

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.26163/RAEN.2022.50.41.003  
УДК 621.396.96

*V.I. Evseev, I.O. Kolachev*

### TRENDS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF SPACE-BASED SYNTHETIC APERTURE RADAR SYSTEMS

**Vladimir Evseev** – professor, the Department of Radio Electronic Control Systems, D. Ustinov Baltic State Technical University (Voenmeh), Doctor of Engineering, Laureate of the prize of St. Petersburg «For the Humanization of Education», St. Petersburg; **e-mail: v.evseev43@mail.ru**.

**Igor Kolachev** – engineer, D. Ustinov Baltic State Technical University (Voenmeh), St. Petersburg; **e-mail: i46108@voenmeh.ru**.

*We assess the role of synthetic aperture radars (RSA) in Earth remote sensing systems. The increase of informative value and efficiency are analyzed as the trends in the development of remote monitoring tools from space carriers. Promising directions for the development of the systems in question are identified.*

**Keywords:** radar; remote sensing of the Earth; synthesized aperture radar; spacecraft; viewing modes; informative value; efficiency; polarization matrix; phased array antenna.

*V.I. Evseev, I.O. Kolachev*

### ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

**Владимир Иванович Евсеев** – профессор кафедры «Радиоэлектронные системы управления», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), доктор технических наук, лауреат премии Правительства Санкт-Петербурга «За гуманизацию образования», г. Санкт-Петербург; **e-mail: v.evseev43@mail.ru**.

**Игорь Олегович Колачев** – инженер, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), г. Санкт-Петербург; **e-mail: i46108@voenmeh.ru**.

*В статье оценена роль радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в системах дистанционного зондирования Земли. Проведён анализ таких тенденций развития средств дистанционного мониторинга с борта космических носителей, как повышение информативности и оперативности. Выявлены перспективные направления развития подобных систем.*

**Ключевые слова:** радиолокация; дистанционное зондирование Земли; радиолокатор с синтезированной апертурой; космический аппарат; режимы обзора; информативность; оперативность; поляризация матрица; фазированная антенная решётка.

С первых шагов в освоении космоса человечество использует данное пространство с целью решения задач дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ). Например, не вызывает сомнения, что создание современных высокоточных карт

было бы невозможно без космических систем ДЗЗ.

Первые космические аппараты (далее – КА) ДЗЗ использовали оптические системы, поэтому ресурс их работы был ограничен количеством плёнки. Появление оп-

тико-электронных систем позволило устранить данный недостаток, однако на первый план вышла другая проблема – зависимость эффективной работы от времени суток и погодных условий. Указанных недостатков лишены радиолокационные системы (далее – РЛС), но в радиодиапазоне проявляется другой недостаток – отношение длины волны к размеру апертуры намного больше, чем у оптических систем. В связи с этим потенциальное разрешение у РЛС значительно хуже, чем у оптико-электронных систем.

Для улучшения разрешающей способности РЛС необходимо увеличивать размер апертуры, однако создание антенны для КА, размеры которой более 10–20 м, затруднено в связи с техническими ограничениями, к которым относятся большая масса и габариты конструкции. В настоящее время существуют проекты больших антенн КА, согласно некоторым из них диаметр перспективной антенны может достигать 100 м [6], но они ещё далеки от технической реализации [1]. Развитие науки и техники позволило решить данную проблему другим путём: увеличивается не реальная антенна, а в результате движения КА создаётся искусственная антенная решётка, размеры которой могут достигать нескольких километров. Данные системы, известные как радиолокаторы с синтезированной апертурой (далее – РСА), позволили приблизить разрешающую способность РЛС к разрешению оптико-электронных систем. Поэтому в настоящее время эти системы являются одним из основных инструментов ДЗЗ. Стоит отметить, что РСА позволяют решать задачи, решение которых затруднено, с помощью средств, работающих в оптическом диапазоне электромагнитных волн, а именно [5]:

- гидрологического наблюдения состояния почв, снежных покровов, мониторинга ледовой обстановки и вечной мерзлоты;
- дистанционной археологии;
- оценки морского волнения и параметров ветра;
- ведения поисково-спасательных работ по элементам металлических конструкций;

- обнаружения аварийных ситуаций на техногенных объектах и т.п.

