

М. И. Нониашвили, И. В. Крючков,
Г. А. Лесников, С. И. Нефедов,
А. Н. Семенов

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ИХ РАЗВИТИЯ

Рассмотрены находящиеся в эксплуатации радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), выведенные на орбиту в течение последних 10 лет. Описаны также перспективные РСА, находящиеся на стадии проектирования или готовящиеся к выводу на орбиту. Приведены тактико-технические характеристики рассмотренных РСА и несущих их космических аппаратов. По результатам проведенного обзора выявлены и обозначены основные тенденции развития РСА и их компонентов.

E-mail: min-st-1986@mail.ru

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой; гибридная зеркальная антенна; активная фазированная антенная решетка.

Одним из способов зондирования Земли из космоса является зондирование с применением радиолокационных систем, размещаемых на космических аппаратах (КА), — радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования. По сравнению с другими видовыми средствами наблюдения радиолокационная съемка выгодно отличается [1]:

- независимостью от метеорологических условий;
- независимостью от условий освещенности;
- повышенной точностью измерения геометрических характеристик объектов;
- возможностью трехмерного портретирования объектов и построения карт рельефа местности;
- возможностью получения информации, связанной с особенностями взаимодействия радиоволн с объектами наблюдения (выявление диэлектрических свойств, внутренней структуры и др.);
- возможностью наблюдения объектов, скрытых снежным или растительным покровом, а также по поверхностным проявлениям глубинных процессов в водной среде.

Современные радиолокационные изображения земной поверхности с высоким пространственным разрешением используются при решении широкого круга научных и народно-хозяйственных задач: исследование природных ресурсов, геологоразведка и геологическое

картирование, мониторинг катастроф и экологических загрязнений, оценка биоресурсов, климатические исследования, создание топографических карт, контроль изменения земной поверхности [2].

В настоящее время космические РСА способны обеспечивать субметровое пространственное разрешение, что делает их пригодными в том числе для видовой разведки. Это объясняет возрастающий интерес к космическим РСА не только со стороны гражданских потребителей, но и со стороны вооруженных сил и спецслужб. Поэтому сейчас наблюдается динамичное развитие космических РСА, характеризующееся увеличением общей численности эксплуатируемых РСА.

Ниже рассмотрены космические РСА, выведенные на орбиту в течение последних 10 лет и находящиеся в эксплуатации, а также проектируемые или готовящиеся к запуску РСА.

С целью систематизации излагаемой информации рассматриваемые РСА разделены на группы в зависимости от используемого частотного диапазона.

РСА X-диапазона. В соответствии с ограничениями на ширину спектра сигнала, определяемыми Регламентом радиосвязи [3], в X-диапазоне возможно получение субметрового разрешения. Также данный диапазон характеризуется повышенным уровнем отраженных сигналов по сравнению с L- и S-диапазонами, что обеспечивает увеличение вероятности обнаружения малоразмерных целей на фоне местности и способствует ведению военной разведки.

TerraSAR-X — коммерческий РСА, разработанный EADS Astrium по заказу немецкого аэрокосмического центра DLR. В 2007 г. РСА выведен на солнечно-синхронную орбиту. Энергообеспечение осуществляется солнечными батареями площадью 5,25 м². Срок активного существования составляет 5 лет.

Режимы съемки: прожекторный режим (ПР), маршрутный режим (МР), широкозахватный режим Скансар (СС). Помимо обычного ПР кадровой съемки реализован ПР двойного приема, в котором разрешение по азимуту увеличено в 2 раза. Двусторонний обзор обеспечивается разворотом РСА по крену.

Стоимость КА и наземного сегмента составила 185 млн евро.

Тактико-технические характеристики TerraSAR-X приведены в табл. 1, а внешний вид — на рис. 1.

В настоящий момент РСА TerraSAR-X работает в бистатическом режиме в паре с РСА *TanDEM-X*, запущенным в 2010 г. Орбита КА TerraSAR-X стабильная, а КА TanDEM-X движется около КА TerraSAR-X на расстоянии 300...600 м. Основная задача тандема этих спутников — создание трехмерной модели поверхности Земли с использованием интерферометрической съемки. По заявлениям представителей EADS Astrium, создание модели планировалось завершить в 2012 г.

Тактико-технические характеристики РСА Х-диапазона

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой				
	TerraSAR-X (Paz SAR-X)	Cosmo SkyMed	SAR Lupe	ТесSAR (RISAT-2)	«Северянин-М» (КА «Метеор-М № 1»)
Масса, кг	1230 (КА)	1700 (КА)	770 (КА)	295 (КА), 100 (РСА)	2630 (КА)
Высота орбиты, км	514	620	470...505	450...580	832
Наклонение орбиты, град	97,44	97,86	~98,5	41	98,77
Центральная частота, МГц	9 650	9 600	9 650	—	9 615
Тип и размер антенны, м	АФАР 4,8×0,8	АФАР 5,7×1,4	ГЗА 3,3×2,7	ГЗА Ø~3	Волноводно-щелевая 13,4×0,25
Средняя потребляемая мощность, Вт	800 (РСА)	1 000 (КА)	250 (КА)	—	1 000 (РСА), 1 430 (КА)
Режимы съемки	ПР, МР, СС	ПР, МР, СС	ПР, МР	ПР, МР, СС	МР
Углы падения, град	20...55 (ПР) 20...45 (МР)	20—50	—	—	20...48
Полоса обзора, км	570 (ПР), 350 (МР)	~400	—	—	600
Полоса съемки, км	15 (ПР), 30 (МР), 100 (СС)	10 (ПР), 30/40 (МР), 100/200 (СС)	5,5 (ПР), 60 (МР)	—	600
Протяженность кадра, км	5—10	10	5,5 (ПР), 8 (МР)	—	10/500

