

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.396.969 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.4.3.8

**Состояние и перспективы развития
орбитальных группировок малогабаритных КА
с радиолокаторами с синтезированной апертурой
зарубежных коммерческих операторов**

А. А. Кучейко, к. т. н., *alexindia@mail.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. В. Тушавина, к. т. н., *dekan6@mail.ru*

*ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация*

С. Э. Зайцев, д. т. н., *ZaiSergei@mail.ru*

ГК «Роскосмос», Москва, Российская Федерация

Е. А. Костюк, к. т. н., *Kostiuk@inbox.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены состояние и перспективы развития коммерческих группировок малогабаритных космических аппаратов с радиолокаторами с синтезированной апертурой операторов из США, стран Европы, Японии и Китая. Основные аспекты: технические, финансовые, маркетинговые, приведены технические решения и маркетинговая политика, двойной характер применения. Несмотря на инвестиционный характер коммерческих проектов, основным заказчиком являются госструктуры и силовые ведомства.

Показано, что основными тенденциями развития рынка РЛИ до середины 2020-х годов будут наращивание орбитальных группировок КА с РСА, миниатюризация и совершенствование техники РСА и методов радиолокационной съемки (двухчастотные РСА, круговая и квадрополяризации, улучшение пространственного разрешения, расширение полосы частот сигналов, новые режимы съемки — InSAR, видео, наблюдение движущихся сцен, томографическая съемка и др.), повышение оперативности процедур заказа и получения РЛИ, совершенствование методов и технологий автоматизированной обработки массивов РЛИ совместно с оптическими изображениями и другими данными на основе методов анализа больших данных и машинного обучения.

Ключевые слова: коммерческий оператор, орбитальная группировка, КА с РСА

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Current Status and Development Prospects of Small Spacecraft Orbital Constellations with Synthetic Aperture Radars of Foreign Commercial Operators

A. A. Kucheiko, *Cand. Sci. (Engineering)*, alexindia@mail.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

O. V. Tushavina, *Cand. Sci. (Engineering)*, dekan6@mai.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

S. E. Zaytsev, *Dr. Sci. (Engineering)*, ZaiSergei@mail.ru

State Space Corporation ROSCOSMOS, Moscow, Russian Federation

E. A. Kostyuk, *Cand. Sci. (Engineering)*, Kostiuk@inbox.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The state and prospects for the development of commercial constellations of small-sized spacecraft with synthetic aperture radars of operators from the USA, Europe, Japan and China are considered. Main aspects: technical, financial, marketing. Technical solutions and marketing policy considering the dual nature of the application are provided. Despite the investment nature of commercial projects, the main customers are government agencies and law enforcement agencies.

It is shown that the main trends in the development of the radar image market until the mid-2020s will be the increase in the orbital constellations of spacecraft with SAR, the miniaturization and improvement of SAR technology and radar survey methods (dual-frequency SAR, circular and quadruple polarization, improvement of spatial resolution, expansion of the signal frequency band, new modes shooting – INSAR, video, observation of moving scenes, tomographic imaging, etc.), increasing the efficiency of procedures for ordering and receiving radar images, improving methods and technologies for automated processing of arrays of radar images together with optical images and other data based on Big Data analysis and machine learning methods.

Keywords: commercial operator, constellation, spacecraft with SAR

В последние годы наблюдается увеличение числа космических аппаратов (КА) с радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), прогресс в технологиях съемки и обработки радиолокационных изображений. Проведена классификация действующих КА с РСА и показано направление их развития.

Представленные данные получены в результате обобщения информации из доступных баз космических аппаратов, основные среди них — каталог eoPortal [1] и база Гюнтера Креббса <https://space.skyrocket.de/directories/sat.htm>, данные компаний-операторов КА с РСА Capella Space, ICEYE и др. [2, 3]. «По состоянию на 01.01.2022 на орбите находилось около 66 КА с действующими радиолокаторами с синтезированием апертуры (РСА). Среди них 39 КА с РСА гражданских, коммерческих и двойного назначения и 27 КА с РСА, эксплуатируемых в интересах оборонных ведомств. Операторами 66 современных КА с РСА является сравнительно небольшая группа из 14 государств и международных организаций. Самые крупные группировки КА с РСА созданы в США, Китае, Японии и странах Европы» [4] (рис. 1).



