

УДК 629.783:629.7.05

**ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ФГБОУ ВО «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
С ПРЕДПРИЯТИЯМИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**
С.В. Новиков

Канд. экон. наук С.В. Новиков (ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»)

В статье приведен опыт и текущие направления исследований ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» в ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, бортовые информационные системы, бортовые вычислительные комплексы

Experience and Opportunities for Interactions of the «Ufa State Aviation Technical University» FSBEI with the Space Rocket Industry Enterprises. S.V. Novikov

The paper covers the experience and current research lines of the «Ufa State Aviation Technical University» Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education in the space rocket branch.

Keywords: Earth remote sensing, onboard information systems, onboard computer systems

Уфимский государственный авиационный технический университет является одним из ведущих технических вузов в сфере авиадвигателестроения. В 2022 году университету исполняется 90 лет со дня основания. На сегодня в университете обучается более 14 тысяч студентов и работают 850 научно-педагогических работников.

УГАТУ развивает научные школы в области двигателестроения, новых материалов, цифровых производственных технологий, биомедицины, новых технологий передачи данных (фотоники).

Сегодня научные школы университета по наноматериалам и электро-механическим преобразователям энергии признаны не только в России, но и получили широкую известность за рубежом.

УГАТУ гордится своими знаменитыми выпускниками, в числе которых ученые и конструкторы двигателей А.А. Саркисов, А.Ф. Ивах, А.А. Рыжов, которые создавали в том числе двигатели для космических аппаратов.

Александр Александрович Саркисов внес вклад в создание и производство высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей для самолетов военного и гражданского назначения (Су-15, Су-25, МиГ-21бис, МиГ-29, Ил-114, Ан-140), вертолетов (Ми-8, Ми-24, Ми-28, Ка-32, Ка-50, Ка-52),



Саркисов
Александр Александрович
(1936–2019)

генеральный конструктор, специалист в области авиадвигателестроения, лауреат Ленинской премии, заслуженный деятель науки РФ



Ивах
Александр Федорович
(1948–2013)

генеральный конструктор, лауреат премии им. А.М. Люльки III степени, награжден медалью «За заслуги перед Отечеством» II степени



Рыжов
Алексей Андреевич
(1931 г.р.)

конструктор авиационных ГТД и энергетических установок, заслуженный деятель науки и техники БАССР, почетный авиадвигателестроитель

беспилотных летательных аппаратов. Под руководством А.А. Саркисова разработаны цифровые системы автоматического управления и контроля, значительно повышающие экономичность и надежность эксплуатации двигателя.

При участии А.Ф. Иваха создавались и совершенствовались двигатели Р25-300 и Р-95Ш для самолетов МиГ-21 и Су-25, под его руководством создано выходное устройство двигателя Р195 с уникальными для своего времени параметрами.

Рыжов Алексей Андреевич руководил работами по технологии изготовления деталей из композиционного материала, по созданию авиационных двигателей: Р95-300, РД-9Б, КРД-26, КРДФ-26, Р11-300, Р11Ф2-300, Р25-300, Р-95Ш, Р195, КР-97, КР-21, АЛ-31, РД-33 для ОКБ Яковлева, Микояна, Сухого.

В 2019 году по результатам научно-исследовательской деятельности Министерством науки и высшего образования Российской Федерации университет отнесен к вузам 1-й категории. Университет входит в топ-700 мировых университетов мира и в топ-50 российских университетов по различным рейтингам. Является участником Евразийского научно-образовательного центра мирового уровня Республики Башкортостан, в рамках которого выполняет 5 технологических проектов с бизнес-партнерами. УГАТУ – член Ассоциации аэрокосмических вузов России.

Деятельность Центра приема и обработки космических снимков

В Уфимском государственном авиационном техническом университете более 30 лет занимаются космической тематикой. История начиналась в далекие 80-е годы с целью установления «космической связи» между наземными станциями и космическими аппаратами. Этой тематикой занимались ученые всех ведущих университетов страны.

В 2009 году в рамках реализации национального проекта «Образование» с космодрома Байконур на ракете-носителе «Союз-2» был запущен научно-образовательный микроспутник «УГАТУ-САТ» (рис. 1). Его созданием занималось студенческое конструкторское бюро «Инфокосмос». Вес микроспутника составлял 40 кг, конструкция включала в себя системы жизнеобеспечения: солнечные батареи, солнечные и звездные датчики, гироскоп, аккумуляторы, система телеметрии, система управления в радиолобительском диапазоне, система передачи данных дистанционного зондирования Земли в диапазоне 8 ГГц. Полезная нагрузка позволила провести научные эксперименты: организация обмена и ретрансляции телеметрической и управляющей информацией через терминал GlobalStar, тестирование оптико-электронной системы наблюдения Земли с пространственным разрешением 50 км.