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой			
	TetraSAR-X (Paz SAR-X)	Cosmo SkyMed	SAR Lupe	TesSAR (RISAT-2)
Разрешение, м	1 (ПР), 3 (МР), 15 (СС)	1 (ПР), 3—15 (МР), 30/100 (СС)	До 0,5 (ПР)	1 (ПР), 3 (МР), 8 (СС), 1,8 («моза- ичный» режим)
Поляризация	Полнополяриметри- ческая	Полнополяриметри- ческая	—	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
Минимальная чув- ствительность (NESZ), дБ	-20 (ПР), -19 (МР, СС)	-22	—	—
Канал передачи РЛИ, Мбит/с	300	310	—	600
				«Северянин-М» (КА «Метеор-М № 1») 450—600/800—1300

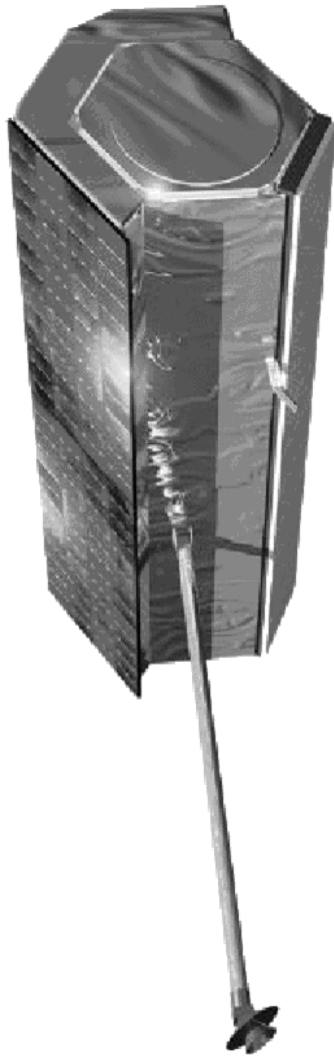


Рис. 1. РСА TetraSAR-X

Представители EADS Astrium также заявили, что в 2014 г. технология TerraSAR-X будет усовершенствована. Это позволит реализовать следующие характеристики РСА:

- ширина спектра зондирующего сигнала 600 МГц;
- разрешение в ПР 0,5 м;
- полоса съемки в МР 10...40 км с разрешением 1...4 м;
- полоса съемки в СС 50...500 км с разрешением 5...50 м;
- канал передачи информации до 800 Мбит/с.

Испанское агентство CDTI в 2013 г. планирует в рамках миссии PAZ вывести на орбиту копию TerraSAR-X под обозначением *Paz SAR-X*.

SAR-2000 — РСА, установленные на КА COSMO-SkyMed. Это созвездие из четырех КА двойного назначения, разработанные итальянским космическим агентством ASI совместно с Министерством обороны Италии. КА запущены в период с 2007 по 2010 г. на солнечно-синхронные орбиты. Электропитание осуществляется от солнечных батарей площадью 18,3 м². Срок активного существования каждого КА составляет 5 лет.

Предусмотрены шесть режимов съемки: два ПР, два МР, два СС. Оба ПР и МР высокого разрешения. СС среднего разрешения и широкозахватный СС предполагают использование режима одной поляризации. МР среднего разрешения работает в режиме двух поляризаций.

Стоимость всей программы оценивается в 900 млн евро.

Тактико-технические характеристики COSMO-SkyMed и SAR-2000 приведены в табл. 1, внешний вид КА — на рис. 2.

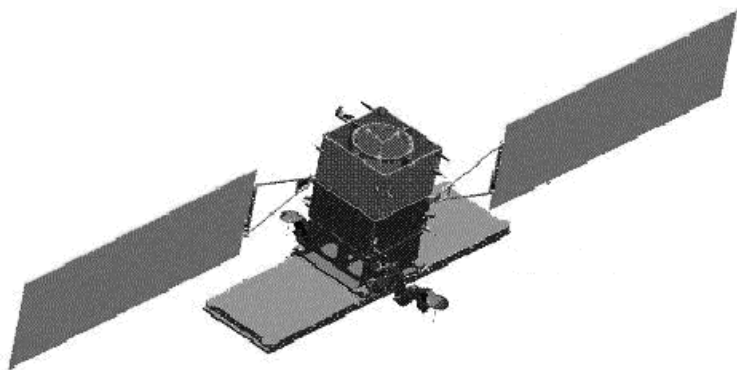


Рис. 2. РСА COSMO-SkyMed

В состав орбитальной группировки SAR-2000 также входят три КА с оптико-электронной аппаратурой.

XSAR — PCA, установленные на серии из пяти немецких PCA военного назначения SAR Lupe. Разработаны консорциумом европейских компаний, возглавляемым OHB Technology AG. КА запущены в период с 2006 по 2008 г. на три околополярные орбиты. Электропитание осуществляется от солнечных батарей. Срок активного существования каждого КА составляет 10 лет.

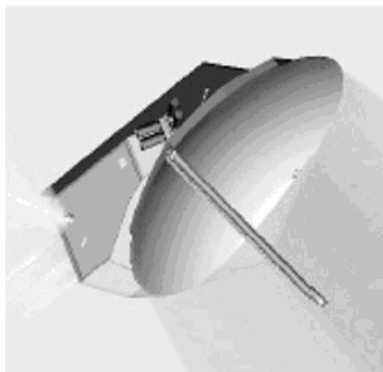


Рис. 3. PCA SAR Lupe

Предусмотрены два режима съемки: ПР и МР. Съемка в ПР осуществляется путем поворота КА.

Тактико-технические характеристики SAR Lupe и XSAR приведены в табл. 1, внешний вид КА — на рис. 3.

