

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА И ПУТЕЙ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

*Канд. физ.-мат. наук Л.Н. Захарова* (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал), *канд. техн. наук В.М. Леонов* (ФГУП ЦНИИмаш), *канд. физ.-мат. наук В.П. Синило* (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал)

Рассматриваются основные тенденции развития новых методов и технологий радиолокационного зондирования Земли, а именно: преимущественное использование многоспутниковых группировок с орбитальными конфигурациями, оптимизированными для решения определённых категорий прикладных задач; реализация различных схем интерферометрической и поляриметрической съёмки; применение технологий, связанных с распределёнными антенными системами и цифровым формированием диаграммы направленности антенны радара. Отмечаются возможности количественного и качественного улучшения результатов наблюдений на основе новых технологий съёмки. Даются рекомендации по их применению в различных целевых приложениях.

**Ключевые слова:** комплексирование информации, многоспутниковые группировки, радиолокационная интерферометрия и поляриметрия, синтезирование апертуры, цифровое формирование диаграммы направленности.

**Analysis of Radar Earth Sensing Perspective Technologies from the Space and the Utilization Ways by an Applied Problems Solving.** L.N. Zakharova, V.M. Leonov, V.P. Sinilo. Main trends in the development of new radar Earth sensing methods and technologies, namely: a preferential utilization of multi-satellite groups with orbital configurations that are optimized to address certain categories of applications; an implementation of various schemes of an interferometric and polarimetric survey; an application of technologies related to distributed antenna systems and a digital radar antenna beamforming are examined. Possibilities of a quantitative and qualitative improvement of observations results on the basis of new surveys technologies are noted. Recommendations for their utilization in different target applications are given.

**Key words:** information integration, multi-satellite groups, radar interferometry and polarimetry, synthetic aperture, digital beamforming.

Заметная тенденция последнего десятилетия в развитии технологий радиолокационных съёмок поверхности Земли из космоса – активный поиск путей расширения их функциональных возможностей. Изыскания проводятся в двух основных направлениях. Согласно первому развиваются методы повышения информативности съёмок и комплексного применения разнотипных данных при интерпретации результатов наблюдений. К числу таких методов относятся новые технологии поляризационных исследований (радиолокационная поляриметрия), получения и использования фазовой информации отражённого сигнала на основе анализа нескольких изображений объекта по результатам его съёмки (в том числе разнесённых по времени) с близких параллельных орбит (радиолокационная интерферометрия), методы совместной обработки данных нескольких частотных диапазонов и т.п. Цель работ второго направления – ослабить принципиальные ограничения возможностей традиционного РСА (радиолокатора с синтезированной апертурой), состоящие в том, что повышение пространственного разрешения достигается за счёт уменьшения размеров полосы съёмки.

Рассмотрим наметившиеся пути повышения эффективности космической радиолокации в сфере дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

**Радиолокационная интерферометрия** [1] представляет собой группу методов, в рамках которых при получении и обработке радиолокационных изображений наравне с амплитудной используется фазовая составляющая радиолокационного сигнала. Преимущества интерферометрии перед чисто «амплитудными» методами анализа радиосигнала заключаются в существенном расширении состава данных о свойствах зондируемой поверхности, в том числе получении информации о рельефе, площади подвижек поверхности, изменениях ландшафта за время между съёмками и т.п. Особо важную роль радарная интерферометрия приобретает в задачах составления высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР), значительно превосходя по своим возможностям оптические стереосъёмки не только за счёт независимости от освещённости и облачности, но и благодаря более высокому качеству получаемой информации. Интерферометрия также обеспечивает детектирование и оценку скорости подвижных объектов, в том числе поверхностно распределённых (например волн на водной поверхности). Все планируемые программы радиолокационного ДЗЗ, особенно многоспутникового, так или иначе связаны с интерферометрией.

Для получения информации на основе анализа фазовой компоненты радиолокационных изображений необходимо провести ряд съёмок объекта с близких позиций с учётом требуемых ограничений одним из следующих способов.

