

Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли космического базирования

Вадим ШПЕНСТ,
д. т. н., профессор

В статье приводится краткий обзор космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), имеющих на борту радиолокационную станцию бокового обзора (РЛС БО) с синтезированием апертуры антенны. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования являются эффективным средством получения оперативной и долговременной информации о состоянии и динамике объектов и районов земного шара в глобальных и региональных масштабах независимо от метеорологических условий и времени суток.

Все более широкое применение во всех областях человеческой деятельности в настоящее время находит информация, получаемая из космоса с помощью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Использование этой информации тем шире и значимей, чем она более качественна и достоверна. На сегодня среди космических аппаратов радиолокационного дистанционного зондирования наибольшее практическое применение получили радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА). Такие РЛС позволяют получить радиолокационное изображение очень высокого качества, поскольку их разрешающая способность существенно возрастает в сравнении с системами, имеющими реальные размеры апертуры антенны.

Анализ источников в этой предметной области показал, что уже создано немало космических систем с аппаратами дистанционного зондирования, оснащенными РСА, позволяющими получать качественное радиолокационное изображение, сопоставимое со снимками поверхности Земли оптических и оптико-электронных систем. Вместе с тем проблема дальнейшего повышения разрешающей способности радиолокационных систем дистанционного зондирования остается актуальной. С началом освоения человеком космического пространства стало возможным подробное изучение и картографирование практически всей поверхности Земли для решения задач навигации.

Современные радиолокаторы землеобзора с синтезированной апертурой антенны имеют огромные информационные возможности при совершенствовании способов дистанционного зондирования, алгоритмов

и технических средств обработки и интерпретации доставляемой информации, а также совершенствовании элементной базы, использовании нанотехнологий для реализации глобальной аэрокосмической системы для непрерывного отслеживания динамических процессов природного и техногенного характера, контроля состояния экосистем и мониторинга вооруженных конфликтов.

Создана аппаратная база для реализации космических РСА, в основном удовлетворяющих требования гражданских и военных потребителей информации в рамках ограничений регламента радиосвязи по выделенным частотным диапазонам для дистанционного зондирования Земли из космоса. Развиваются методы радиолокационного зондирования: поляриметрия, интерферометрия, стереометрия, комплексная обработка данных оптического, инфракрасного и СВЧ-диапазонов волн.

Непременным фактором извлечения математической информации по результатам радиолокационного зондирования является применение измерительных технологий.

Наряду с использованием амплитудных (или энергетических) изображений, позволяющих измерять эффективную площадь рассеяния (ЭПР) объектов и удельную ЭПР земных покровов при разной поляризации, получает все большее применение интерферометрическая обработка комплексных изображений (построение карт рельефа местности, дифференциальная интерферометрия, измерение скорости компактных и распределенных объектов, поляриметрическая интерферометрия).

Активно применяется зондирование в разных диапазонах волн с помощью РСА, размещаемых на разных космических аппара-

тах. Обеспечивается получение радиолокационных снимков с высоким разрешением (0,5–1,5 м) в 3-см диапазоне волн для решения задач видовой разведки, обнаружения малоразмерных объектов на открытой местности, а также с разрешением от 3 м в диапазонах волн 3 и 5,6 см для мониторинга растительного покрова и других задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В отличие от сантиметровых диапазонов зондирование в дециметровом диапазоне 23 см с разрешением от 3–7 м имеет преимущества: можно обнаружить объекты техники под листовым покровом, значительно увеличивается стабильность фазы сигнала для интерферометрической обработки (построение карт рельефа и обнаружение изменений в оперативной обстановке методом дифференциальной интерферометрии). Возрастает возможность оценки объема биомассы и определения типа и состояния растительного покрова.

Важное направление совершенствования РСА, обусловленное улучшением пространственного и радиометрического разрешения, — это широкое внедрение методов радиовидения и многопозиционного зондирования с получением трехмерных радиолокационных портретов объектов, детально выявляющих их форму, а также применение автоматических методов классификации объектов по их радиолокационным портретам и текстуре изображения.

Многопозиционное зондирование и миниатюризация приемных датчиков на дешевых мини-спутниках и беспилотных летательных аппаратах позволит обеспечить непрерывный контроль локальных районов для сопровождения военных операций и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Разрабатываемые перспективные средства дистанционного зондирования Земли с помощью многорежимных многофункциональных РСА интегрируются в геоинформационную систему (ГИС), что дает возможность вести более точные расчеты формы геоида для составления высокоточных цифровых карт рельефа, климатических исследований, исследований взаимодействия океан — атмосфера.