TecSAR — израильский PCA, разработанный IAI MBT Space Division и выведенный в 2008 г. на эллиптическую орбиту. Электропитание осуществляется от солнечных батарей. Срок активного существования превышает 5 лет.

Основные режимы работы:

- СС с электронным управлением луча для обеспечения широкой полосы съемки;
- различные МР;
- различные ПР, использующие механический разворот КА по курсу;
- «мозаичные» режимы, сочетающие высокое разрешение с обзором в широком диапазоне углов падения; реализуются за счет электронного сканирования луча и механического разворота КА;
- поляриметрические режимы: вертикальный—вертикальный, вертикальный—горизонтальный, горизонтальный—горизонтальный, горизонтальный—вертикальный.

Отдельный интерес представляет собой построение антенны и передатчиков. Антенна с параболическим рефлектором, обеспечивающим большую эффективную площадь, имеет широкую полосу благодаря использованию элементов временной задержки при электронном сканировании. Отражатель антенны состоит из двух секций — центральной секции и периферического параболического сетчатого рефлектора. Каждый фидер, соединяющий передатчики с облучателями, смещен по отношению к оси рефлектора, что позволяет формировать многолучевую диаграмму направленности антенны (ДНА) в пространстве.

Тактико-технические характеристики *TecSAR* приведены в табл. 1, его внешний вид — на рис. 4.

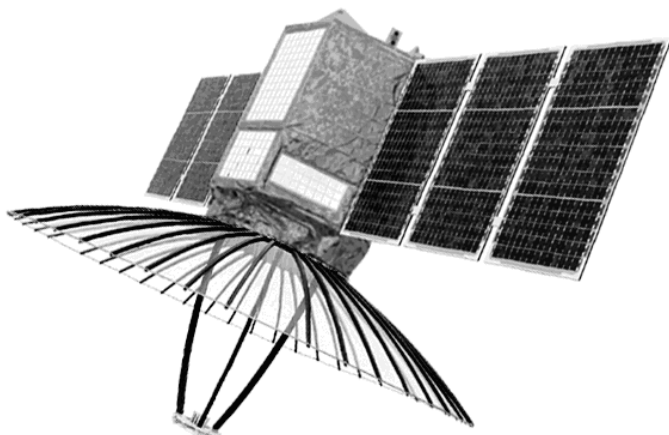


Рис. 4. PCA TecSAR

Индийская компания ISRO приобрела у израильского концерна IAI комплект TecSAR и осуществила его запуск в 2009 г. под обозначением *RISAT-2*.

Северянин-М — российский PCA, установленный на КА «Метеор-М № 1». Разработан ОАО «НИИ точных приборов» и выведен на околокруговую солнечно-синхронную орбиту в 2009 г. Электропитание осуществляется от солнечных батарей. Срок активного существования составляет 5 лет.

Радиолокационная съемка возможна в двух режимах: МР со средним или низким разрешением, оба с поляризацией ВВ.

В отличие от большинства современных PCA, оснащенных или активной фазированной антенной решеткой (АФАР), или АФАР-ГЗА, в «Северянин-М» используется волноводно-щелевая антенна. Возможно, это объясняется использованием уже имевшегося научно-технического задела, созданного при проектировании PCA ЭКОР-1В, который предназначался для размещения на КА «Алмаз-1В».

Тактико-технические характеристики «Метеор-М № 1» и «Северянин-М» приведены в табл. 1, внешний вид КА — на рис. 5.

Lacrosse/Onyx — серия из пяти PCA видовой разведки, разработанных корпорацией Lockheed Martin. Запуски производились с 1988 по 2005 г. В настоящее время группировка состоит из трех PCA с околокруговыми орбитами высотой около 700 км и наклонениями 57° и 68° . Источником питания являются солнечные батареи. Срок активного существования каждого КА составляет 9 лет. Общая масса КА с PCA составляет 14...16 т.

Все тактико-технические характеристики PCA Lacrosse засекречены. Однако, по некоторым данным [4], углы обзора составляют

30...60°, время перенацеливания — около 15 с. Реализация сканирования луча в зеркальной антенне на углы, превышающие ширину луча в 150 раз, представляет собой сложную задачу, решение которой требует применения АФАР облучателя [5]. Поэтому, предположительно, используется антенна Кассегрена с параболическим зеркалом диаметром 15...17 м и облучателем АФАР — АФАР-ГЗА.

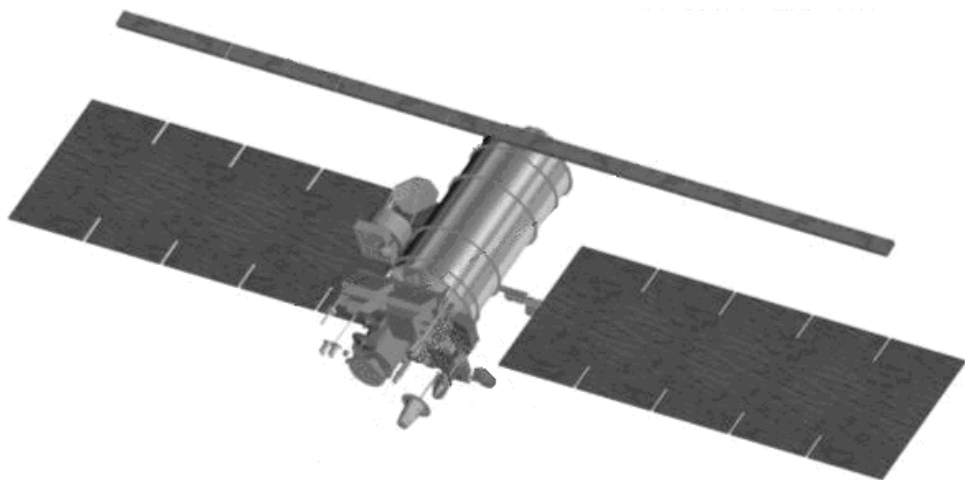


Рис. 5. PCA КА «Метеор-М № 1»

Основные режимы работы:

- покадровый МР с разрешением до 2 м при размере кадра 6×6 км;
- непрерывный МР с разрешением до 3 м при полосе обзора 100 км;
- ПР с разрешением до 0,6 м при размере кадра 2×2 км;
- экспериментальный режим с большими углами падения.