В настоящей статье проведён анализ современных тенденций развития космических РСА. По результатам анализа РСА, запущенных на орбиту за последние 8 лет, было выявлено три направления развития:

- повышение информативности,
- повышение оперативности,
- создание многолучевых систем.

Рассмотрим каждое направление развития более подробно.

Повышение информативности заключается в получении дополнительной информации об объектах наблюдения. Если для задачи картографирования часто достаточно получить однополяризационное радиолокационное изображение (далее – РЛИ), то для определения характера отражающей поверхности, оценки характеристик окружающей среды, классификации целей, подстилающих поверхностей и других задач средствами ДЗЗ необходимо определение полной поляризационной матрицы обратного рассеяния радиолокационного сигнала. Поэтому в настоящее время большинство космических РСА являются поляриметрическими комплексами, способными работать с любой комбинацией поляризаций сигнала на излучение и приём.

Дальнейшее повышение информативности средств ДЗЗ может быть достигнуто при работе в нескольких частотных диапазонах. Данные системы активно используются в самолётных РСА, однако реализация подобной системы на КА связана с рядом технических трудностей, главной из которых является создание многодиапазонной антенной системы. Существует несколько путей решения данной проблемы [4]. Среди них следует выделить два подхода. Первым является совмещение антенных решёток, когда высокочастотные облучатели располагаются между низкочастотными.

Второй подход подразумевает компоновку антенн «друг на друга», в результате чего низкочастотная антенна служит рефлектором для высокочастотной. Однако оба подхода приводят к ухудшению направленных свойств антенн в связи с взаимодействием решёток, которое приводит, в

свою очередь, к появлению взаимных помех.

Единственным реализованным многодиапазонным вариантом космической РСА по настоящее время служила SIR-C/X/L [7], которая была установлена на КА «Space Shuttle», запущенный на орбиту высотой 230 км в 1994 г.

Как было отмечено в работе [4, с. 82], опубликованной в 2018 г.: «... зарубежные разработчики космических систем с РСА на сегодняшний день и на ближайшую перспективу не считают технологически и экономически оправданным разрабатывать и выводить в космос многочастотные радиолокаторы, размещённые на одном космическом аппарате». По состоянию на середину 2021 г. существует ряд проектов многодиапазонных космических РСА. Например, проект «Смотр-SP» предполагает работу в P- и S-диапазонах длин волн, а «Спинар-1ДМ» будет работать в диапазонах L и P. К сожалению, в связи с трудностями технической реализации и экономическими проблемами некоторые проекты закрываются. Подобным проектом является «Opti SAR», предполагавший создание орбитальной группировки, состоящей из КА с радиолокационными системами, работающими в L- и X-диапазонах, и оптико-электронными комплексами на борту [12]. Проект был закрыт в 2020 г. в связи с банкротством компании-разработчика [13].

Ещё одной тенденцией повышения информативности является разработка нестандартных режимов обзора. В литературе под стандартными режимами понимают: маршрутный, широкозахватный и прожекторный. В работе [3] приведено их подробное описание. В качестве примера подобного режима можно привести «Скользящий прожектор» («Sliding Spotlight»), реализованный в космической РСА «Capella X-SAR» [8]. Данный режим сочетает в себе особенности маршрутного и прожекторного обзоров. В маршрутном режиме луч антенны остаётся неподвижным в течение всего обзора, что позволяет формировать непрерывное РЛИ по азимуту. Однако при использовании равномерного фазового распределения поля в антенне разрешение по азимуту может быть достигнуто не

лучше значения, равного половине горизонтального размера реальной апертуры.

Для улучшения разрешающей способности РСА антенна должна постоянно направляться на интересующий участок земной поверхности – в этом заключается идея прожекторного режима. Данный режим позволяет получить разрешение порядка долей метра, однако размер зоны захвата определяется шириной диаграммы направленности реальной антенны.

