

Радиолокационное дистанционное зондирование на платформе малоразмерных космических аппаратов. Перспективы использования радиофотонных технологий.

А.А. Кузнецов, Ш.Р. Валиуллин, Б.Р. Гаптеррахимов, И.В. Еремин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

E-mail: aakuznetsov@kai.ru

Приведен обзор современного состояния отечественных и зарубежных технических решений по построению систем радиолокационного зондирования, предназначенных для размещения на борту малоразмерных космических аппаратов (МКА) формата Cube Sat. Обозначены тренды развития таких систем, связанные с применением радиофотонных технологий с целью улучшения точностных и массогабаритных характеристик.

Radar remote sensing of the Earth using small spacecraft. Prospects for using microwave photonic technologies.

A.A. Kuznetsov, Sh.R. Valiullin, B.R. Gapterakhimov, I.V. Eremin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI.

This article provides an overview of the current state of domestic and international technical solutions for building radar sensing systems designed for deployment onboard small-size CubeSat spacecraft. Development trends in such systems, related to the use of microwave photonic technologies to improve accuracy and weight-and-size characteristics, are outlined.

Keywords: microwave photonics, CubeSat, active phased array antenna, diagram formation scheme

Введение

Дистанционное зондирование Земли – эффективный инструмент получения изображений элементов земной поверхности с высоким разрешением, в настоящее время развернута группировка спутников, осуществляющих ДЗЗ в разных диапазонах частот.

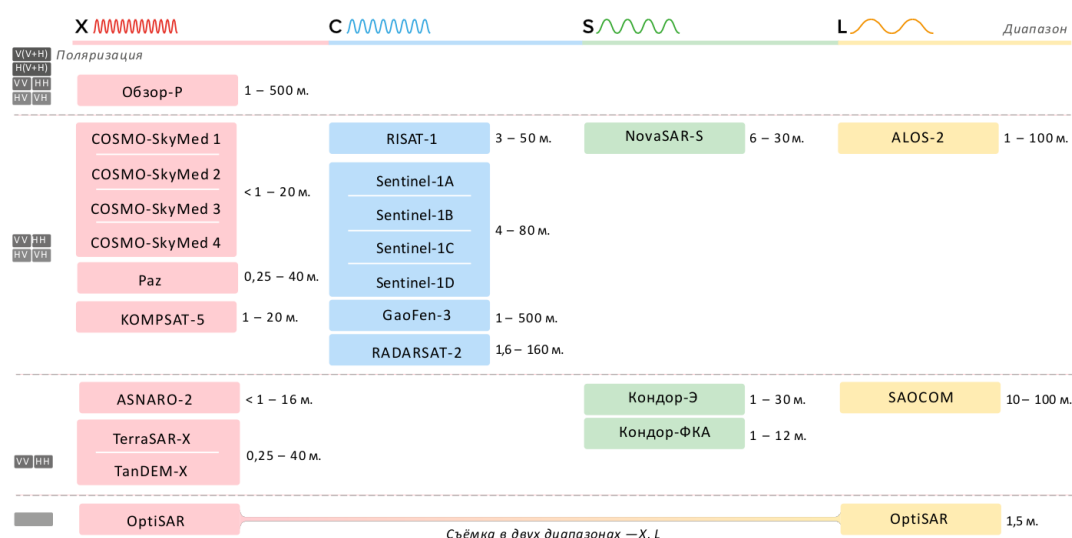


Рис. 1. Примеры используемых диапазонов длин волн КА ДЗЗ РЛН

Выбор длины волны лоатора обусловлен многими факторами: метрологическими характеристиками (пространственное разрешение, проникающая способность, спекл-шумы), массо-габаритными (размеры антенны прямо-пропорциональны длине волны), нормативными (разрешение на использование конкретных частотных диапазонов).

