

# ПОСТРОЕНИЕ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

## CONSTRUCTION OF SYNTHETIC ANTENNA APERTURE RADARS FOR SPACE-BASED EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS: FOREIGN EXPERIENCE

С. В. ПАВЛОВ

АО «НПП «Пульсар», Москва

S. V. Pavlov

JSC "Scientific Production Enterprise "Pulsar", Moscow

**Аннотация.** Рассматривается развитие зарубежных систем дистанционного зондирования Земли космического базирования с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой антенн. Основное внимание уделяется рассмотрению типов и характеристик антенн радиолокаторов с синтезированной апертурой и их поэтапному развитию. Все радиолокаторы с синтезированной апертурой разделены условно на четыре поколения, отличающиеся временными рамками начала эксплуатации и характеристиками, достижимыми в системах. Описываются перспективы развития антенн радиолокаторов с синтезированной апертурой.

**Ключевые слова:** радиолокаторы с синтезированной апертурой, дистанционное зондирование Земли, антенны радиолокаторов с синтезированной апертурой, антенны космических аппаратов, активная фазированная антенна решетка, космические аппараты дистанционного зондирования Земли, бистатический режим, интерферометрия.

Для цитирования: Павлов С. В. Построение радиолокаторов с синтезированной апертурой антенн для систем дистанционного зондирования Земли космического базирования: зарубежный опыт // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 21–35.

**Annotation.** The article discusses the development of foreign space-based Earth remote sensing systems using synthetic antenna aperture radars. The main focus is on the types and characteristics of synthetic aperture radar antennas and their phased development. All synthetic aperture radars are conditionally divided into four generations, differing in the time frame of the start of operation and the characteristics achieved in the systems. The article describes the prospects for the development of synthesized aperture radar antennas.

**Key words:** synthetic aperture radars, remote sensing of the Earth, synthetic aperture radar antennas, spacecraft antennas, active phased array antenna, remote sensing satellites, bistatic mode, interferometry.

For citation: Pavlov S. V. Construction of synthetic antenna aperture radars for space-based earth remote sensing systems: foreign experience // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 21–35.

### Введение

Дистанционное зондирование в широком смысле – это получение любыми неконтактными методами информации о поверхности Земли, объектах на ней или в ее недрах. Физической основой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются измерения различных количественных характеристик полей (электромагнитного, реже – гравитационного) с авиационных и космических носителей. Однако обычно к данным дистанционного зондирования относят только те, которые позволяют получить изображение земной поверхности в каких-либо участках электромагнитного спектра.

Дистанционное зондирование Земли из космоса начало энергично развиваться в 1960-х гг., в период холодной войны. Первыми космическими аппаратами (КА) с возможностью мониторинга земной поверхности запустили в США.

### Системы обзора Земли оптического диапазона

После окончания Второй мировой войны мир разделился на два лагеря – капиталистический и социалистический, начался период холодной войны. Противоборствующие стороны пытались узнать о местонахождении и количестве вооружения противника. Первое время самолеты США получали разведданные с помощью высоко летающих самолетов, с которых проводили фотосъемку местности. После того, как у советского государства появилась возможность сбивать данный тип самолетов, США решили запустить КА с возможностью фотосъемки местности. Такими КА с системой обзора Земли оптического диапазона стали КА космической программы «Корона» (CORONA).

**CORONA.** К разработке космической программы CORONA США приступили в 1956 г. Она требовалась

для проведения разведки территорий СССР и ее союзников. В 1960 г. началась эксплуатация системы. Благодаря ей за один полет были получены данные о шестидесяти четырех советских аэродромах и двадцати шести зенитно-ракетных комплексах [1]. Передача снимков на Землю осуществлялась сбрасыванием отнятой фотопленки, которую перехватывали с помощью самолета.

Зондирование оптическим методом в данной системе не позволяло использовать ее в условиях облачности и отсутствия солнечного света. В связи с этими проблемами возникла необходимость перейти от систем, работающих в видимом спектре частот, к радиосистемам ДЗЗ. Стоит отметить, что системы оптического диапазона частот и по сей день разрабатываются и выполняют свои задачи в различных отраслях народного хозяйства [2].