Кардинальная проблема дистанционного зондирования Земли, в которой намечены только первые шаги, — это решение обратной задачи определения и описания свойств наблюдаемой поверхности, наземных и подземных (подводных) объектов с использованием радиолокационной информации. Решение этой задачи дает простор научной и технической творческой мысли как для радиоинженеров, совершенствующих аппаратуру, так и для радиофизиков, выявляющих связи между параметрами электромагнитного излучения и свойствами объектов. Геоинформационные технологии, основанные на использовании радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны авиационного и космического базирования, находятся в самом расцвете своего развития. За предшествующие годы силами отечественных и зарубежных ученых были проведены фундаментальные исследования процессов взаимодействия электромагнитного излучения с природными средами и искусственными объектами при распространении и отражении зондирующих радиосигналов, разработана теория построения распределенных антенных систем и их воплощения в динамические многопозиционные структуры синтезированных антенн.

Проведенные исследования [1] показали все возрастающую роль использования космического пространства в решении оборонных задач, глобального влияния космонавтики на экономику, социальную сферу как отдельных стран, так и всего мирового сообщества.

Широкие возможности дистанционного изучения Земли появились в конце 1960-х годов с внедрением в практику гражданских исследований радиолокационных и сканерных методов, разработанных для военной разведки, которые позволили проводить съемки в ранее не использовавшихся диапазонах электромагнитных волн и получать качественно иную информацию, в том числе изображения разных по площади участков поверхности Земли. Появились такие методы съемки, как многозональное и инфракрасное (ИК) фотографирование, тепловые и пассивные методы картографирования в СВЧ-диапазоне. Системы, работающие на основе этих методов, позволяют собирать данные о поверхности Земли путем анализа ее СВЧ- и ИК-излучений и отраженных электромагнитных колебаний в видимой и ближней ИК-областях спектра. Все датчики указанных систем, по существу, являются пассивными,

то есть воспринимают только ту энергию, которая излучается поверхностью Земли или переизлучается ею в процессе отражения солнечного излучения.

Принципиально новые возможности дает применение радиолокационных систем, работающих в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения. РЛС БО, установленная на борту КА ДЗЗ, посылает к поверхности Земли сфокусированный антенной узконаправленный высокочастотный электромагнитный импульсный сигнал. Отразившись от сканируемой поверхности, он вновь принимается приемной антенной и регистрируется на борту носителя приемной аппаратурой. Поскольку такие системы используют свою собственную энергию излучения и работают на относительно длинных волнах, такие съемки можно проводить в любое время суток, при любых погодных условиях и облачности, так как поток электромагнитного излучения в определенном диапазоне длин волн, направляемый антенной системы, беспрепятственно проходит сквозь облака, дождь и туман. Кроме того, такие системы предоставляют уникальную возможность непрерывного контроля динамических процессов на поверхности планеты.

В силу изложенных причин радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли находят очень широкое применение. На практике применяются как РЛС БО с реальной апертурой (их называют также некогерентными РЛС БО), так и радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны — так называемые когерентные РЛС БО [2]. Разрешающая способность некогерентных РЛС БО определяется размерами реальной апертуры антенны, и их преимущество заключается в относительной простоте самого радиолокатора и системы обработки информации, а также в более широкой полосе обзора. Недостатком является низкая разрешающая способность. Когерентные РЛС БО дают возможность получать более высокое разрешение, но требуют довольно сложной системы обработки сигналов.

Радиолокационные системы бокового обзора относятся к числу наиболее универсальных и информативных датчиков дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне. Пространственная разрешающая способность радиолокационной аппаратуры ДЗЗ (10–100 м для РСА и 1–2 км для некогерентных РЛС БО) сопоставима с разрешением оптических систем [3].

Наибольшее практическое применение в настоящее время находят РЛС с синтезированной апертурой антенны. Их принцип действия основан на использовании перемещения бортовой антенны РЛС для последовательного формирования антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна при этом имеет небольшие размеры и широкую диаграмму направленности. В каждой точке траектории полета

носителя РСА формирует вполне определенную амплитудную и фазовую информацию о просматриваемых участках местности и объектах на ней, соответствующую мгновенным значениям их текущих координат относительно КА. Выделяется эта информация (радиоголограмма) из совокупности принимаемых импульсных радиосигналов [4].