Для прямого взаимодействия со спутником на базе ФГБОУ ВО «УГАТУ» создан Центр приема и обработки данных космических систем наблюдения, который позволяет принимать и тематически обрабатывать данные более чем с 14 спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с различным пространственным разрешением от 60 см до 1 км.

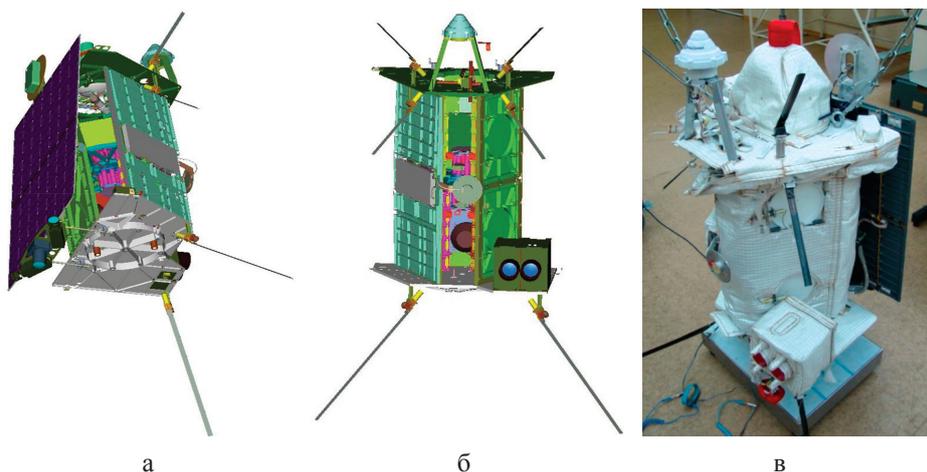


Рис. 1. Микроспутник «УГАТУ-САТ»:
а, б – 3D-модель микроспутника «УГАТУ-САТ»; в – летный образец

Центр использует следующее оборудование:

1. Приемный комплекс «Алиса СК». Данный комплекс позволяет принимать космические снимки с серии спутников NOAA-15, -16, -17, -18, -19, Suomi NPP, FengYun-3, JPSS-1. (Разрешающая способность – 1100 м). Основные области применения получаемых и обрабатываемых данных ДЗЗ:

- мониторинг пожарной обстановки, техногенных и лесных пожаров;
- гидрометеорология и прогноз погоды;
- сельское хозяйство;
- мониторинг паводков;
- мониторинг ледовой обстановки и динамики снежного покрова;
- образовательные цели.

2. Приемный комплекс Унискан-24. Данный комплекс способен получать снимки поверхности Земли в радиусе 2,5 тыс. км (площадь около 12 млн. кв. км), что позволяет вести регулярное наблюдение за всей территорией в зоне обзора. Предназначен для работы со спутниками TERRA, AQUA (разрешающая способность – 1000, 500, 250 м), спутниками серии SPOT (разрешающая способность – 10 и 20 м), EROS A/B (разрешающая способность – до 10 см), Radarsat (всепогодная съемка).

Центр приема и обработки космической информации ЦУП УГАТУ-САТ является ядром многоцелевой системы космического мониторинга состояния окружающей среды и чрезвычайных ситуаций. Центр проводит пространственный анализ состояния и развития природных и техногенных процессов в геологической среде, атмосфере и гидросфере, происходящих на территории Республики Башкортостан.

Основой информационной системы обработки данных ДЗЗ является новый мультимасштабный концептуальный подход к проблеме синтеза информационных технологий анализа и обработки данных космических систем наблюдения, разработанный учеными и специалистами УГАТУ с участием студентов и аспирантов университета. В основе данного метода лежит системная интеграция концепций фрактальных множеств, непрерывного вейвлет-анализа, дискретных вейвлет-преобразований и рекурсивных квазинепрерывных разверток многомерных пространств в одномерные, позволяющая повысить эффективность обнаружения и оценки параметров аномальных сигналов в условиях априорной неопределенности и сложности фоноцелевой обстановки (отношение сигнал/шум меньше единицы).

Области применения данной системы:

- мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий как с точки зрения соблюдения правил севооборота, так и с точки зрения целевого использования земель, прогнозирование урожайности;
- оперативная оценка состояния и степени деградации сельскохозяйственных и пастбищных земель;
- ведение земельного кадастра;

- актуализация карт лесопользования;
- раннее обнаружение и наблюдение за развитием лесных и степных пожаров;
- обновление топографической подосновы для разработки проектов схем территориального планирования Республики Башкортостан;
- контроль лесопользования и мониторинг состояния лесов;
- мониторинг экологического состояния территорий;
- мониторинг и прогнозирование процессов заболачивания и опустынивания, засоления, карста, эрозии и т.п.;
- инвентаризация сельскохозяйственных угодий, создание карт землепользования;
- мониторинг состояния посевов, оценка засоренности, выявление вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности, точное земледелие;
- мониторинг состояния лесной растительности, инвентаризация лесов;
- мониторинг природных и антропогенно-спровоцированных катастроф;
- мониторинг состояния объектов инфраструктуры транспортировки и добычи нефти и газа;
- территориальное планирование и управление муниципальным и городским хозяйством г. Уфа;
- обновление дорожных и других специальных карт масштаба 1:25 000–1:50 000;
- мониторинг экологического состояния территорий в районах добычи, переработки, транспортировки нефти и газа, других полезных ископаемых.

