

Формальное обоснование требований к облику космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны

The formal basis of requirements on outlook of a spaceborne synthetic aperture radar

Полетаев / Poletaev A.

Александр Михайлович
(poletam@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А. Ф. Можайского), профессор кафедры.
г. Санкт-Петербург

Агарков / Agarkov V.

Виталий Витальевич
(vitaliy.agarkov@gmail.com)
ВКА им. А. Ф. Можайского, научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Лазутин / Lazutin R.

Роман Юрьевич
(roma.lazutin.90@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского, адъюнкт.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли – remote sensing of Earth; космический радиолокатор с синтезированной апертурой антенной – spaceborne synthetic aperture radar; активная фазированная антенная решетка – active phased array antenna.

Рассмотрены применения оптико-электронных и радиолокационных данных дистанционного зондирования для решения ряда тематических задач, в частности, картографирования земных покровов. Представлены тенденции в разработке космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны.

Applications are considered of optical-electronic and radar remote sensing data to solve certain thematic tasks, mapping of land covers in particular. Trends are presented in designing of spaceborne synthetic aperture radar.

Мировой рынок услуг в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) составляет 10–15% от результатов космической деятельности, остальной объем приходится на связь и навигацию. В соответствии с рядом нормативных документов РФ [3–5] приборами ДЗЗ (ПДЗЗ) много- и гиперспектральной съемки предусматривается решение до 50% тематических задач, а космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (КРСА) – до 15%. Подобное распределение задач в существующей экономической ситуации вызвано высокой стоимостью разработки радио-

локационных (РЛ) ПДЗЗ и специального программного обеспечения для синтеза и обработки РЛ изображений (РЛИ), а также отсутствием широкой системы подготовки специалистов по их дешифрированию. Уже общепризнано, что РЛ ПДЗЗ являются оперативными средствами наблюдения поверхности Земли (ПЗ), применение которых возможно в любое время суток и при наличии облачного покрова, однако потенциальные информационные возможности когерентного РЛ наблюдения (РЛН) остаются до сих пор проблематикой специалистов, а не широкого круга потребителей данных ДЗЗ (ДДЗЗ) в РФ.

По состоянию на 01.09.2015 из 46 космических аппаратов (КА) с РЛ ПДЗЗ на 38 КА 12 государств установлены КРСА, что составляет ~20% от совокупной орбитальной группировки (ОГ) КА ДЗЗ (данные сайта www.ucsusa.org). В 2016–2017 гг. планируется существенное пополнение ОГ зарубежных космических РЛ систем (КРЛС) на 17 КРСА 10 стран (по открытым данным сайтов www.eoportal.org, www.esa.org, www.jaxa.org, www.nasa.org). Эта тенденция будет преобладать как в текущем, так и в следующем десятилетии: будет развернута КРЛС США «Space Radar» из 12–24 КРСА; создадут собственные КРЛС Аргентина, Бразилия, Великобритания, Турция и Франция. Подобная динамика роста ОГ зарубежных КРСА существенно выше, чем для оптико-электронных (ОЭ) КА ДЗЗ, и обусловлена рядом обстоятельств: практическим освоением технологий многопозиционного РЛН для повышения разрешения РЛИ и определения скорости объектов ПЗ (ОПЗ); форми-

рованием орбитального и наземного сегментов высокоскоростных систем передачи и приема ДДЗЗ (включая оптические каналы); разработкой бортовых антенных систем нового поколения с расширением числа используемых частотных диапазонов (в том числе на одном КРСА) и видов поляризации; соответствующим расширением круга эффективно решаемых тематических задач ДЗЗ, включая комплексирование РЛ ДДЗЗ с системой автоматической идентификации судов AIS.

Учитывая особенности территории РФ (обширность суши и протяженность морских границ, неблагоприятные условия наблюдения для ОЭ КА ДЗЗ, разнообразие земных покровов) целесообразно рассмотреть уникальные преимущества КРСА перед ОЭ ПДЗЗ и сформулировать варианты коррекции РЛ проектов РФ.

Сравнительный анализ потенциальных возможностей оптического и радиодиапазона по ДЗЗ ПЗ

Дешифрирование ОПЗ по ДДЗЗ относится к некорректным обратным задачам. Неединственность и неустойчивость их решения вызывается нестационарностью и неоднородностью среды распространения ЭМП по пространству и по времени, нелинейной зависимостью измеряемых параметров ЭМП (ПЭМП) от параметров ОПЗ, дискретностью формируемых ДДЗЗ и пространственной нелокализovanностью (без четких границ) и многослойностью природных ОПЗ (как правило, наблюдаемый ОПЗ находится на фоне как других поверхностных, так и подповерхностных объектов). Сведение к единственному решению или, по крайней мере, к компактному множеству возможных решений на основе сходящихся регуляризирующих алгоритмов требует многомерности исходных ДДЗЗ. Повышение устойчивости решения и скорости сходимости численных методов регуляризации определяется свойствами измерительной шкалы ДДЗЗ (диапазоном, чувствительностью, разрешающей способностью по координатам и времени). Поэтому процесс распознавания ОПЗ по ДДЗЗ должен реализовываться по иерархичному принципу с формированием многомерного векторного признакового пространства и последовательным сужением множества решений (факторизацией спектральных, пространственных и топологических атрибутов ОПЗ), что, в свою очередь, предъявляет требования к ПДЗЗ – количеству и точности измеряемых ПЭМП.

В ОЭ ПДЗЗ регистрируется амплитуда (коэффициент спектральной яркости (КСЯ)) и частота (ширина спектрального канала) при известном диапазоне углов падения ($\sim 0 \div 15^\circ$ при съемке в надире). Прогресс микроэлектроники позволил создать высокочувствительные приборы с зарядовой связью (ПЗС-структуры) с шириной диапазона $5 \div 20$ нм и реализовать много- и гиперспектральную съемку в десятках-сотнях каналах. В РЛ ПДЗЗ набор измеряемых ПЭМП и, следовательно, размерность признакового пространства значительно

выше: амплитуда (удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР)), частота, фаза и поляризационные компоненты. Кроме того, оптический диапазон более чувствителен к химическим и тепловым свойствам поверхности ОПЗ, а радиодиапазон – к физическим и электромагнитным (шероховатости, структуре и комплексной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя ОПЗ; форме, размеру и ориентации относительно локального угла падения ЭМП), что создает возможность получения набора некоррелированных ДДЗЗ (табл.1). Более простая, с технической точки зрения, регистрация эффекта Доплера в радиодиапазоне определяет возможность измерения параметров движения естественных (морские течения) и искусственных ПЗ за период однократного РЛН.