Несмотря на сложность и высокую стоимость РСА космического базирования (РСА КБ), их разработка и эксплуатация позволяют решать множество важных задач, зачастую доступных только лишь этому способу дистанционного зондирования. Именно такие системы находят свое применение и при решении навигационных задач. Для их успешного решения, с целью как можно более точной привязки получаемого радиолокационного изображения (РЛИ) к объектам на местности, необходимо получение РЛИ с как можно более высоким пространственным разрешением, что может обеспечить лишь только синтезирование апертуры.

В связи с этим из всего множества КА ДЗЗ в этой статье рассматриваются только системы, оснащенные РСА. Кроме орбитальных параметров движения, каждый КА ДЗЗ имеет много различных технических характеристик и параметров функционирования установленного на борту целевого оборудования (излучаемая мощность, частотный диапазон, поляризация сигнала, ширина полосы сканирования и др.). Но одной из важнейших характеристик систем зондирования является разрешающая способность. Она может быть пространственной и радиометрической (яркостной). Радиометрическая разрешающая способность определяется количеством уровней дискретизации яркости и зависит от ширины динамического диапазона.

Пространственная разрешающая способность зависит от длины волны, размера апертуры антенны и высоты орбиты [3]:

$$r \sim (\lambda/D)H,$$

где r — пространственное разрешение; λ — длина волны; D — размер апертуры антенны; H — высота орбиты.

Из приведенного соотношения видно, что для получения высокого пространственного разрешения необходимо стремиться к увеличению размера апертуры антенны и иметь как можно меньшую длину волны. Длина волны определяется рабочим диапазоном частот электромагнитного излучения РЛС и имеет достаточно большую величину в сравнении со световым диапазоном оптических средств. В связи с этим для увеличения пространственной разрешающей способности РЛС БО необходимо увеличивать размеры апертуры антенны. Однако это практически нереализуемо технически, так как для получения требуемого разрешения необходимо иметь очень большие габаритные размеры реальной апертуры антенны в некогерентных РЛС.

На помощь приходит принцип синтезированной апертуры, при котором размер апертуры увеличивается за счет движения относительно небольшой антенны вдоль обследуемой поверхности. В таких (когерентных) РЛС две соседние цели разрешаются благодаря различиям во временных задержках отраженных сигналов и в доплеровских частотах, изменяющихся во времени. Следует заметить, что эти различия не зависят от расстояния до цели, и в связи с этим разрешающая способность РЛС БО с РСА существенно не зависит от высоты орбиты КА ДЗЗ.

На сегодня в космическом пространстве используются различные типы космических систем ДЗЗ с синтезом апертуры: ERS, Radarsat, IGS-3R, Yaogan, COSMO SkyMed, TerraSAR-X, SAR-Lupe, TECSAR, ENVISAT, ALOS, SIR-X SAR и другие (таблица).

Рассмотрим основные технические характеристики некоторых из таких систем [3].

Европейская космическая система дистанционного зондирования земли ERS (European Remote Sensing satellite)

Целевая аппаратура космических аппаратов ERS включает аппаратуру микроволнового зондирования AMI (Active Microwave Instrument), которая устанавливается на обоих космических аппаратах (ERS-1 и -2) и обеспечивает различные режимы работы. Режим построения радиолокационных изображений подстилающей поверхности с использованием синтезированной апертуры антенны (AMI-SAR image mode) имеет такие характеристики:

- излучаемая мощность: 1270 Вт;
- частота излучения: 5,3 ГГц;
- ширина спектра излучаемых сигналов: $15,5 \pm 0,06$ МГц;
- поляризация излучаемых и принимаемых волн: вертикальная линейная;
- длительность импульса: 37,1 мкс;
- пространственное разрешение: 30 м;
- точность определения высоты наземных объектов при интерферометрических измерениях: 10 м;
- радиометрическое разрешение: 2,5 дБ (при пространственном разрешении 30 м) и 1 дБ (при пространственном разрешении 100 м);
- ширина полосы сканирования: 100 км при угле падения излучаемых ЭМВ на поверхность Земли 23° в центре полосы обзора.