Уникальные свойства радиолокационных снимков, такие как независимость от времени суток, освещенности, наличия облачности и других погодных условий, возможности детального изучения состояния водной поверхности, а также возможности интерферометрической обработки для построения цифровой модели рельефа, еще больше способствовали расширению применения данных ДЗЗ.

### Системы дистанционного зондирования Земли радиодиапазона

За сорокалетнюю историю космической радиолокационной съемки поверхности Земли эксплуатировалось около тридцати типов радиолокационных станций (РЛС), большая часть из которых являлась радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА). В монографии [3] выделены четыре поколения создания и развития космических РСА. Первое поколение систем, начиная с радиолокатора КА «Сисат-А» (SEASAT-A) (1978 г.), было нацелено на оценку потенциальных возможностей РСА космического базирования для решения широкого круга задач, включая видовую разведку, мониторинг морской поверхности, изучение ледового покрова, геологическое и топографическое картографирование [4].

Исторически реализация и освоение космических РСА, которые, в принципе, могут обеспечить пространственное разрешение получаемых снимков до долей метра, можно охарактеризовать четырьмя этапами.

#### Радиолокаторы с синтезированной апертурой первого поколения

К первому поколению РСА относятся радиолокаторы, установленные на космическом аппарате *SEASAT* и многоразовых космических кораблях, так назы-

ваемых «космических членоках» или шаттлах, *Space Shuttle Imaging Radar-A (SIR-A)* (1981 г.) и *Shuttle Imaging Radar-B (SIR-B)* (1984 г.), а также российские (советские) РСА, такие как «Меч-К» (на КА «Космос-1870»), «Меч-КМ» (на КА «Алмаз-1») [3, 5].

Этот этап исследовательский. На нем был накоплен большой экспериментальный опыт, отработаны методы решения задач военной разведки, разработаны методики, а также программные пакеты для обработки и интерпретации получаемых радиолокационных изображений.

**SEASAT.** Первой системой зондирования Земли в радиодиапазоне является американская система *SEASAT* (рис. 1), выведенная на орбиту вокруг Земли 27 июня 1978 г. *SEASAT* – это экспериментальный американский КА океанографического наблюдения. Система была разработана в первую очередь для определения температуры поверхности моря, скорости ветра, параметров атмосферного водяного пара. Она измеряет тепловое микроволновое излучение Земли на пяти частотах с двойной линейной поляризацией (6,6; 10,69; 18; 21 и 37 ГГц) [6].



Рис. 1. Общий вид космического аппарата *SEASAT*:  
1 – солнечные батареи; 2 – антенна радиолокатора с синтезированной апертурой;  
3 – антенны скаттерометра

На рис. 1 видны солнечные батареи 1, антенна PCA 2 и антенны скаттерометра 3.

На борту *SEASAT* были следующие радиосистемы:

- SAR (радар с синтезированной апертурой) – L-диапазон (1,275 ГГц);
- ALT (радиовысотомер) – *Ки*-диапазон (точность по вертикали 10 см);
- сканирующий многоканальный сверхвысокочастотный (СВЧ) радиометр – частоты 6,6; 18; 37; 10,7 и 21 ГГц с полосой съемки 600 км;
- SASS (спутниковый скаттерометр) L-диапазон (1,275 ГГц), определяет точность скорости ветра  $\pm 2$  м/с и направление 20°;
- радиометры оптического и инфракрасного спектров.

Радар с синтезированной апертурой выполнен на основе волноводно-щелевой антенной решетки *L*-диапазона (1,275 ГГц) размером апертуры  $10,74 \times 2,16$  м. В качестве зондирующего сигнала использовался импульсный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с полосой до 19 МГц, поляризация сигналов – горизонтальная длительность ЛЧМ-импульса 33,4 мкс, импульсная мощность 1 кВт, частота повторения зондирующего импульса 1463 – 1640 Гц [7].

Полученные радиолокационные изображения (РЛИ) в *L*-диапазоне волн в разных районах Земли стали основой для развития методов тематической обработки радиолокационной информации. В частности, выяснилась возможность обнаружения по радиолокационным снимкам внутренних волн, создаваемых движением погруженных подводных лодок. Исследования возможностей РЛИ в *L*-диапазоне волн были продолжены с помощью PCA *SIR-A* и *SIR-B* в составе многоразового космического корабля *Space Shuttle*.