Для режима обзора «Скользящий прожектор» луч антенны поворачивается в азимутальной плоскости, но скорость его поворота меньше, чем в прожекторном режиме. В результате длительность синтеза увеличивается, а разрешающая способность, по сравнению с маршрутным режимом, улучшается. В связи с тем, что луч антенны не направлен постоянно на точку визирования, протяжённость полосы съёмки больше, чем в прожекторном режиме, однако разрешение становится хуже. Например, в космической РСА «Terra SAR-X» в прожекторном режиме разрешающая способность по азимуту составляет 0,24 м при протяжённости полосы захвата 3,7 км, а в режиме «Скользящий прожектор» полоса увеличивается до 5 км при разрешении 1,1 м [2].

Поскольку отличие между большинством режимов заключается в алгоритмах управления лучом антенны и цифровой обработке сигналов, в настоящее время возможно изменение набора режимов работы РСА на орбите путём изменения программного обеспечения. Например, в первоначальном варианте КА «ICEYE-X» не предусматривался широкозахватный режим обзора – он был добавлен во время эксплуатации аппарата [11].

Второе направление развития космических РСА – повышение оперативности. Известно, что скорость получения информации является важнейшей характеристикой любой информационной системы. Поскольку подобные КА не располагаются на геостационарных орбитах, для получения РЛИ интересующего участка местности необходимо использовать временные интервалы, когда он попадает в рабочую зону РЛС. Это является большой проблемой,

поскольку к моменту получения информации она может быть уже неактуальной.

Наиболее простым способом решения подобной проблемы является создание спутниковых группировок. Например, для КА «COSMO-Sky Med Second Generation» [9] максимальный период повторного освещения участка земной поверхности составляет 16 дней, а для орбитальной группировки «ICEYE-X» [10], которая будет состоять из 18 КА, он составляет 24 ч. При увеличении числа спутников до 36 и с применением специального расчёта их орбит этот промежуток времени можно уменьшить до 1 ч. Подобное планируется для группировки КА «Capella X-SAR» [8]. Следовательно, создаётся система, позволяющая получить РЛИ значительной части Земли в течение десятков минут после формирования задания.

Необходимо отметить, что увеличение числа КА в группировке, как правило, приводит к уменьшению информативности каждого аппарата в отдельности, что обусловлено, в первую очередь, экономическими причинами. Например, КА группировки «ICEYE-X» работают только с вертикальной поляризацией на передачу и приём [10], а «Capella X-SAR» – с горизонтальной [8]. Поэтому для повышения информативности всей системы в целом перспективно использование не однотипных КА, а объединение различных датчиков: оптико-электронных и радиолокационных, работающих в разных частотных диапазонах. Исходя из экономических соображений (если они носят критичный характер) на каждом КА группировки целесообразно устанавливать один датчик.

В настоящее время существуют проекты подобных группировок, например, упомянутая выше система «Opti SAR» состоит из восьми тандемов, включающих в себя КА с РСА и оптико-электронный спутник. Создание орбитальных группировок, состоящих из тандемов, является перспективным направлением, поскольку это позволит оперативно формировать трёхмерные РЛИ земной поверхности с помощью интерференционных методов [3]. Отметим, что подобное положение практически невозможно для оптико-электронных

систем. Помимо этого, подобный подход позволит формировать РЛИ в разных частотных диапазонах без использования многодиапазонной антенной системы.

Третьим направлением развития космических РСА является расширение полосы захвата радиолокатора путём одновременного формирования нескольких лучей. Это возможно с помощью многоапертурных антенн, применению которых в космических РСА посвящено диссертационное исследование [2]. При использовании подобных антенн и зондирующих сигналов с несколькими поднесущими частотами либо ансамбля импульсов с фазокодовой модуляцией возможно одновременное формирование РЛИ нескольких участков земной поверхности.

Формирование нескольких лучей по азимуту в прожекторном режиме позволяет получать РЛИ смежных участков поверхности, что увеличивает протяженность полосы съёмки.

Формирование лучей в угломестной плоскости в маршрутном режиме увеличивает полосу захвата, а в широкозахватном – увеличивает длительность синтеза каждой парциальной полосы, что улучшает разрешающую способность РСА по азимуту.