Космический аппарат дистанционного зондирования земли ENVISAT-1

Аппаратура дистанционного зондирования ИСЗ ENVISAT-1 имеет в своем составе усовершенствованную радиолокационную систему ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), которая является усовершенствованным вариантом РЛС с синтезированной апертурой, использованной на ИСЗ серии ERS. Система ASAR работает на частотах С-диапазона (3,9–6,2 ГГц или 7,69–4,84 см) и обеспечивает всепогодное наблюдение до семи избираемых

Таблица. Основные орбитальные параметры и технические характеристики различных КА ДЗЗ с РСА

Космический аппарат	Высота орбиты КА, км	Наклонение орбиты КА	Рабочая длина волны, см (частота, ГГц)	Режим функционирования РСА	Пространственное разрешение (азимут – дальность), м	Ширина полосы обзора (размер кадра), км
ERS-1	782×785	98,5°	(5,3)	–	30	100
ERS-2	782×798	98,54°				
ENVISAT-1	820	98,55°	7,69–4,84 (3,9–6,2)	7 избираемых полос	30	100
				Обзорный	100	400
				Глобальный	1000	400
JERS-1	567×569	97,7°	(1,275)	–	18	75
ALOS	700	98,1°	(1,275)	Высокое разрешение	5–10	70
				Низкое разрешение	–	250
Radarsat	743	98,6°	(5,263)	Стандартный	28×25	500
				Широкий обзор	28×35	300
				Высокое разрешение	9×10	200
				Обзорный	30×35	300
				Обзорный	50×50	300
				Обзорный	55×32	500
				Обзорный	100×100	500
				Экспериментальный	28×30	300
				Экспериментальный	28×40	170
				Алмаз-1А	280	72,7°
Алмаз-1Б	400	–	9,6	3,5	5–7	20–35
				Детальный	5–7	30–55
				Промежуточный	15	60–70
				Обзорный	15–40	120–170
COSMO	600–650	98°	(9,65)	–	3	40
				–	6–12	100–120
COSMO-SkyMed 1	614,4×633	97,86°	3,1 (9,6)	В зависимости от требуемого разрешения	Менее 1	(10×10)
					3–15	40
					30	100
					100	200
Lacrosse	676×696	68°	(9,5–10,5)	Детальный	Менее 1	(2–4×2–4)
				Обзорный	2–3	(6–20×6–20)
SIR-C/X-SAR (Space Shuttle)	233×240	57°	(5,298)	–	30×13–26	15–90
			(9,6)			15–40
			–			Телескопический
Osiris	600–800	90°	3	–	3–5	30–50
TerraSAR-X	507,7×512,5	97,45°	(9,65)	Пржекторный	1–2	(5–10×10)
				Маршрутный	3	(30×50)
				Обзорный	16	(100×150)
				Сверхдетальный	0,5–1	–

полос вдоль трассы ИСЗ общей шириной 100 км с разрешением 30 м либо одной полосе шириной 400 км с разрешением 100 м. В режиме глобального наблюдения осуществляется просмотр полосы шириной 400 км с разрешением 1 км. Радиометрическая точность измерений составляет 0,65 дБ, радиометрическое разрешение — 1,5–3,5 дБ.

Японский космический аппарат разведки природных ресурсов JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite, японское название Fuyo-1)

Радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны (реальные размеры антенной решетки — 11,9×2,5 м) предназначена для всепогодной съемки земной поверхности и береговой зоны моря с получением радиолокационных изображений высокого разрешения. Она имеет следующие характеристики:

- рабочая частота: 1275 МГц;
- пространственное разрешение: 18 м;
- ширина полосы обзора: 75 км, край полосы обзора смещен на 326 км вправо от трассы ИСЗ;
- мощность в импульсе: 1,3 кВт;
- длительность импульса: 35 мкс.

Японский ИСЗ разведки природных ресурсов ALOS (Advanced Land Observation Satellite)

ИСЗ имеет на борту радиолокационную систему высокого разрешения VSAR, обладающую следующими техническими характеристиками:

- рабочая частота: 1,275 ГГц;
- ширина спектра излучаемых сигналов: 15 МГц;
- предельное пространственное разрешение: 10 м (по наклонной дальности), 5 м (вдоль трассы ИСЗ);
- точность измерения ЭПР поверхности: ± 1 дБ;
- ширина полосы обзора: 70 км (в режиме высокого разрешения), 250 км (в режиме низкого разрешения).