***SIR-A* и *SIR-B*.** Исследования, проводимые на КА *SEASAT*, были продолжены на запусках многоразовых космических кораблей с PCA *SIR-A* (1981 г.) и *SIR-B* (1982 г.). По своим характеристикам эти PCA были близки к PCA *SEASAT* с некоторыми отличиями по высоте орбиты, углам падения, полосе съемки и реализуемому разрешению.

В качестве антенн использовались волноводно-щелевые антенны решетки с размерами  $9,4 \times 2,16$  (*SIR-A*) и  $10,7 \times 2,16$  (*SIR-B*) с рабочей частотой 1275 МГц и горизонтальной поляризацией.

#### ***Радиолокаторы с синтезированной апертурой второго поколения***

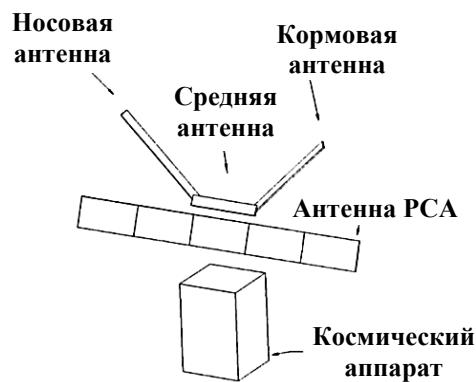
К PCA второго поколения относятся PCA космических аппаратов «ЭРС-1» (*ERS-1*), «ЭРС-2» (*ERS-2*), «ДЖЕРС-1» (*JERS-1*), а также радар с синтезированной апертурой *Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar* (*SIR-C/X-SAR*) многоразового

космического корабля «Индейор» (*Endeavour*). Отличие второго поколения от первого заключается в долговременной работе в штатном эксплуатационном режиме и обеспечении наземной инфраструктурой обработки и распространения информации для широкого круга пользователей [8]. Съемка проводилась, как правило, в одном режиме.

На этом этапе проходило уточнение методик тематической обработки радиолокационных снимков и их применение для решения задач ДЗЗ в различных сферах деятельности. Например, решение задач разведки сухопутных объектов и обеспечение военной операции «Буря в пустыне» во время войны в Ираке реализовывалось системой военных КА США «Ля-кросс» (*Lacrosse*) (запуски в 1988, 1991, 1997, 2000, 2005 гг.) с разрешающей способностью до 0,6 м.

***ERS-1*.** Семейство КА *ERS* разработано Европейским космическим агентством (в проекте принимали участие 13 государств Европы и Канада) и эксплуатировалось с 1991 по 2011 гг. (*ERS-1* – с 1991 по 2000 гг., *ERS-2* – с 1995 по 2011 гг.). КА были разработаны для наблюдения за поверхностью морей. После совершения нескольких витков выяснилось, что КА могут решать некоторые задачи и по обзору суши.

Для получения радиолокационного изображения используется радар с синтезированной апертурой длиной 10 м и шириной 1 м. Электрически антenna состоит из десяти подрешеток, каждая из которых имеет 24 горизонтальных щелевых волновода с 24-мя прорезями в каждом. Подрешетки получают питание с одинаковой амплитудой и фазой. Диаграмма направленности имеет форму веера, что позволяет охватывать полосу Земли шириной 80 км. Радиолокационное изображение имеет разрешение 25 м. Ширина луча составляет  $5,4 \times 0,3$  град., коэффициент усиления (КУ) антенн от 39 до 40 дБи [9]. Система работает в С-диапазоне (5,3 ГГц) частот. Условное расположение антенн показано на рис. 2.



**Рис. 2. Условное расположение антенн на космическом аппарате *ERS-1***

Также на КА установлены еще три плоские антенные решетки, служащие для определения скорости и направления ветра над морем. Они называются носовая, средняя и кормовая антенны. Носовая и кормовая антенны идентичны. Они состоят из двух подрешеток и образуют апертуру размерами  $3,6 \times 0,25$  м. Каждая из подрешеток состоит из 6-ти волноводов с 44-мя прорезями в каждом. Ширина луча составляет  $24 \times 1,2$  град. Средняя антenna также составлена из двух подрешеток и имеет размеры  $2,34 \times 0,25$  м. Подрешетка состоит из 8-ми волноводов с 28-ю прорезями.