Бортовая радиосистема передачи данных обеспечивает uplink-канал со скоростью около 150 Мбит/с в двух диапазонах. Один из них предназначен для передачи данных непосредственно на земные станции, второй — для использования спутников-ретрансляторов. На данный момент США обладают группировкой из семи спутников-ретрансляторов SDS-3 (4 КА на ГСО, 3 КА на ВЭО). Это позволяет существенно снизить требования к бортовой радиосистеме передачи данных за счет увеличения времени передачи.

Стоимость каждого КА Lacrosse с учетом вывода на орбиту оценивается в 0,83...1,78 млрд долл. в ценах 2012 г.

FIA Radar — новейшая разработка США. Несмотря на то, что предполагаемые тактико-технические характеристики Lacrosse схожи с ТТХ лучших современных PCA, Национальное управление во-

енно-космической разведки США (NRO) в 2010 и 2012 гг. осуществило запуски двух новейших РСА, разработанных по программе FIA (Future Imagery Architecture).

Данные о FIA Radar засекречены, однако известно, что оба РСА выведены на ретроградную орбиту высотой 1 100 км. При сохранении углов обзора $30...60^\circ$ такая орбита позволяет расширить полосу обзора на 1/3 при энергетическом проигрыше менее 2 дБ благодаря увеличению дальности до земной поверхности.

Анализ характеристик ракет-носителей, с помощью которых осуществлялся запуск FIA Radar, показывает, что масса КА с новым РСА не может превышать 8 т.

IGS-Radar — серия японских РСА двойного назначения, разрабатываемая агентством JAXA. С 2003 г. осуществлены запуски трех РСА на орбиты высотой 480...500 км. В 2012 г. готовится запуск четвертого КА.

Тактико-технические характеристики данных РСА засекречены, однако известно [6], что последний РСА (IGS-Radar 3) обеспечивает разрешение не хуже 1 м.

РСА С-диапазона. В С-диапазоне, так же, как и в Х-диапазоне, возможно использование сигналов с шириной спектра, достаточной для реализации субметрового разрешения. С-диапазон также более пригоден для военной разведки, чем L- и S-диапазоны.

Radarsat-2 — коммерческий канадский РСА, выведенный на орбиту в 2007 г. Основным подрядчиком по заказу Канадского космического агентства CSA являлась компания MDA. Электропитание РСА обеспечивается солнечными батареями общей площадью $13,4 \text{ м}^2$. Срок активного существования составляет 7 лет.

Radarsat-2 является гибким инструментом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так как способен работать в одном из 11 режимов съемки, отличающихся углами падения, полосой съемки, разрешением, числом наблюдений, поляризацией. Отличительная особенность *Radarsat-2* от других современных РСА — отсутствие ПР, однако *Radarsat-2* может вести съемку в полосе 20 км с ультравысоким разрешением (УВР) 3 м в режиме одной поляризации при углах падения $30...40^\circ$, при этом используется режим двойного приема.

Тактико-технические характеристики *Radarsat-2* приведены в табл. 2, его внешний вид — на рис. 6.

Тактико-технические характеристики РСА С- и S-диапазонов

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой			
	Radarsat-2	ASAR (КА ENVISAT)	RISAT-1	«Кондор-Э»
Масса, кг	2280 (КА), 750 (РСА)	8211 (КА), 832 (РСА)	1858	950 (КА), 250 (РСА)
Высота орбиты, км	798	~790	536	~500
Наклонение орбиты, град	98,6	98,55	~97	до 98
Центральная частота, МГц	5 405	5 331	5 350	3 191
Тип и размер антенны, м	АФАР 15×1,4	АФАР 10×1,3	АФАР 6×2	ГЗА Ø~6
Средняя потребляемая мощность, Вт	—	—	—	—
Режимы съемки	Различные	МР, СС, РГС, РМВ	ПР, МР, СС	ПР, ДР, ОР, СС
Углы падения, град	20—49, 30—40 (УВР), 10—23/10—23, 20—41 (пол.)	20—45 (МР, РМВ), 17—42 (СС, РГС)	20—49	20—55
Полоса обзора, км	150—500	500 (МР), 485 (РМВ) 405 (СС, РГС)	400	До 500
Полоса съемки, км	100—500, 20 (УВР), 170/70, 25 (пол.)	100—56 (МР), 5 (РМВ), 405 (СС, РГС)	10 (ПР), 30 (МР), 120/240 (СС)	8—10 (ПР), 10—25 (ДР), 20—40 (ОР), 120 (СС)
				499
				97,37
				3 200
				ГЗА
				—
				МР, СС
				25—47
				—
				40 (МР), 100 (СС)

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой				
	Radarsat-2	ASAR (КА ENVISAT)	RISAT-1	«Кондор-Э»	НД-1С
Протяженность кадра, км	—	5/10 (РМВ)	10 (ПР)	8—10 (ПР)	—
Разрешение, м	25—100, 3 (УВР), 40/28, 11/28 (пол.)	28 (МР), 150(СС), 980 (РГС), 30 (РМВ)	~1 (ПР), 3/12 (МР), 25/50 (СС)	1 (ПР), 3 (МР), 8 (СС), 1,8 («мозаичный» режим)	5 (МР), 20 (СС)
Поляризация	Полнополяриметрическая	Полнополяриметрическая	Полнополяриметрическая	ВВ, ГГ	ВВ
Минимальная чувствительность (NESZ), дБ	—	-22 (МР), -20 (РМВ), -21 (СС), -32 (РГС)	—	-20 (ПР, ОР, СС), -15 (ДР)	-19
Канал передачи РЛИ, Мбит/с	2×105	100+32+9×10	160×4	350	—