Канадская система разведки природных ресурсов Земли Radarsat (Radar Satellite)

Размеры антенны РЛС — 15×1,5 м. Многофункциональная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны, устанавливаемая на ИСЗ серии Radarsat, предназначена для всепогодной съемки поверхности планеты, наблюдения за движением судов и перемещением ледового покро-

ва, картографирования земной поверхности и многого другого.

РСА космического аппарата Radarsat имеет следующие основные характеристики:

- рабочая частота: 5,263 ГГц;
- пространственное разрешение: 9–100 м (в зависимости от режима работы);
- поляризация излучаемых и принимаемых сигналов: линейная горизонтальная;
- средняя излучаемая мощность: 300 Вт;
- импульсная излучаемая мощность: 5 кВт;
- ширина полосы пропускания: 11,6, 17,3 и 30 МГц;
- частота дискретизации: 12,9, 18,5 и 32,3 МГц;
- длительность импульса: 42 мкс;
- частота повторения импульсов: 1270–1390 Гц.

РЛС может изменять положение полосы обзора относительно трассы космического аппарата. Ширина полосы обзора варьируется в пределах от 45 до 500 км в соответствии с требуемым сектором углов наблюдения и пространственным разрешением.

Российская программа «Алмаз»

Программа «Алмаз» по изучению ресурсов Земли с использованием космических аппаратов с РСА. Радиолокационная система с синтезированной апертурой космических аппаратов «Алмаз-1А» включала две волноводные антенные решетки размером 1,5×15 м, формирующие два отдельных луча, и имела следующие характеристики:

- рабочая частота: 3 ГГц;
- пространственное разрешение: 15 м;
- поляризация передаваемых и принимаемых сигналов: линейная горизонтальная;
- излучаемая мощность: 190 Вт (импульсная), 80 Вт (средняя);
- длительность зондирующих импульсов: 0,07 и 0,1 мс;
- частота повторения импульсов: 3 кГц;
- ширина луча РСА на местности: 30 км;
- ширина полосы захвата: 350 км;
- протяженность записи радиолокационного изображения вдоль трассы ИСЗ: 20–240 км.

В продолжение программы «Алмаз» создан КА «Алмаз-1Б», бортовой радиолокационный комплекс которого предназначен для всепогодного наблюдения земной поверхности и состоит из трех подсистем, обеспечивающих зондирование на различной частоте и в разных режимах:

- РСА-3: рабочая длина волны 3,5 см, разрешение на местности 5–7 м, ширина полосы обзора 20–35 км;
- РСА-10: рабочая длина волны 9,6 см, разрешение на местности 5–7 м и ширина полосы обзора 30–55 км (детальный режим), разрешение на местности 15 м и ширина полосы обзора 60–70 км (промежуточный режим), разрешение на местности 15–40 м и ширина полосы обзора 120–170 км (обзорный режим);

- РСА-70: рабочая длина волны 70 см, разрешение на местности 20–40 м, ширина полосы обзора 120–170 км.

В российском научно-производственном предприятии «Вега» проектируется многофункциональный радиолокационный комплекс нового поколения «Экор-1В» для КА «Алмаз-1В». Трехчастотный радиолокационный комплекс «Экор-1В» работает в сантиметровом диапазоне: 3,49 см (разрешающая способность 5–7 м при ширине полосы обзора 20–35 км); 9,58 см (разрешающая способность по дальности: 5–7 м и 22 м, по азимуту: 5 м и 15 м при ширине полосы обзора 25–100 км); 69,8 см (разрешающая способность 20–40 м при ширине полосы обзора 100–150 км).

Российский модуль дистанционного зондирования Земли «Природа»

Модуль «Природа» являлся космической платформой, оснащенной разнообразной аппаратурой ДЗЗ и действовавшей в составе орбитальной станции «Мир» с апреля 1996 года. Радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны «Траверс» имела следующие основные характеристики: рабочая длина волны — 9,3 и 23 см; пространственное разрешение — 50–150 м; ширина полосы обзора — 50 км.

Космические аппараты ДЗЗ COSMO (Италия, Испания, Греция)

КА ДЗЗ COSMO оснащаются РСА, функционирующей на рабочей частоте 9,65 ГГц, которая обеспечивает пространственное разрешение 3 м при ширине полосы обзора 40 км и 6–12 м при 100–120 км соответственно [3].