Все четыре волноводные решетки имеют резонансный тип, то есть расстояние между щелями равно половине длины волны и используются короткозамкнутые концы. Излучающие щели смешены от центра волновода. Волноводы питаются по средствам перпендикулярно расположенных питающих волноводов через повернутые под углом соединительные щели. На рис. 3 приведена конструкция питания волноводов.

При данном методе питания амплитуда определяется углом поворота соединительной щели, а фаза – длиной щели, что дает возможность определить амплитудно-фазовое распределение (АФР) решетки по вертикали. Сдвиг щелей относительно центра волноводов позволяет определить АФР по азимуту.

**JERS.** В 1992 г. Японское агентство аэрокосмических исследований вывело на орбиту КА для дистанционного обзора Земли *JERS*. Программа проходила до 1998 г. КА показан на рис. 4.

В открытых источниках мало информации об антенных системах данного КА. Из имеющихся данных можно привести такие параметры, как диапазон частот (*L*-диапазон 1,275 ГГц), размер фазированной антенной решетки (ФАР) ( $11,9 \times 2,4$  м), поляризацию (горизонтальная на прием и передачу), пространственное разрешение радиолокационного изображения (18 м) и ширину полосы съемки (75 км).

На космическом аппарате также находилась оптическая система, работающая в видимом и инфракрасном диапазоне волн. Оптические оси двух камер были смешены одна относительно другой вдоль линии пути на  $15,3^\circ$ , что позволяло осуществлять непрерывную стереосъемку поверхности Земли [3].

КА функционировал до октября 1998 г., когда произошел отказ бортовой системы электропитания.

**SIR-C/X-SAR.** Космический радар-рефлектор с синтезированной апертурой *SIR-C/X-SAR* (рис. 5) совместный проект *NASA*, Немецкого аэрокосмического центра и Итальянского космического

агентства. Особенностью данной системы является возможность работать в трех диапазонах длин волн и проводить измерения для различных поляризаций на двух из них. Зондирование Земли на разных частотах помогает ученым понять физику некоторых явлений, наблюдавшихся ранее только на одной частоте [10]. В табл. 1 приведены данные о подсистемах, используемых на *SIR-C/X-SAR*.

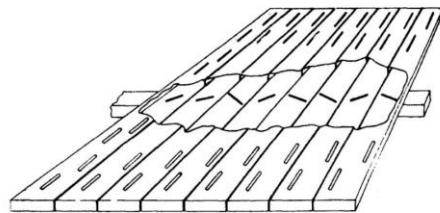


Рис. 3. Конструкция питания волноводов питающим волноводом через соединяющие щели



Рис. 4. Космический аппарат дистанционного зондирования Земли *JERS*



Рис. 5. *SIR-C/X-SAR* в грузовом отсеке космического челнока *Endeavour* во время миссии STS-59, 9 апреля 1994 г.

Таблица 1

Данные о подсистемах *SIR-C/X-SAR*

Название подсистемы	Рабочая длина волны, см	Поляризация (прием/передача)	Антенная система
<i>X-SAR</i>	3,1	V/V	Волноводно-щелевая антенная решетка
<i>SIR-C</i>	5,8	H/H, V/V, H/V, V/H	Антенная решетка из микрополосковых излучателей с двойной поляризацией
	23,5		

Таблица 2

Характеристики системы *SIR-C/X-SAR*

Параметр	L-диапазон	C-диапазон	X-диапазон
Длина волны, м	0,235	0,058	0,031
Ширина полосы, км	15 – 90	15 – 90	15 – 40
Длительность импульса, мкс	33,8; 16,9; 8,5	33,8; 16,9; 8,5	40
Скорость передачи данных, Мбит/с	90	90	45
Формат данных	<i>BFPQ</i> *	<i>BFPQ</i>	<i>BFPQ</i>

\**BFPQ* – блочное квантование с плавающей запятой, форма сжатия данных с 8 до 4 бит на отсчет.