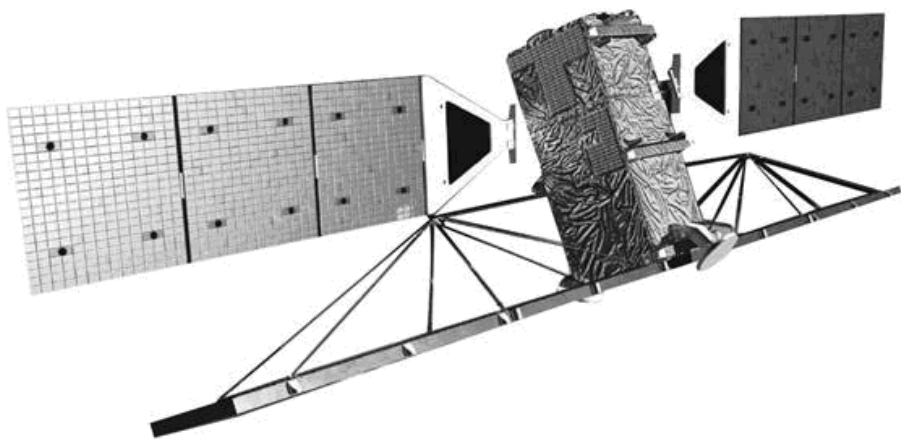


Рис. 6. PCA Radarsat-2

ASAR — поляриметрический PCA, являющийся одним из инструментов КА *ENVISAT*, который предназначался для регулярного ДЗЗ. PCA был построен Европейским космическим агентством ESA и запущен в 2002 г. на солнечно-синхронную орбиту. Электропитание осуществлялось за счет солнечных батарей. Несмотря на то, что расчетный срок активного существования *ENVISAT* составлял 5 лет, КА продолжал функционировать до апреля 2012 г., когда связь со спутником была потеряна. В мае ESA официально объявило о завершении миссии.

В PCA предусмотрены следующие режимы съемки: МР с разными поляризациями, СС, режим глобальной съемки (РГС); режим съемки морских волн (РМВ).

Стоимость создания, запуска и пятилетней эксплуатации *ENVISAT* составляет 2,3 млрд евро.

Тактико-технические характеристики *ENVISAT* и *ASAR* приведены в табл. 2, внешний вид КА — на рис. 7.

RISAT-1 — PCA, разработанный индийской ISRO и запущенный в 2012 г. Энергообеспечение осуществляется за счет солнечных батарей. Срок активного существования составляет не менее 5 лет.

PCA может работать в одном из пяти режимов. В ПР предусмотрена возможность разворота КА по тангажу на углы $\pm 13^\circ$. Один МР полнополяриметрический, а второй МР — с одной или двумя поляризациями. Два широкозахватных режима (СС) с разной полосой съемки и разрешением.

Общая стоимость миссии составила 89 млн долл. На ее подготовку было затрачено около пяти лет.

Тактико-технические характеристики *RISAT-1* приведены в табл. 2, его внешний вид — на рис. 8.

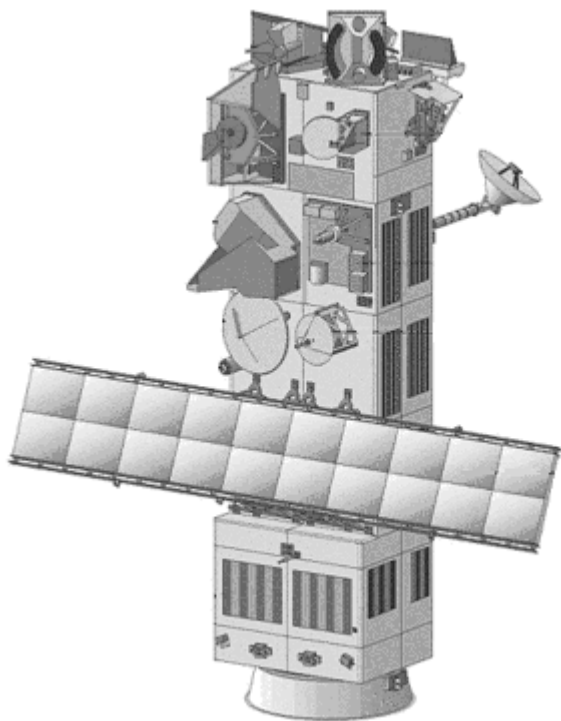


Рис. 7. PCA КА ENVISAT

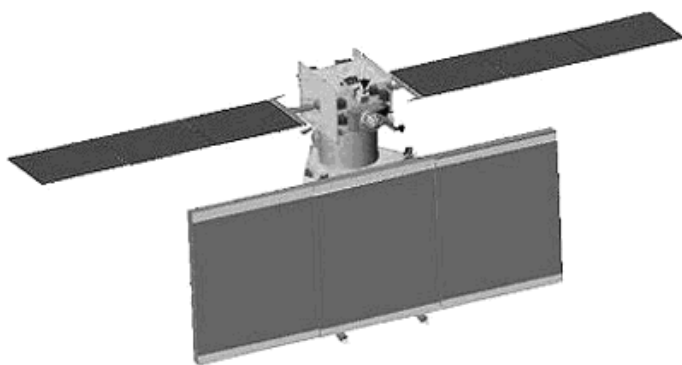


Рис. 8. PCA RISAT-1

РСА S-диапазона. В S-диапазоне реализуемо метровое разрешение. Изобразительные свойства радиолокационных снимков при наблюдении растительного покрова, а также при изучении геологической структуры земной поверхности выше в S-диапазоне, чем в X- и C-диапазонах волн. Для измерения удельных объемов лесной биомассы S-диапазон подходит лучше, чем более коротковолновые диапазоны.

