воздействующих на НКС в процессе эксплуатации.

Для анализа и обсуждения проблемных вопросов **30 января 2025 года** запланировано проведение научно-практического семинара с участием ведущих представителей научных школ вузов и промышленности **«Фундаментальная инженерия для реализации проактивной информационной поддержки систем мониторинга космического пространства»**.

В процессе исследований была достигнута возможность существенного повышения как уровня, так и количества научных статей за счет включения в ожидаемые результаты проекта тематику проактивной информационной поддержки операторов средств мониторинга космического пространства и расширения научного коллектива.

В ходе работы со студентами и сотрудниками ВУЦ и ФКИ были отобраны наиболее компетентные кандидаты для усиления коллектива НОШ в 2025 году.

Показатели	2024 г. Согласно соглашению при заявленном финансировании 7,2 млн. руб	2024 г. Результат при выплате 2 млн руб.	2025 Согласно соглашению при выплате 2 млн руб.	2025 План при увеличении финансирования
Число членов Исследовательской команды ФКИ	6	6	6	8
Число членов Исследовательской команды ФКИ – исследователей, ординаторов, аспирантов, студентов в возрасте до 30 лет включительно	5	5	5	6
Число членов Исследовательской команды ВУЦ	5	5	5	9
Число членов Исследовательской команды ВУЦ – исследователей, ординаторов, аспирантов, студентов в возрасте до 39 лет включительно	3	3	3	7
Число статей, содержащих результаты исследований по Проекту, в изданиях из ядра РИНЦ	4	<u>6</u>	5	<u>10</u>
Число информационных материалов о наиболее значимых полученных результатов по Проекту подготовленных Коллективом в формате пресс-релизов	1	1	1	<u>4</u>

По результатам работы в **2024 году (2-4 кварталы)** удалось перевыполнить план по статьям в изданиях, входящих в Ядро РИНЦ. С учетом статей, поданных в редакцию в конце 2024 года планируется перевыполнение плана в 2025 году.

Планируемые результаты проекта в 2025 году



В 2025 году планируется опубликовать **13 статей**, из них **3 SCOPUS**, **10 RSCI** и **2** из перечня ВАК.

Также в 2025 году планируется выпустить 4 пресс-релиза.

Ожидаемые научные результаты в 2025 году:

Формализовать модель движения ВМО с повышенной скоростью вращения, которая в теории должна точнее описывать движение ВМО на 20%

Построить алгоритмы управления приемной системы НКС МКП с учетом изменения характеристик малошумящих усилителей для повышения точности сопровождения КО

Получить систему проектирования блоков РИС с учетом теплового распределения на основе отнормированных по реальным измерениям данных

Произвести расчёт пространственно-временных характеристик сигналов, отраженных от КО, для НКС МКП в интересах повышения точность обнаружения ВМО

Разработать имитационную модель функционирования НКС в условиях воздействия деструктивных факторов различной природы

Интегрировать методы PINN (Physical-informed neural network) в имитационную модель для ускорения расчётов более чем 2 раза

Разработать модель человека-оператора, описывающую с точки зрения психофизиологии и эргономики взаимодействие человека с системой визуализации СМКП

Разработать алгоритм поддержки принятия решения оператором НКС для повышения оперативности действий на 15-25%

Факультет космических исследований МГУ

Булатов Марат Фатыхович (соруководитель) – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник

Шафир Р.С. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;

Захаров А.С. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;

Мацеевич С.В. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;

+

Панкратов В.А. – младший научный сотрудник ФКИ МГУ;

Шуварики Д.В. – лаборант кафедры фундаментальной и прикладной математики;

Колесников П.Д., Андреев М.И. – студенты ФКИ

(6 из 8 участников моложе 39 лет)

Военный учебный центр при МГУ

Тимошенко Александр Васильевич (соруководитель) – д.т.н., профессор, старший преподаватель;

Загер И.Б. – к.т.н., зам. нач. кафедры;

Перлов А.Ю. – к.т.н., старший преподаватель;

Львов К.В. – к.т.н., младший научный сотрудник Физического факультета МГУ.

+

Панферов С.В. – к.ф.-м.н., доцент ВУЦ МГУ;

Шурубур Г.П. – лаборант физического факультета МГУ;

Веретенников К.И. – студент физического факультета МГУ;

Марков А.А. – студент физического факультета МГУ;

Гордиенко И.А. – студент ВМК МГУ

Михалко Я.А. – студент мехмата МГУ

Веревкин Г.А. – студент мехмата МГУ

(9 из 11 участников моложе 39 лет)

Всего: 19 членов коллектива

По результатам работы за 2024 год предлагается увеличить финансирование проекта 24-Ш01-04 в 2025 году на основании высоких публикационных показателей, расширенного перечня новых научных результатов по исследуемой научно-технической задаче, а также повышения уровня проводимых исследований за счет привлечения компетентных специалистов.