Опыт выполнения работ в данной области:

1. В рамках государственного контракта с МЧС РФ разработаны алгоритмы:
 - а) для оперативного выявления тепловых аномалий (лесных и техногенных пожаров);
 - б) для оперативного составления карт-схем индекса пожарной опасности лесов на основе аэрокосмической информации и метеорологических данных.

На основании данных алгоритмов было реализовано программное обеспечение для автоматической идентификации лесных и техногенных пожаров на территории Российской Федерации с определением площади пожара, температуры горения и направления движения пожара. Программное обеспечение позволяло учитывать состояние погоды и предсказывать вероятность возникновения пожара.

2. В рамках работы с фондом Volkswagen создана технология и проведен мониторинг деградации почв Предуралья и Зауралья на основе данных дистанционного зондирования Земли. Проведенная работа позволила провести ретроспективный мониторинг деградации почв на основе данных

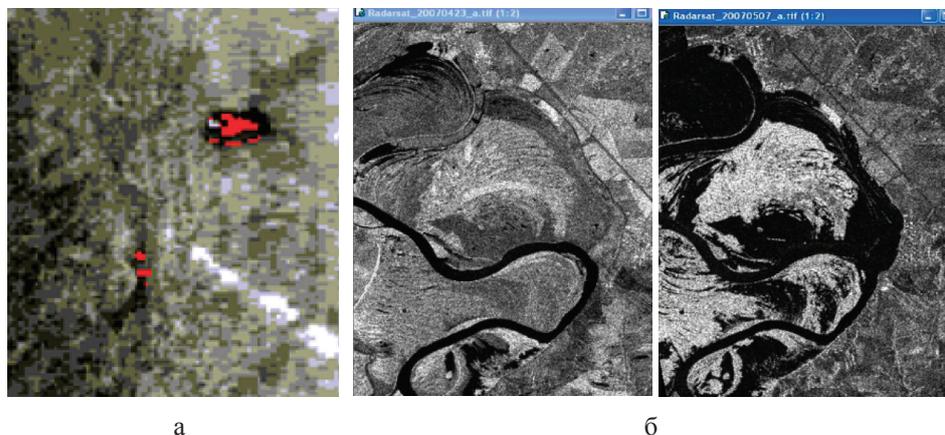


Рис. 2. Примеры использования разработанных алгоритмов обработки изображений:

а – обнаружение и оценка зон поражения прорыва трубопроводов по данным спутника NOAA 12; *б* – мониторинг паводковой обстановки на территории Республики Башкортостан

дистанционного зондирования Земли для оценки динамики состояния землепользования, оценки зарастания пахотных земель и состояния растительности, а также оценки влияния водной эрозии на плодородные почвы (рис. 2).

Для проведения ретроспективного мониторинга за состоянием почвы наиболее приемлемым и экономически выгодным решением является использование технологий ДЗЗ. Современный уровень развития космических и наземных средств позволяет оперативно получать снимки конкретного участка, наличие большого количества архивных снимков позволяет оценить влияние тех или иных факторов на исследуемую территорию в ретроспективном аспекте, а современные вычислительные возможности обеспечивают высокую оперативность обработки. Использование различных радиометров в решении задач мониторинга, радиолокаторов и оптических сканеров, позволяет расширить возможности интерпретации полученных изображений. Преимуществом применения инфракрасного и оптического диапазонов является их высокая разрешающая способность. Космические снимки используются для выявления лесных пожаров, зон почвенной эрозии, ореолов загрязнения вокруг крупных городов по зимним снимкам и т.п. Проведенные ранее исследования показали возможность дистанционной оценки динамики развития землепользования и анализа деградации почв на основе водной эрозии.

В настоящее время Центр занимается поиском решений для мониторинга состояния окружающего пространства вокруг карбоновых полигонов, создаваемых в рамках Евразийского научно-образовательного центра мирового уровня.

Электротехнические комплексы и системы для космических аппаратов

С 1970 года ведутся разработки электротехнических комплексов и систем для космических аппаратов. Нашим научно-исследовательским коллективом были разработаны вихретоковые тормоза для гашения энергии при стыковке космических аппаратов, электрические приводы для систем стыковки космических аппаратов, узлы для стыковочных устройств космических аппаратов на основе платформы Стюарта, испытательные комплексы для проверки разворачиваемости паруса на орбите и т.д. Работы проводились совместно с ИКИ АН СССР, НПО «Энергия» и другими крупными производственными объединениями и научно-исследовательскими организациями.