«Кондор-Э» — российский РСА, разрабатываемый ОАО «Концерн «Вега». При проектировании этого РСА ставилась цель создать

универсальную многорежимную аппаратуру, позволяющую решать широкий круг задач.

В работе [1] сделан вывод, что для совмещения задач детального наблюдения заданных районов и ДЗЗ оптимален S-диапазон волн с реализацией широкого набора режимов работы:

- ПР максимального разрешения с разрешением порядка 1 м;
- маршрутный детальный режим (ДР);
- обзорный режим (ОР);
- широкозахватный СС низкого разрешения.

Срок активного существования «Кондора-Э» составляет 5 лет.

Тактико-технические характеристики «Кондора-Э» приведены в табл. 2, его внешний вид — на рис. 9.

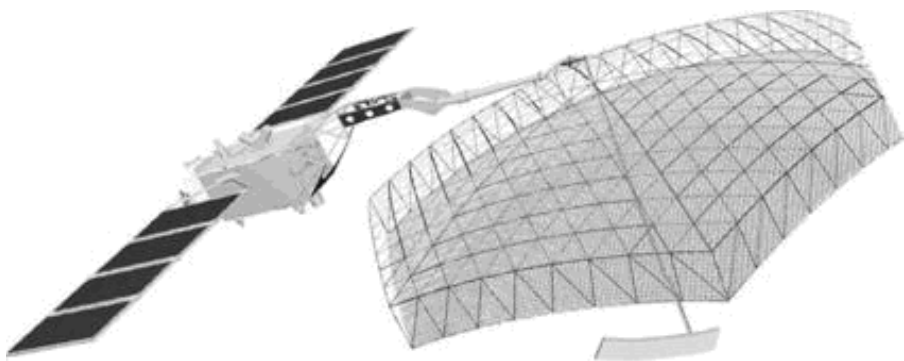


Рис. 9. РСА «Кондор-Э»

HJ-1C — проектируемый китайский РСА на малом КА. Запуск планируется осуществить в 2012 г. Предназначен для мониторинга окружающей среды и чрезвычайных ситуаций. На орбиту планируется вывести четыре КА. Срок активного существования каждого КА составит 3 года.

В РСА будут реализованы два режима: МР и СС.

Некоторые тактико-технические характеристики *HJ-1C* приведены в табл. 2.

РСА L-диапазона. По сравнению с рассмотренными частотными диапазонами в L-диапазоне лучше всего различаются контрасты растительного покрова. В этом диапазоне наблюдается наиболее высокая проникающая способность под крону леса. Однако по сравнению с более высокочастотными диапазонами, в L-диапазоне необходим больший энергетический потенциал, компенсирующий снижение отражательной способности местности.

PALSAR — космический РСА, разработанный японским агентством JAXA и выведенный в 2006 г. На солнечно-синхронную орбиту в составе КА ALOS. Энергообеспечение осуществляется за

счет солнечных батарей. Расчетный срок активного существования РСА составляет 5 лет.

Режимы работы РСА: два МР с одной и двумя поляризациями, низкоскоростной режим прямой передачи данных (РПП), широкозахватный СС, полнополяриметрический режим.

Тактико-технические характеристики ALOS и PALSAR приведены в табл. 3, внешний вид КА — на рис. 10.

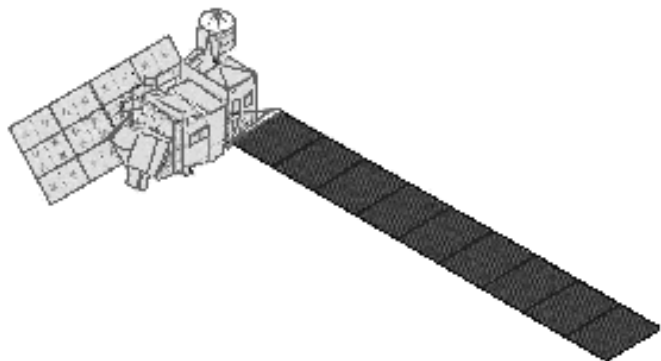


Рис. 10. РСА КА ALOS

В 2013 г. JAXA намерено запустить КА ALOS-2 с усовершенствованным радаром *PALSAR-2*. Высота орбиты КА составит 628 км, масса КА — около 2 т. Срок активного существования составит 5—7 лет. В ПР разрешение в кадре размером 25×25 км будет составлять 1...3 м, в МР в полосе шириной 50...70 км — 3...10 м, в режиме СС в полосе 350 км — 100 м.

TerraSAR-L — перспективный РСА, разработанный EADS Astrium по заказу немецкого DLR. В 2007 г. РСА выведен на солнечно-синхронную орбиту. Электропитание осуществляется за счет солнечных батарей. Срок активного существования *TerraSAR-L* составляет 5 лет.

Режимы съемки: МР, СС. В МР возможно использование режима одной, двух или четырех поляризаций; в СС — режима одной или двух поляризаций. Также предусмотрен специальный режим, в котором КА съемка ведется на протяжении всего витка кадрами 20×20 км² на каждые 100 км.

Тактико-технические характеристики *TerraSAR-L* приведены в табл. 3, его внешний вид — на рис. 11.

