

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2023-4-11-31

УДК 621.396.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ СЕГМЕНТ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В 2023 ГОДУ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Костров Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: vyk_2004@rambler.ru

Ракитин Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», начальник отдела АО «НИИ «Субмикрон»².

E-mail: alexey.rakitin@mail.ru

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 124498, Российская Федерация, г. Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, стр. 2.

Аннотация: Проведён анализ запусков КА с РСА за 2022–2023 годы и предшествующие годы, который показал, что за последние годы количество запусков КА с РСА устойчиво растёт (в 2022 г. в 2,5 раза больше, чем в 2021 г.): наибольшее количество радиолокационных средств работает в X диапазоне, а наименее загруженным является S диапазон; для достижения высокой разрешающей способности используются сверхширокополосные радиосигналы с максимальной полосой частот до 1,2 ГГц. Показано, что в последние годы большое внимание уделяется использованию для съёмки малых КА с РСА, которые в качестве антенной системы используют как активные фазированные антенные решётки, так и гибридные зеркальные антенны. Это позволяет за один запуск вывести на орбиту 2...4 КА с РСА, что снижает удельные затраты. Однако уменьшение габаритов КА и его энерговооружённости отрицательно сказываются на его функциональности: сокращается диапазон углов визирования, затрудняется реализация сканирующих режимов, уменьшается полоса съёмки (полоса захвата). Рассматривается ряд перспективных радиолокационных космических миссий, реализация которых планируется в период до 2030 г. Особое внимание уделяется системам с бортовой обработкой радиоголограмм, которая производится в специализированном вычислительном устройстве. Рассматривается архитектура цифрового вычислительного кластера для перспективных РСА, приводятся характеристики цифровых сигнальных процессоров и оценки времени обработки базовых операций синтеза радиолокационных изображений.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), космический аппарат, антенна, пространственное разрешение, радиоголограмма, бортовая обработка траекторного сигнала.

Одной из наиболее востребованных на современном этапе областей применения спутниковых технологий является сфера дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) — съёмка поверхности Земли с помощью космических аппаратов (КА), работающих на низких околоземных круговых орбитах (НКО) с высотами 500...1700 км. Это обусловлено значительным улучшением тактико-технических характери-

стик средств наблюдения, расширением области их применения [1–3]. Практически все новые системы используют цифровые методы обработки сигналов, что позволяет реализовать потенциальные возможности оптических и радиолокационных систем или приблизиться к ним. За последние 15...20 лет значительно (на порядок и более) возросла пространственная разрешающая способность средств ДЗЗ, кото-

рая достигла субметровых значений, что позволяет обнаруживать и распознавать не только крупные цели, но и большое число разнообразных малоразмерных целей.

Технологии съёмки средствами ДЗЗ эффективно используются для метеорологического обеспечения, картографирования, построения цифровых моделей рельефа, наблюдения за биологическими явлениями, проведения разведки, рационального природопользования, управления земельными ресурсами и кадастром, контроля за лесопользованием, экологического мониторинга, для мониторинга чрезвычайных ситуаций и т.п. [2–4].

Любая съёмка – это регистрация яркости поверхности Земли в определённом диапазоне спектра электромагнитных волн, причём в диапазоне, для которого атмосфера достаточно прозрачна, а Земля либо имеет собственную яркость, либо способна отражать излучение Солнца или искусственного источника электромагнитных волн. Вследствие всего этого возможны только следующие варианты съёмки Земли из космоса:

- съёмка в оптическом диапазоне спектра за счёт регистрации солнечного света, отражённого поверхностью Земли в видимой области спектра (длины волн 0,5–0,7 мкм) и в «окнах прозрачности» атмосферы так называемого ближнего ИК-диапазона (~ 0,7–3 мкм);

- съёмка собственного ИК-теплового и радиотеплового излучения Земли в зоне длин волн 9–12 мкм и радиотепловая съёмка в микроволновом диапазоне радиоволн, включающем миллиметровые и сантиметровые волны;

- радиолокационная съёмка путём регистрации сигналов, отражённых от поверхности Земли и генерируемых искусственным источником направленного излучения, находящимся на борту космического аппарата (КА).

Для целей мониторинга природной среды в исторической хронологии наибольшее внимание уделялось космическим съёмкам в оптическом диапазоне [5–9]. Оптико-электронные средства (ОЭС) имеют малые габариты, массу и энергопотребление, что обеспечивает срав-

нительно большой срок активного существования и возможность группового запуска. Например, 09.12.2022 во время одного старта было выведено 7 спутников GF03D-44...50 с массой 43 кг каждый, которые обеспечивают пространственное разрешение 0,75 м/пиксель. Однако в последнее время возрастает роль съёмки с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Использование сложных зондирующих сигналов с широкой полосой позволяет создать РСА с высоким пространственным разрешением порядка 1 м и менее, что сопоставимо с разрешением, получаемым при помощи средств ДЗЗ оптического и инфракрасного диапазонов. В 2021 г. было выведено 9 КА с РСА на борту, в 2022 г. — 24 КА, т.е. в 2,5 раза больше. При этом растёт и соотношение между количеством КА с РСА и числом КА с ОЭС — 11,4% и 22,2% соответственно. В текущем 2023 г. уже выведено на орбиту 30 КА с РСА при одном неудачном старте (19.09.2023, потерян спутник Capella-12), что превышает результаты предыдущих лет.

Основное преимущество радиолокационной съёмки с помощью РСА по сравнению с оптической — возможность её выполнения в любое время суток и независимо от наличия облачности. С одной стороны, поверхность Земли на 60...70% закрыта облаками, которые могут длительное время (недели, месяцы) препятствовать оптической съёмке. С другой стороны, часть территории России находится за полярным кругом, где поверхность Земли имеет слабую освещённость, которая к тому же зависит от времени года и существенно снижает качество получаемых снимков. Поэтому для России становится актуальной более сложная, но работающая в подобных условиях радиолокационная съёмка.

Целью данной работы является анализ состояния, возможностей и технических характеристик современных РСА космического базирования, а также планируемых миссий. Особое внимание уделяется вопросу реализации обработки радиолограмм на борту КА с ис-

пользованием отечественных сигнальных процессоров.

Космическая система, предназначенная для целей дистанционного зондирования Земли из космоса, состоит из космических аппаратов (КА) с установленной целевой аппаратурой, выделенных линий связи «Космос-Земля», по которым передаются данные, команды управления и телеметрия, и наземной инфраструктуры. Наземный комплекс включает в себя наземные центры и пункты управления полетом КА, пункты контроля траектории, приёма, обработки радиолокационных данных и распространения информации через сеть единой территориально-распределенной системы и другие наземные сооружения, различные инженерные службы (в том числе мобильные) [10]. Наземная космическая инфраструктура требует больших капитальных затрат, является более устойчивой к изменениям в космическом сегменте и совершенствуется в основном за счёт модернизации аппаратуры и программного обеспечения. Наземные комплексы проще обслуживать и в то же время они могут обеспечить приём, обработку, хранение и распространение данных ДЗЗ от различных КА. Проблемы развития и проблемы наземной космической инфраструктуры неоднократно обсуждались [10, 11]. Также самостоятельным вопросом является состояние и развитие ОЭС космического базирования, в создании которых достигнуты значительные успехи [6–9].

Радиолокационная съёмка требует специальных источников радиосигнала для подсвета объекта наблюдения, поэтому требует больших энергетических затрат по сравнению с ОЭС, которые используют отражённые сигнала

лы от Солнца или собственное излучение тел. Полоса частот радиосигналов также формируется радиолокатором, а максимальное значение определяется Регламентом радиосвязи [12]. От выбора рабочей частоты и ширины спектра сигнала существенно зависит круг целевых задач, которые способен решать космический комплекс с РСА, его технический облик. Сложность реализации миссий с использованием РСА приводят к увеличению сроков и стоимости разработки, поэтому обсуждение вопросов состояния и развития таких систем, определение вектора по совершенствованию отдельных компонент, методов обработки и режимов съёмки находится в постоянном поле зрения исследователей. Среди работ, вышедших за последнее десятилетие, можно отметить [13–22]. Об общем состоянии средств ДЗЗ за последние годы можно получить представление из обзоров [23, 24].