КА ДЗЗ двойного назначения COSMO-SkyMed (Италия)

Разворачиваемая с июня 2007 года орбитальная группировка КА ДЗЗ двойного назначения COSMO-SkyMed имеет в своем составе четыре космических аппарата. На КА COSMO-SkyMed 1 установлен радар SAR-2000 с синтезированием апертуры, имеющий размеры антенны 5,7×1,4 м. Радиолокатор работает в X-диапазоне длин волн (6,2–10,9 ГГц или 4,84–2,75 см) на частоте 9,6 ГГц (длина волны 3,1 см). В различных режимах работы он обеспечивает разрешение на местности менее 1, 3–15, 30 и 100 м при соответствующей ширине полосы обзора 10×10, 40, 100 и 200 км [5].

Система радиолокационной разведки Lacrosse

Характерным примером КА ДЗЗ военного назначения является система Lacrosse, созданная в США компанией Martin Marietta. Ориентировочно начальная стоимость разработки системы составляла около \$3 млрд, один КА стоил \$0,5–1 млрд. Предполагалось, что орбитальная группировка должна будет насчитывать шесть КА. Наиболее вероятно, что рабочий частотный диапазон РЛС КА Lacrosse

находится в пределах полосы 9,5–10,5 ГГц; разрешающая способность радиолокационного снимка на местности в детальном режиме менее 1 м, размер кадра — 2–4 на 2–4 км; в обзорном режиме — разрешение 2–3 м, размер кадра — 6–20 на 6–20 км. Не исключена возможность ведения съемки полосой шириной около 100 км, при этом разрешающая способность составит 10–15 м. Разведка, проводимая КА Lacrosse, является стратегической, и эта КА предназначена для длительного наблюдения с высокой разрешающей способностью небольших участков местности.

Радиолокационный комплекс SIR-C/X-SAR

Комплекс разработан по заказам НАСА (США) и космических управлений Германии и Италии. Разработчики аппаратуры — лаборатория реактивного движения и фирма Ball Communication (США), компании Dornier (Германия) и Selena (Италия). Комплекс состоит из трех РЛС с синтезом апертуры, работающих в диапазонах L (1248 МГц), С (5298 МГц) и X (9600 МГц). Мощность излучения в импульсе составляет 4,3; 2,25 и 3,3 кВт соответственно. Ширина полосы обзора — 15–90 км (SIR-C) и 15–40 км (X-SAR). Разрешающая способность по азимуту составляет 30 м, по дальности 13 или 26 м (два варианта). В телескопическом режиме может быть получено разрешение по дальности 8–10 м [6].

Французский КА ДЗЗ Osiris (возможно, на базе проекта Radar 2000)

Заказчик — министерство обороны Франции, исполнители — фирмы Matra Marconi Space и Alcatel Espace. КА имеет РСА сантиметрового диапазона, которая обеспечивает разрешающую способность 3–5 м при ширине полосы обзора 30–50 км.

Примером современного коммерческого КА ДЗЗ с РСА, способного решать широкий круг задач, в том числе военного назначения, служит выведенный 15 июня 2007 года на солнечно-синхронную орбиту немецкий спутник радиолокационной съемки Земли TerraSAR-X. Космическое агентство Германии DLR взяло на себя основную долю расходов по TerraSAR-X и стало партнером германского отделения Astrium GmbH европейского концерна EADS. В проекте стоимостью 130 млн евро доля DLR составила 102 млн, а EADS — 28 млн евро. Аппаратурой целевого назначения спутника является радар с синтезированной апертурой TSX-SAR — поляриметрический многоканальный комплекс массой 394 кг с активной ФАР X-диапазона (частота 9,65 ГГц) с высоким пространственным и радиометрическим разрешением, сравнимым с разрешением авиационных РСА. Радар создан на базе технологий, приобретенных европейцами в ходе полетов шаттлов с радиолокаторами SIR-C и SRTM в 1994 и 2000 г. Бортовая активная ФАР имеет габаритные размеры 4,8×0,8×0,15 мм и состоит из 384 прямо-передающих модулей.

Радиолокационный комплекс обеспечивает съемку поверхности планеты в трех основных режимах: прожекторном, маршрутном и обзорном ScanSAR. Пространственное разрешение (по азимуту):

- 1–2 м (прожекторный);
- 3 м (маршрутный);
- 16 м (обзорный ScanSAR).

Размер кадра:

- (15–10)×10 км (прожекторный);
- 30×50 км, длина маршрута 1500 км (маршрутный);
- 100×150 км, длина маршрута 1500 км (обзорный ScanSAR).