SAOCOM — РСА, разрабатываемый аргентинским агентством CONAE. Опубликованные им тактико-технические характеристики этого РСА типичные: высота орбиты ~620 км, разрешение 10...100 м в полосе съемки 30...350 км при углах падения 20...50°. РСА может работать в полнополяриметрическом режиме. Внешний вид SAOCOM приведен на рис. 12.

ТТХ РСА L-диапазона и двухчастотного РСА

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой		
	PALSAR	TerraSAR-L	«Смотр-SP»
Масса, кг	3850 (КА), 440 (РСА)	2800 (КА)	340 (РСА)
Высота орбиты, км	692	~635	~500
Наклонение орбиты, град	98,16	97,9	—
Центральная частота, МГц	1270	1268	3191
Тип и размер антенны, м	АФАР 8,9×3,1	АФАР 11×2,9	АФАР-ГЗА 6×2
Средняя потребляемая мощность, Вт	1 100	—	—
Режимы съемки	МР, РПП, СС	МР, СС	ПР, МР, ММЛР
Углы падения, град	8—60 (МР, РПП), 18—43 (СС), 8—30 (пол.)	15—38	—
Полоса обзора, км	870 (МР), 40—70 (РПП), 250—350 (СС), 20—65 (пол.)	180/260	500
Полоса съемки, км	40—70 (МР, РПП), 250—350 (СС), 20—65 (пол.)	40/60 (МР), 180/260 (СС)	5 (ПР), 1—40 (МР), 10—60 (пол.), 500 (ММЛР)
			60—120

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой		
	PALSAR	TerraSAR-L	«Смотр-SP»
Протяженность кадра, км	—	—	10 (ПП)
Разрешение, м	7—44/14—88 (MP), 14—88 (РПШ), 100 (СС), 24—89 (пол.)	5/9 (MP), 50 (СС)	1,5 (PP), 5 (MP), 5—10 (пол.), 10 (ММЛР)
Поляризация	Полнополяриметри- ческая	Полнополяриметри- ческая	Полнополяриметри- ческая
Минимальная чувстви- тельность (NESZ), дБ	-23 (MP), -25 (РПШ, пол.), -29 (СС)	-30	-22 (PP, ММЛР), -17 (MP)
Канал передачи РЛИ, Мбит/с	240	300	—
			PALSAR
			—
			15...30
			Полнополяриметри- ческая
			-24

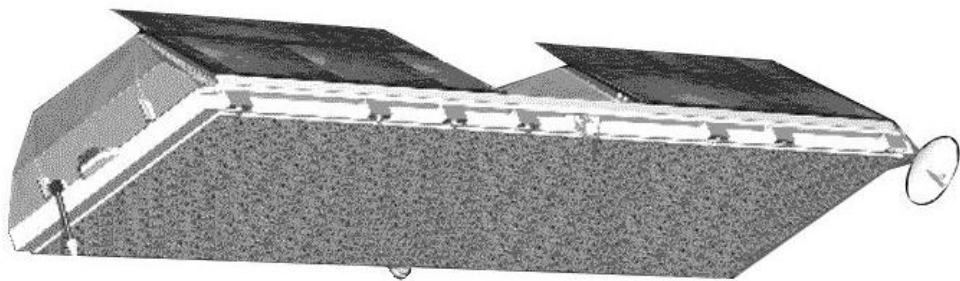


Рис. 11. PCA TerraSAR-L

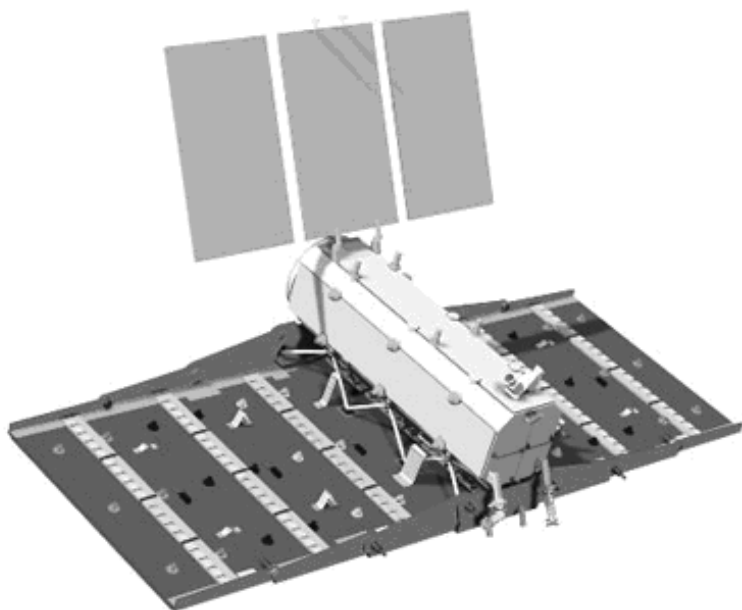


Рис. 12. PCA SAOCOM

Yaogan 1, 3, 6, 9, 10 — разведывательные РСА КНР. Были выведены на орбиты высотой 500...650 км с 2006 по 2010 г. Данные об этих РСА засекречены, однако известно, что *Yaogan 1*, внешний вид которого приведен на рис. 13, работает в L-диапазоне. Поэтому можно предположить, что все созвездие РСА также работает в L-диапазоне. Последний запущенный в 2011 г. *Yaogan 13* принято относить ко второму поколению китайских РСА — возможно, они работают в другом частотном диапазоне. Предполагается, что на данный момент новые китайские РСА могут обеспечивать разрешение вплоть до 1,5 м.