Закон М. Планка и его асимптотика в длинноволновой части диапазона электромагнитного поля (ЭМП) – зависимость Релея – Д. Джинса – определяет спектральную плотность энергии излучения и в сочетании со способом обзора ПЗ при движении КА и радиометрической чувствительностью ограничивает пространственную разрешающую способность пассивных ПДЗЗ. Как следствие, СВЧ-радиометры имеют самое грубое разрешение – единицы-десятки километров, а ПДЗЗ инфракрасного (ИК) диапазона – десятки-сотни метров. ОЭ ПДЗЗ регистрируют, как правило, отраженное и рассеянное атмосферой излучение Солнца и реализуют разрешение до долей метра. В РЛ ПДЗЗ имеется возможность ситуационно (применительно к конкретным ОПЗ и условиям обзора) увеличивать отношение сигнал/шум и расширять состав обрабатываемых временных и пространственных ПЭМП, что приводит к потенциальной возможности увеличения пространственной разрешающей способности до дифракционного предела. Пространственное разрешение ДДЗЗ реализуется в ОЭ и РЛ ПДЗЗ по-разному: в КРСА это происходит за счет смены режима РЛН, т.е. алгоритмически при той же антенне, в ОЭ КА ДЗЗ – за счет разных оптических камер и ПЗС-структур. Кроме того, противоречие между шириной полосы обзора и достигаемым разрешением в КРСА возможно разрешить за счет электронного сканирования ДНА, что недоступно в ОЭ ПДЗЗ.

При дешифрировании площадных ОПЗ (в частности, растительности) по многоспектральным ОЭИ получили широкое распространение так называемые вегетационные индексы (ВИ, англ. VI) – линейные и нелинейные весовые комбинации значений КСЯ каналов, позволяющих дополнительно проводить сравнительный анализ относительных разностей КСЯ и частично устранять эффекты затухания ЭМП в атмосфере [9, 10]. Обычно применяют три группы ВИ, использующих различные комбинации «красного» и ближнего ИК каналов – стандартные (NDVI, WdVI, ENDVI, IPVI, RVI, TVI), минимизирующие влияние почвы (SAVI, TSAVI, MSAVI1, MSAVI2) и атмосферы (GEMI, ARVI, SARVI, GVI). Например, при обработке ДДЗЗ ОЭ КА «Landsat-7» с 7

спектральными каналами формировалось до 35 комбинаций. При повышении числа каналов в гиперспектральных ПДЗЗ темп поступления ДДЗЗ становится соизмеримым с КРСА (мгновенная скорость до 1–2 Гбит/с, средняя – до 600–800 Мбит/с), что приводит к необходимости наличия бортового запоминающего устройства (БЗУ) и высокоскоростных радиоканалов для их передачи потребителям.

В отличие от оптического диапазона в радиодиапазоне применяется нормативное регулирование частотного ресурса комиссией по радиосвязи Международного телекоммуникационного союза ИТУ-R (данные сайта www.itu-r.int): пассивные СВЧ-средства работают на частотах, выделенных для службы радиоастрономии, а активные радиолокаторы – в 11 диапазонах, выделенных для спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ) и службы космических исследований (6 из которых используются для наблюдения ПЗ, а остальные – для

наблюдения процессов в тропосфере). Низкочастотные диапазоны для ДЗЗ из космоса не используются из-за возрастающих эффектов Фарадея (поворота плоскости поляризации) и нарастающей фазовой и поляризационной дисперсии. Преимущественное использование выделенных диапазонов определяется проникающей способностью радиоволн: дециметровые Р- и L-диапазоны используются для решения природно-ресурсных задач (оценка лесных ресурсов, поиск полезных ископаемых и заглубленных объектов); сантиметровые S-, C-, X- и Ku-диапазоны – для РЛН объектов на ПЗ. Подавляющее число КРСА (до 35–40% совокупной ОГ) функционируют в X-диапазоне с наиболее широкой полосой частот до 600 МГц, позволяющей реализовать высокую детальность РЛИ с возможностью реализовать достаточно малогабаритные антенны (рис. 1). Рядом государств на заседаниях всемирной конференции по радиосвязи WRC-2007 и WRC-2012 стави-

Таблица 1

Типовые характеристики РЛ и ОЭ ПДЗЗ для наблюдения ПЗ

Диапазоны ЭМП и вид съемки (режим наблюдения)	Относительная ширина спектра	Разрешение	Поляризация	Способ обзора (время накопления)
1. Оптический (полуактивный метод – по отраженному солнечному излучению)				
<i>Видимый</i> (0.5÷0.9 мкм) – панхроматический	0.3÷1	0.4÷1 м	–	Кадровая съемка в надир, сканирование поперек трассы (линейная и/или коническая развертка) (0.1÷15 мс)
– многоспектральный	0.1÷0.2	2÷4 м	–	
– гиперспектральный	0.01÷0.02	~30 м	–	
<i>Инфракрасный</i> (пассивный) – <i>ближний</i> (1÷2 мкм)	0.02÷0.08	4÷30 м	–	Сканирование поперек трассы (линейная и/или коническая развертка) (0.01÷0.1 с)
– <i>тепловой</i> (8÷12 мкм)	0.04÷0.08	90÷100 м	–	
2. Радиодиапазон				
– пассивный СВЧ (0.4-30 см)	~0.1	15÷100 км	2 линейных (В, Г)	Круговое сканирование (коническая развертка), панорамная съемка в надир (0.25÷1.8 с)
– активный некогерентный (1.5-65 см)	~0.01	0.4÷1.5 км	2 линейных, круговая	Боковой обзор (0.01÷0.1 с)
– активный когерентный (1.5-65 см)	0.01÷0.07	0.25÷150 м	4 линейных, круговые и гибридные	Боковой обзор (0.1÷10 с)

лись вопросы о необходимости увеличении ресурса в X-диапазоне для активного РЛ ДЗЗ. По всей видимости, на очередной WRC-2015 для ССИЗ будут определены дополнительные частотные диапазоны на первичной основе, т.е. с расширением X-диапазона для РЛ ДЗЗ до ~1.2 ГГц.