Ниже приводятся более подробные данные о КА с РСА на борту, которые по состоянию на 11.11.2023 находятся на орбите или планируются к запуску до 2030 г. [25–29]. В таблицах 1–5 КА с РСА классифицированы по типовым P , L , S , C и X диапазонам, которые используются для радиолокационной съёмки. В таблице 6 содержатся сведения о некоторых заметных проектах многочастотных РСА. Используются следующие сокращения: а) режимы работы (spot — прожекторный, detal — детальный, strip — маршрутный, scan — сканирующий, topsar — сканирующий в двух плоскостях); б) тип антенны (АФАР — активная фазированная антенная решётка, ВЩ — волноводно-щелевая антенна,

Таблица 1. КА с бортовой РЛС P диапазона

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|----------------------------|-------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------|--------|---------------|
| Аист-2Д Россия | 2016-04-28 | 490 | Директорная | 5 x 5 м | – | SP | 250 |
| Biomass ЕКА | >2024 | 634-666 | ГЗА Ø = 12 м | strip 50–60 м (50–60 км) | –27...–30 | SP/DP | 220 (1500) |

Таблица 2. КА с бортовой РЛС L диапазона

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|---|--|-------------------|--|---|---------------|----------|----------------|
| ALOS 2 / PALSAR 2 Япония | 2014-05-24 | 692 | АФАР, 8,9 x 3,5 м | detal 7 м (25 км) strip 24 м (55 км) scan 40-100 м (350 км) | -25 | SP/DP | 7000 |
| ALOS 4 / PALSAR 3 | 2024-2029 | 640 | АФАР, 8,9 x 3,5 м | 1-25 м (35 - 700 км) | - | SP/DP | 5200 |
| SAOCOM 1A,1B Аргентина | 2018-10-07 2020-08-31 | 620-659 | АФАР, 10 x 2,6 м | strip 10 м (30 км) strip 20 м (65 км) topsar 20 м (170 км) scan 100 м (320 км) | - | SP/DP | - |
| SAOCOM 2A,2B | 2025-2032 | 620 | АФАР, 10 x 2,6 м | strip 10-20 м (30-60 км) scan 100 м (320 км) | - | SP/DP | - |
| Ludi Tance 1-01A Ludi Tance 1-02A Китай | 2022-01-26 2022-02-26 | 600 | АФАР, 13 x 3,2 м, Sэф=33 м ² | 3-20 м (400 км) | - | - | - |
| Ludi Tance 4-01A (L-SAR4 01) Китай | 2023-08-12 | 36000 ГСО | Sэф=33 м ² | 3 м для LEO 20 м для GEO | - | - | - |
| Jian Bing (JB 5-1, 5-2, 5-3) Китай | 2006-04-26 2007-11-11 2010-08-09 | 628 | АФАР | spot 5 м (20 км) scan 40 м (100км) | - | SP | - |
| SMAP США | 2015-01-31 | 685 | Ø = 6 м | 0,25-3 км (30 км) | -10... -15 | SP/DP | 1450 |
| Tandem L Германия | 2028-2040 | 745 | ГЗА Ø=15 м | wide 7 м (350 км) narrow 7 м (175 км) | -27... -31 | SP/DP | 2000 |
| MapSAR Бразилия-Германия | - | 620 | ЗА, 7,5 x 5 м | strip 3 м, 10 м, 20 м (32...55 км) | -17... -33 | SP/ QP | 500... 1000 |
| TerraSAR-L Германия | - | 635 | АФАР, 11 x 2,9 м | 5 м (40, 70 км) 20 м (200 км) 50 м (200км) | -27... -35 | SP/DP/QP | 1720 |

Таблица 3. КА с бортовой РЛС S диапазона

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора, км) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|--|--|--------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--------------------|----------|
| NovaSAR-S Великобритания | 2018-09-16 | 574-592 | АФАР, 3 x 1 м | strip 6-30 м (15-140 км) scan 20 м (50-100 км) scan 30 м (750 км) | -12... -27 | SP/DP/ QP | 1800 |
| Кондор-Э 1,2 Кондор-ФКА 1-4 Россия | 2013-06-27 2014-12-19 2023-05-27 | 500-550 500-600 | ГЗА, Ø=6 м ГЗА с АФАР | detal 0,8 м (10 км) strip 1,6-2,5 м (10-25) scan 8-30м (40-220 км) | -15... -20 -20... -30 | SP H(V)/ H+V | 1450 |
| HJ-1C (Huah Jing) Китай | 2012-11-18 | 500 (453) | ГЗА | strip 5 м (20 км) scan 20 м (100км) | -18,5 | SP | 800-1100 |
| HJ-2E, 2F (S-SAR-01, 02) Китай | 2022-10-12 2023-08-08 | 500 | - | strip 5 м (20 км) scan 20 м (100км) | - | - | 1000 |

Таблица 4. КА с бортовой РЛС С диапазона

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|---|--|---|-----------------------------------|--|---------------|----------------|---------|
| RadarSat 2 Канада | 2007-12-14 | 797 | АФАР 15 x 1,5 м | spot 3...5 м (20 км) strip 25 м (250 км) scan 100 (до 500 км) | – | SP/DP/ QP | 2400 |
| RCM C-1, C-2, C-3 Канада | 2019-06-12 | 598-601 | АФАР 6,88x 1,37 м | spot 3...5 м (30 км) strip 30 м (125 км) scan 50 (до 350 км) scan 100 (до 500 км) | –17... –25 | SP/CP/ QP | 1600 |
| Sentinel-1A, 1B Sentinel-1C, 1D Европейский союз | 2014-04-03 2016-04-25 >2023 >2024 | 707-814 | АФАР 12,3x0,82 м | strip 5 м (80 км) strip 20 м (240 км) scan 25...80м(400 км) | –23... –30 | SP/DP | 4400 |
| Gao Fen 3 Gao Fen 12, 12-02 CSAR-1 CSAR-2 Gao Fen 12-03 Gao Fen 12-04 Китай | 2016-08-10 2019-11-27 2021-03-30 2021-11-22 2022-04-06 2022-06-27 2023-08-20 | 758 635 635 740 740 635 635 | АФАР, 4 панели, 15 x 1,23 м | spot 1 м (10 км) strip 3-25 м (50-130 км) scan 50-500 (650 км) | –22 | SP/DP/ QP | 1800 |
| Haisi-1 (Hisea) Tianxian-SAR Китай | 2020-12-22 2022-02-27 | 490-512 | АФАР, 4 x 0,64 м | spot 0,5-1 м (5 км) strip 3 м (20 км) scan 10-20 м (50 - 100 км) | –22 | SP (BB) | 2500 |
| RISAT-1 EOS-04 RISAT-1B Индия | 2016-04-26 2022-02-14 >2024 | 529 | АФАР 7,7 x 1,7 м (6 x 2 м) | spot 1...3 м (10 км) strip 3-9 м (30 км) scan 25 (до 120 км) scan 50 (до 240 км) | –16...–20 | CP SP/DP/QP | 3100 |
| Тораз-4, 5 США | 2016-02-10 2018-01-12 | 1050 | ГЗА, Ø=6...8 м | spot 0,5-1 м (18 км) strip 3 м (50 км) scan 6 м (100 км) | – | – | – |
| MicroSat Норвегия | 2025 | 500 | ГЗА 3,8 x 1,8 м | 4 м (200 км) | – | SP | 800 |

Таблица 5. КА с бортовой РЛС Х диапазона

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|--|--------------------------|-------------------|-----------------------|---|-----------------|--------|---------------|
| COSMO-SkyMed 3-4 Италия | 2008-10-25 2010-11-06 | 620 | АФАР 5,7 x 1,4 м | spot 1 м (10x5 км) strip 3-15 м (30-40 км) scan 30-100 м (200 км) | –22 | SP/DP | 1000 12000 |
| COSMO-SkyMed CSG 1, 2 Италия | 2019-12-18 2022-01-31 | 633 619 | АФАР 5,7 x 1,4 м | spot 0,35...1 м strip 3...6 м scan 40 м (200 км) | –19... –23,5 | DP/QP | 20000 |
| TerraSAR-X TanDEM-X Германия-Франция | 2007-06-15 2010-06-21 | 514 | АФАР 4,8 x 0,8 м | spot 1м (до 10 км) strip 3 м (30x50 км) scan 15 м (100-270 км) | –19... –20 | SP/DP | 800 |
| PAZ Испания | 2018-02-22 | 540 | АФАР 4,8 x 0,8 м | spot 1 м (5 км) strip 3 м (30 км) scan 15 м (100 км) | –19... –20 | SP/DP | 850 |

Продолжение таблицы 5.

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|--|--|----------------------------|----------------------------|--|---------------|----------------|--------------------------|
| ТесSAR-1,2,3 (Ofeq-8,10,13) Израиль | 2008-01-21 2014-04-09 2023-03-28 | 450-580 | ГЗА Ø=3 м | spot 1 м (5 км) strip 3 м (15 км) scan 8 м (17-100 км) | – | – | 750 |
| Kompsat-5 Kompsat-6 Южная Корея | 2013-08-22 >2024 | 509-550 | АФАР | spot 1 м (5 км) strip 3 м (30 км) scan 20 м (100 км) | –20 | SP/DP | 1400 |
| SAR-Lupe-4,5 Германия | 2008-03-27 2008-07-22 | 470-505 | ГЗА 3,3 x 2,7 м | spot 0,5 м 5,5 км strip 60 км | – | – | 250 |
| SARah 1, 2, 3 Германия | 2022-06-18 2023-12-31 >2023 | 750 500 | ГЗА Ø=3,26 м | 0,5 м | –19,9 | – | – |
| Capella 1-11 США | 2018-12-03 2020-08-30 2021-01-24 2021-06-30 2022-01-13 2023-03-16 2023-08-24 | 535-575 | ГЗА, Ø=3,5 м | spot 0,3/0,5 м strip 6 - 12 м | –14... –20 | SP (ГГ) | 600 |
| Umbra 01-08 США | 2021-06-30 2022-01-13 2022-05-25 2023-01-03 2023-04-15 2023-11-11 | 522-535 | SAR-2001 ЗА, Ø=3,8 м | spot 0,16-2 м (до 4 км) strip 3 м (до 20 км) | –18 | SP (ГГ или ВВ) | 500 |
| Iceye- X1- X24 Iceye- X21,22,27 Iceye- X23,25,26,30 Finland | 2018-01-12 2019-05-05 2019-07-05 2021-06-30 2022-01-13 2022-05-25 2023-01-03 2023-06-12 | 570 (6КА) 540 (13КА) | АФАР 3,2 x 0,4 м | spot 1 м (5 км) strip 2,5 м (5-40 км) strip 6-12 м (5-40 км) | –15... –18 | SP (ВВ) | 4000 |
| QPS-SAR № 1 – 6 Япония | 2019-12-11 2021-01-24 2022-10-12 2023-06-12 | 584 | Ø=3,6 м | spot 0,46 м (7 км) strip 0,5 -2 м (14 км) | –20 | – | 2000 План на 36 КА |
| StriX №3, 10 Япония | 2022-02-28 2022-09-15 | 500 | | spot1, strip 1...3 м (10-30 км) | | – | |
| Aspero-2 Япония | 2018-01-17 | 504 | ЗА, 4,2 x 1,2 м | spot 1 м (10 км) strip 2 м (12 км) scan 16 м (50 км) | – | SP (ГГ, ВВ) | 1200- 1500 |
| Taijing-4 (01) Китай | 2022-02-27 | 513-533 | ФАР Ø=5 м | Spot, strip 1 м | – | – | – |
| SuperView Neo 2-01, 2-02 Китай | 2022-07-15 | 500 | – | Spot, InSAR 0,5...3 м | – | – | – |
| Tianhui 2-01A, 01-B, 02A, 02B Китай | 2019-04-29 2021-08-19 | 514-528 | – | 3 м (30 км) | – | – | – |
| NeuSAR Сингапур | 2022-06-30 | 561-572 | ЗА Ø = 2,8 м | 0,5-3 м | – | FP | – |
| Yaogan 6, 13, 18, 23 Китай | 2009-04-22 2011-11-29 2013-10-29 2014-11-14 | 500 | ФАР | 0,5 м | – | SP | – |

Продолжение таблицы 5.