Рис. 1. Состав национальных группировок КА с РСА различных стран на май 2021 г. Синим цветом показаны национальные группировки гражданские, коммерческие и двойного назначения

«Ежегодный темп запусков КА с РСА составляет по 7–14 новых спутников с РСА различного назначения. С 2018 года начались запуски малогабаритных коммерческих КА с РСА массой 100–150 кг, созданных на новых принципах венчурного финансирования, причем их доля среди гражданских КА с РСА ежегодно растет» [4] (рис. 2).

Новое поколение коммерческих КА с РСА выделяется среди традиционных спутников по массо-

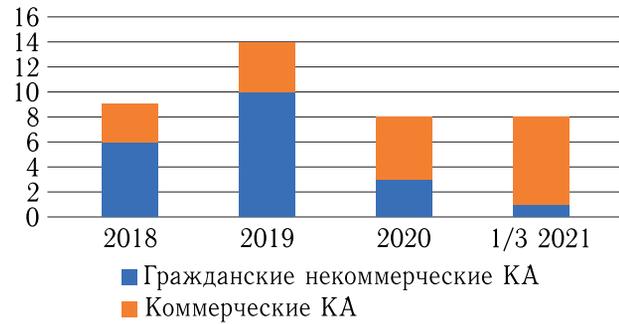


Рис. 2. Запуски гражданских КА с РСА в 2018–2021 гг., в том числе коммерческих

габаритным характеристикам, принципам финансирования и применения данных ДЗЗ и техническим решениям. Среди существующих КА с РСА можно выделить четыре основные группы на основе массогабаритных, целевых и финансовых факторов (таблица).

Целевые, конструктивные и организационно-финансовые аспекты

«В первую группу входят крупноразмерные КА массой 1–3 т, предназначенные для регулярной съемки обширных регионов (океанских и морских акваторий, ледяного покрова в Арктике, лесных и сельскохозяйственных регионов) со средним и высоким разрешением» [4]. Используемая ширина полосы сигналов 45–100 МГц (величина, определяющая разрешение по дальности). К таким программам можно отнести КА Sentinel-1A/B, ALOS-2, RADARSAT-2, GaoFen-3, RCM (ранее — ENVISAT-1, RADARSAT-1), которые оснащены РСА диапазонов С- и L- с крупноразмерными АФАР и с большой продолжительностью работы на витке (до 20–30 минут).

Средняя стоимость КА с РСА массой 1–3 т составляет 300–500 млн долл. США, спутники финансируются в основном из средств госбюджета, радиолокационные изображения (РЛИ) распространяются бесплатно как открытые данные ДЗЗ или по номинальной стоимости, что позволяет частично компенсировать операционные расходы. Случаи успешной коммерческой деятельности на мировом

Таблица. Классификация современных гражданских, коммерческих и двойного назначения КА с РСА

Параметр	Крупноразмерные КА глобального мониторинга	Среднеразмерные КА детального наблюдения	Малоразмерные КА детального наблюдения	Коммерческие миниразмерные КА детального наблюдения
Масса КА с РСА	1–3 т	0,7–2 т	0,3–0,6 т	0,05–0,2 т
Диапазон частот РСА	L-, C-	X-	X-, S-	X-, C-, Ku-
Стоимость, долл. США	300–500 млн	160–250 млн	65–150 млн	5–50 млн
Пространственное разрешение	1–3–100 м	0,25–40 м	0,35–30 м	0,25–15 м
Рабочий цикл РСА	15–30 мин	6–10 мин	2–10 мин	1–3 мин (до 10 мин)
Типовые КА	RADARSAT-2, Sentinel-1, ALOS-2, RISAT-1, SAOCOM, GaoFen-3	TSX/TDX, PAZ, COSMO, IGS-Radar, KOMPSAT-5	TechSAR, RISAT-2BR, SAR-Lupe, NovaSAR, ASNARO-2	ICEYE-X, Capella, QPS-SAR, Strix, HiSea-1, Qilu-1

рынке единичны, относятся к КА RADARSAT-1 (Канада), где успех достигнут благодаря созданию крупнейшей международной сети приемных станций компаний-дистрибьюторов в ходе 17-летней эксплуатации, а также КА RADARSAT-2 благодаря многофункциональному радиолокатору, работающему в 20 режимах. Спутники первой группы обеспечивают работу сервисов контроля океанов и суши, оценки последствий изменения климата, формирования и обновление мозаичных покрытий регионов и всего мира, а также карт просадок почвы на всю территорию крупных стран. Наибольшее распространение в современных сервисах и в научных исследованиях получили бесплатные данные КА Sentinel-1A/B.