Сегодня в УГАТУ разрабатываются высокоэффективные электрические приводы космического назначения для стыковочных устройств космических аппаратов (рис. 3). Отличительной особенностью разрабатываемых электроприводов является их высокая надежность при характеристиках, не уступающих мировым аналогам. Электрические приводы представляют собой высокомоментный электродвигатель с постоянными магнитами, вал которого соединен с шариковинтовой или роликовинтовой передачей.

Была проведена разработка электромеханических узлов стыковочных устройств космических аппаратов на основе платформы Стюарта.

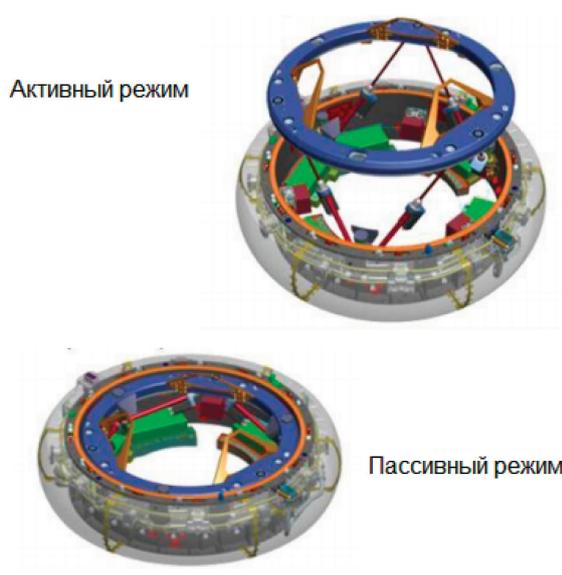


Рис. 3. Электромеханические узлы стыковочных устройств космических аппаратов

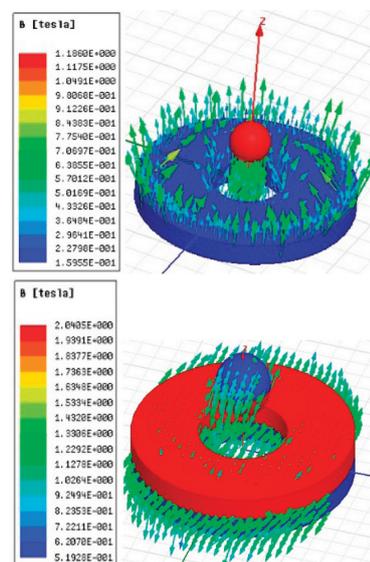


Рис. 4. Модель системы стыковки космических аппаратов, не требующая выравнивания по крену

Стыковочное устройство обеспечивает ряд операций и одна из важнейших – амортизация соударений аппаратов. Особое значение приобретает исследование вопросов демпфирования кинетической энергии движущихся механизмов. Ведется инициативная работа над системой стыковки космических аппаратов, не требующая выравнивания по крену, на основе сферического электродвигателя (рис. 4).

В ближайшее время планируется участие УГАТУ в работах «Разработка предварительного проектного облика космического комплекса с многофункциональным крылатым кораблем» совместно со стыковочной частью (СЧ) НИР «Авангард (Пилот)-НПП» по техническому заданию АО «ЦНИИмаш». Работы выполняются в рамках госконтракта с Госкорпорацией «Роскосмос». УГАТУ обладает богатым опытом проектирования электротехнических систем для космических аппаратов, что позволяет участвовать в современных проектах и создавать высококлассные изделия мирового уровня.

Разработки, проводимые в настоящее время

Использование малых низкоорбитальных космических аппаратов представляет большой интерес в связи с возросшими потребностями обеспечения широкополосного доступа и проведения космических экспериментов. Для управления малыми спутниками и приема с них телеметрической и полезной информации в радиолобительском диапазоне частот ведется разработка мобильной станции. Мобильная станция предназначена для оперативного наведения и сопровождения низкоорбитальных спутниковых систем из любой точки земной поверхности, генерации сигнала для антенно-поворотного устройства, получения телеметрической и полезной информации с низкоорбитальных спутниковых систем, формирования команд для загрузки на спутник, установления сеансов радиосвязи в радиолобительском диапазоне с любыми низкоорбитальными объектами, определения местоположения и получения наборов элементов орбиты с использованием программ Orbitron или Gpredict для выработки управляющего сигнала для поворотного устройства антенны.

Мобильная станция состоит из следующих блоков (рис. 5):

- антенна кросс-яги с 9-ю элементами на 430–435 МГц;
- SDR приемник RTL SDR V3;
- платформа Arduino Pro Micro на базе микроконтроллера ATmega32u4;
- модуль управления одним или двумя моторами постоянного тока для поворотного устройства L298N;
- многофункциональный датчик, обладающий акселерометром и магнитометром для определения ориентации в пространстве по трем координатам LSM303DLHC;
- коллекторные моторы постоянного тока 0,6 RPM;
- блок питания на 12 В DELTA.