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|---|--|--------------------------|---------------------------------|--|---------------|---------------|----------|
| Yaogan 29 Yaogan 33-01R Yaogan 33-02 Yaogan 33-03 Yaogan 33-04 Китай | 2015-11-26 2020-12-28 2022-09-02 2023-09-06 2023-09-26 | 628 688 701 694 | ФАР | spot 0,5 м (8 км) strip 1 м (16 км) strip 1,5 м (30 км) | – | SP (BB) | – |
| RISAT-2B, 2BR1 RISAT-2BR2 (EOS-01) Индия | 2019-05-22 2019-12-11 2020-11-07 | 561-580 | АФАР 7,7 x 1,7 м (6 x 2 м) | 1...8 м (10 - 50км) | –16... –20 | CP/SP/DP /QP | 2200 |
| IGS-Radar 5, 6, 7 Япония | 2017-03-17 2018-02-27 2023-01-26 | 495 | АФАР | менее 1 м | – | – | – |
| Метеор-М № 2-2, 2-3 Россия | 2019-07-05 2023-06-27 | 821 | ВЦ 13,4x0,25 м | 400-1300 м (600 км) | –20 | SP (BB) | 1000 |
| Метеор-М № 2-4, № 2-5, № 2-6 | >2023 >2025 >2026 | 820 | Радиолокатор MeteoroSAR | spot 1 м (10 км); strip 5 м (30 км); scan 50, 200, 500 м (130, 600, 750 км) | – | – | 2000 |
| Метеор-МП № 1 Метеор-МП № 2 Метеор-МП № 3 | >2025 >2026 >2028 | 830 | АФАР, 6 x 0,85 м | 1-500 м (10-750 км) | –30... –35 | SP/DP | 4500 |
| XpressSAR США | 2024 | 425 | 4,8 x 0,8 м | spot 0,25-1 м (10 км) strip 3 м (30 км) scan 30 м (300 км) | – | QP | <1000 |
| Hai Yang (HY-3A, 3B, 3C, 3D) Китай | >2023 >2024 >2026 | – | – | spot 1-2 м (40 км) strip 5 м (80км) scan 10 м (150 км) | – | – | – |
| EOS SAR -1 США | 2024 | – | ГЗА, Ø= 3,5 м | spot 0,5x0,25 м (25км); strip 1x1,5 м (25км); scan 2x3м (50км) | – | SP | – |
| HRWS SAR Германия | 2029-2036 | – | 4 КА (1 ведущий + 3 спутеллита) | spot 0,25 м (10 км) HR strip 0,5 м (20 км) strip 1 м (70 км) scan 25 м (800 км) | – | SP/DP | – |
| Метеор-М3 № 3 Россия | – | 650 | АФАР 5,6 x 1,6 м | spot 1м (10..20 км) strip 5 м (200 км) scan 5-500 м (750 км) | –20... –30 | SP/DP | 7000 |
| Обзор-Р №1 Обзор-Р №2 Обзор-Р №3 Обзор-Р №4 Россия | >2023 >2024 >2025 >2027 | 654 | АФАР 4 x 1,6 м | spot 1 м (10 км) strip 2-40 м (20...370 км) strip 200...500 м (400...750 км) | –20... –28 | SP/DP/QP /FP | – |
| Смотр-Р Россия | >2028 | 670 500-650 | АФАР | spot 0,5-1 м (10 км) strip 5-30 м (100 км) scan 50...100 м (500) | –14... –27 | SP/DP/QP | до 12000 |
| Diamond-X Россия | >2027 | 500-550 | АФАР | spot 1-2 м (5 км) strip 1-3 м (10–20км) scan 15-45 м (400 км) | – | QP (H(V)/H+V) | – |
| PLATiNO-XSAR1 (PLT-1) Италия | >2023 >2024 | Ф 1: 619 Ф 2: 410 | ФАР | Фаза 1: strip 2,85 м (40 км), только Rx Фаза 2: strip 2,85 м (15,3 км), Tx и Rx | – | SP (VV) | – |
| AstroSAR-Lite AstroSAR-UK Великобритания | – | 500 | АФАР | spot 1 м (10 км) strip 3 м (20 км) scan 30 м (200 км) | –19 | DP/QP SP | – |

Таблица 6. КА с многодиапазонной бортовой РЛС

| Наименование КА или миссии | Дата старта | Высота орбиты, км | Вид и размеры антенны | Разрешение, м (зона обзора, км) | NESZ, дБ | Поляр. | Рср, Вт |
|--|-------------|-------------------|--|--|---------------|-------------|----------------|
| NISAR США, Индия L + S | 2014-05-24 | 747 | ГЗА Ø=12 м | spot 1-3 м (25 км) fine 3-10 м (55-70 км) scan 40-100 м (350 км) | – | SP/DP/QP | 4000 |
| | >2024-2026 | 747 | L : полоса 80 МГц S : полоса 75 МГц | L : 2-7 м (240 км) S : 2-6 м (240 км) | – | SP/DP/QP/CP | 4000 |
| Аркон-2 Россия X + L + P | 2013 | 550-600 | АФАР 12 x 4 м(P,L) 6 x 1,5 м(X) | spot 1 м (10 км) strip 3-6 м (30-50км) scan 20-50 м (130-450) | –23 | SP/DP/CP | L: 1545 P: 685 |
| EOS SAR – 2 nd generation США X + S | 2025 | – | ГЗА, 4 луча (X), 2 луча (S). Ø=до 10 м | X диапазон: spot 0,5x0,25 м (25км); strip 1x1,5 м (25км); scan 2x3м (50км) S диапазон: spot 1,5x0,5 м (25км); strip 1,5x1,5 м (25км) | – | DP/QP | – |
| OptiSAR Канада X + L | – | 450 | 16 КА: 8 опти-ка+8 PCA | X диапазон: spot 1 м (до 10 км); strip 1-3,5 м (10км); scan 10 м (30км) L диапазон: strip 7,5 м (10 км); scan 30 м (140 км) | –20... –26 | – | – |
| Смотр-SP Россия S + P | – | 500 | ГЗА, 10 x 5 м | S диапазон: spot 1x1,5 м (5 км); strip 5 м (10-40 км); scan 5-10 м (10-60 км) P диапазон: strip 15-30 м (120км) | –17... –24 | SP/DP | 1700+ 520 |

ГЗА — гибридная зеркальная антенна); в) поляризация (SP — одиночная, DP — двойная, QP — четверная, CP — компактная); г) NESZ — шумовой эквивалент удельной эффективной площади рассеивания.

На рис. 1 представлено распределение числа КА с PCA по диапазонам частот, сгруппированное за два периода: на конец 2021 г. и за два последних года (2022–2023 г.г.). Диаграмма наглядно показывает устойчивый интерес к X диапазону, который обеспечивает наилучшее разрешение по координате наклонной дальности. Конечно, большую долю в общем количестве здесь занимают малые КА, включая мини и микро спутники, которые допускают групповой вывод на орбиту: за последние два года результаты практически сравнялись с общими итогами за предшествующие годы. Для X диа-

пазона распределение КА с PCA по массе представлено на рис. 2.