«Вторую группу составляют среднеразмерные КА массой 0,7–2 т, которые предназначены для высокдетальной съемки районов и объектов, мониторинга изменений, в том числе интерферометрическим методом. Основная полезная нагрузка — РСА X-диапазона с шириной полосы сигналов до 300–400 МГц, которые при сравнительно небольшой продолжительности работы на витке (4–10 минут) позволяют получать РЛИ со сверхвысоким пространственным разрешением до 0,25–0,5 м. Спутники запускаются с начала 2000-х годов в составе группировок и по целевому назначению относятся к системам двойного назначения и оборонным» [4]. К данному классу относятся КА серии TerraSAR-X

(3 КА), SAR-Lupe (5 КА), серий COSMO-SkyMed (5 КА) и IGS-Radar (> 4 КА).

Средняя стоимость КА второй группы 160–250 млн долл. США, проекты финансируются за счет средств госбюджета или по схеме частно-государственного партнерства. Для решения задач мониторинга операторы систем КА эксплуатируют группировки из 2–5 КА, размещенных в одной или нескольких орбитальных плоскостях. Стоимость РЛИ сверхвысокого разрешения самая высокая на рынке, но операторы не преследуют задачи достижения окупаемости, часть ресурсов КА закупает оборонные ведомства. Распространена практика международной кооперации в распределении ресурсов КА на арендной основе среди разных стран. Наиболее совершенный в группе — КА COSMO 2nd Generation (Италия) с РСА X-диапазона, который работает с сигналами шириной полосы частот 1100 МГц и обеспечивает съемку с разрешением 0,3–0,5 м (РЛИ доступны на мировом рынке).

«Третью группу составляют миниразмерные КА массой 0,3–0,6 т, которые появились с начала 2010-х годов в результате первых попыток радикальным образом снизить массу и стоимость КА с РСА благодаря прогрессу в миниатюризации подсистем (иногда КА называют Small SAR Mission)» [4]. Основу группы составляют КА с РСА X-диапазона, разработанные в Израиле (совместно с Индией запущено 6 КА), Японии и проект бри-

танской компании SSTL по созданию мини-спутника для морских применений с РСА S-диапазона NovaSAR-1. По целевому назначению спутники третьей группы аналогичны КА второй группы (мониторинг объектов со сверхвысоким разрешением), но стоимость существенно снижена до 65–140 млн долл. США. Тем не менее развернутые спутники применяются прежде всего в оборонных целях. К данной категории относятся КА класса TechSAR-X (6 КА типа Ofeq и RISAT-2,-2BR), ASNARO-2, NovaSAR-1 (S-диапазона).

«Наконец, четвертую группу составляют новые коммерческие многоспутниковые группировки из КА массой 50–200 кг (иногда называют New Space SAR), созданные на принципах инвестиционного финансирования и предназначенные для мониторинга объектов с высокими частотой съемки и оперативностью представления данных потребителю в интересах решения широкого круга задач (бизнес-разведка, агромониторинг, страхование, строительство и энергетика, добывающие отрасли, транспорт) и с потенциальным разрешением до 0,1 м. Несмотря на низкую массу, спутники оснащены РСА с крупногабаритными антеннами. Благодаря применению сигналов шириной 1100–1200 МГц и реализации длинной синтезированной апертуры антенны (до 500 км при времени когерентного накопления до 60 секунд) спутники четвертой группы обеспечивают съемку с разрешением 0,2–1 м. Кроме того, разбиение сверхдлинной синтезированной апертуры антенны на субапертуры позволяет представлять данные наблюдения в формате видеосъемки или реализовывать многократное некогерентное накопление сигнала, обеспечивающее высокие радиометрические характеристики радиолокационных изображений, изобразительные свойства которых приближаются к изображениям оптического диапазона» [4].

Оценочная стоимость спутников 5–20 млн долл. США, что позволяет развертывать многоспутниковые группировки с высокой частотой обзора при существенном снижении стоимости всей системы.

С 2018 года до 01.05.2021 года семь компаний-стартапов запустили первые КА-прототипы или уже серийные миниспутники: ICEYE — 7 КА (всего в системе планируется 18 КА) из Финляндии, Capella

Space — 4 из 36 КА, R2 Space 1 из 8 КА (обе — США), iQPS — 2 из 36 КА и Synerspective 1 из 25 КА (обе — Япония), Spacety Aerospace — 1 из 56 КА и Шаньдунский институт промышленных технологий — 1 из 20 КА (оба оператора — Китай). В США регулятор выдал лицензии на запуски группировок малогабаритных КА с РСА компаниям Umbra Lab, Ursa Space, PredaSAR, XpressSAR, Trident Space, York Space Systems, Earth Observing System. Аналогичные проекты анонсировали еще несколько компаний из стран Европы, Китая и Японии. Сложившуюся ситуацию с запуском группировок миниразмерных КА с РСА в мире вполне можно назвать как «бум радиолокации».