Ширина полосы обзора: 463 (до 622) км (прожекторный); 287 (до 622) км (маршрутный); 287 (до 577) км (обзорный ScanSAR).

РЛС TSX-SAR имеет дополнительные несколько экспериментальных режимов:

- 1) Сверхдетальный режим с разрешением по дальности менее 1 м (до 0,5 м) с использованием радиосигналов с шириной спектра 300 МГц.
- 2) Режим маршрутной интерферометрии АТІ (Along Track Interferometry), при котором благодаря дублированию электронных модулей ФАР радар может принимать радиосигналы по отдельным каналам от двух подрешеток ФАР (Dual Receive Antenna, DRA) длиной по 2,4 м, и после сравнения сигналов от двух подрешеток можно выделять движущиеся объекты. Космическое агентство Германии DLR приступило к разработке двух дополнительных проектов — TanDEM-X и TerraSAR-X2. Проект TanDEM-X стоимостью 85 млн евро также финансируется по схеме партнерства: 56 млн евро выделяет агентство DLR, 26 млн евро — Astrium EADS, 3 млн евро — другие инвесторы [7].

Учитывая высокую стоимость КА ДЗЗ с РСА, перспективным направлением является создание легких РСА КБ высокого разрешения для малых КА. В российском научно-производственном предприятии «Вега» проектируются легкие РСА КБ, которые будут выводиться на орбиту баллистическими ракетами, снятыми с боевого дежурства. Такие РСА сверхвысокого разрешения для малых

КА будут работать на длине волны 9,6 см, охватывать полосу перенацеливания 500 км и обеспечивать разрешающую способность:

- 2 м при детальном наблюдении и ширине полосы обзора 10–20 км;
- 5–7 м при наблюдении со сниженным разрешением и ширине полосы обзора 50–100 км;
- 15 м при наблюдении с низким разрешением и ширине полосы обзора 150–200 км.

При этом масса всей радиолокационной аппаратуры не будет превышать 250 кг, и энергопотребление ограничится на уровне 1300 Вт.

Заключение

Требования к построению РСА очень специфичны и зачастую противоречивы, так как зависят от многих факторов. Для использования радиолокационной информации ДЗЗ при решении навигационных задач необходимо охват больших по площади участков планеты, при этом нужно получить как можно лучшее разрешение. Однако обеспечить высокую разрешающую способность, как правило, можно лишь при небольшой ширине полосы обзора или малых размерах кадра. Для подавляющего большинства РСА КБ отношение ширины полосы обзора к разрешающей способности в азимутальном направлении меньше 10000, то есть при разрешении 5 м не приходится рассчитывать на получение полосы обзора больше 50 км [4].

Представленный обзор КА ДЗЗ с РСА показывает большой интерес космических держав, да и множества других стран, к таким системам, получившим бурное развитие в последнее время, несмотря на их чрезвычайно высокую стоимость. Направления дальнейшего развития КА ДЗЗ с РСА во многом определяются требованиями потребителей информации, но имеют теоретические и технические ограничения, обусловленные, например, дифракционной границей получения высокого разрешения, энергетическим ресурсом РЛС, сложностью алгоритмов обработки информации и быстродействием вычислительных машин, пропускной способностью линии передачи данных и т. д.

Принимая во внимание противоречие между получением высокой разрешающей способности и желанием иметь широкую полосу обзора, все же можно оправдать стремление к развитию РСА по пути улучшения их разрешения. Это существенно расширяет возможности таких систем, и, кроме того, в какой-то мере разрешить это противоречие можно при переходе от узкополосных сигналов к широкополосным с одновременным использованием широкоугольных апертур. По всей видимости, теоретический предел разрешения еще не достигнут, и поэтому необходимо продолжать научные исследования и поиски новых методов и способов повышения разрешающей способности. Достижение высокого разрешения РСА особенно актуально для использования радиолокационной информации дистанционного зондирования при решении задач навигации и управления движением. ■

Литература

1. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003.
2. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учебное пособие. М.: Логос, 2001.
3. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и Б, 1997.
4. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988.
5. Копик А. В космосе — итальянский радиолокационный разведчик // Новости космонавтики. 2007. № 8 (295).
6. Cantafio L. J. Space-based Radar Hand Book. 1989.
7. Кучейко А. Германия штурмует рынок геоинформатики // Новости космонавтики. 2007. № 8 (295).
8. Верба В. С. и др. Радиолокационные станции землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010.