Повышенное внимание к частотам вблизи 9,6 ГГц обусловлено также тем, что полоса разрешённых частот сигнала увеличена с 600 МГц до 1,2 ГГц, что позволяет получить потенциальную разрешающую способность по дальности 12,5 см [30]. Такие сигналы используются в PCA КА «Umbra» и планируется использовать в канале X диапазона PCA «EOS SAR-2nd Generation» и КА «HRWS SAR». По наземным объектам разрешающая способность δ_{re} снижается в зависимости от угла визирования $\delta_{re} = \frac{c}{2\Delta f_s} \frac{\kappa}{\cos \gamma}$, где c — скорость распространения радиоволн; Δf_s — ширина спектра сигнала; κ — коэффициент расширения

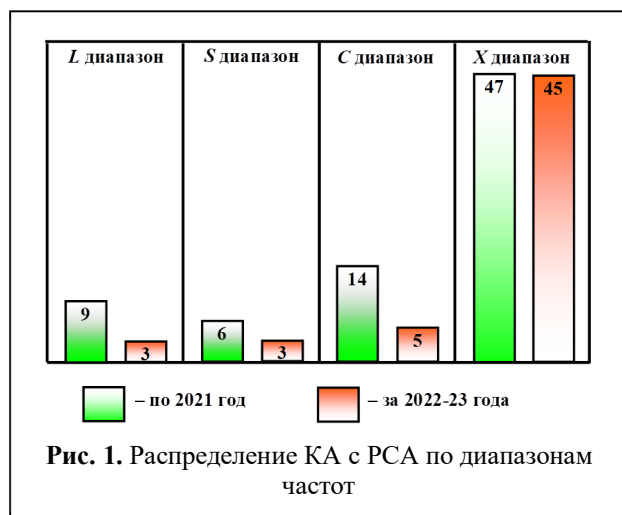


Рис. 1. Распределение КА с РСА по диапазонам частот

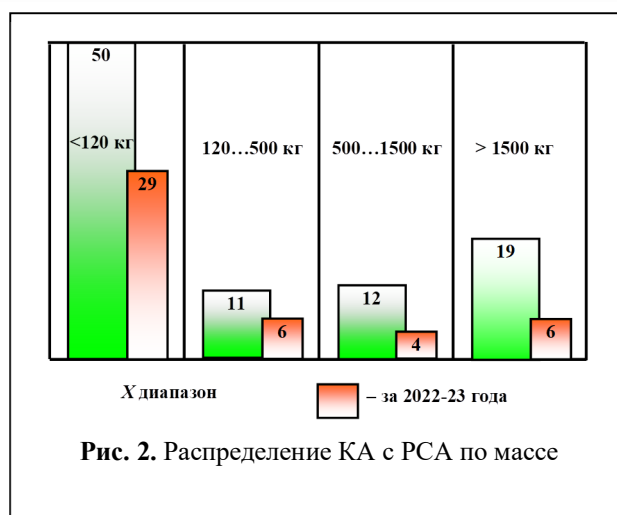


Рис. 2. Распределение КА с РСА по массе

отклика на точечную цель из-за применения весовой обработки, $\kappa = 1,25$; γ — угол между направлением на антенну и местным горизонтом. В диапазоне углов визирования $\beta = 25^\circ \dots 55^\circ$ при высоте орбиты 650 км $\gamma = 62^\circ \dots 25^\circ$, а величина δ_{re} изменяется от 33 см до 17 см, т.е. остается достаточно высокой и сопоставимой с разрешением оптических изображений. Кроме технических проблем, связанных с формированием, излучением и приёмом сверхширокополосного сигнала, использование сигналов с $\Delta f_s = 1,2$ ГГц ограничено прожекторным режимом с размером сцены 5×5 км при расстоянии между повторными съёмками не менее 45 км.

Как и в предшествующие годы, L диапазон привлекает как пограничный, в котором еще слабо сказывается влияние ионосферы, поэтому с успехом применяется дифференциальная интерферометрия и поляриметрия. Заметным явлением 2023 года стало то, что именно в L диапазоне прошёл стадии теоретических исследований и проектных решений и выведен на орбиту первый КА с геосинхронной орбитой (Ludi Tance 4-01A).

Наименее загруженным пока оказался S диапазон, хотя с технической точки зрения реализация аппаратуры РСА проще, чем в X диапазоне (по элементной базе) или в L диапазоне (меньше размеры антенной системы). Сравнение радиолокационных изображений, полу-

ченных КА TerraSAR-X (диапазон X) и Кондор-Э (диапазон S) в примерно одинаковых условиях, показало, что объекты (самолёты) на снимках выглядят идентично, но в S диапазоне РЛИ имеет большую контрастность, чем в X диапазоне, что обусловлено меньшим отражением от земной поверхности [31]. Более того, на РЛИ S диапазона проявляются некоторые объекты, которых на РЛИ X диапазона не видно. Все это свидетельствует о том, что данный диапазон остается недооцененным и требует более внимательного рассмотрения.

Не освоенным в полной мере пока является P диапазон, свойства радиоволн которого обладают большей проникающей способностью по сравнению с ближайшим по частоте L диапазоном. Первыми радиолокационными комплексами в этом диапазоне частот стали РСА Спинар-1 КА Аркон-2 [2] и бистатический РСА КА Аист-2Д [32], который предназначен для обработки многопозиционного радиолокационного наблюдения и интерферометрической бистатической съёмки [33]. Высокую степень готовности имеет КА Biomass с РСА на борту (прошёл механические испытания, запуск запланирован на апрель 2025 г.). Способность РСА P диапазона проникать сквозь лиственный покров позволит измерять объём лесной биомассы (через оценку высоты деревьев, в том числе поляриметрическими интерферометрическими методами) [34]. Именно большая проникающая способность делает воз-

возможным наблюдением подповерхностных и замаскированных объектов, изучение верхних слоев поверхности океана, растительного и почвенного покровов, проведение геологического картографирования, поэтому исследование РСА Р диапазона можно отнести к числу перспективных.

Если брать радиолокационный сегмент в целом, то с положительной стороны можно отметить усилия стран по завершению создания или поддержанию в активном состоянии группировок КА с полномасштабными РСА. Такие радиолокаторы, как правило, имеют антенную систему в виде АФАР, что позволяет реализовать разнообразные режимы съёмки: базовые (прожекторный — Spotlight, маршрутный — Stripmap, сканирующий — ScanSAR), а также скользящий прожекторный, мозаичный, волновой, с двойным сканированием (TopSAR) и др. Схемно-техническая реализация обеспечивает поляриметрические режимы (простая двойная, четверная, компактная и круговая поляризации), сканирование во время приёма (режим *Stare*). К находящемуся на орбите более 15 лет КА RadarSat-2 добавилось созвездие из 3-х КА RCM 1-3 по проекту Radarsat Constellation Mission, на реализацию которого ушло 15 лет: восемь лет на этап проектирования и семь лет на этап сборки и запуска. Дополнение данной ОГ до 6 КА в ещё большей степени повысит информативность системы. Широкими возможностями обладают сформированные за последние 3–4 года ОГ SAOCOM (2 КА), Ludi Tance (2 КА), Huah Jing (2 КА), Gao Fen (6 КА), Yaogan (4 КА). Группировка COSMO-SkyMed в 2019 и 2022 г. пополнилась двумя КА нового поколения CSG 1 и CSG 2. На смену военным спутникам SAR-Lupe (было выведено на орбиту 5 КА) приходят КА SARah, запуски которых были отмечены в 2022–2023 годах и будут продолжаться. Свои группировки создали или обновили Индия, запустившая 3 КА Risat, и Япония, которая вывела на орбиту 3 новых радиолокационных КА IGS-Radar.

В сегменте радиолокационных КА не обо-

шлось без космических инцидентов, которые страны-операторы стараются смягчить запусками новых КА. Так, например, спутник Yaogan 1 разрушился через 4 года после запуска, скорее всего, от внутреннего взрыва, а не в результате столкновения с внешним объектом. Вместо потерянного 22.05.2019 КА Yaogan 33-01 на ту же орбиту был выведен КА Yaogan 33-01R (28.12.2020). Европейское космическое агентство 23 декабря 2021 г. потеряло связь с КА Sentinel-1B, работавшим в паре с запущенным 3 апреля 2014 г. КА Sentinel-1A. В течение 2022 г. продолжались попытки восстановить его работоспособность, однако никаких данных с декабря 2021 г. получить не удалось. На смену вышедшему из строя КА Sentinel-1B в марте 2024 г. планируется вывести на орбиту Sentinel-1C с идентичными характеристиками. Кроме того, учитывается, что расчётный срок активного существования КА Sentinel-1A подходит к концу, поэтому на 2023–24 г. намечен запуск аналогичного по параметрам КА Sentinel-1D. Такие пополнения продлят жизнь радиолокационной группировки Sentinel до 2031–2032 годов.

Перспективы развития группировок радиолокационных КА также впечатляют [35]. Прежде всего, отметим российские КА: кходящему в настоящее время летно-конструкторские испытания КА Кондор-ФКА-1 [36] присоединятся еще 3 спутника, причём №3 и №4 будут иметь АФАР в качестве облучателя офсетной зеркальной антенны; серию спутников гидрометеорологического и океанографического обеспечения Метеор-М2 пополният 3 КА с новым радиолокатором MeteoSAR, который позволит получить разнообразие режимов с пространственным разрешением от 1 м до 500 м в зависимости от целевой задачи; в течение ближайших лет планируется развернуть новый специализированный гидрометеорологический и океанографический комплекс из 3-х КА Метеор-МП с АФАР; с 2024 г. начнётся последовательная реализация вывода на орбиту 4-х аппаратов космического комплекса Обзор-Р, пространственное разрешение

которого соответствует мировым стандартам [37].

Среди планов по запуску зарубежных КА отметим проект XpressSAR, в рамках которого планируется вывести 4 КА с РСА, продолжающих и развивающих основные концепции хорошо зарекомендовавшего себя «долгожителя» космоса TerraSAR-X. В другой миссии HRWS SAR предполагается использовать 4 КА: один (ведущий) работает в активном режиме, а три близко расположенные спутника – в пассивном режиме. Отличительные особенности этой группировки — сверхвысокое разрешение (0,25 м) и широкая полоса захвата (800 км) — являются уникальными и превышают проектные показатели отечественных разработок Метеор-МЗ №3 и Обзор-Р (1 м и 750 км соответственно).