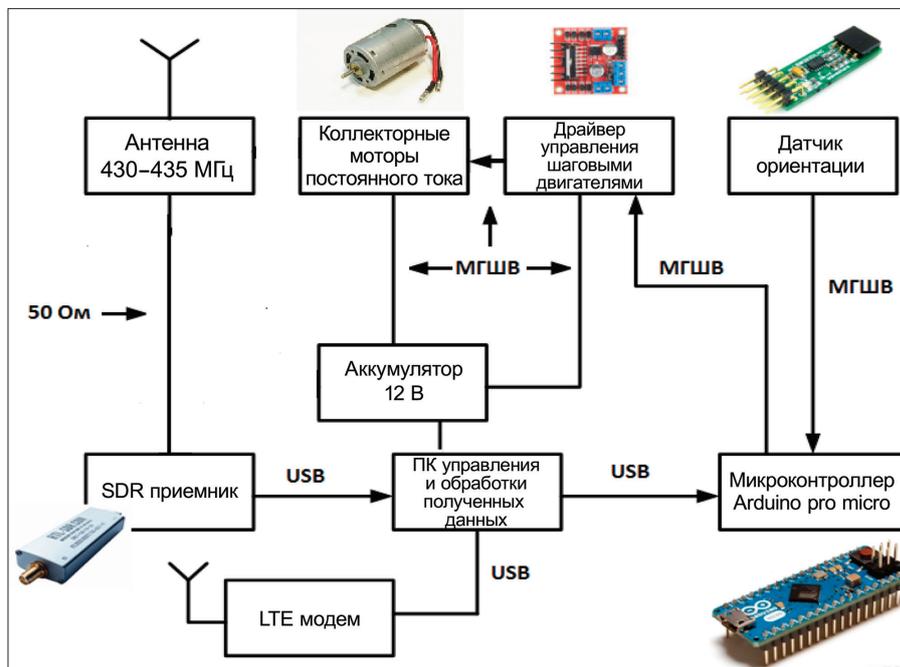


Рис. 5. Структурная схема мобильной станции для управления и приема телеметрической и полезной информации с низкоорбитальных спутников

Бортовые информационные системы

Одним из устойчивых мировых трендов последних лет в области приборостроения является использование интегральной фотоники при обработке сигналов. Фактически это новая технологическая парадигма, обеспечивающая использование полупроводниковой технологии для создания устройств для генерации, преобразования и приема световых сигналов. Создаваемые при этом фотонные интегральные схемы (ФИС) обладают высокой энергоэффективностью, компактностью, надежностью, вибростойкостью. Фактически функционал целой оптической системы выполняется на едином полупроводниковом кристалле. Указанные пользовательские качества обуславливают перспективность использования ФИС в бортовых системах связи и обработки информации в аэрокосмической отрасли. С точки зрения построения инновационных бортовых систем передачи информации одной из важнейших задач является повышение скорости передачи без потери надежности и помехозащищенности. Перспективным решением этой задачи является пространственное уплотнение каналов (мультиплексирование по модам излучения). В рамках указанной тематики был разработан ряд решений для генерации оптических пучков, переносящих орбитальный угловой момент непосредственно на ФИС.

Для генерации и приема оптических вихрей в свободном пространстве была разработана ФИС на основе кольцевого резонатора с периодическими неоднородностями, которая осуществляет одновременно мультиплексирование/демуплексирование вихрей четырех различных порядков [1]. Также были разработаны ФИС, обеспечивающие генерацию вихревых пучков непосредственно в интегральном световоде. В первом способе используется генерация двух различных мод с помощью решеток ввода-вывода в двух различных волноводах, преобразование полученных мод и последующее сложение с необходимой разностью фаз для получения вихря ± 1 порядка [2]. Второй способ реализуется устройством, не имеющим мировых аналогов по компактности и принципу функционирования. В нем используется единая решетка ввода-вывода, полученная суммированием решеток, необходимых для получения двух требуемых мод, и последующей численной оптимизацией (рис. 6) [3].

Возможность эффективного распространения оптических вихрей в интегральном волноводе была подтверждена аналитически и экспериментально [4].

Разработанные методы пространственного уплотнения сигналов, наряду с эффективными форматами модуляции позволяют на основе устройств интегральной фотоники построить высокоскоростные бортовые системы передачи с прекрасными массогабаритными характеристиками (рис. 7). Однако открытыми на сегодняшний день остаются вопросы, связанные с возможностью использования ФИС, особенно с легированными областями, в условиях космического излучения.