Формирование нескольких лучей осуществляется путём изменения фазового распределения поля в реальной апертуре [2]. В случае использования активной фазированной антенной решётки изменение направления луча осуществляется с помощью перестройки фазовращателей. Другой вариант одновременного формирования нескольких лучей – использование зеркальной антенны с несколькими облучателями.

Однако реализация данного режима сталкивается с рядом проблем: возникают смещения максимума диаграммы направленности антенны для каждого из лучей и амплитудные потери, вызванные несоответствием фактической несущей частоты и частоты, на которую проектировалась антенна и тракты РЛС.

В результате отклонения луча возникают геометрические искажения, которые приводят к пропуску части полосы обзора.

В настоящее время существуют способы решения данной проблемы. Например, использование специального чередования несущих частот и специальное управление положением многолучевой антенны, также рассмотренные в диссертационном исследовании [2].

Таким образом, можно сформулировать следующие тенденции развития космических РСА для повышения эффективности работы средств ДЗЗ с космических орбит:

1. Повышение информативности путём определения полной поляризационной матрицы обратного рассеяния и разработки нестандартных режимов обзора.

2. Повышение оперативности путём создания орбитальных группировок.

Помимо этого, были выявлены следующие перспективы развития данных систем:

1. Создание многочастотных космических РСА.

2. Создание орбитальных группировок, включающих в себя как РСА, так и оптико-электронные средства.

3. Объединение КА в структуру типа тандем с целью формирования трёхмерных РЛИ земной поверхности.

4. Создание многолучевых РСА с целью увеличения полосы захвата при высоком разрешении РЛИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкова Е.С. Разработка технологии изготовления отражающих поверхностей трансформируемых антенн из металлотрикотажных сетеполотен с увеличенными размерами ячеек: дисс. ... канд. техн. наук / Е.С. Бабкова. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. – 148 с.

2. Булыгин М.Л. Многолучевые режимы съемки в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой: дисс. ... канд. техн. наук / М.Л. Булыгин. – М.: Московский государственный авиационный институт, 2018. – 154 с.

3. Верба В.С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

4. Груздов В.В. Новые технологии дис-

танционного зондирования Земли из космоса / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Кришкотов, А.И. Кудря. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 482 с.

5. Неронский Л.Б. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны / Л.Б. Неронский, В.Ф. Михайлов, И.В. Брагин. – СПб.: СПбГУАП, 1999. – 220 с.

6. Самый большой рефлектор космической антенны // Программа повышения конкурентоспособности ТГУ: [сайт]. URL: <http://viu.tsu.ru/news/practices/1539/> (дата обращения: 27.01.2022).

7. Freeman A. The legacy of the SIR-C/X-SAR radar system: 25 years on / A. Freeman, M. Zink, E. Caroa, A. Moreira, L. Veilleu, M. Werner // Remote Sensing of Environment. – 2019. – V. 231.

8. Capella X-SAR // eoPortal - Earth Observation Directory & News. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/capella-x-sar>. (дата обращения: 12.10.2021).

9. COSMO-SkyMed Second Generation // eoPortal - Earth Observation Directory & News. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed-second-generation> (дата обращения: 12.10.2021).

10. ICEYE Constellation // eoPortal - Earth Observation Directory & News. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iceye-constellation> (дата обращения: 11.10.2021).

11. ICEYESAR Product Guide 2021 Version 4.2 // ICEYE: [сайт]. URL: [https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/ICEYE\\_SAR\\_Product\\_Guide\\_2021\\_V4.0.pdf](https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/ICEYE_SAR_Product_Guide_2021_V4.0.pdf) (дата обращения: 11.10.2021).

12. OptiSAR // eoPortal - Earth Observation Directory & News. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/optisar> (дата обращения: 11.10.2021).

13. Urthecast Bankruptcy Surprises No One // SAR Journal: [сайт]. URL: <http://syntheticapertureradar.com/urthecast-bankruptcy-surprises-no-one/> (дата обращения: 13.10.2021).