Тенденции развития космических сервисов и услуг связаны с более широким использованием аппаратов среднего и малого класса, расположенных на низких орбитах, что обусловлено более низкими затратами на создание и вывод спутника на орбиту, а также потенциально более высоким пространственным разрешением ввиду меньшего расстояния до поверхности Земли. В части отработки технологий наиболее успешно себя зарекомендовали аппараты формата CubeSat, имеющие модульную конструкцию с размером элементарной единицы 10x10x10 см (1U). Максимальные размеры аппарата ограничены пусковым контейнером и для отечественных систем величина составляет 16U, масса аппарата ~30 кг, пиковая/средневытянутая мощность, потребляемая полезной нагрузкой (ПН) ~200 / 4 Вт, стоимость платформы без ПН ~20 млн руб. Обычно такие МКА выводятся на низкую околоземную орбиту (400-600 км) в качестве попутного груза, средний срок орбитального существования 2-3 года.

В настоящее время из открытых источников известно несколько миссий, в ходе которых апробированы решения радиолокационного ДЗЗ на базе МКА (см. табл. 1).

Таблица 1 – Обзор миссий МКА с отработкой радиолокационного ДЗЗ

Миссия	Формат	Тип антенны	Диапазон	Разрешение	Статус миссии
Аист-СТ	16U	АФАР с синтезированной апертурой	X (8-12 ГГц)	2 км	Активен (с 28.12.2025)
RainCube	6U	Параболическая	Ка (35,75 ГГц)	7,9 км / 250 м	Завершена (21.05.2018 -12.2020)
ICEYE	~85 кг	АФАР с синтезированной апертурой	X (9,6 ГГц)	до 25 см	Разработка
Capella	110–197 кг	АФАР с синтезированной апертурой	X (9,6 ГГц)	до 25 см	Разработка
SATURN	3×16U	АФАР с синтезированной апертурой + ММО	X-диапазон	5×5 м (план)	Разработка

Таким образом показано, что МКА играют важную роль в формировании сервисов радиолокационного ДЗЗ как непосредственно носителей, так и платформ для отработки новых технических решений.

Применение технологий фотоники для улучшения характеристик радиолокационных систем ДЗЗ

Использование радиофотоники (микроволновой фотоники) для построения АФАР на МКА представляет собой перспективное направление, позволяющее улучшить как метрологические, так и эксплуатационные характеристики системы ДЗЗ. Технический аспект этих улучшений связан с потенциальным использованием существенно более широкополосных зондирующих сигналов, реализацией элементов

диаграммообразующей схемы в интегральном фотонном (фотонная интегральная схема – ФИС) исполнении, обработкой сверхширокополосных сигналов в аналоговом виде. Известны следующие результаты применения технологий радиофотоники в МКА: испытание компонентной базы [1], датчики [2], испытания фотонных интегральных схем [3], при этом в открытых источниках примеры использования технологий радиофотоники при построении АФАР для КА не найдены. Стоит отметить, что есть ряд технических решений, которые могут быть успешно использованы в составе АФАР (как для телекоммуникационных систем, так и ДЗЗ, см. табл. 2):

Таблица 2 – Примеры технологий фотоники, которые могут быть использованы в составе АФАР для КА

Компонент / функция	Преимущество	Ссылка
Оптические линии истинной задержки	Широкополосность и минитюаризация (при использовании ФИС)	[4-5]
Оптические линии передачи (бортовые)	Фазовая стабильность, низкие погонные потери	[6]
Оптоволоконные усилители	Компенсация потерь преобразования сигнала	[7]
Обработка сигнала	Аналоговая обработка в широкой полосе сигнала	[8-12]
Матричные диаграммообразующие схемы	Сверхширокополосность, минитюаризация, снижение перекрестных помех	[13-14]

Таким образом показано, что имеется потенциал улучшения характеристик радиолокационных систем ДЗЗ на базе АФАР за счет применения технологий фотоники.