В настоящее время пять государств и сообществ имеют КРСА (на различных КА), функционирующие в двух и более частотных диапазонах (Европейское космическое агентство, Индия, Китай, США и Япония). Несмотря на то что двухчастотное РЛ ДЗЗ традиционно используется в РЛ высотомерах (РЛВ) для коррекции измерений (преодоления эффектов рефракции и фазовой дисперсии ионосферы (Ku-, C-/S-)) и в РЛ профиломерах (РЛП) для выявления различий уровня резонансного рассеяния на гидрометеорах атмосферы (Ka-, Ku-), широкому применению в КРСА этому препятствуют энергетические и массово-габаритные ограничения (табл. 2). Длительность РЛН на витке в современных КРСА с системой энергоснабжения (СЭС) на основе солнечных батарей (СБ) составляет всего 5–25% от периода орбиты (длительность РЛН на затененной части витка определяется емкостью аккумуляторной батареи (АКБ)), при этом габариты КА существенно увеличиваются из-за СБ большой площади. До 60% КРСА размещаются на околополярных (солнечно-синхронных) орбитах (ССО) на высотах 500–800 км, которые позволяют обеспечить практически непрерывное освещение СБ КА выбором соответствующей долготы восходящего узла орбиты (совмещением трассы с терминатором) и выгодный энергетический режим. В конструкциях КРСА «TerraSAR-X/TanDEM-X» и «SAR-Lupe» антенны располагаются на левой стороне корпуса КА, а СБ – на правой, постоянно ориентированной на Солнце под требуемым углом. Это позволяет избежать упругих колебаний конструкции КА при механической переориентации ДНА (поворотом корпуса КА) и переориентации СБ на Солнце.

Вес антенной системы КРСА составляет до 10–40% массы КА, и поэтому они, как правило, оборудуются одной крупногабаритной антенной – активной фазированной антенной решеткой (АФАР) (с размером 1x5–3x22 м в зависимости от частотного диапазона) или зеркальной параболической антенной (ЗПА). ЗПА с диаметром до 3–5 м выполняются со сплошным раскрывом, а с большим – с сеточным. В связи с ограничениями на габаритные размеры головных обтекателей ракетносителей АФАР и ЗПА, как правило, выполняются с многократным развертыванием. В ряде КРСА длинноволнового диапазона и без реализации прожекторного режима получают распространение раскрываемые ЗПА диаметром до 12–16 м («TanDEM-L», «BIOMASS», «NISAR») на основе успешно применяемой конструкции антенн телекоммуникационных КА «Alphasat/Inmarsat-4A F4», «Thuraya-2/-3» и «MBSat-1/-2/-3» (с усиленной жесткостью и точностью образования отражающей

поверхности до долей мм, Ø12 м, вес 60 кг). В некоторых КРСА АФАР («AstroSAR», «ALOS-2») и ЗПА («HJ-1C», «SAR-Lupe», «MapSAR») в целях облегчения веса антенны выполняются в эллиптической форме. Для снижения удельного веса АФАР с 10–20 кг/м² до 1–3 кг/м² в ряде зарубежных перспективных проектов рассматриваются гибкие (мембранные) многослойные структуры, совмещающие излучающую поверхность с приемопередающими модулями печатного монтажа, при этом дополнительное снижение веса достигается использованием в качестве несущей рамы АФАР трубчатых конструкций, образуемых при развертывании металлизированных лент. Использование низкочастотного диапазона в межпланетных КА обусловлено совмещением в одном радиолокаторе функций РЛВ, РЛП и КРСА.

Преодоление массово-габаритных и энергетических ограничений и разработка двухчастотных КРСА ведется по нескольким направлениям:

- минимизация количества ПДЗЗ на одном борту (отказ от тяжелых многофункциональных КА ДЗЗ с комплексированием ОЭ и РЛ ПДЗЗ, например, в ESA вместо КА «ERS-1/-2» и «Envisat» реализуется серия КА «Sentinel», в JAXA вместо «JERS-1» и «ALOS-1» – «ALOS-2» и «ALOS-3»), что позволяет устранить сложности совместного применения ПДЗЗ с различной ориентацией поля зрения, уровнем энергопотребления и разноскоростных потоков ДДЗЗ;

- использование бортовых ядерных энергетических установок (при мощностях СЭС до 25 кВт массово-габаритные характеристики КА с ЯЭУ и с обычной СЭС на основе СБ соизмеримы) [13, 14];

- разработка микрополосковых АФАР с размещением на одном раскрыве методом печатного монтажа излучателей двух-трех диапазонов, а также с размещением излучателей в многослойном исполнении [15, 20];

- перевод элементной базы передатчика КРСА на GaN-технологии (на основе нитрида галлия) с повышенным КПД и радиационной стойкостью [12];

- использование СЭС с повышенной эффективностью на основе многослойных СБ (на основе арсенида галлия TJ-GaAs, 4J-GaAs и 5J-GaAs с КПД 24–30% и на основе фосфида галлия и индия с КПД до 24–35%) и АКБ с на основе лития (ионные Li-ion и полимерные Li-poly) [17];

- разработка оптимальных КРСА, т.е. с достижением не максимально возможных показателей РЛ ДДЗЗ и реализуемых режимов РЛН, а ориентированных на требования целевых групп потребителей, в том числе по длительности работы на витке, своевременного сброса данных в пункты обработки и т.п. Наиболее востребованными оказываются следующие конфигурации режимов РЛН: полосовой и широкополосный с многополяризационным режимом; полосовой и СДЦ с одной–двумя поляризациями; полосовой и прожекторный (самый энергозатратный режим) с одной поляризацией [18, 19].