Антенная система *SIR-C* состоит из 2-х плоских антенных решеток (одна для *L*-диапазона, другая для *C*-диапазона). Каждая панель состоит из эквидистантно расположенных микрополосковых антенн с двойной поляризацией, при этом каждый порт поляризации питался от отдельной распределительной сети [11].

Антенна *X-SAR* представляет из себя волноводно-щелевую антенную решетку размерами  $10 \times 0,4$  м.

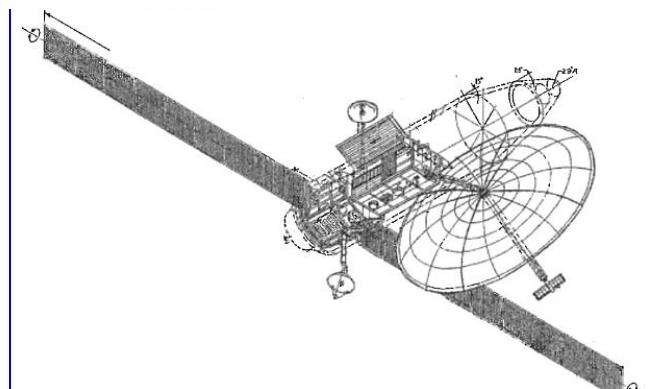
Обе подсистемы могут работать как в автономном, так и совместном режимах. В табл. 2 представлены характеристики системы *SIR-C/X-SAR* [12].

«*Радарсат-1*» (*Radarsat-1*) – коммерческий космический аппарат, спроектированный для интересов широкого круга пользователей. Был выведен на орбиту 4 ноября 1995 г. КА *Radarsat-1* представлен на рис. 6.

Бортовой многорежимный РСА работает в *C*-диапазоне волн (частота 5,3 ГГц, длина волны 5,8 см). РСА оборудован волноводно-щелевой фазированной антенной решеткой размером  $15 \times 1,5$  м. Ширина луча по элевации и азимуту 0,2 и  $3,5 - 6,5^\circ$  соответственно. Поляризация излучения и приема – горизонтальная [3].

*Lacrosse*. Разработка КА в интересах Центрального разведывательного управления США началась в 1978 г. по программе «Индиго» (*Indigo*) [13]. Система предназначалась для решения задач все-погодной круглосуточной детальной видовой разведки стратегических объектов, включая слежение за перемещением мобильных ракетных комплексов и ударных бронетанковых частей вооруженных сил зарубежных стран. До запуска КА военного назначения использовалась информация гражданских КА *SEASAT*, *SIR-A* и *SIR-B*.

Для РСА прорабатывались разные варианты построения антенн. Изначально предполагалось использовать в составе РСА зеркальную антенну с облучателем типа ФАР, представленную на рис. 7 [14]. Рассматривались варианты с зеркалами полукруглой или полуэллиптической формы.

Рис. 6. Космический аппарат *Radarsat-1*Рис. 7. Конструктивная схема космического аппарата *Lacrosse*

Согласно данным [15] использовалась антенна Кассегрена с параболическим зеркалом диаметром 15 – 17 м и с облучателем типа ФАР. Углы обзора находятся в диапазоне 30 – 60°, время перенацеливания – около 15 с.

PCA работает в диапазоне частот 9,5 – 10,5 ГГц (*X*-диапазон), импульсная мощность излучения составляет 1500 Вт при длительности импульса 10 – 50 мкс, средняя мощность излучения равна 400 Вт.

Высокое разрешение по дальности достигается путем использования широкополосных зондирующих импульсов, а по азимуту – большим временем синтеза при работе в прожекторном режиме [3].

#### **Радиолокаторы с синтезированной апертурой третьего поколения**

Начало этого этапа ознаменовалось реализацией миссии по получению топографических данных с помощью радара *Shuttle Radar Topography Mission* (*SRTM*) на борту шаттла *Endeavour*, в ходе которой за 11 суток была осуществлена съемка 80% суши в диапазонах *C* и *X* в интерферометрическом режиме. В результате обработки этих данных была создана широко известная цифровая модель рельефа местности (ЦМРМ). К этому же периоду относятся поляриметрические PCA *C*-диапазона *SAR* на KA *Radarsat-2* и PCA *L*-диапазона *PALSAR* на KA *ALOS* [16].