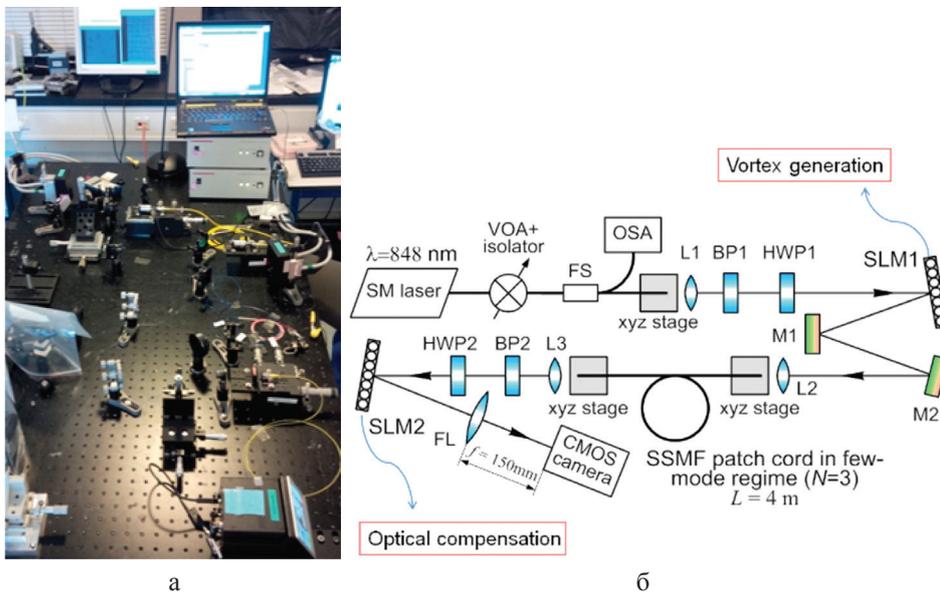


Рис. 6. Экспериментальная установка по полностью оптической компенсации смещения мод:

a – фотография установки; *б* – схема

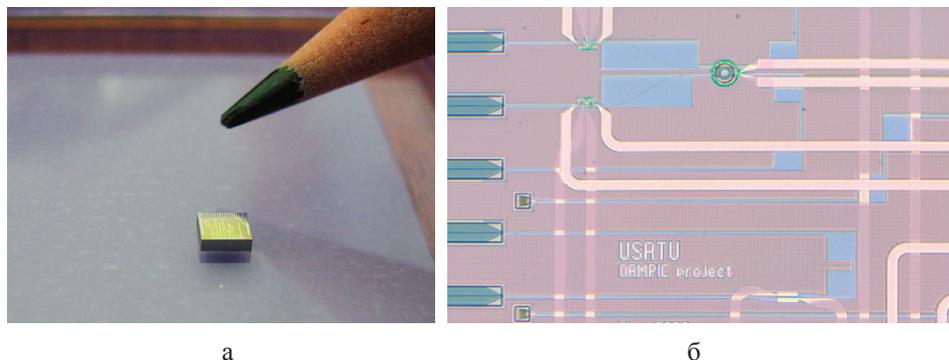


Рис. 7. Оптический чип на платформе «кремний-на-изоляторе»:
а – фотография изготовленного чипа; б – фотофрагмент элемента фотонной интегральной схемы, снятый оптическим микроскопом

Цифровые двойники в космической отрасли

В рамках учебно-научного инновационного центра «Проектирование и эксплуатация оптических и межспутниковых коммуникаций» разработан прототип цифрового двойника микроспутника «УГАТУ-САТ», который предназначен для решения целого ряда задач информационной поддержки жизненного цикла микроспутника. В частности, для отработки орбитальных операций и маневров перед их выполнением на орбите, мониторинга орбитального движения на основе данных телеметрии, получаемой во время сеансов связи.

Комплекс компьютерных моделей микроспутника, входящих в состав цифрового двойника включает [5]:

- 3D-модель микроспутника, обеспечивающая визуализацию орбитального движения и процессов эксплуатации МКЛА с применением технологий виртуальной реальности и 3D-анимации;
- математические, имитационные и интеллектуальные модели бортовых систем;
- информационные модели процесса сборки микроспутника;
- логистические модели взаимодействия участников жизненного цикла микроспутника: проектировщиков, производителей, эксплуатантов и потребителей целевой космической информации.

База данных (БД) системы информационной поддержки жизненного цикла (ЖЦ) МКЛА содержит гибридную разнородную информацию, пополняемую из распределенных информационных систем – проектно-конструкторскую, производственно-технологическую, испытательную и эксплуатационную. 3D-модель микроспутника интегрирована в базу данных изделия – электронный формуляр (паспорт) изделия, реализованный на базе российской PDM-системы «PDM Step Suite», что позволяет решать эксплуатационные задачи с привлечением полного массива цифровых данных о микроспутнике, как о сложном техническом объекте (рис. 8) [6].