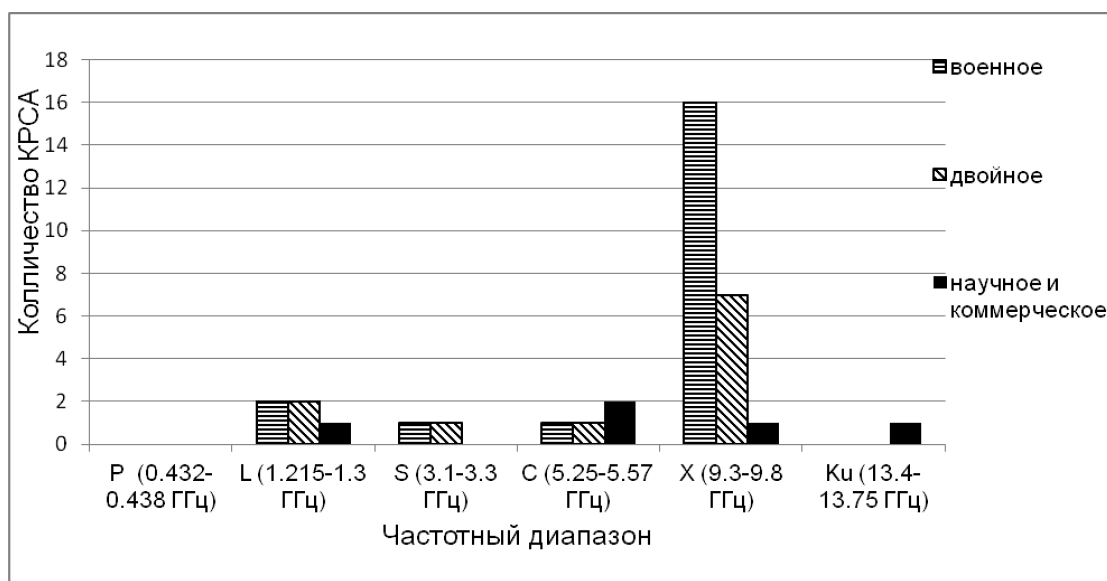


Рис. 1. Распределение КРСА различного назначения по частотным диапазонам

Большинство КРСА реализуют три режима РЛН (широкополосный, полосовой, прожекторный), осуществляемых при боковом обзоре, т.е. реализуемых при направлении ДНА в направлении, близком к перпендикулярному к трассе КА. Режимы РЛН определяются сочетанием ориентации и формы ДНА, параметров излучаемых импульсов (ширины спектра, поляризации, частоты повторения импульсов (ЧПИ), мощности) и параметров приема отраженных сигналов (поляризации, величины задержки и длительности строки, числа парциальных ДНА). Требуемая форма ДНА в АФАР достигается соответствующим амплитудно-фазовым распределением на раскрыве, реализуемым совокупностью приемо-передающих модулей с независимым управлением коэффициента усиления, фазы и поляризации, поэтому до 60% КРСА оборудуются АФАР для реализации более широкого набора режимов РЛН. В ЗПА аналогичные функции выполняют решетки рупоров с ограничением числа режимов (в табл. 3 они выделены заливкой).

Режим TOPS/TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), впервые апробированный на КРСА «TerraSAR-X» и затем реализованный в КРСА «Sentinel-1», является усовершенствованием широкополосного режима ScanSAR, при котором ДНА периодически переключается по углу крена для облучения участков полос наблюдения в пределах полосы обзора и в каждом положении производится сканирование ДНА по азимуту в угловых секторах и со скоростью, определяемых величиной наклонной дальности. В отличие от прожекторного режима направление сканирования ДНА – обратное (с задне- на переднебоковое направление без удержания ДНА в направлении на наблюдаемый УПЗ по мере пролета КРСА), при котором происходит сокращение времени облучения, но расши-

ряется доплеровский спектр отраженного сигнала и соответственно улучшается азимутальное разрешение до 25–40 м при сохранении постоянного значения отношения сигнал/шум и уровня неоднозначности по азимуту по всей ширине полосы обзора. К разновидностям режима TOPS относится расширенный ETOPS (со смещением вперед или назад центрального угла углового сектора сканирования) и инверсный ITOPS (направления сканирования как и у прожекторного, но с более высокой угловой скоростью, чем требуется для сохранения направления на облучаемый УПЗ).

Интерферометрические режимы РЛН реализуются в бистатической конфигурации КРСА, т.е. при наличии пространственно разнесенных антенн: поперечный режим ориентирован на получение информации о высотах УПЗ (формирования ЦМР), продольный режим – на получение информации о скоростях объектов (СДЦ). Малые интерферометрические базы (1.5÷60 м) реализуются разделением АФАР на подрешетки («TerraSAR-X», «TanDEM-X», «Radarsat-2») или выносом антенн на штанге («SIR», «Cryosat-2», в перспективе «Ka-Band SAR Interferometer»), а большие (0.1÷1 км) – при двухпроходной съемке или при кластерном полете активных и пассивных КРСА («TerraSAR-X/TanDEM-X», «CosmoSkyMed», в перспективе «Radarsat Constellation»). Для продольной интерферометрии в тандемном полете КРСА различаются по углу аномалии ϑ , а для совместной реализации продольной и поперечной интерферометрии (с вариациями длины базы и ее ориентации относительно направления РЛН с адаптацией к широтному поясу ПЗ) – изменением в небольших пределах номинальных значений долготы восходящего узла Ω и ϑ (конфигурация двойного маятника «Binodal pendulum»), Ω , ϑ , наклона i и эксцентриситета e (конфигурация

Отечественные и зарубежные многочастотные КРСА

КРСА/название КА	Период эксплуатации	Конструкция антенны
<i>КА ДЗЗ</i>		
Граверс/станция «Мир» (S, X)	1996–2001 (РФ)	1 ЗПА с совмещенным ПРД
SIR/Space Shuttle (L, C, X)	1983–2000 (США)	3 ФАР
Спинар-1ДМ/Аркон-2 (X, L, P)	Не реализован (РФ)	3 АФАР
ЭКОР-1В/Алмаз-1В (X, S, P)	Не реализован (РФ)	X, S – 2 ФАР (по левому борту КА); S, P – 3 ЗПА (по правому)
Dual-frequency Precipitation Radar/GPM (Ku, Ka)	с 2014 (США, Япония)	1 совмещенная АФАР
SAR-radiometer/SMAP (L – 1.2÷1.3 (SAR) и 1.4 ГГц (СВЧ))	с 2015 г. (США)	1 вращающаяся ЗПА
SAR/NiSAR (L, S)	в перспективе (США, Индия)	1 ЗПА с совмещенным ПРД
SAR/CoReH2O/ (Ku, X)	в перспективе (Европа)	1 ЗПА с совмещенным ПРД
SAR/SCLP (Ku, X)	в перспективе (США)	1 ЗПА с совмещенным ПРД
<i>Межпланетные КА</i>		
MARSIS/Mars Express Orbiter (1.8÷5 МГц)	с 2005 г. (Европа)	2 дипольные антенны
SHARAD/ Mars Reconnaissance Orbiter (15÷25 МГц)	с 2006 г. (США, Италия)	1 дипольная антенна
Lunar Radar Sounder/Kaguya-Selene (10÷30 МГц)	2007–2009 гг. (Япония)	4 дипольные антенны
ДПР/Фобос-Грунт (125÷175 МГц)	Аварийный запуск в 2012 г. (РФ)	1 биконический плоский вибратор
РЛК-Л/Луна-Глоб (20÷50 МГц)	в перспективе (РФ)	2 дипольные антенны

поперечного маятника «Cross track pendulum»), *e* и *i* (конфигурация спирали «Helix»)[10]. Вследствие деградации и/или резонансного изменения номинальных параметров орбиты, реализация тандемного полета КРСА требует периодических маневров и специфичного баллистико-навигационного обеспечения с высокоточными межспутниковыми измерениями дальности и скорости. Кластерный полет КРСА с АФАР или разностной передающей (как правило, малогабаритной с широкой ДНА) и приемной (крупногабаритной с возможностью сканирования ДНА) АФАР на одном КРСА позволяют реализовать МИМО-технологии (multiple-input multiple-output) РЛН с цифровым диаграммообразованием; в частности, режимы HRWS (High Resolution Wide Swath) и HROM (High Resolution Overview Mode), одновременно сочетающие возможности широкополосного, полосового и прожекторного режимов [21]. Следует отметить, что реализация потенциальных характеристик режимов РЛН чувствительна к географической широте расположения УПЗ и типу орбиты КРСА, а именно к высоте (дальности РЛН и соответственно уровню сигнал/шум) и наклонению орбиты, определяющему величину относительной скорости перемещения КРСА и УПЗ. Несмотря на глобальность РЛН ПЗ, обеспечиваемой ССО, до 25% ОГ КРСА располагаются на наклонных орбитах, которые позволяют

реализовать многоракурсный обзор (до 3–4 азимутальных секторов в зависимости от соотношения наклона орбиты и географической широты района РЛН), в отличие от полярных, обеспечивающих 2 сектора. Кроме того, обратные наклонные орбиты (например, «FIA Radar») позволяют обеспечить более высокую относительную скорость перемещения КРСА и УПЗ (движение навстречу вращающейся ПЗ) и, следовательно, снизить требования по энергетике за счет повышения КНД (сужения ДНА).