В числе перспектив рассматривается бистатический режим работы КА, эффективность которого наглядно продемонстрировали TerraSAR-X и TanDEM-X, позволившие на протяжении десятка лет уточнить цифровую модель рельефа и решить множество других задач. Планируется создать аналогичный комплекс в L диапазоне TanDEM-L, правда, за счёт прекращения проекта TerraSAR-L. Большие надежды возлагаются на результаты реализации проекта PLATiNO-XSAR-1. Выведение на орбиту космического комплекса PLT-1 (PLATiNO-XSAR-1) планируется в две фазы: Ф1 и Ф2. В течение Ф1 (один год) КА с РСА (высота орбиты 619 км) отрабатывает бистатический режим работы в маршрутном режиме при взаимодействии с группировкой CSK/CSG, хотя потенциально РСА может работать в активном режиме. Затем, на фазе Ф2 (1,5 года) на орбиту с высотой 410 км выводится второй КА, который может работать как в активном режиме (маршрутный и прожекторный), так и в пассивном, взаимодействуя с РСА фазы 1, CSK/CSG или каким либо другим КА. К числу перспективных комплексов с бистатическим режимом относится проект HRWS SAR с предельным разрешением по дальности 0,25 м, в

котором три спутника на близких орбитах будут работать только в режиме приёма.

Более интенсивными темпами развивался кластер мини и микро спутников с РСА X диапазона на борту. Этому способствуют относительно малые в этом диапазоне размеры антенной системы, которые приводят к снижению габаритов и массы КА и позволяют организовать групповые запуски. В этом плане выделяются группировки микро КА Capella, Umbra, Iceye, каждая из которых в 2023 г. отмечалась двумя (Umbra, Iceye – тремя) удачными запусками (2+1, 2+1+2, 3+4+4 КА соответственно). Заметным явлением в радиолокационном сегменте стало развертывание ОГ QPS-SAR (4 КА), StriX (2 КА) и SuperView Neo 2 (2 КА) с разрешением 0,4...1 м. Миниспутником NeuSAR высокого разрешения (0,5 м) обзавёлся Сингапур, причем NeuSAR позиционируется как первый в мире спутник такого класса с полной поляризацией. Продолжена серия КА TecSAR (Polaris, Ofeq), которые для снижения массы в гибридной зеркальной антенне используют сетчатое зеркало.

Созвездия мини и микро спутников с РСА X диапазона будут интенсивно наращиваться, при этом не обходятся стороной и другие диапазоны волн. Фирма PredaSAR планирует в ближайшие годы вывести на орбиту 48 КА, а затем довести группировку до 96 КА. Предполагается, что радиолокаторы будут работать в C и X диапазонах, причём в C диапазоне облик РСА определяет зеркальная антенна, а в X диапазоне — АФАР. Аналогичный подход по наращиванию группировки до 96 мини КА уже реализуется в рамках проекта Tianxian-SAR (на орбите 2 КА). Орбитальная группировка из 96 мини КА этой серии будет использовать X и C диапазон (космические миссии Chaohu, Hisea). По 36 КА будут насчитывать ОГ мини спутников QPS-SAR и Capella каждая; группировка Umbra будет составлять 24 КА, а группировка StriX будет доведена до 30 КА. Семейство КА Iceye, уже составляющее на орбите 27 КА, будет ежегодно пополняться на 4–10 аппаратов.

Анализ технических характеристик мини и микро КА показал также и негативные стороны миниатюризации РСА. В первую очередь это сказалось на снижении числа режимов съёмки, вызванное ограниченными возможностями по сканированию луча антенны. Например, если в микро КА первого поколения заявлялись все базовые режимы, включая сканирующий режим (ScanSAR), то 3-е поколение работает только в маршрутном, прожекторном и скользящем прожекторном режимах (Iceye, Capella). Зона захвата в таких системах определяется высотой орбиты и шириной диаграммы направленности, а полоса обзора реализуется разворотом КА вокруг оси, совпадающей с вектором скорости. Сканирование, необходимое в азимутальной плоскости для съёмки в прожекторных режимах, создаётся программным разворотом (вращением) платформы КА, что не является равнозначной заменой электронному сканированию в АФАР. Частично в некоторых КА эта проблема сглаживается за счёт переключения облучателей в гибридных зеркальных антеннах, но число таких излучателей в силу конструктивных ограничений составляет 2...4, поэтому полосу захвата удастся увеличить до 30...50 км. Дальнейшее улучшение этого параметра обычно связывают с увеличением высоты орбиты. Следующим показателем, деградация которого из-за ограниченных возможностей антенны наблюдается в микро КА, является угол визирования. Так, у КА Capella он составляет 10...30°, у КА Iceye – 15...40°, поэтому оперативность съёмки будет достигаться количественным составом группировок.

Наметившаяся 10...15 лет назад тенденция снижения высоты орбиты до 350...400 км не нашла широкого распространения. Безусловно, снижение высоты орбиты приводит к снижению стоимости вывода КА на орбиту, к ослаблению требований по мощности передатчика и энергетике аппарата в целом. Однако при этом уменьшается полоса захвата и, что более существенно, увеличивается сопротивление атмосферы, требующее дополнительного запаса

топлива на коррекцию орбиты. С возмущением атмосферы из-за геомагнитной бури в виде увеличения плотности воздуха в ближнем космосе столкнулась группировка спутников Starlink, которые были выведены на технологическую орбиту (210 км) 3 февраля 2022 года, но стали интенсивно снижаться. Предпринятые меры по управлению КА и попытке вывода их на расчётную орбиту не увенчались успехом: из 49 аппаратов на орбите осталось только 11, остальные КА стали снижаться, разрушаться и сгорать в атмосфере, т.е. была потеряна практически вся группировка [29]. Этот пример наглядно показал нецелесообразность в радиолокационном сегменте снижения высоты орбиты, значения которых лежат выше 480...500 км. К случаям применения более низких орбит можно отнести миссии XpressSAR (425 км) и PLATiNO-XSAR-1 (410 км для КА 2-ой фазы).

Следующей тенденцией развития мини и микро КА с РСА является увеличение времени синтезирования. В соответствии с общей теорией РСА линейное разрешение по азимуту связано со временем синтезирования соотношением $\delta_{az} = \lambda R_n / (2V_n T_c)$, где λ — длина волны; R_n — наклонная дальность; V_n — скорость движения луча по поверхности Земли; T_c — время синтезирования. Для большинства КА среднее время T_c составляет 1...3 с, что обеспечивает сверхвысокое разрешение (менее 1 м). К числу первых экспериментов по увеличению времени синтезирования можно отнести введение улучшенного прожекторного режима (Staring Spotlight) в КА TerraSAR-X: увеличение T_c до 7...9 с позволило получить линейное разрешение по азимутальной координате 16...21 см. Современные микро КА еще более увеличивают время синтезирования: для КА Iceye разработан новый режим Dwell с $T_c = 25$ с; в РСА КА Capella антенна фокусируется на местности в течение 30 с. Кроме увеличения разрешающей способности, повышения четкости каждой детали и других изобразительных свойств РЛИ, в таких режимах по-

является возможность покадровой съёмки с последующим усреднением РЛИ, что является эффективным средством снижения уровня спекл шума, NESZ, улучшения радиометрического разрешения.

Следует отметить ещё одну тенденцию по разрешению технических противоречий оптических и радиолокационных средств съёмки земной поверхности. На КА совместно устанавливаются оптические камеры и бортовые радиолокаторы, что позволяет одновременно наблюдать объекты в видео- и радио-диапазонах. Если состояние атмосферы и освещённость позволяют получить оптические снимки, то производится совместная обработка оптических изображений (ОИ) и РЛИ. Если качество ОИ низкое, облачность занимает большую часть снимка или затеняет объект, то для обработки используется только РЛИ. В любом случае целевая миссия выполняется с гарантированным качеством и без катастрофических последствий. Кроме того, комплексирование оптико-электронной системы (ОЭС) и РСА позволяет продлить жизненный цикл космической миссии, поскольку при выходе из строя одного из датчиков (выше отмечалось, что срок активного существования КА с РСА меньше, чем КА с ОЭС) второй выполняет возложенные на него целевые задачи. Типичным представителем такого подхода может служить КА «ALOS» и группировка Yaogan 33, в которых спутники оснащены и оптическими камерами, и бортовыми радиолокаторами. Как развитие этого направления следует отметить проект OptiSAR (Канада), реализация которого предполагает создание группировки из 16 КА: 8 являются носителями оптико-электронной системы (ОЭС) и 8 представляют спутники с РЛС на борту. Можно отметить две особенности этой группировки: а) целевая аппаратура работает тандемом (КА с ОЭС + КА с РСА); б) предусматривается работа РСА в двух диапазонах ($L + X$), что в еще большей степени повышает информативность комплекса. Не менее информативной ожидается группировка из 4-х КА Azalea, которая будет осуществлять опти-

ческую, радиолокационную и радиотехническую разведку. Установка на борту КА аппаратуры обработки данных, систем машинного обучения для анализа и интеллектуальной обработки информации, а также системы высокоскоростной непосредственной связи с потребителями позволит обеспечить передачу полного набора готовой информации в режиме реального времени и сделать систему перенастраиваемой.

Получаемые в результате зондирования радиоголограммы с необходимой служебной информацией, содержащей основные параметры съёмки, через высокоскоростные линии спутниковой связи передаются в специализированные наземные центры, где производится их обработка и формирование РЛИ. Для сокращения времени доставки информационного продукта в канале «КА – потребитель» обработка переносится на борт КА. Такое техническое решение применяется, например, в КА Capella, на борту которого устанавливается графический процессор формирования РЛИ (режим работы quick look) [38]. В КА Haisi-1 также реализована функция интеллектуального синтеза РЛИ на борту [39]. В проекте космического комплекса Azalea на бортовую ЦВМ будет возлагаться весь спектр обработки оптической, радиолокационной и радиотехнической информации. Кроме повышения оперативности доставки РЛИ бортовая обработка радиоголограмм позволяет сократить объём передаваемых данных (РЛИ) в зависимости от режима работы на 10...50%, но более высоких показателей можно достичь, используя на борту вторичную обработку радиолокационной информации и стандартные процедуры сжатия изображений (с потерями или без потерь). Платой за отмеченные положительные свойства обработки на борту КА является увеличение мощности, потребляемой от системы электроснабжения, и массы РЛК, поэтому такая опция пока применяется на военных спутниках или КА двойного назначения, работающих в интересах обороны и безопасности. Не смотря на это, спрос на бортовую обработку с течением вре-

мени будет возрастать, поскольку выгоды в получении оперативной информации для потребителя очевидны.