1. Съёмка объекта с одного и того же космического аппарата (КА) в течение двух его проходов над снимаемой областью.
2. Последовательная съёмка объекта двумя, желательными идентичными, сенсорами, установленными на двух разных КА.
3. Одновременная съёмка объекта двумя (или более) сенсорами, один из которых излучает сигнал и принимает ответный (активный сенсор), а второй (и прочие, если имеются) работает только на приём (пассивный сенсор).

В свою очередь одновременная съёмка объекта с разных точек в пространстве может быть организована разными способами:

- а) за счёт разнесения приёмных антенн вдоль продольной оси несущего аппарата (например размещения их в носовой и кормовой частях летательного аппарата, либо раздельного использования двух частей единой антенны);
- б) путём размещения пассивного сенсора на конце жёсткой штанги, соединённой с аппаратом, несущим основной (активный) сенсор;
- в) посредством использования полуктивной системы наблюдения, в которой один активный (главный) аппарат дополняется группировкой из нескольких пассивных, расположенных на некотором отдалении от него.

Расстояние между точками расположения приёмно-передающих антенн в моменты съёмки называют базой интерферометра. По типу ориентации этого отрезка относительно траектории носителя в пространстве все интерферометрические съёмки делятся на два класса: с ориентацией базы вдоль трассы полёта и поперёк неё.

Интерферометрия с использованием базы, ориентированной вдоль трассы полёта, может быть организована только при однопроходных схемах съёмки. Этот способ предназначен, в основном, для выделения движущихся целей и оценки их скорости. Цели могут быть точечными (автомобили, корабли) или распределёнными (поверхность океана). Специфика измерения скоростей такова, что необходимо только одномоментное получение двух изображений. Таким образом, для решения этой задачи подходят лишь способы из группы 3.

Интерферометрия на основе базы, ориентированной поперёк трассы полёта, имеет приложения в нескольких направлениях: построение цифровых моделей рельефа; измерение мелкомасштабных смещений поверхности за время между съёмками; оценка изменений отражательных свойств поверхности за то же время. В зависимости от конкретной задачи выбираются наиболее подходящие схемы съёмки. Для построения ЦМР наилучшей является одновременная съёмка (метод б) при условии ориентации штанги поперёк трассы полёта и метод (в). Допустимы также

и двухпроходные схемы (1) и (2), при этом интервал между съёмками желательнее минимизировать в целях сокращения временной декорреляции. Для измерения подвижек подстилающих покровов и оценки их изменений допустимы только двухпроходные съёмки, и в этом случае интервал между проходами выбирается в зависимости от конкретной задачи.

Всё более широкое применение получают методы *радиолокационной поляриметрии* [2], информативной основой которых являются структуры с чётко выделенной ориентацией на поверхности и в объёмном слое. Поляризационные измерения могут использоваться как уникальный способ дистанционного изучения состояния и свойств растительных покровов, почв, льдов и т.д.

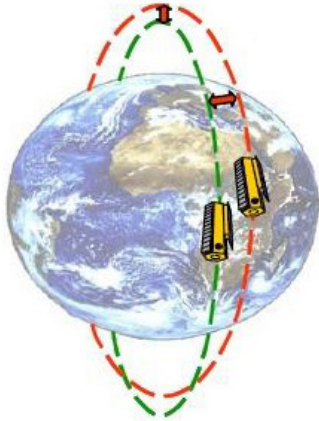
Поляризационные съёмки, выполняемые поляриметрическим радиолокатором с синтезированной апертурой, являются базой для формирования матрицы рассеяния элементов отражающей поверхности, которая состоит из коэффициентов обратного рассеяния четырёх вариантов поляризации сигналов на излучении и приёме:  $S_{HH}$ ,  $S_{VV}$ ,  $S_{HV}$ ,  $S_{VH}$ . Первой буквой в индексах обозначена поляризация сигнала при излучении, второй – при приёме ( $H$  – горизонтальная,  $V$  – вертикальная). Элементы матрицы, при которых поляризация на излучении и приёме совпадает, соответствуют так называемой согласованной поляризации, а при которых не совпадает – перекрёстной, или кросс-поляризации.