В ряде зарубежных РЛВ и РЛП, проводящих съемку в районе надир (углы места ~90÷85° и ~90÷70° соответственно), реализован интерферометрический режим SARIn, позволяющий существенно повысить разрешающую способность (с размера пятна ДНА на ПЗ 8–15 км до 200–250 м вдоль трассы). Это достигается при использовании одной (КА «Sentinel-3» с РЛВ «SAR Radar Altimeter») или двух ЗПА (КА «CryoSat-2» с РЛВ «SAR Interferometer Radar Altimeter»), а также АФАР (КА NASA/JAXA «TRMM» и «DPR» с РЛП) с формированием многолучевой ДНА и реализацией когерентной обработки сигнала. Реализация подобного голографического режима РЛН в районе надир на базе двух АФАР или ЗПА позволит получить разрешающую способность РЛН, аналогичную широкополосному режиму, т.е. при оборудовании КРСА антен-

Режимы РЛН КРСА

Количество формируемых ДНА	Количество антенн (точек излучения и приема) и характеристики режимов РЛН					
	Одна			Две и более		
	Режимы/число угловых положений ДНА	Ширина полосы, км	Разрешение по координатам, м/по скорости, м/с	Режимы/ количество угловых положений ДНА	Ширина полосы, км	Разрешение по координатам, м/по скорости, м/с
Одна	Полосовой (маршрутный)/ 5÷7 (по углу крена)	20÷160	2÷15/-	Двухпроходная поперечная интерферометрия/ 1	20÷160	2÷15/-
	Некогерентный (глобальный)/1	500÷900	800÷1000/-			
	Прожекторный/ 50÷350 (по углу курса)	5×5÷10×10	0.25÷1/-			
Две и более	Широкополосный/ 5÷7 (по углу крена)	300÷500	50÷150/ -	Продольная интерферометрия /2÷4	20÷100	3÷10/1÷20
	Широкополосный TOPS/ 5÷7 (по углу крена), 50÷100 (по азимуту)	300÷500	25÷40/-	Широкополосный HRWS-HROM/ >100	100÷200	1÷4/1÷20
	Прожекторный/ 50÷350 (по углу курса и азимута)	5×5÷10×10	0.25÷1/-	Однопроходная поперечная интерферометрия/2	40÷200	1÷4/ -
	Скаттерометрический/ >3 (по углам крена и курса)	300÷500	-/3÷30	Продольная и поперечная интерферометрия/2÷4	40÷200	1÷4/1÷20
	Волновой/ 2 (по углу крена)	5×5÷20×20	5×5÷30×30/-			

нами, ориентированными в надир, возможно реализовать возможность РЛН в широкой полосе без разрыва в районе трассы.

Повышение числа реализуемых поляризационных каналов КРСА в условиях ограничения ЧПИ (для устранения неоднозначности по дальности и по азимуту при импульсном излучении) приводит к пропорциональному уменьшению ширины полосы РЛН. Разрешением этого противоречия является изменение поляризационного базиса сигналов при излучении и приеме: выполнение приема линейных поляризаций (вертикальной (В, англ. V) и горизонтальной (Г, англ. H), т.е. ортогональных 90° и 0°) при излучении «компактной» поляризации (иначе гибридной, англ. CP) – круговой (с правым или левым вращением) или линейной с наклоном 45°. Реализация круговой поляризации позволяет дополнительно уменьшать эффект Фарадея (частично компенсировать поворот плоскости поляризации) в P- и L-диапазонах, а при РЛН морских районов – повышать эффективность идентификации надводных кораблей благодаря

достигаемому максимальному РЛ контрасту (КРСА «Radarsat-2», «ALOS-2», «NovaSAR»).

Механизм рассеяния зависит от соотношения параметров РЛ сигнала (длины волны, поляризации, угла падения и реализуемого разрешения) и параметров поверхности ОПЗ (структуры (размера, формы, ориентации рассеивающей поверхности), шероховатости, диэлектрической проницаемости). В линейном поляризационном базисе возможно получить четыре составляющих комплексной матрицы рассеяния объектов РЛН (с учетом когерентности – три амплитуды на ГГ, ГВ и ВВ поляризациях и две разности фаз на ВВ и ГВ поляризациях), характеризующих три основных механизма отражения – однократное, двухкратное и многократное (объемное) (рис. 2). При переходе к обобщенным показателям распознавания РЛИ – поляризационной энтропии H (степени хаотичности отражения), углу рассеяния α (типу отражающих элементов с преобладающей ориентацией) и поляризационной анизотропии A – удастся разделить наблюдаемые ОПЗ на

9 классов всего лишь по геометрическим характеристикам (высоте, угловой ориентации и шероховатости) [16]. Параметр α описывает поляризационную зависимость зеркального отражения от гладкой поверхности ($\alpha \sim 0^\circ$), дипольного отражения ($\alpha \sim 45^\circ$) и двукратного отражения ($\alpha \sim 90^\circ$). Низкие значения энтропии $0 < H < 0.5$ для ОПЗ №7÷9 свидетельствуют о явном преобладании одного из механизмов отражения. Средняя энтропия $0.5 < H < 0.9$ соответствует классам №4÷6 с двукратным рассеянием при увеличении шероховатости поверхности и глубины проникновения сигнала в растительный покров. Высокая энтропия $0.9 < H < 1$ соответствует ОПЗ с многократным рассеянием и хаотическими деполяризующими свойствами (например, лесные покровы).

Таким образом, при наличии преимуществ радиодиапазона расширение признакового пространства путем использования в КРСА нескольких частотных диапазонов и комбинаций поляризации является более эффективным методом для распознавания ОПЗ, чем расширение спектральных каналов в ОЭ ПДЗЗ. Естественно, применение подобных методов дешифрирования влечет за собой предъявление жестких требований к радиометрической и фазовой стабильности и поляризационной развязке каналов АФАР КРСА.