Справедливости ради заметим, что такое решение не является новым. Ещё радиолокационный комплекс бокового обзора УС-А имел в своём составе бортовую ЦВМ «Аэли-та», которая вела обработку радиолокационной информации в реальном времени, запоминала её и в сеансы связи передавала потребителям (КА «Космос-402», старт 01.04.1971). Сигналы от двухчастотного РСА «Траверс-1П», который был установлен на модуле «Природа» (дата старта 23.04.1996) орбитальной станции МИР, также обрабатывались на борту. К идее бортовой обработки радиолокационных данных вернулись в проекте «Метеор-3М №3», однако до конца этот проект не был реализован. Подобные технические решения по реализации предварительной обработки для формирования РЛИ на борту КА в полосе обзора до 200...500 км предусматриваются «Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» [3].

Решение задачи по обработке радиолокационных данных на КА является многогранным. С одной стороны, оно приводит к перераспределению функций бортовой аппаратуры обработки сигналов и изображений (БАОСИ) и аппаратно-программных средств пункта приёма в сторону увеличения объёма обработки информации, реализуемой в бортовых вычислителях РСА. Учитывая условия эксплуатации, ограниченный энергетический ресурс бортовой сети, необходимо минимизировать массу, потребление, объёмы оперативной памяти и время вычислений. С другой стороны, от БАОСИ требуется работа в реальном времени и полная автоматизация процессов формирования и цифровой обработки изображений, включая автоматическое определение доплеровского центра, автофокусировку, устранение миграций сигнала по каналам дальности, шивку кадров и другие процедуры получения высококачественного РЛИ. Сложность этих задач

вызывает необходимость жёсткого согласования и использования всех ресурсов алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения. Кроме того, должна быть обеспечена возможность оперативного изменения программного обеспечения в процессе лётных испытаний и эксплуатации.

В связи с перечисленными ограничениями возникает необходимость решения вопросов построения специализированного высокоскоростного бортового вычислителя для эффективной обработки радиолокационной информации. К сожалению, известные технические решения, хорошо проработанные для авиационных систем, не могут быть полностью использованы для решения данной задачи, поскольку требования, предъявляемые к бортовой аппаратуре КА, по ряду позиций существенно отличаются. Кратко эти отличия заключаются в следующем.

✓ Условия эксплуатации бортовой аппаратуры КА предполагают радиационную стойкость всей элементной базы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Это обстоятельство существенно ограничивает возможности использования широко распространённых компонент вычислительной техники для цифровой обработки сигналов при проектировании РЭА.

✓ Более широкий спектр механических и температурных воздействий выдвигает значительно более жёсткие требования к конструкции РЭА.

✓ Бортовая аппаратура КА относится к необслуживаемым устройствам. В отличие от РЭА авиационного базирования здесь отсутствует возможность текущего или профилактического ремонта. Поэтому бортовая аппаратура КА должна иметь высокую надёжность, способность к самовосстановлению при сбоях в работе.

✓ Массогабаритные характеристики и энергопотребление бортовых средств КА являются ограниченными.

В любом случае конечное быстродействие и скорости приёма-передачи данных в БАОСИ начинают ограничивать ТТХ РСА и качество

Таблица 7. Отечественные радиационно стойкие процессоры

| Параметр | 1892BM16Т | 1892BM17Ф | 1892BM18Ф | 1892BM206 | 1892BM15АФ |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| Производительность пиковая, MFLOPs | 330 | 660 | 1320 | 2240 | 2240 |
| DSP ядро (такты частота ядра, МГц) | SISD | 2 SIMD | 2 SIMD | DELcore-30M (140) | DELcore-30M (140) |
| Объем памяти, Мбит | 4 | 4 | 4 | 1 | 3 |
| Рабочая частота, МГц | 110 | 110 | 110 | 100 | 120 |
| Порт SpaceWire | – | + | + | + | + |
| Порт SpaceFibre | – | – | – | + | – |
| Ускоритель БПФ | – | – | – | – | + |

обработанного РЛИ. Основными причинами отмеченного ограничения являются:

1) ограничение массогабаритных характеристик бортовой ЭВМ, что с учётом резервирования не позволяет наращивать вычислительные мощности до требуемых значений;

2) ограничение скорости вычислений и записи в память процессора входного потока данных.

Оценим предельные характеристики режимов работы, которые могут быть ограничены перечисленными факторами. В качестве возможного варианта построения бортового вычислителя РСА можно использовать архитектуру, выполненную на основе перспективной технологии SpaceWire. Данную технологию отличают высокие скорости передачи информации (до 300 Мбит/с), малые задержки доставки сообщений, низкое энергопотребление, электромагнитная совместимость, компактная реализация в отечественных СБИС, поддержка систем реального времени. При использовании SpaceWire бортовой вычислитель строится как распределенная вычислительная сеть с коммутацией пакетов [40]. Указанные особенности позволяют в значительной степени повысить качественные характеристики и возможности бортового вычислителя. В качестве элементной базы для построения бортового вычислителя могут быть использованы отечественные радиационно стойкие сигнальные процессоры, базовые параметры которых представлены в таблице 7.

Поскольку базовой операцией при синтезе РЛИ является быстрая свёртка, то наиболее

привлекательной является СБИС 1892BM15АФ, имеющая аппаратные ускорители процедуры БПФ и сжатия изображений по стандарту JPEG [41]. Рассмотрим для этого сигнального процессора обработку радиоголограммы с размером 16К×32К, что при времени синтезирования 1 с и дискрете 0,5 м соответствует съёмке объекта размером примерно 7,5×15 км. Расчёты показывают, что предельное время синтеза РЛИ в этом случае составит 25,4 с, а на сжатие РЛИ при подключении ускорителя уйдет всего 1,5 с. Отсюда получаем суммарное время, затрачиваемое на первичную обработку, порядка 27 с. Работу в реальном времени обеспечат семь модулей обработки сигналов по четыре процессора каждый.

Широкие возможности масштабирования такой архитектуры позволяют получить практически любые вычислительные мощности и объёмы памяти, оптимизированные под решаемые космической миссией задачи. Ограничения возникают в основном по массогабаритным показателям и потребляемой мощности. Использование в качестве вычислителей одноплатных вычислительных модулей позволит значительно упростить построение системы, облегчить управление, а также уменьшить её стоимость в целом. Появляется возможность, в зависимости от вычислительной мощности БАОСИ, реализации различных уровней обработки радиоголограмм. Например, в соответствии со следующей классификацией:

Уровень 1: Формирование первичного РЛИ парциальных кадров, получаемых в процессе

съёмки, с необходимой служебной информацией, но без обработки изображений.

Уровень 2: Радиометрическая и геометрическая коррекция РЛИ с учётом градуировочных и калибровочных характеристик аппаратуры съёмки, добавление служебной информации для последующей обработки.

Уровень 3: Приведение РЛИ к избранной картографической проекции и привязка к электронным картам местности.

Уровень 4: Комплексная обработка РЛИ. Составление РЛИ регионов из отдельных парциальных кадров, формирование рельефа и т.п.

Уровень 5: Автоматическая обработка РЛИ. Формирование координатных точек целей, целеуказание с классификацией классов целей.

С учётом эффективного сжатия РЛИ приведённая классификация показывает, что чем выше уровень обработки, тем больше эффект от применения бортовой обработки. Если добавить сюда оперативность доставки информации, то данное направление в развитии космических РСА можно отнести к числу приоритетных.

Подведём некоторые итоги вышесказанного. За последние два года в секторе малых КА сделаны крупные шаги по завершению построения и продления жизни орбитальных группировок с полнофункциональными РСА. В то же время радиолокационный сегмент ДЗЗ существенно пополнился за счёт сектора мини и микро спутников, не смотря на все технические сложности реализации таких проектов. Сравнение реализованных технических характеристик представителей этих секторов показало некоторые различия в направлениях развития РСА. Для полнофункциональных РСА в технических характеристиках наблюдается: расширение полосы обзора до 750 км; увеличение времени съёмки на одном витке до 30%; многообразие режимов с широким спектром разрешающей способности от 0,5 м до 100...200 м; переход к различным поляриметрическим режимам, включая полную поляриметрию; работа в активном и бистатическом

режимах для реализации интерферометрической съёмки (включая дифференциальную и поляриметрическую); повышение сроков активного существования до 7...10 лет. Вместе с развитием орбитальных группировок из 3...4-х КА наблюдается переход к многопозиционным РСА с использованием 2...4-х КА.