*Shuttle Radar Topography Mission* – это международное исследование, в ходе которого были получены цифровые модели рельефа в почти глобальном масштабе от 56° южной широты до 60° северной широты. Для предоставления цифровых данных о высоте *SRTM* использует метод, называемый радиолокационной интерферометрией, при котором два радиолокационных изображения формируются антеннами, разнесенными в пространстве на расстояние, называемое интерферометрической базой. Различия между этими изображениями позволяют вычислить высоту поверхности или ее изменение.

Для получения двух радиолокационных изображений, полученных из разных мест, оборудование *SRTM* состояло из набора антенн приемопередатчика радара в грузовом отсеке шаттла и второго набора антенн приемника радара, прикрепленных к концу развертываемой мачты, выступающей на 60 м от шаттла [17]. Антенны радара *SRTM* на космическом корабле *Endeavour* изображены на рис. 8. Таким образом реализуется интерферометрическая схема с «жесткой» базой.



**Рис. 8. Антенны радара SRTM на космическом корабле *Endeavour***

Достоинством однопроходной схемы интерферометрии с «жесткой» базой является то, что две радиограммы (от основного приемника и дополнительного, удаленного на размер базы) формируются одновременно, что исключает влияние на конечные продукты неоднородности среды распространения и факторы временной декорреляции [18].

Недостатком схемы с «жесткой» базой является ограниченный размер базы, что не позволяет получить цифровые модели рельефа местности с ошибками менее 10 м.

Архитектура *SRTM* была основана на приборах *SIR-C/X-SAR*, модифицированных и дополненных для обеспечения однопроходных интерферометрических операций. Полученная новая система состояла из четырех основных подсистем: радиолокатора с синтезированной апертурой *C*-диапазона (*C-RADAR*), радиолокатора с синтезированной апертурой *X*-диапазона (*X-RADAR*), антенно-механической системы (*AMS*) и авионики определения ориентации и орбиты (*AODA*). Три из четырех основных подсистем *C-RADAR*, *X-RADAR* и *AMS* использовали хорошо проверенное оборудование *SIR-C/X-SAR*. *AODA* была недавно разработанной подсистемой. Значительные части *AMS* также были новыми. Уникальные концепции, на которых была построена *AODA* и модифицирована *AMS*, внесли значительный вклад в практический безупречный выполнение миссии *SRTM* [19].

Хотя большая часть радиолокационной системы была унаследована от *SIR-C*, для интерферометрической работы потребовалось несколько новых систем или модификаций предыдущих. *C-RADAR* включал интересную конструктивную особенность – автотрекер луча (АТЛ). Концепция АТЛ, впервые проте-

стированная на испытательном стенде бортового поисково-спасательного комплекса *AIRsar* Лаборатории реактивного движения (*Jet Propulsion Laboratory – JPL*), казалась простой: разделить антенну на правый и левый лучи, сравнить силу сигнала в каждом, затем изменить диаграмму направленности антенны, чтобы уравнять силу сигнала. Это электронное управление лучом могло компенсировать быстрые движения мачты. Тест *AIRsar* показал, что по крайней мере в некоторых ситуациях эта концепция работала. К счастью, мачта оказалась довольно стабильной во время сбора данных, и поэтому АТЛ не использовался.

Основная передающая и приемная антенна *X*-диапазона длиной 12 м и шириной 40 см была установлена на ферменной конструкции антенны радара *C*-диапазона в грузовом отсеке шаттла и механически наклонена на минус 7°, разместив свой 50-километровый луч между 3-м и 4-м лучами *C-Radar*. Основная антенна и электроника *X-SAR* остались почти неизменными с миссии Радиолокационной космической лаборатории (*Spase Radar Laboratory – SRL*), во время которой проходил сбор данных для создания детальных топографических изображений. Новая внешняя приемная антенна была длиной всего 6 м и состояла из шести 1-метровых панелей (запасные части от *SRL*). Она была установлена вместе с внешней электроникой *X*-диапазона на опорной конструкции внешней антенны. На задней стороне шести антенных панелей были прикреплены шесть малошумящих усилителей, по одному на каждую панель. Вместе с шестью управляемыми фазовращателями это позволило осуществлять электронное управление лучом внешней антенны в диапазоне  $\pm 0,9^\circ$  по азимуту. Электронная возможность наведения была разработана для динамического наведения на основе сигнала АТЛ, чтобы оставаться в пределах освещенного пятна на Земле.