Формирование поляризационного базиса является технически сложной задачей вследствие невозможности одновременного измерения всех четырёх элементов полной матрицы рассеяния. Для решения проблемы измерения полной матрицы рассеяния и отдельных её компонентов существуют различные способы разнесения измерений: по времени, пространству, частоте и т.д., каждый из которых характеризуется своими преимуществами и недостатками. Наиболее предпочтительным может оказаться способ разнесения измерений на основе так называемых ортогональных кодов, обладающих нулевой взаимной корреляцией. К таковым можно условно отнести ЛЧМ-сигналы (сигналы с линейно-частотной модуляцией зондирующего импульса) с противоположными знаками девиации частоты. Предполагается, что ортогональные импульсы излучаются одновременно или с небольшим разнесением во времени. Исходя из уровня искажений амплитудно-фазовых соотношений между элементами полной матрицы рассеяния можно рекомендовать организацию измерений с разделением во времени или с ортогональным кодированием [3].

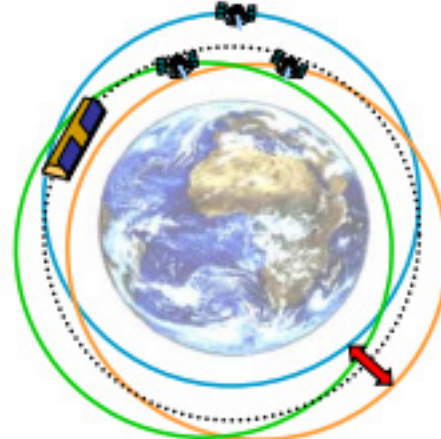
Современные проекты в области космической радиолокации создаются преимущественно как *многоспутниковые системы*, которые могут обеспечивать оперативный мониторинг различных естественных и антропогенных процессов, получение данных для интерферометрического и поляриметрического анализа, а также многочастотную радиолокацию. Вариант комплексирования информации, в рамках которого объединяются данные нескольких частотных диапазонов, выглядит многообещающим для изучения объёмных отражающих сред (в частности растительности), поскольку глубина проникновения радиосигнала в отражающий слой зависит, кроме прочего, от длины волны. Однако в полной мере этот вариант пока не реализован (за исключением съёмок *SIR-C/X-SAR*, проводившихся в 1994 г.). В настоящее время предпочтение отдаётся многопозиционной локации в одном частотном диапазоне.

Многоспутниковые группировки могут быть сформированы в виде как полуактивных, так и активных систем. Основной задачей активных многоспутниковых группировок является оперативный контроль объектов и территорий с оптимальным для выбранного ряда задач временем повторной съёмки определенных участков поверхности Земли. В активных системах, например состоящей из 4 аппаратов *CosmoSkyMed* [4], как правило, предусматриваются одинаковые орбиты для всех спутников. Космические аппараты таких группировок, обычно, равномерно разнесены по орбите, и их положение отличается только временем прохождения восходящих узлов. В ряде случаев целесообразно применение оперативных радиолокационных систем наблюдения многоплоскостной орбитальной структуры, обеспечивающей возможность реализации многопозиционной съёмки объектов с разных ракурсов.

При высокоточных съёмках рельефа парой активных КА методами интерферометрии оптимальной оказалась конфигурация орбит *HELIX* (рис. 1), реализованная в виде связки *TerraSAR-X – TanDEM-X* [5, 6]. Параметры орбит названных спутников (наклонение, эксцентриситет, восходящие узлы) различаются незначительно. Аппараты движутся на небольшом (не превышающем 1 км) расстоянии друг от друга.



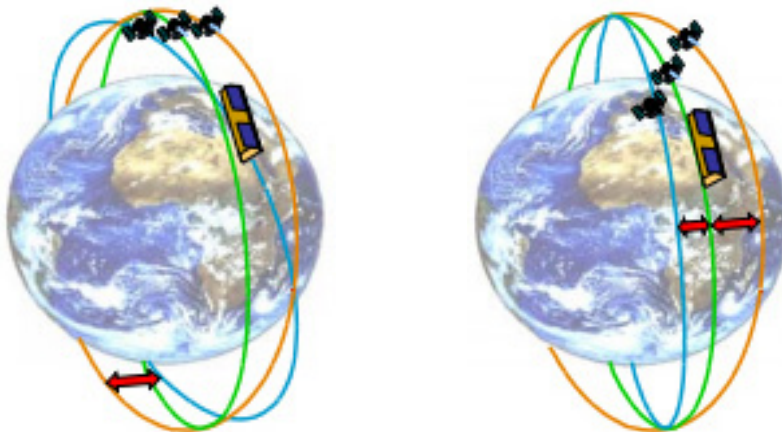
**Рис. 1.** Орбитальный сценарий *HELIX*, реализованный с использованием системы *TerraSAR-X – TanDEM-X*