Для РСА микро и мини КА основной задачей считается повышение информативности и достижение предельного разрешения 0,25 м за счёт увеличения в 3...20 раз времени синтеза и расширения полосы частот сигнала до предельных значений 600...1200 МГц. При этом в жертву приносятся некоторые другие характеристики: набор режимов съёмки ограничивается маршрутным и прожекторным, отсутствует обзорный режим; ограничиваются углы визирования (до 40°); ухудшаются радиометрическое разрешение и шумовой эквивалент. Экономия затрат на формирование ОГ приводят к тому, что срок активного существования таких КА составляет 3...5 лет из-за применения относительно дешёвых компонентов. Повторяемость съёмки обеспечивается большим количеством используемых КА, которое имеется в ОГ или планируется вывести на орбиту (до 96 КА). В качестве антенной системы применяются лёгкие и простые в техническом исполнении ГЗА или ФАР с патч-элементами, обладающие ограниченными возможностями сканирования луча, поэтому управление лучом производится за счёт программного разворота КА. В то же время микро КА с РСА оказались более приспособленными к решению задачи создания трёхмерных радиолокационных портретов объектов при использовании режима multilook, когда с разных ракурсов можно получить до 10 снимков сверхвысокого разрешения.

Одним из перспективных направлений развития радиолокационного сегмента является использование бортовой обработки радиолограмм для синтеза РЛИ и быстрой передачи полученной информации пользователям в любой точке мира напрямую с орбиты. Наличие бортовых средств анализа и машинного обуче-

ния делает КА высокоинтеллектуальным средством ДЗЗ и позволяет решить большинство задач ДЗЗ в реальном времени. Выше было показано, что технические средства комплекса бортовой аппаратуры КА с соответствующим программно-алгоритмическим обеспечением, которые предназначены для формирования РЛИ в реальном времени работы с подвижными абонентами, могут быть реализованы на отечественной элементной базе.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов и др. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Туррук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 676 с.
3. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 82 с.
4. Заичко В.А. Российская система ДЗЗ будет развиваться в рамках специализированных по целевому назначению подсистем // Геоматика. 2015. №2. С. 12–21.
5. Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического ун-та. 2010. № 2. С. 80–91.
6. Стратилатов Н.Р., Крошин В.М., Нечаев А.А. Возможный облик, характеристики и эффективность перспективного КА ДЗЗ с высокодетальным, мультиспектральным и ИК-каналом наблюдения // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научно-технической конференции М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» НПП «ОПТЕКС», 2012. С. 79–82.
7. Бакланов А.И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т.5. Вып. 3. С. 17–28.
8. Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатиньев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Ч.1. Базовые проектные решения и пути модернизации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с аппаратурой оптико-электронного наблюдения // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 1. С. 82–89.
9. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Ломакин А.А. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов. Обзорная статья // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т.27. № 1. С. 120–149.
10. Заичко В.А., Шведов Д.О. Основные положения концепции развития наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли до 2030 года // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2021. С. 447. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a
11. Лошкарев П.А., Пушкарский С.В., Белый А.Н. Современные подходы к построению наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования земли из космоса с открытыми данными // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XVIII научно-технической конференции. Москва, Зеленоград: МНТО РЭС им. А.С. Попова, 2022. С. 18–22.
12. Рекомендация МСЭ-R RS.2105-1 (12/2021) Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем спутниковой службы исследования Земли (активной), использующих распределения между 432 МГц и 238 ГГц. ITU 2022. 35 с.
13. Горячкин О.В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического ун-та, 2010. № 2. С. 92–104.
14. Нониашвили М.И., Крючков И.В., Лесников Г.А., Нефедов С.И., Семенов А.Н. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 8(8). С. 94–114.
15. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Римаев В.В., Смирнов С.Н., Шишанов А.В. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2013. Т. 134. С. 21–26.
16. Клименко Н.Н., Занин К.А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2(99). С. 72–82.
17. Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы // Ural Radio Engineering Journal. 2020. № 4(2). С. 198–233.
18. Трубина Л.К., Мусина Г.А. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой с целью их применения для мониторинга угольных

карьер // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. №4(2). С. 3–9.

19. *Евсеев В.И., Колачев И.О.* Тенденции и перспективы развития радиолокационных систем с синтезированной апертурой космического базирования // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2022. 26(1): 28–32.

20. *Сибирцев В.А., Сидельников Е.В.* Анализ состояния и оценка перспектив развития иностранной космической радиолокационной видовой разведки // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы. Сб. материалов Международной научно-практической конференции. Том. 1. Иваново: ИПК "ПресСто"; Воронежский институт ФСИН России, 2022. С.281–284.

21. *Алексеева А.М., Лепёхина Т.А., Николаев В.И.* Перспективы дальнейшего развития космических систем ДЗЗ // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XVIII научно-технической конференции. Москва, Зеленоград: МНТО РЭС им. А.С. Попова, 2022. С. 39–43.

22. *Пешикун А.А.* Перспективные российские космические системы радиолокационного наблюдения // Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки. 2-я Международная научно-техническая конференция. С.-Пб., 2022. С. 72–73.

23. *Данилова Т.Д., Пермьяков Р.В.* Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2021 г. и перспективы 2022 г. // Геопрофи. 2022. № 1. С. 10–12.

24. *Пермьяков Р.В., Данилова Т.Д.* Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2022 г. и перспективы 2023 г. // Геопрофи. 2023. № 1. С. 10–14.

25. *Мировая орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ (октябрь 2021 года) // Дистанционное зондирование Земли из космоса. 2021. № 19 (78). С. 33–59.*

26. *Мировая орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ (июнь 2022 года) // Дистанционное зондирование Земли из космоса. 2022. № 11 (94). С. 29–55.*

27. *Observing Systems Capability Analysis and Review Tool [Электронный ресурс]. URL: <https://space.oscar.wmo.int> (дата обращения 10.10.2023).*

28. *Gunter's Space Page [Электронный ресурс]. URL: <https://space.skyrocket.de> (дата обращения 10.10.2023).*

29. *McDowell J.* Space Activities in 2022 // 2023 Jan 17. Rev 2.0. 148 p.

30. *Рекомендация МСЭ-R RS.2043-0 (02/2014) Характеристики радаров с синтезированной апертурой, работающих в спутниковой службе исследования Земли (активной) в полосе около 9600 МГц. ITU 2014. 16 с.*

31. *Бабочкин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Тутов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е.* Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 16–36.

32. *Borisenkov A., Goriachkin O., Dmitrenok V., Dolgopolov V., Zhengurov B., Juravlev A., Kurkov I., Khohlov S.* Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2 // *Procedia Engineering*. 2015. No. 104. Pp. 2–8.

33. *Горячкин О.В., Маслов И.В.* Оценка точности восстановления высоты рельефа бистатическим РСА Р-диапазона для двух вариантов съёмки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. №1. С. 14–23.

34. *F. Hélière, F. Fois, C.-C. Lin et. al.* Biomass: new mission selected as the 7th ESA Earth Explorer Mission // *EARSel Symposium*, 2013. Pp.89–98.

35. *Earth Observation Missions Current and Future: Multi-Purpose Imagery 2023 to 2040 [Электронный ресурс]. URL www.newspaceseconomy.ca (дата обращения 10.10.2023).*

36. *Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА». Версия 1. АО «ВПК «НПО машиностроения», 2023. 112 с.*

37. *Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми от космического комплекса «Обзор-Р». Версия 1. ГК «Роскосмос», АО «РКЦ «Прогресс», 2023. 111 с.*

38. *Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатиньев И.В.* Анализ проектных параметров и технических характеристик бортовой аппаратуры малых космических аппаратов Capella (Whitney) с радиолокатором синтезированной апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 2. С. 3–12.

39. *Кучейко А.А.* Космические программы ДЗЗ зарубежных стран БРИКС // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2022. №2. С. 40–57.

40. *Гришин В.Ю., Ракитин А.В., Костров В.В.* Облик перспективного вычислительного комплекса космического базирования с гибкой архитектурой для обработки сигналов // III Всероссийские Армандовские чтения: Космическая радиолокация / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Муром, 25.06–27.06 2013). Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. С. 52–57.

41. *Микросхема интегральная 1892ВМ15Ф, 1892ВМ15АФ. Руководство пользователя. АО НПП «Элвис». 13.03.2023. 534 с.*

Поступила 10 октября 2023 г.

English

RADAR SPACE SEGMENT OF REMOTE SENSING OF THE EARTH IN 2023: STATUS AND DEVELOPMENT TRENDS

Victor Vasilyevich Kostrov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: vyk.2004@rambler.ru

Alexey Valeryevich Rakitin — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”, Head of the Department of JSC “Research Institute “Submicron”².

E-mail: alexey.rakitin@mail.ru

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya St., 23.

²Address: 124498, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, Georgievsky Ave., 5/2.

Abstract: Space radar survey systems for the Earth remote sensing (ERS) using technologies of antenna aperture synthesis rank high and they enable radar survey in overcast and low light environment unlike optronic equipment (OE). Space vehicles (SV) equipped with synthetic aperture radars (SAR) have advanced capabilities and enable to make detailed ground maps, to verify existing maps, to detect and identify camouflaged facilities, to track displacements to a high accuracy, etc. Analysis of launching SAR-equipped SVc within 2022-2023 and in previous years enabled to highlight some features and development trends in radar segment. For instance, there is a steady rise in the number of SAR-equipped SV launches: it totaled to 11.4%, in 2022 and it was 22.2% of OE-equipped SVs launches in 2023. There was reviewed an occupancy of frequency range selection for radar systems, which revealed that S range is the least occupied, and most of radar equipment operates in X range. Ultra-wideband radio signals of maximum bandwidth up to 1200 MHz came into use to achieve high resolution. It is demonstrated that the focus was made on using small-size SAR-equipped SVs over recent years, which employ both active phased antenna arrays and hybrid antenna mirrors as antenna system. That enables to put 2-4 SAR-equipped SVs into orbit with other payload during one launch, which reduces specific costs. However, reducing SV size and its available energy supply affects negatively its capabilities: sighting angles' range shrinks, scanning modes meet difficulties and survey swath (capture range) goes down. A few of promising radar space missions are considered, the implementation of which is scheduled within the period up to 2030. Emphasis is placed on real-time operating systems. It is pointed out that there came along SVs with on-board processing of radio holograms, which is done in dedicated computing unit. Digital computing cluster architecture for advanced SAR is examined, as well as domestic hardware components due to which it is possible to implement radar imaging. There are given properties of digital signal processors and of processing time estimate for basic operations in radar images' synthesis. The ultimate resolution capability is evaluated, which can be implemented in on-board computing unit. It is revealed that 3...5 m resolution can be achieved in en-route and scanning mode which is equivalent to international standards.