Выводы

Использование малоразмерных космических аппаратов для задач ДЗЗ является современным вызовом: с одной стороны, такой подход позволяет существенно снизить стоимость миссии и при схожих затратах сформировать группировку из множества спутников с большим одновременным покрытием территорий, с другой – малые габариты и энерговооруженность аппаратов не позволяют обеспечить высокие технические характеристики, получение высокого пространственного разрешения требует сложных аппаратных решений и серьезной пост-обработки. Одна из очевидных ниш – использование МКА как платформы для отработки новых технических решений, в качестве которых выступают, в том числе, технологии радиофотоники. Показано, что есть ряд направлений, которые могут быть адаптированы для использования в составе АФАР и блоков обработки сигнала на борту МКА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10059, <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>.

Литература

1. Lopez-Arreguin A.J.R. etc. all Theoretical study of the space radiation effects in an EDFA for an smallsatellite mission // International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems - ISROS 2016. Otwock, Poland, DOI:10.13140/RG.2.1.2389.7846
2. Кузнецов, А.А. Бортовая компактная волоконно-оптическая система мониторинга для малоразмерных космических аппаратов / А. А. Кузнецов // Наука и технологии Сибири. – 2025. – № 3(18). – С. 68-71.

3. Guo, U etc. all Integrated photonics for space communication and sensing // Journal of Physics: Photonics. – 2025. – Volume 7, Number 4. – 042001. DOI 10.1088/2515-7647/ade64b
4. Zhu, Ch. etc. all Silicon integrated microwave photonic beamformer // Optica. – 2020. – Vol. 7, Issue 9. – C. 1162-1170. DOI: 10.1364/OPTICA.391521
5. He, J. etc all Review of Photonic Integrated Optical Phased Arrays for Space Optical Communication // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – C. 188284-188298. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030627
6. The European Cooperation for Space Standardization: ECSS-E-ST-50-11C – SpaceFibre – Very high-speed serial link. Режим доступа: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50-11c-spacefibre-very-high-speed-serial-link/>, свободный (дата обращения 12.03.2026).
7. NIMPH: Nanosatellite to Investigate Microwave Photonics Hardware. Режим доступа: <https://www.csut.cnrs.fr/en/project/nanosatellite-to-investigate-microwave-photonics-hardware/>, свободный (дата обращения 12.03.2026).
8. Силаков, К.А. и др. Методы определения доплеровского смещения частоты на основе технологий радиофотоники // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2024. – Т. 80, № 1. – С. 114-122.
9. Иванов, А.А. и др. Измерение мгновенной частоты множества микроволновых сигналов на основе методов вынужденного рассеяния Мандельштама - Бриллюэна и предварительного двухчастотного расщепления // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12-2. – С. 130-134.
10. Лустина, А.А. Векторный измеритель доплеровского сдвига частоты локационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции и волоконной брэгговской решетки, поддерживающей поляризацию // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2023. – Т. 3, № 2. – С. 32-43.
11. Мальцев, А.В. и др. Простое радиофотонное устройство для измерения мгновенной частоты множества СВЧ-сигналов на основе симметричного неплоского генератора гребенки // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 5. – С. 32-39. – DOI 10.31857/S0032816223050129.
12. Морозов, О.Г. и др. Простой модуль локационных измерений доплеровского сдвига частоты и угла прихода на основе двухканальной поляризационной тандемной амплитудно-фазовой модуляции. Часть 2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 2(58). – С. 67-81. – DOI 10.25686/2306-2819.2023.2.64.
13. Гаптеррахимов, Б. Р. Радиофотонные системы диаграммообразования на матричных элементах в интегральном исполнении // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2024 : Сборник тезисов докладов XI Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 300-летию со дня основания Российской Академии наук, 90-летию со дня рождения первых космонавтов СССР Ю.А. Гагарина и А.А. Леонова, 90-летию первого выпуска КАИ, 65-летию начала регулярного телевизионного вещания в Республике Татарстан, Казань, 11–12 апреля 2024 года. – Казань: ИП Сагеев А.Р., 2024. – С. 175-176.
14. Zhou, Z. Butler matrix enabled multi-beam optical phased array for two-dimensional beam-steering and ranging // Photonics Research. – 2024. – Vol. 12, Issue 5. – С. 912-920. DOI: 10.1364/PRJ.509595