По расчетам сочетание низкой стоимости КА, сравнительно высокой съемочной производительности РСА при высоких потребительских свойствах РЛИ и сервисов позволяет рассчитывать на окупаемость проектов новых коммерческих группировок с РСА. Так, по приведенным расчетам [5], не самый малый КА массой 300 кг и стоимостью 42 млн долл. США обеспечивает в течение срока эксплуатации получение РЛИ общей площадью 44 млн км² суммарной стоимостью 440 млн долл. США (при цене РЛИ 10 долл. США/км²). Однако практика показывает, что бизнес-планы не всегда реализуются.

Анализ контрактов ведущих компаний-стартапов в области ДЗЗ из США показывает, что коммерческие продажи пока не дают ощутимого дохода, государственные оборонные структуры по-прежнему оказываются главными рынками стартапов с РСА. Компании-стартапы из Китая аккумулируют средства из бюджета экономически развитых провинций страны, а также опираются на технологические разработки государственных корпораций электронной промышленности. Китайский миниспутник HiSea-1 массой 185 кг стал первым в своем классе с РСА S-диапазона. Японские компании-стартапы используют технологические разработки национальных университетов.

Перспективы развития космической радиолокации

По прогнозам компании Northern Sky Research NSR [6], мировой рынок РЛИ будет расти ежегодно на 12,4%. К 2026 году соотношение между

данными РСА и ОЭС составит 23% и 77% соответственно. Основными потребителями — до 44% объема рынка — по-прежнему будут структуры обороны и безопасности, а также органы государственной власти. Основными областями тематического применения РЛИ останутся морские сервисы, прогнозирование и смягчение последствий ЧС, сельское и лесное хозяйство, нефтегазовая и добывающая промышленности, инфраструктура, страхование.

Согласно провозглашенным концепциям, группировки КА с РСА станут элементами общей системы глобального непрерывного и всепогодного мониторинга районов и объектов, где КА с обзорными оптическими и радиолокационными датчиками будут играть роль, аналогичную периферийному зрению человека в режиме широкоугольного обзора, а новые системы КА с РСА будут аналогами узкоугольного детального зрения. При оценке перспектив применения РСА следует учесть два фактора: существуют прикладные задачи, которые могут быть решены с высокой результативностью только с помощью РСА (контроль океанов, мониторинг зон затопления при ЧС, оценка смещений почвы методами InSAR и оперативная разработка ЦМР); развитие информационных сервисов с совместной обработкой детальных оптических снимков и РЛИ для задач мониторинга.

Основными тенденциями развития рынка РЛИ до середины 2020-х годов будут наращивание орбитальных группировок КА с РСА, миниатюризация и совершенствование техники РСА и методов радиолокационной съемки (двухчастотные РСА, круговая и квадрополяризации, улучшение пространственного разрешения, расширение полосы частот сигналов,

новые режимы съемки — InSAR, видео, наблюдение движущихся сцен, томографическая съемка и др.), повышение оперативности процедур заказа и получения РЛИ, совершенствование методов и технологий автоматизированной обработки массивов РЛИ совместно с оптическими изображениями и другими данными на основе методов анализа больших данных и машинного обучения.

Список литературы

1. Satellite Missions catalogue. eoPortal. <https://www.eoportal.org/satellite-missions> (Дата обращения 05.05.2021).
2. ICEYE Product Documentation. <https://iceyeld.github.io/product-documentation/5.0/> (Дата обращения 05.05.2021).
3. Capella Space SAR Imagery Products. <https://support.capellaspace.com/hc/en-us/categories/360002612692-SAR-Imagery-Products> (Дата обращения 05.05.2021).
4. *Нафиева Е. Н., Гречищев А. В., Кучейко А. А.* Современные космические радиолокационные системы мониторинга Земли // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг, 2021, т. 2, № 6. С. 74–80.
5. Trident Space's challenge: Standing out from the crowd of SAR satellite startups. Space News/ August 22, 2018. Режим доступа: <https://spacenews.com/trident-spaces-challenge-standing-out-from-the-crowd-of-sar-satellite-startups/> (Дата обращения: 05.05.2021).
6. EO SAR: Trick or Treat? <https://www.nsr.com/eo-sar-trick-or-treat/> (Дата обращения 05.05.2021).