Механическая система *SRTM* была основана на системе *SIR-C/X-SAR* со значительными изменениями. Прибор *SIR-C/X-SAR* управлял одним рядом из 18-ти панелей *C*-диапазона и двумя рядами из 9-ти панелей *L*-диапазона. *SRTM* сохранил 18 панелей *C*-диапазона и 6 панелей *L*-диапазона, но поскольку система *L*-диапазона не использовалась, лишние панели были удалены для экономии веса.

***Radarsat-2*** (рис. 9) – канадский космический аппарат дистанционного зондирования Земли, предназначен для замены отработавшего свой ресурс КА *Radarsat-1*.



Рис. 9. Космический аппарат *Radarsat-2*

Антенна радара с синтезированной апертурой (*SAR*) *Radarsat-2* – это современная активная решетка размером  $15 \times 1,4$  м, состоящая из 512-ти 20-элементных подрешеток, каждая из которых подключена к приемо-передающему модулю (ППМ). Высокопроизводительная электроника обеспечивает питание и управление ППМ. Эти блоки вместе с сетями и жгутами радиочастотного делителя мощности смонтированы на четырех интегрированных алюминиевых панелях, которые развернуты на раздвижной опорной конструкции из армированного углеродным волокном пластика [20].

Подрешетка представляет собой легкую многослойную структуру, разработанную для оптимальных характеристик излучения с точки зрения как эффективности апертуры, так и минимальных потерь радиосигнала. Цель проектирования подрешетки была достигнута за счет следующих конструктивных особенностей. Во-первых, концепция конструкции облучателя подрешетки основана на конфигурации подвесных микрополосковых линий. Это обеспечивает минимальные диэлектрические потери, которые ограничиваются только очень низким материалом прокладки. Верхняя и нижняя заземляющие плоскости напечатаны на очень тонкой, термостойкой диэлектрической подложке. Верхняя заземляющая плоскость устраняет паразитное излучение облучателя, поэтому боковые лепестки и кросс-полярное излучение можно эффективно контролировать за счет точной конструкции облучателя. Вокруг каждой заплатки и коаксиального интерфейса установлены подавители мод для предотвращения распространения параллельных мод пластины. В статье [21] подробно описано построение радиотракта антенны *Radarsat-2*.

**PALSAR.** *PALSAR* – система РСА, разработанная Японией. В РСА применена активная фазированная антенная решетка *L*-диапазона (частота – 1270 МГц, длина волны – 23,62 см) размерами  $8,9 \times 3,1$  м. Активная фазированная антенная решетка (АФАР) является усовершенствованным вариантом антенны РСА, работавшей в составе КА *JERS-1*. РСА имеет 80 приемопередающих модулей, что позволяет изменять угол визирования диаграммы направленности антенны в диапазоне от 10 до  $51^\circ$  относительно надира (18 позиций луча).

В табл. 3 приведены данные о системе *PALSAR* [22].

Основные рабочие режимы *PALSAR*: детальный – с пространственным разрешением 10 м и шириной полосы обзора 70 км при использовании на прием и передачу вертикальной (*VV*) или горизонтальной (*HH*) поляризаций, и обзорный режим (*ScanSAR*), разрешение которого составляет 100 м, а ширина полосы покрытия до 350 км при одинаковой поляризации на передачу и прием (*VV* или *HH*) [23].

Для удобства визуального дешифрования РЛИ, а также его регистрации в псевдоцвете, поляризационные составляющие формируют в композитное *RGB*-изображение, например: красный – *HH*, зеленый – *HV*, синий – *VV*.