3. Приложения

- С. В. Мацеевич, А. С. Захаров, У. А. Владко и др. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения. (2024). Научная визуализация 16.3: 87 - 96, DOI: 10.26583/sv.16.3.09 – SCOPUS, RSCI WoS
- С. В. Мацеевич, А. В. Тимошенко, В. А. Судаков, К. С. Соколов, Алгоритм поддержки принятия решения оператором радиолокационной станции мониторинга космического пространства в условиях нештатной ситуации на основе гибридной функции // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 145-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2024-4-145-157.
- А. Ю. Перлов, А. В. Тимошенко, Ю. В. Бабкин и др. Применение теории нечётких множеств при решении задач управления временным ресурсом РЛС мониторинга космического пространства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2024. — SCOPUS, RSCI WoS
- А. С. Захаров, А. Ю. Перлов, К. С. Соколов и др. Многопараметрическая оптимизация процесса проектирования РЛС мониторинга космического пространства на основе онтологического анализа зависимостей функциональных характеристик от множества технических решений // Радиотехника.— 2024. — Т. 88, № 10. — С. 110–117.— RSCI WoS
- A. V. Timoshenko, A. Y. Perlov, A. S. Zakharov, M. F. Bulatov and I. V. Tyutin, "Increasing the Accuracy Characteristics of the Space Monitoring System Based on Intelligent Calibration of the APAA Radio Information System," 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO 61835.2024.10617593. – SCOPUS
- А. Ю. Перлов, А. С. Захаров, А. В. Тимошенко, М. Ф. Булатов. Модель тепловых искажений амплитудно-частотной характеристики приемной системы радиолокационной станции в режиме сверхразрешения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 26–34. – ВАК К1

- А. В. Зюзин, А. С. Захаров, А. Ю. Перлов, А. В. Тимошенко. Методика выбора оптимальных параметров зондирующего сигнала при работе в режиме с повышенным разрешением // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182681> – ВАК К1
- A. V. Timoshenko, A. Y. Perlov, A. S. Zaharov, V. V. Sazonov. Model for calculating changes in the radiation pattern and amplitude-phase distribution in the subarray of a large-aperture apaa based on a modified thermal conductivity equation // — IEEE xPlore : 2024. — P. 1-7 - SCOPUS
- A. S. Zakharov, A. V. Timoshenko, A. Y. Perlov et al. Increasing the accuracy characteristics of the space monitoring system based on intelligent calibration of the apaa radio information system / // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). — IEEE: 2024. — P. 1–4. – SCOPUS
- А. С. Захаров, А. М. Савчук, В. Г. Феклин, И. Д. Ястребов. Повышение полноты доведения информации при обрыве линий связи центра мониторинга космического пространства на основе модифицированного алгоритма Дейкстры // Электромагнитные волны. 2024. Т. 26. № 6. С. 107-113. DOI: <https://doi.org/10.18127/j19998554-202406-13> - RSCI WoS
- А. С. Захаров, А. М. Савчук, В. В. Морозов, Д. А. Звонарев Использование нелинейного уравнения Шредингера в модели оценки и компенсации влияния тепловых процессов на амплитудно-фазовое распределение // Нелинейный мир. — 2024. — № 4. — С. 16 – ВАК К1
- Р. С. Шафир, И. Б. Загер. и др. Оценка показателей надежности при проектировании сложных радиоэлектронных систем на основе имитационного моделирования // Вопросы оборонной техники. Серия 16. — 2024. — № 197. — С. 83–91. – ВАК К1

Зарегистрированная программа на ЭВМ:

"Исследование и коррекция амплитудно-фазового распределения в каналах передачи после прохождения малошумящего усилителя, работающего в режимах с повышенной выделяемой мощностью" регистрационный № 2024690593 от 16.12.2024, авторы: Захаров А.С., Перлов А.Ю.

Приняты редакцией для опубликования:

- А. Ю. Перлов, А. В. Тимошенко и др. Обеспечение безопасности полетов ВМО на основе управления рисками ущерба в системе – Известия ВУЗов. Авиационная техника
- А. С. Захаров, А. В. Тимошенко и др. Расчет изменений разрешающей способности радиолокационной станции из-за воздействия тепловых процессов на малошумящий усилитель – Цифровая обработка сигналов

Отправлены в редакцию:

- Р.С. Шафир, И. Б. Загер и др. Оценка показателей надежности при проектировании сложных радиоэлектронных систем на основе имитационного моделирования – Известия ВУЗов. Приборостроение
- М.Ф. Булатов, К.В. Львов, А.Ю. Перлов. Разработка модели влияния деструктивных факторов на функциональные характеристики наземно-космической системы мониторинга воздушных объектов - Автоматизация процессов управления
- А.В. Тимошенко, А.М. Казанцев, В.М. Барышников, М.Ф. Булатов. Моделирование траекторий движения центра масс планирующего высокоскоростного летательного аппарата с учётом влияния неконтролируемых факторов с использованием симплекс-метода – Известия РАН. Теория и системы управления
- A. S. Zakharov, A. V. Timoshenko - Multiparametric optimization of the radar design process based on an ontological analysis of the dependencies of functional characteristics – IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine

- 12-14 марта, 2024 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications IEEE № 60226, МТУСИ – Захаров А.С., Тимошенко А.В. Model for calculating changes in the radiation pattern and amplitude-phase distribution in the subarray of a large-aperture APAA based on a modified thermal conductivity equation
- 1-3 июля, «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» СИНХРОИНФО 2024, Отель Дружба, г. Выборг – Захаров А.С., Булатов М.Ф. Increasing the accuracy characteristics of the space monitoring system based on intelligent calibration of the APAA radio information system
- 21 ноября «VIII научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач МКП», ОАО «Алмаз-Антей» - Мацеевич С.В. Алгоритм поддержки принятия решения оператором радиолокационной станции мониторинга космического пространства в условиях нештатной ситуации на основе гибридной функции
- 21 ноября «VIII научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач МКП», ОАО «Алмаз-Антей» - Шафир Р.С. Оценка показателей надежности при проектировании сложных радиоэлектронных систем на основе имитационного моделирования