**Рис. 2.** Орбитальный сценарий «интерферометрическое колесо» с использованием одного активного и трёх пассивных КА

При этом взаимное относительное движение двух аппаратов описывается спиралеобразной траекторией. Наряду со съёмками рельефа указанные КА в связке решают с высоким пространственным разрешением (до 1 м) широкий спектр задач оперативного мониторинга.

Орбитальная структура полуактивных конфигураций в значительной мере определяется требованиями к оптимальным условиям интерферометрических съёмок и позволяет применить различные подходы к организации орбит в зависимости



**Рис. 3.** Варианты орбитального сценария «маятниковая конфигурация» при одном активном и трёх пассивных КА

от целей наблюдений. Полуактивные системы, в которых активный спутник сопровождается тремя малогабаритными пассивными, ещё не реализованы на практике, однако рассматриваются, в частности, в связи с планируемым проектом *TerraSAR-L*.

Применительно к подобным системам активно обсуждаются варианты орбит «интерферометрическое колесо» [6, 7] (рис. 2) и «маятниковая конфигурация» [6] (рис. 3).

Согласно сценарию «интерферометрическое колесо» предусматривается расположение орбит всех трёх пассивных КА в одной плоскости с активным спутником, при этом меняется только их высота за счёт изменения эксцентриситета орбит. При «маятниковой конфигурации» орбиты пассивных аппаратов отличаются углом наклона и временем прохождения восходящих узлов. Таким образом обеспечивается постоянное расстояние между активным и пассивными КА, а также положение интерферометрической базы в горизонтальной плоскости, что имеет принципиальное значение в ряде тематических приложений.

В рамках второго направления развития технологий радиолокационного зондирования активно разрабатываются новые подходы к организации процесса синтеза изображения и построению бортовой аппаратуры, позволяющие решать проблему увеличения пространственного разрешения съёмки без сокращения размеров снимаемой площади. К таким методам относится, прежде всего, **цифровое формирование диаграммы направленности** (ЦФДН) РСА при приёме для управления в режиме реального времени узким лучом в направлении ожидаемого прихода радарного эха. Для улучшения азимутального разрешения принимающая антенна делится на множество субапертур, расположенных вдоль направления движения в непосредственном соседстве друг с другом и подсоединённых к индивидуальным каналам приёма [8]. Когерентная комбинация всех субапертурных сигналов в специализированном многоканальном РСА-процессоре позволяет осуществить однозначное синтезирование изображения с высоким разрешением и широкой полосой, недоступными для классического РСА [9]. Этот метод был успешно реализован в «самолётном» варианте, а затем в ходе космического эксперимента при работе КА *TerraSAR-X* с приёмной антенной, разделённой на две субапертуры.

Идея использования субапертурных антенн обусловила появление новейших методов формирования диаграммы направленности. В рамках одного из них – активного ЦФДН [10, 11] – применяется многомерное волновое кодирование (МВК) при излучении. В развитие ранее предложенных методов в этом случае вся площадь апертуры антенны используется и для излучения, и для приёма сигналов. Следует отметить, что МВК является естественным дополнением к ЦФДН при приёме, а комбинация обоих методов позволит получить новые режимы работы РСА – более гибкие, адаптивные, с улучшенными эксплуатационными качествами.