Keywords: aperture synthesis radar (RSA), spacecraft, antenna, spatial resolution, radio hologram, onboard trajectory signal processing.

References

1. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images / L.A. Shkolny, E.F. Tolstov et al. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
2. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radar systems of land survey space-based. Moscow: Radio Engineering, 2010. 676 p.
3. The concept of development of the Russian space system of remote sensing of the Earth for the period up to 2025. Moscow: Federal Space Agency, 2006. 82 p.
4. Zaichko V.A. The Russian remote sensing system will be developed within the framework of subsystems specialized for the intended purpose. Geomatics. 2015. No.2. Pp. 12–21.
5. Baklanov A.I. Analysis of the state and trends in the development of high- and ultra-high-resolution surveillance systems. Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2010. No. 2. Pp. 80–91.

6. *Stratilatov N.R., Kroshin V.M., Nechaev A.A.* Possible appearance, characteristics and effectiveness of a promising remote sensing spacecraft with a highly detailed, multispectral and IR observation channel. Systems of observation, monitoring and remote sensing of the Earth: Materials of the scientific and technical conference. Moscow: MNTORES named after A.S. Popov, branch of FSUE "GNPRCC "TSSKB-PROGRESS" – NPP "OPTEx", 2012. Pp.79–82.
7. *Baklanov A.I.* New horizons of space systems of optical-electronic Earth observation high resolution. Rocket and space instrumentation and information systems. 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp. 17–28.
8. *Zanin K.A., Klimenko N.N., Moskatinyev I.V.* Modern spacecraft for remote sensing of the Earth. Part 1. Basic design solutions and ways of modernization of spacecraft for remote sensing of the Earth with optical-electronic surveillance equipment. Aerospace sphere. 2020. No. 1. Pp. 82–89.
9. *Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Lomakin A.A.* Review of the current state of orbital groupings of Earth remote sensing spacecraft and space repeaters. Review article. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika. 2022. Vol.27. No. 1. Pp. 120–149.
10. *Zaichko V.A., Shvedov D.O.* The main provisions of the concept of the development of ground-based space infrastructure for remote sensing of the Earth until 2030. Proc. of the 19th Int. Conf. "Modern Problems of remote sensing of the Earth from space". Moscow: ICI RAS, 2021. P.447. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a
11. *Loshkarev P.A., Pushkarsky S.V., Bely A.N.* Modern approaches to the construction of a ground-based space infrastructure for remote sensing of the Earth from space with open data. Systems of observation, monitoring and remote sensing of the Earth. Materials of the XVIII scientific and technical Conference. Moscow, Zelenograd: A.S. Popov MNTO RES, 2022. Pp. 18–22.
12. Recommendation ITU-R RS.2105-1 (12/2021) Typical technical and operational characteristics of Earth Exploration Satellite Service (Active) systems using distributions between 432 MHz and 238 GHz. ITU 2022. 35 p.
13. *Goryachkin O.V.* Ways of development of radar space systems of remote sensing of the Earth. Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2010. No. 2. Pp. 92–104.
14. *Noniashvili M.I., Kryuchkov I.V., Lesnikov G.A., Nefedov S.I., Semenov A.N.* Review of modern space-based radars with synthesized aperture and analysis of trends in their development. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Instrument Engineering". 2012. No. 8(8). Pp. 94–114.
15. *Vnotchenko S.L., Kovalenko A.I., Riman V.V., Smirnov S.N., Shishanov A.V.* Possibilities of creating wide-range radars with synthesized aperture for small spacecraft. Questions of Electromechanics. 2013. Vol. 134. Pp. 21–26.
16. *Klimenko N.N., Zanin K.A.* A new generation of spacecraft for monitoring the marine environment. Aerospace sphere. 2019. No. 2(99). Pp. 72–82.
17. *Sosnovsky A.V.* Interferometric data processing of space radars with synthesized aperture when creating digital models of the relief of the Earth's surface: state and problems. Ural Radio Engineering Journal. 2020. No. 4(2). Pp. 198–233.
18. *Trubina L.K., Musina G.A.* Review of modern synthetic aperture radars for their application for monitoring of coal pits. Interexpo Geo-Siberia. 2021. No. 4(2). Pp. 3–9.
19. *Evseev V.I., Kolachev I.O.* Trends and prospects for the development of space-based synthetic aperture radar systems. Bulletin of Education and Development of Science of the Russian Academy of Natural Sciences. 2022. No. 26(1): Pp. 28–32.
20. *Sibirtsev V.A., Sidelnikov E.V.* Analysis of the state and assessment of prospects for the development of foreign space radar species intelligence. Technique and safety of objects of the penal system. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conf. Volume 1. Ivanovo: IPK "PresSto"; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, 2022. Pp. 281–284.
21. *Alekseeva A.M., Lepekhina T.A., Nikolaev V.I.* Prospects for further development of remote sensing space systems. Systems of observation, monitoring and remote sensing of the Earth. Materials of the XVIII scientific and technical Conference. Moscow, Zelenograd: A.S. Popov MNTO RES, 2022. Pp. 39–43.
22. *Peshkun A.A.* Promising Russian space radar surveillance systems. Digital reality: space and spatial data, processing technologies. 2nd International Scientific and Technical Conf. S.-Pb., 2022. Pp. 72–73.
23. *Danilova T.D., Permyakov R.V.* Results of remote sensing spacecraft launches in 2021 and prospects for 2022. Geoprofi. 2022. No. 1. Pp. 10–12.
24. *Permyakov R.V., Danilova T.D.* Results of remote sensing spacecraft launches in 2022 and prospects for 2023. Geoprofi. 2023. No. 1. Pp. 10–14.
25. The world orbital grouping of remote sensing spacecraft (October 2021). Remote sensing of the Earth from space. 2021. No. 19 (78). Pp.33–59.
26. The World orbital grouping of remote sensing spacecraft (June 2022). Remote sensing of the Earth from space. 2022. No. 11 (94). Pp.29–55.

27. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool [Electronic source]. URL: <https://space.oscar.wmo.int> (access date 10.10.2023).
28. Gunter's Space Page [Electronic source]. URL: <https://space.skyrocket.de> (access date 10.10.2023).
29. *McDowell J.* Space Activities in 2022. 2023 Jan 17. Rev 2.0. 148 p.
30. Recommendation ITU-R RS.2043-0 (02/2014) Characteristics of synthetic aperture radars operating in the Earth Exploration Satellite Service (active) in the band about 9600 MHz. ITU 2014. 16 p.
31. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neronsky L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* Results and lessons of flight tests of the RSA of the small spacecraft "Condor-E". VI All-Russian Armand Readings: Radiophysical methods in remote sensing of environment: VII All-Russian Scientific Conf. (31.05-2.06. 2016, Murom). Murom: CPI MI VISU, 2016. Pp. 16–36.
32. *Borisenkov A., Goriachkin O., Dmitrenok V., Dolgoplov V., Zhengurov B., Juravlev A., Kurkov I., Khohlov S.* Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2. *Procedia Engineering* 104 (2015) 2-8.
33. *Goryachkin O.V., Maslov I.V.* Estimation of the accuracy of restoring the elevation of the relief of bistatic P-band SAR for two shooting options // *Radio engineering and telecommunication systems*. 2018. No. 1. Pp.14-23.
34. *F. Hélière, F. Fois, C.-C. Lin et. al.* Biomass: new mission selected as the 7th ESA Earth Explorer Mission // *EARSel Symposium*, 2013. Pp. 89–98.
35. Earth Observation Missions Current and Future: Multi-Purpose Imagery 2023 to 2040 [Electronic Source]. URL www.newspaceconomy.ca (access date 10.10.2023).
36. User's Guide to Earth remote sensing data received by the Condor-FKA space system. Version 1. JSC "MIC "NPO Mashinostroeniya", 2023. 112 p.
37. User's Guide to Earth remote sensing data received from the space complex "Obzor-R". Version 1. GC "Roscosmos", JSC "RCC "Progress", 2023. 111 p.
38. *Zanin K.A., Klimenko N.N., Moskatinyev I.V.* Analysis of design parameters and technical characteristics of onboard equipment of small Capella (Whitney) spacecraft with synthesized aperture radar. *Vestnik NPO named after S.A. Lavochkin*. 2023. No. 2. Pp. 3–12.
39. *Kuceiko A.A.* Space remote sensing programs of foreign BRICS countries. *Remote sensing of the Earth from space in Russia*. 2022. No. 2. Pp. 40–57.
40. *Grishin V.Yu., Rakitin A.V., Kostrov V.V.* The appearance of a promising space-based computing complex with a flexible architecture for signal processing. III All-Russian Armand readings: Space radar. Proc. II All-Russian Scientific and Practical Conf. (Murom, 25.06-27.06 2013). – Murom: CPI MI VISU, 2013. Pp. 52–57.
41. Integrated circuit 1892VM15F, 1892VM15AF. User Manual. JSC SPC "Elvis". 13.03.2023. 534 p.