Применение ДДЗЗ для решения социально-экономических задач

Эволюцию взглядов на адекватное применение ОЭ и РЛ ДДЗЗ уместно рассмотреть на примере тема-

тической задачи картографирования растительного покрова. Глобальные модели земных покровов, в первую очередь, предназначены для анализа климатических изменений и оценки параметров энергетического, углеродородного и водного циклов в планетарном масштабе. Подобные модели (например, GLC-2009 (Global Land Cover), GlobCover-2009) имеют грубое разрешение до $0.3 \div 1$ км и ограниченное число классов покровов – $6 \div 11$ типов ОПЗ. Широкому прогрессу в тематическом картографировании способствовали доступность данных от ОЭ ПДЗЗ КА «AVHRR/NOAA» (разрешение ~ 1 км в 5 каналах) и «MODIS/Terra» ($0.25 \div 1$ км в 36 каналах).

Региональные модели земных покровов имеют более высокое разрешение и номенклатуру классов ОПЗ и предназначены не только для изучения природных явлений, но и для анализа влияния антропогенной деятельности на окружающую среду, т.е. носят социально-экономический характер. Проанализируем закономерности формирования региональных моделей на примере европейской программы по картографированию земных покровов CLC (CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover), реализуемой в рамках программы ESA «Copernicus» по ДЗЗ территории Европы ($20.7^\circ \text{W} \div 34.5^\circ \text{E}$, $24.15^\circ \text{N} \div 72.45^\circ \text{N}$), начиная с 1985 г. (табл. 4, 5). Высокая эффективность объективного контроля выполнения решений Европейского союза по землепользованию и природным ресурсам привела к значительному увеличению картографируемой площади – с 23 стран в модели CLC-1990 (3.86 млн.км²) до 39 стран в CLC-2012 (5.74 млн.км²).

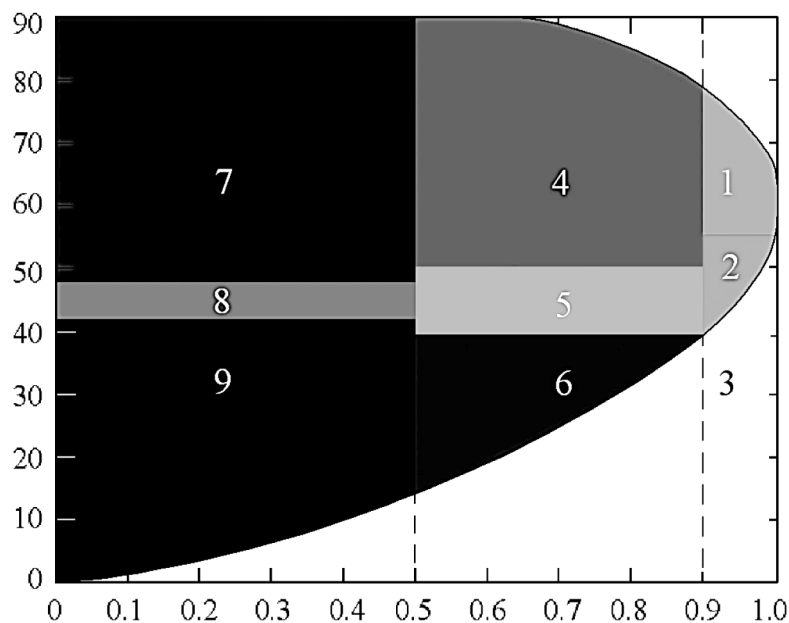


Рис. 2. Зоны классификации по признакам механизма отражения (энтропии $0 < H < 1$ и углу рассеяния $0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

Классификация типов покровов производится на языке LCML (Land Cover Meta Language), разработанном на основе универсального языка моделирования UML и языка географической разметки GML (как диалекта XML). Синтаксис этого языка позволяет балансировать между общими требованиями международных стандартов по пространственным данным и необходимостью детального описания земных покровов. Элементы земных покровов как набор базовых объектов языка наполняются семантическими признаками за счет внешних связей и атрибутов различных тематических слоев в целях детального описания широкого класса ОПЗ, т.е. объектно-ориентированная структура языка UML дает основу для вербального и математического описания классов. Язык GML преобразует типовые схемы UML в компьютерно-ориентированный формат. Принципы описания ОПЗ и метаданных CLC основаны на ISO 19115 и согласованы с европейской инфраструктурой пространственных данных INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe).

Классификация земных покровов в CLC основана на функциональных, физических и физиогномических признаках (атрибутах) площадных ОПЗ. Искусственные ОПЗ и сельскохозяйственные районы определяются с помощью функциональных атрибутов и связаны с семантическим признаком землепользования LU (Land Use). Класс земного покрова LC (Land Cover) представляет собой биофизическое состояние ландшафта, определяя его как «физический материал на поверхности данного УПЗ», т.е. можно говорить о «чистых» классах LC (водные поверхности, пески) и LU (промышленные объекты) или о смешанных классах (леса, аэропорты). Первый уровень CLC (5 классов) независим от конкретного типа покрова, второй уровень (15 классов) учитывает площадные ОПЗ, «согласованные» с масштабом ЦТК 1:500 000 и 1:1 000 000, а третий уровень (44 класса) описывает ОПЗ, непосредственно интересующие потребителя. Выбранный масштаб модели 1:100 000 обеспечивает размер элемента с достаточно однородным земным покровом с учетом его изменчивости. Мини-

мальная площадь ОПЗ составляет 25 га (500x500 м) с минимальной шириной линейных объектов 100 м. В модели не фиксируются сезонные изменения ОПЗ (например, растительные циклы и снеговой покров), суточные изменения (участки, затопляемые приливами) или краткосрочные изменения (наводнения). Съемка территории проводилась в весенне-осенний период в течение 1–4 месяцев (т.е. в условиях устойчивой растительной массы) в зависимости от географического расположения территории. Характерно, что для более северных стран (например, Швеции и Финляндии) рекомендованным интервалом для съемки являлся только один месяц (июль), что обусловлено, с одной стороны, благоприятными условиями освещенности ПЗ, а с другой – минимальным числом классов растительности (неразвитостью сельского хозяйства и преобладанием лесных покровов). Для уточнения результатов дешифрирования ОЭ ДДЗЗ съемка участка ПЗ (УПЗ) проводилась до 3–5 раз в рекомендованные временные интервалы.