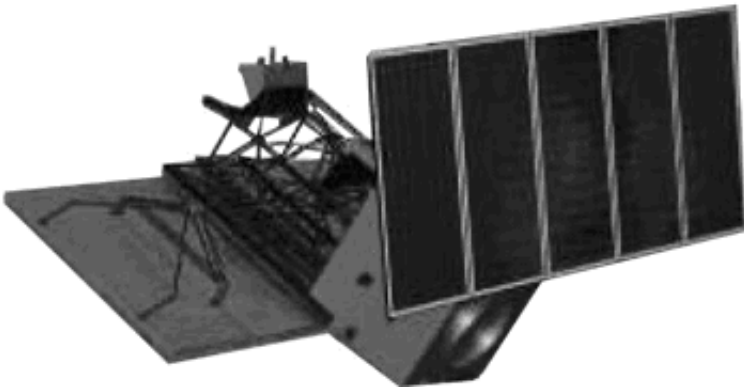


Рис. 13. РСА Yaogan-1

Двухчастотные РСА. В космических РСА возможна реализация многочастотного зондирования. Причем многочастотное зондирование может быть как синхронным (с использованием многочастотных РСА) [7], так и несинхронным (с комбинацией изображений, полученных одночастотными РСА в разное время наблюдений). Многочастотное зондирование дает больше информации о наблюдаемом объекте вследствие того, что изобразительные свойства различных диапазонов отличаются.

Смотр-SP — проект двухчастотного космического РСА, работающего в S- и P-диапазонах. РСА предназначен для регионального землеобзора и мониторинга объектов и территорий [1]. Сигналы P-диапазона хорошо применимы для подповерхностного зондирования.

В проекте предусматривается использование АФАР-ГЗА с рефлектором с расчетными размерами 10×5 м и совмещенным двухчастотным АФАР-облучателем. Благодаря использованию АФАР-ГЗА упрощается реализация поляриметрических режимов в РСА, возможно гибкое управление лучами. Это позволяет вместо широкозахватного режима Скансар, в котором ухудшается разрешение по азимуту, использовать маршрутный многолучевой режим (ММЛР) с азимутальным разрешением $5 \dots 10$ м в широкой полосе съемки.

Таким образом, в «Смотр-SP» реализованы следующие режимы работы: ПР, МР, обзорный широкозахватный режим ММЛР, поляриметрические режимы.

Тактико-технические характеристики «Смотр-SP» приведены в табл. 3.

Основные тенденции развития РСА. Совершенствование космических РСА направлено на:

- повышение информативности радиолокационных изображений (РЛИ);
- увеличение полосы обзора;

- создание трехмерных радиолокационных портретов;
- повышение оперативности наблюдения.

Повышение информативности радиолокационного изображения (РЛИ) в космических РСА можно достичь за счет реализации следующих мер:

1) расширение полосы зондирующего сигнала, что ведет к увеличению разрешения по углу места. Так, в проектируемом TerraSAR-X2 планируется использовать сигналы с полосой 600 МГц. Перспективным является цифровое формирование ДНА широко- и сверхширокополосных радаров;

2) использование многочастотных РСА. Одновременная съемка в различных частотных диапазонах значительно увеличивает информативность РЛИ. Так, X-диапазон наиболее пригоден для видовой разведки и выявления малоразмерных объектов, в то время как более низкочастотные диапазоны лучше подходят для обнаружения техники в лесу, оценки биомассы и растительного покрова. Альтернативой использованию многочастотных РСА является комплексирование методов тематической обработки с использованием РЛИ, полученных в различных частотных диапазонах разными РСА;

3) реализация полнополяриметрических режимов работы РСА. РЛИ, полученные при съемке в таком режиме, позволяют выявить поляризационные характеристики наблюдаемых объектов;

4) применение режима двойного приема. Это позволяет двукратно увеличить разрешение РСА, однако снижает энергетический потенциал радиолокатора на 3 дБ.

Увеличение полосы обзора РСА, или расширение углов сканирования, связано с применением сложных антенных систем. В настоящее время наибольшие возможности по управлению лучом предоставляют АФАР и АФАР-ГЗА. Последние чаще используются на малых КА.

Интерферометрия позволяет создавать трехмерные радиолокационные портреты и выявлять форму объектов. Это, в свою очередь, дает возможность применять автоматические методы классификации объектов по их радиолокационным портретам. Интерферометрию также используют для построения карт рельефа и измерения скоростей движущихся объектов. Так, тандем РСА TerraSAR-X и TanDEM-X используется для построения трехмерной карты земной поверхности.

Повышение оперативности радиолокационного наблюдения особенно актуально для решения задач разведки и достигается за счет:

- увеличения численности орбитальной группировки РСА;
- расширения полосы съемки до 600 км и более;
- увеличения времени съемки на одном витке до 20% и более.

Важно отметить, что максимальный объем радиолокационной информации, накапливаемый космическим РСА за виток, может

ограничиваться пропускной способностью каналов связи и доступным временным интервалом для передачи информации. Поэтому совершенствование каналов связи имеет большое значение для дальнейшего развития РСА. Так, США для работы своих военных КА использует созвездие спутников-ретрансляторов, находящихся на высоко-эллиптической и гелио-стационарных орбитах. Это позволяет существенно увеличить доступное время передачи информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др. / Под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
3. Сборник рабочих материалов по Международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра (с учетом изменений, принятых ВКР-2007: Т. 1–4. – М.: НПФ «Гейзер», 2009.
<http://www.geyser.ru/rus/products>
4. Космическая съемка Земли. Космическая радиолокационная съемка поверхности Земли. Справочно-аналитическое издание/ Под ред. Ю.А. Подъездкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 66 с.
5. Крупногабаритные гибридно-зеркальные антенны с облучателями в виде АФАР / Г.В. Савосин, А.В. Серяпин, В.К. Шило и др. // Решетневские чтения: Материалы X Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2007. – С. 166–167.
6. <https://directory.eoportal.org>
7. Спутники радиолокационного зондирования Земли // Спутниковые системы связи и вещания. Приложение № 1. – 2000. – 86 с.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012