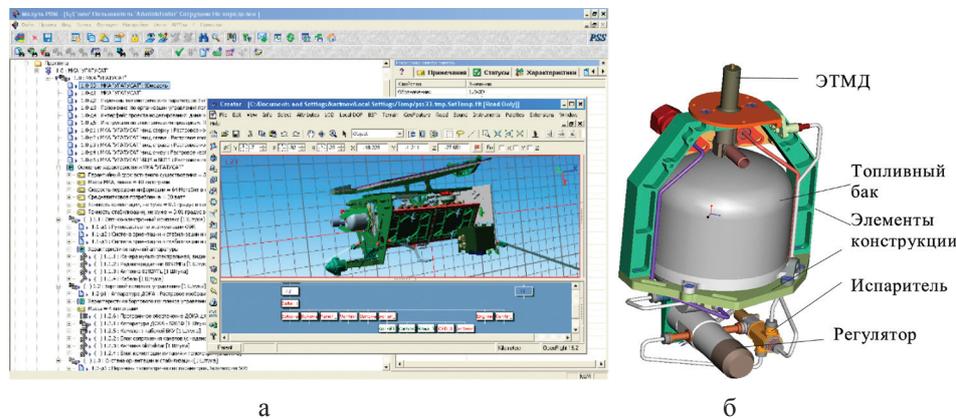


Рис. 8. Примеры цифровых моделей:

а – для управления жизненным циклом изделия «УГАТУ-САТ» на базе российской PDM-системы «PDM Step Suite»; *б* – предиктивной аналитики технического состояния микродвигателя на основе нейронных сетей

Технология разработки цифровых двойников бортовых систем реализуется на базе комплекса нейронных сетей с учетом существенной неопределенности орбитальной обстановки и технического состояния микроспутника. Разработан цифровой двойник электротермического двигателя микроспутника (спроектирован и разработан в ОмГТУ и ПО «Полет» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Омск) на основе комплекса из трех многослойных перцептронов. Назначение нейросетевой модели микродвигателя – предиктивная аналитика технического состояния микродвигателя и оценка запаса топлива на борту, что в существующих условиях затруднительно в связи с малыми габаритами микродвигателя, малой величиной тяги, а также условиями неопределенного газожидкостного состояния топлива. Для обучения нейросетевого предиктора использованы расчетные данные, сведения о наземных и летных испытаниях микродвигателя [5, 7].

Технологии для авиационных двигателей поколения 5+

Наработаны компетенции в следующих областях:

- технология сварки трением (технологии линейной сварки трением высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов);
- крупногабаритное титановое литье (технология получения крупногабаритных сложнопрофильных тонкостенных отливок из титановых сплавов);
- цифровые двойники агрегатов и систем (цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия);
- защитные титановые накладки (технология изготовления защитной титановой накладки для композитных лопаток компрессора);

- электрофизические технологии (ионная имплантация и электролитно-плазменная обработка; прецизионная электрохимическая обработка);
- аддитивные методы создания деталей (технологии изготовления и термообработки изделий с заданными свойствами, конструкторские решения по топологической оптимизации, бионическому дизайну);
- электромеханические преобразователи энергии (стартер-генераторы, электрические двигатели с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями).

В 2022 году планируется участие в работах по разработке предварительного проектного облика космического комплекса с многофункциональным крылатым кораблем. Разработка ведется в интересах АО «Проект-техника», работающего по техническому заданию АО «ЦНИИмаш» в рамках госконтракта АО «ЦНИИмаш» с Госкорпорацией «Роскосмос». Разрабатываемые электроприводы планируются к применению в составе комплекса рулевых следящих систем.

Амбициозная задача на перспективу – создание и запуск нового спутника класса CUBESAT (рис. 9) массой до 4 кг для организации и исследования новых способов межспутниковой передачи данных.

Задачи и планируемый эксперимент:

- разработка мобильной станции приема и передачи телеметрии и управления спутником;
- организация межспутниковых каналов передачи данных телеметрии и данных ДЗЗ;
- разработка бортовой оптической линии связи и межспутниковой линии связи на основе интегральной фотоники.

Университет готовит специалистов для аэрокосмической и оборонной отрасли России по современным образовательным программам. В 2021 году создана Школа перспективных исследований и технологий фотоники, где студенты ведут исследования в области интегральной фотоники, в частности, для повышения пропускной способности бортовых систем передачи данных и межспутниковых коммуникаций.