После радиометрической и геометрической коррекции на первом этапе дешифрирования использовались спектральные признаки (яркость и цвет пикселей исходных или комбинированных ОЭИ на основе ВИ), на втором – их пространственное распределение (размер, форма, текстура) и косвенные признаки (взаимное расположение, высота, тени). На третьем этапе после пространственной и яркостной фильтрации производились оконтуривание и сегментация (векторизация) ОЭИ с привлечением временных признаков сезонного изменения ОПЗ. Следует отметить, что разрешающая способность привлекаемых ОЭ ДДЗЗ в 5–15 раз лучше, чем размер элемента модели CLC. На заключительном этапе дешифрирования происходила топологическая «сшивка» площадных ОПЗ с учетом их пространственно-логических связей с привлечением дополнительной информации: ДДЗЗ самолетной съемки, ЦТК, разнообразных баз данных (о береговой черте World Vector Shorelines, метеорологических явлениях). Итоговые данные затем адаптировались к национальным картографическим проекциям и номенклатурному ряду ЦТК европей-

Таблица 4

Характеристики ДДЗЗ, используемых для формирования модели CLC

КА ДЗЗ/ПДЗЗ	Число каналов	Полоса съемки, км	Разрешение ДДЗЗ, м	Модель земных покровов
Landsat-5/MSS,TM	7	172x185	30 TM, 80 MSS	CLC1990
Landsat-7/ ETM	7	180	30 MS, 15 PAN	CLC2000
SPOT-4/-5/ HRVIR	5	60-80	20 MS, 10 PAN	CLC2006
IRS P6/ LISS III	4	141	23	CLC2006, CLC2012
RapidEye/ REIS	5	77	5-6.5	CLC2012
Sentinel-2/ MSI	13	290	10, 20, 60	Перспективная модель
Sentinel-1/ SAR		80-400	5-100	

Таблица 5

Уровни классификации СЛС и число классов земных покровов

Уровень 1 (5)	Уровень 2 (15)	Уровень 3 (44)	Уровень 4 (106)
1. Искусственные поверхности (~3–4% от всей площади)	1.1. Городские кварталы	1.1.1. Непрерывные городские кварталы	2
		1.1.2. Прерывистые городские кварталы	3
	1.2. Промышленные, коммерческие и транспортные объекты	1.2.1. Промышленные и коммерческие объекты	2
		1.2.2. Автомобильные и железные дороги	2
		1.2.3. Порты (включая причалы, доки и пристани)	4
		1.2.4. Аэропорты	2
	1.3. Шахты, свалки и стройки	1.3.1. Участки добычи полезных ископаемых	2
		1.3.2. Свалки	2
		1.3.3. Строительные площадки (земляные работы)	1
	1.4. Участки с искусственной растительностью	1.4.1. Районы с озеленением (парки, кладбища)	2
1.4.2. Спортивные и развлекательные районы (спортивные площадки, парки отдыха, гольф-поля)		2	
2. Сельскохозяйственные земли (~42–43%)	2.1. Пахотные земли	2.1.1. Неорошаемые пашни	3
		2.1.2. Постоянно орошаемые земли	1
		2.1.3. Рисовые поля (периодически затопляемые)	1
	2.2. Многолетние плодово-ягодные культуры	2.2.1. Виноградники	1
		2.2.2. Фруктовые деревья и ягодные плантации	6
	2.2.3. Оливковые рощи	1	
	2.3. Пастбища	2.3.1. Пастбища	2
	2.4. Гетерогенные сельскохозяйственные (с/х) районы	2.4.1. Однолетние с/х культуры, связанные с многолетними культурами	1
		2.4.2. Комплексные культивируемые участки	2
		2.4.3. С/х земли с естественной растительностью	5
2.4.4. Агро-лесные области		1	
3. Лесные и полу-природные территории (~48–49%)	3.1. Леса	3.1.1. Лиственный лес	5
		3.1.2. Хвойный лес	5
		3.1.3. Смешанный лес	8
	3.2. Кустарники и травы	3.2.1. Естественные пастбища	2
		3.2.2. Болота и пустоши	2
		3.2.3. Жестколистная растительность	1
		3.2.4. Переходный лес и кустарники	5
	3.3. Открытые участки с небольшой растительностью	3.3.1. Пляжи, дюны, пески	3
		3.3.2. Каменные россыпи	2
		3.3.3. Участки с редкой растительностью	3
3.3.4. Лесные гари		1	
3.3.5. Ледники и вечные снега		1	
4. Водно-болотные области (~2–3%)	4.1. Внутренние области	4.1.1. Внутренние болота	4
		4.1.2. Торфяники	4
	4.2. Засоленные области	4.2.1. Солончаковые болота	2
		4.2.2. Солончаки	2
		4.2.3. Приливные участки	1
5. Водные поверхности (~2–3%)	5.1. Внутренние воды	5.1.1. Водные протоки (реки, каналы)	2
		5.1.2. Водоемы (озера, пруды)	2
	5.2. Морские воды	5.2.1. Прибрежные лагуны	1
		5.2.2. Эстуарии	1
		5.2.3. Моря и океаны	1

Задачи ДЗЗ, решаемые с помощью КРСА

Частотные диапазоны и преобладающие эффекты	Подповерхностное рассеяние						Гражданские потребители		
	Поверхностное рассеяние						Разрешение, м	Министерства (тип наблюдения)	Доля потребляемых ДДЗЗ, %
	Рассеяние на объектах поверхности и атмосферы								
	P	L	S	C	X	Ku			
Тематические области и задачи ДЗЗ	+	+	?				5–100	МПР(П,С), МЭ (П), МЧС (О)	5–10**
Геология и ресурсы недр – мониторинг районов вечной мерзлоты*									
Гидрология и водные ресурсы – мониторинг ледников* – прогнозирования весенних паводков и картографирование зон наводнений*		+	+	+	+	?	5–150	МСХ (С), МПР (С), МЧС (О)	10–15**
Лесные ресурсы и растительный покров – картографирование типов и оценка запасов древесины*	+	+	+	+	+		5–150	МСХ (С), МПР (С), МЧС (О)	10–15**
Техногенные воздействия на окружающую среду – мониторинг вырубок и гарей*	+	+	+	+	+		5–150	МЧС (О)	10–15**
Океанология – мониторинг ледового покрова Арктики*		?	+	+	+	+	50–150	МТ (О), МПР (О), МЧС (О)	10–15**
Сельское хозяйство – мониторинг посевов* – мониторинг почвенных условий*		+	+	+	?		3–30	МСХ (С), МЧС (О), МПР (П)	5–10**
Землепользование – создание крупномасштабных цифровых топографических карт*		+	+	+	+		2–15	МПР (П), МЧС (О), МЭР (П)	50–60**

Обозначения таблицы 6.

* – тематическая задача ДЗЗ, критически важная для территории РФ

** – экспертная оценка по результатам продаж в РФ («Ракурс», «Иннотер», «Гео-Альянс», «СканЭкс», «Совзонд», «Терра-Спэйс») и в мире («MDA», «InfoTerra», «e-GEOS»);

МЧС – Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, МПР – Министерство природных ресурсов и экологии, МЭ – Министерство энергетики, МЭР – Министерство экономического развития, МТ – Министерство транспорта, МСХ – Министерство сельского хозяйства;

П – плановое наблюдение (годы), С – сезонное наблюдение (месяцы), О – оперативное наблюдение (часы-сутки);

+ – диапазон используется; ? – возможное использование диапазона.