Другим аппаратно-конструктивным решением в отношении широкозахватного РСА с высоким разрешением является смещение фазовых центров антенны (метод *DPCA: displaced phase center antenna* [11]). Основная его идея состоит в том, что применительно к каждому излучённому импульсу принимаются дополнительно отсчёты эхо-сигнала в разных точках пространства вдоль синтезируемой апертуры. Это может быть достигнуто путём применения многоканального приёма за счёт использования множества апертурных элементов, которые смещены один относительно другого вдоль орбиты. Дальнейшее развитие метод *DPCA* получил в разработках широкополосного РСА высокого разрешения (*HRWS*). Эта система включает в себя отдельную передающую антенну и большой массив приёмных антенн, объединённых в прямоугольную решётку [11]. Малая передающая антенна облучает широкую полосу на Земле, а большая приёмная апертура компенсирует потери усиления при зондировании посредством ЦФДН в реальном времени, называемом «сканированием на приёме».

Улучшенным вариантом известного режима *ScanSAR* для широкополосной съёмки, получившим название *TOPS (Terrain Observation by Progressive Scan)*, является съёмка поверхности Земли методом прогрессивного сканирования [12].

Перечисленные методы цифрового формирования диаграммы направленности [10 – 12] в штатном варианте ещё не использованы ни одним из действующих РСА, однако широко обсуждается возможность их реализации, например в рамках планируемой в 2014 г. экспедиции *Sentinel-1* [13].

Рассмотренные технологии космической радиолокации позволяют существенным образом расширить её возможности и сферу эффективного применения. Многорежимность космических РСА, основанных на новых технологиях, возможность

оперативного и гибкого переключения режимов съёмки с целью адаптации к текущим требованиям наблюдений позволяют рассматривать их как мощный и универсальный инструмент ДЗЗ. Отечественные разработки радиолокационных КА, как показывает анализ, базируются, главным образом, на традиционных принципах построения РСА, в основе которых лежат методы амплитудного анализа отражённого сигнала. При разработке перспективных отечественных систем ДЗЗ представляется принципиально важным учесть новые технологии радиолокационных съёмки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bamler R., Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Inverse Problems* 14 (1998) P.: R1 – R54.
2. Lee J.-S., Pottier E. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC Press, 422 p.
3. Zakharov A. I. On the Construction of the Prospective Polarimetric SAR Systems. Paper to EUSAR-2004 Symposium, Ulm, Germany, 2004.
4. Caltaigione F. et al. Status, Results, Potentiality and Evolution of COSMO-SkyMed, the Italian Earth Observation Constellation for Risk Management and Security. *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2010)*, pp. 4393 – 4396.
5. Krieger G., Moreira A., Fiedler H. et al. TanDEM-X: Mission Concept, Product Definition and Performance Prediction. *Proceedings of EUSAR 2006*, Dresden, Germany, 2006.
6. Zink M., Krieger G., Amiot T. Interferometric Performance of a Cartwheel Constellation for TerraSAR-L. *Proc. of FRINGE-2003 ESA Conference (CD-ROM)*, Frascati, Italy, 2003.
7. Massonnet D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel. – *IEEE TGRS*, 2001, 39, 3, pp. 506 – 520.
8. Currie A., Brown M. A. Wide-Swath SAR. *Proc. Inst. Electr. Eng. F – Radar Signal Process.*, 1992, v. 139, № 2, pp. 122 – 135.
9. Krieger G., Gebert N., Moreira A. Unambiguous SAR Signal Reconstruction from Nonuniform Displaced Phase Center Sampling. – *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2004, v. 1, № 4, pp. 260 – 264.
10. Krieger G., Gebert N., Moreira A. Multidimensional Waveform Encoding: A New Digital Beamforming Technique for Synthetic Aperture Radar Remote Sensing. – *IEEE Trans. GRS*, 2008, v. 46, № 1, pp. 31 – 46.
11. Süss M., Grafmueller B., Zahn R. A Novel High Resolution, Wide-Swath SAR System. *Proc. IGARSS-2011*, Sydney, Australia, 2011, pp. 1013 – 1015.
12. De Zan F., Monti Guarnieri A. TOPS: Terrain Observation by Progressive Scan. – *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, v. 44, № 9, pp. 2352 – 2360.
13. Ludwig M., Torres R., Ostergaard A. et al. The Sentinel-1 SAR Instrument: Current Status and Outlook. *Proc. of 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Seoul, 2011, ISBN: 978-1-4577-1351-4.