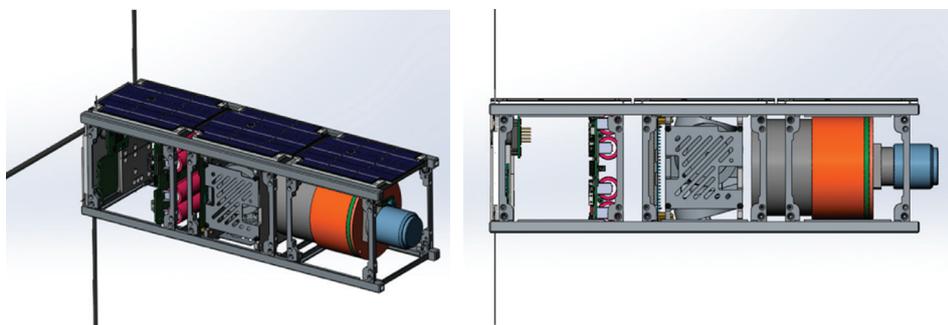


Рис. 9. Модель микроспутника «УГАТУ-САТ-Ф»

УГАТУ уделяет внимание вопросам популяризации космических исследований и повышения интереса молодежи к космической отрасли. С 2012 года ежегодно проводится международная аэрокосмическая школа имени космонавта-испытателя СССР У.Н. Султанова совместно с региональным отделением Федерации космонавтики России. В университете функционирует радиоклуб, студенческое конструкторское бюро «Инфокосмос», проводятся ежегодные сеансы связи студентов и школьников с МКС, проводятся теоретические и практические занятия действующими летчиками и космонавтами, ветеранами космодромов Байконур, Плесецк, Капустин Яр.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фатхиев Д.М. [и др]. OAM Signal Emitter Based on a Ring Resonator // Optical Technologies for Telecommunications 2019. International Society for Optics and Photonics, 2020. – Т. 11516. – С. 115160Z.
- [2] Кутлюяров Р.В. [и др]. Design and Modeling of a Photonic Integrated Device for Optical Vortex Generation in a Silicon Waveguide // Компьютерная оптика. 2021. – Т. 45. – № 3. – С. 324–330.
- [3] Фатхиев Д.М. [и др]. A Grating Coupler Design for Optical Vortex Mode Generation in Rectangular Waveguides // IEEE Photonics Journal. – 2021. – Т. 13. – № 4. – С. 1–8.
- [4] Любопытов В.С. [и др]. Modeling and Optimization of Vortex Modes Propagation in Rectangular Dielectric Waveguides // IEEE Photonics Journal. – 2019. – Т. 12. – № 1. – С. 1–17.
- [5] Информационная поддержка жизненного цикла микроспутника на основе сквозных интеллектуальных моделей / В.Н. Блинов, С.С. Валеев, Р.Р. Каримов, Т.В. Исламгулов, В.В. Косицын, В.И. Рубан // Вестник УГАТУ. – Т. 14. – № 4(39). – Уфа, 2010. – С. 97–103.
- [6] Информационная поддержка сложной технической системы на основе мягких вычислений (на англ. яз.) / С.С. Валеев, Р.Р. Каримов., О.Ю. Карпенко, Н.В. Кондратьева // Вестник УГАТУ. – Т. 17, № 6(59). – Спец. выпуск ITIDS – МААО. – Уфа, 2013. – С. 57–60.
- [7] Концептуальное проектирование сложного технического объекта на основе интеллектуальных технологий / Р.Р. Каримов, Н.В. Кондратьева, Е.А. Кузьмина, А.С. Ковтуненко, М.А. Верхотуров, С.С. Валеев // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2638, Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments. Irkutsk, 2020. – pp. 112–119.

REFERENCES

- [1] Fatkhiev D.M. [et al]. OAM Signal Emitter Based on a Ring Resonator. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2019, vol. 11516, p. 115160Z.
- [2] Kutluyarov R.V. [et al]. Design and Modeling of a Photonic Integrated Device for Optical Vortex Generation in a Silicon Waveguide. Computer Optics, 2020, Vol. 45, No 3, pp. 324–330.
- [3] Fatkhiev D.M. [et al]. A Grating Coupler Design for Optical Vortex Mode Generation in Rectangular Waveguides. IEEE Photonics J. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, Vol. 13, No 4, pp. 1–8.

-
- [4] Lyubopytov V.S. [et al]. Modeling and Optimization of Vortex Modes Propagation in Rectangular Dielectric Waveguides. IEEE Photonics J. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Vol. 12, No 1. pp. 1–7.
- [5] Blinov V.N., Valeev S.S., Karimov R.R., Islamgulov T.V., Kositsyn V.V., Ruban V.I. Information Support of Microsatellite Life Cycle Based on End-to-End Intelligent Models. Bulletin of USATU, Ufa, 2010, Vol. 14, No 4(39), pp. 97–103.
- [6] Valeev S.S., Karimov R.R., Karpenko O.Yu., Kondratieva N.V. Information Support of Complex Technical System Based on Soft Computing. Bulletin of USATU, Vol. 17, No 6(59). Specialist. ITIDS Publ. MAAO, Ufa, 2013, pp. 57–60.
- [7] Karimov R.R., Kondratieva N.V., Kuzmina E.A., Kovtunenکو A.S., Verkhoturov M.A., Valeev S.S. The Conceptual Design of a Complex Technical Object Based on Intelligent Technologies. Ceur Workshop Proceedings, Vol. 2638, Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, Irkutsk, 2020, pp. 112–119.