ских государств, как правило, в форматах данных ГИС «ARC/INFO». К источникам типовых ошибок дешифрирования и дальнейшей классификации относились: сезонное изменение уровня воды во внутренних водоемах и приливы в прибрежных районах морей; опадение листьев в смешанных и лиственных лесах и соответствующее отнесение этих УПЗ к лугам или кустарникам; несезонное выпадение снега и обледенение малоиспользуемых портов; выведение сельскохозяйственных земель из севооборота; обезлесивание из-за локальных пожаров. Средняя точность распознавания по классам ОПЗ составила ~87% (по 13 классам – выше 90%, по 2 – ниже 80%). Отметим, что в качестве исходных данных для СЛС-2102 и после-

дующей модели использование зарубежных ДДЗЗ не предусмотрено.

В последующих версиях CORINE запланировано введение 4-го уровня классификации с повышением детальности (минимальный размер элемента 4 га, масштаб ЦТК 1:50000) и расширением до 106 классов ОПЗ. Характерно, что увеличение числа классов произойдет по растительным покровам, дешифрируемым по РЛ ДДЗЗ КРСА «Sentinel-1». Классификационные признаки лесного покрова, определяемые по многополяризационным РЛ ДДЗЗ (тип подлеска, степень затененности крон, степень/скорость роста высоты), почти совпадают со схемой классификации при контактных наблюдениях. Использование на данном

этапе КРСА «Sentinel-1» см-диапазона обусловлено наличием апробированных моделей УЭПР наземных и морских ОПЗ в С-диапазоне на основе полученного опыта дешифрирования РЛ ДДЗЗ КРСА «ERS-1/-2» в однополяризованном режиме и «ENVISAT» в двухполяризованном режиме. При этом активно разрабатывается КРСА Р-диапазона «BIOMASS», а в L-диапазоне три КРСА – «TerraSAR-L» с АФАР и два «TanDEM-L» с ЗПА (для кластерного полета, как и «TerraSAR-X/TanDEM-X») – в целях целенаправленного картографирования растительных покровов.

Территория РФ составляет 11.4% земной суши, из которой 60% занимают леса (≈ 11.8 млн.км²), что предопределяет широкомасштабное использование РЛ ДДЗЗ. Оценки, проведенные в [6–8], показывают, что для решения тематических задач по территории РФ, ряд из которых носит критический характер (табл. 6), целесообразно использование всех РЛ диапазонов, однако проекты Роскосмоса в области РЛ ДЗЗ до 2018–2020 гг. (данные сайтов www.roscosmos.ru, www.zakupki.ru) предусматривают разработку КРСА только см-диапазона: X («Обзор-Р», «Арктика-Р/Смотр-Х», «Элсар» КА «Метеор-М»), С («Арктика-Р/Смотр-С»), S («Кондор-ФКА»).

Для картографирования и оперативного мониторинга большей части территории РФ целесообразно возобновление разработок КРСА дм-диапазона. КРСА должны оборудоваться двухчастотными АФАР (как вариант, двумя АФАР по разным бортам КА) с реализацией многополяризованного режима. На ССО следует запускать КРСА для реализации кластерного полета в целях формирования глобальной ЦМР, при этом предпочтительны диапазоны, чувствительные к морским и ледовым приложениям (X-, С-). Большую часть ОГ КРСА целесообразно располагать на наклонных орбитах для обеспечения всеракурсного РЛН ОПЗ (желательно на обратных для снижения требований к СЭС). Для обеспечения большей степени глобальности целесообразно увеличение высоты орбиты до 1000–1200 км и предельного угла крена антенны КРСА, что является актуальным как с точки зрения повышения безопасности (уклонения от космического мусора при крупногабаритных АФАР и СБ), так и с точки зрения возможности РЛН одного УПЗ со смежных витков орбиты.

Литература

1. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли: коллективная монография / под ред. А.И. Канашенкова. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба [и др.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. Редакция 7. – Иркутск: ООО «Байкальский центр», 2008. – 80 с.

4. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. – Роскосмос, 2006.
5. Михайлов, С. И. Классификатор тематических задач МЧС России, решаемых с использованием данных ДЗЗ из космоса / С.И. Михайлов // Земля из космоса. – 2010. – № 4. – С. 64–71.
6. Полетаев, А. М. Информологический анализ космических радиолокационных систем / А.М. Полетаев. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2013. – 214 с.
7. Полетаев, А. М. Критерии информативности радиолокационных данных, предъявляемые потребителями / А.М. Полетаев, Р.Ю. Лазутин // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – 2015. – Вып. 11. – С. 215–223.
8. Полетаев, А. М. Анализ принципов построения и режимов функционирования космических систем радиолокационного наблюдения / А.М. Полетаев, Р.Ю. Лазутин // Труды ВКА имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 159–169.
9. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
10. Чернов, А. А. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения / А.А. Чернов, Г.М. Чернявский. – М.: Радио и связь, 2004. – 200 с.
11. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
12. Capece, P. Active SAR antennas: design, development and current programs [Электронный ресурс] / P. Capece // International Journal of Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 2009. – Режим доступа: <http://downloads.hindawi.com/journals/ijap/2009/796064.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
13. Feuerstein, M. Topaz II Nuclear Powered SAR Satellite / M. Feuerstein, B. Agrawal. – Naval Postgraduate School Monterey, California, 1994. – AIAA 94-4688.
14. Handbook of Space Technology. – John Wiley & Sons, 2009. – 906 p.
15. Imbriale, W. A. Space Antenna Handbook / W.A. Imbriale, S. Gao, L. Boccia. – Wiley, 2012. – 774 p.
16. Lee, J. S. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications / J.S. Lee, E. Pottier. – Artech House, 2009. – 342 p.
17. Patel, M. R. Spacecraft power systems / M.R. Patel. – CRC Press, 2005. – 734 p.
18. Pillai, S. U. Space Based Radar. Theory and Applications / S.U. Pillai, K.Y. Li, B. Himed. – McGraw-Hill Companies, 2008. – 420 p.
19. Richards, J. A. Remote Sensing with Imaging Radar / J.A. Richards. – Springer, 2009. – 372 p.
20. Design of an S/X dual-band dual-polarised microstrip antenna array for SAR applications / X. Qu [et al.] // Microwaves, Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 1. – P. 513–517.
21. Wang, W.-Q. Multi-Antenna Synthetic Aperture Radar Imaging Theory and Practice / W.-Q. Wang. – Beijing: National Defense Industry Press, 2010. – 560 p.