#### **Радиолокаторы с синтезированной апертурой четвертого поколения**

К космическим радиолокационным системам с синтезированной апертурой четвёртого поколения относятся, например, КА *TerraSAR-X*, КА *Tandem-X*, группировка малых КА *COSMO-SkyMed 1 – 4*, разведывательная спутниковая система *SAR-Lupe*, КА *TecSAR*, группировка космических аппаратов *Sentinel-1*, КА «Кондор-Э». Такие РСА позволяют получать информацию о земной поверхности в различных диапазонах волн: 3 см (*X*-диапазон), 5,6 см (*C*-диапазон), 9,6 см (*S*-диапазон), 23 см (*L*-диапазон) и в перспективе – 70 см (*P*-диапазон).

Таблица 3

#### **Характеристики *PALSAR***

Тип съёмки	Радиолокационный
Рабочий диапазон	<i>L</i> -диапазон
Режим съёмки	<i>Fine Beam (S, D), ScanSAR</i>
Разрешение на местности, м	7, 14, 100, 30
Поляризация	<i>HH/VV/HH+HV/VV+VH</i>
Ширина полосы захвата, км	40, 250, 30
Интерферометрия	Да



Рис. 10. Общий вид космического аппарата *COSMO-SkyMed*

В 2007 г. произошел информационный взрыв в области космических радиолокаторов, когда Германия, Италия, Китай, Япония и Канада вывели на орбиты 9 космических аппаратов с бортовыми радиолокаторами.

***COSMO-SkyMed*** – серия из четырех малых космических аппаратов двойного назначения для наблюдения за Средиземноморским бассейном, финансируемая Итальянским космическим агентством и Министерством обороны Италии. Общий вид КА *COSMO-SkyMed* приведен на рис. 10.

Антенна РСА является АФАР с апертурой около  $5,7 \times 1,4$  м. Антенна разделена на три механические панели, две выдвижные боковые панели и неподвижную центральную панель. Антенна включает 1280 линейных решеток по 12 элементов в каждой, расположенных в 64-х строках и 20-ти столбцах. 32 излучающих элемента сгруппированы в 4 платы, каждая из которых состоит из 8-ми решеток, установленных на одной подрешетке, которая, таким образом, является основой антенны. Изображение антенного полотна показано на рис. 11. Подрешетки расположены в виде двойной решетки в шахматном порядке, чтобы распределить энергию лепестков решетки и снизить их пиковый уровень. Подрешетка представляет собой полнофункциональную активную фазированную решетку и включает в себя:

- 4 излучающих модуля (рис. 12) по 8 линейных решеток каждая, работающие как в *H*-, так и в *V*-поляризации;
- 32 ППМ с двойной поляризацией;
- модуль постоянной временной задержки;
- цифровой контроллер для управления и формирования луча;
- два блока питания.

Подрешетки установлены на алюминиевом каркасе, который также поддерживает механизмы фиксации и развертывания, а также антенный жгут.

Две схемы формирования луча (одна для распределения радиочастотного сигнала приема/передачи, а другая для калибровки) установлены на каркасах трёх панелей. Цифровое управление антенной осуществляется с помощью пяти цифровых шин стандарта *MIL-STD-1553* (российский аналог ГОСТ Р 52070-2003), по одной на каждый столбец из 8-ми подрешеток [24].

В 2018 – 2019 гг. были запущены еще два КА *COSMO-SkyMed* второго поколения, дополняющие группировку четырех КА первого поколения [25].

Группировкой КА *COSMO-SkyMed* реализованы две схемы интерферометрии:

– Тандем. Интерферометрия с использованием двух КА с орбитами, разнесеными на  $0,08^\circ$ . Расстояние между двумя КА составляет 151 км. Такая конфигурация позволяет создавать цифровую карту рельефа местности. При этой схеме декорреляция по времени составляет 20 с [26].

– Тандемоподобная (то есть однодневная интерферометрия). Интерферометрия с использованием двух КА на одной орбите, разнесенных на  $67,5^\circ$  [27]. Конфигурация созвездия КА для реализации тандемоподобной схемы показана на рис. 13.

**TerraSAR-X.** Принципы построения РСА КА *TerraSAR-X* были определены еще в 1994 г. по результатам успешной работы комплекса *SIR-C/X-SAR* на космическом челноке *Endeavour*. В этом комплексе наглядно проявились преимущества РСА с АФАР (*SIR-C*) по сравнению с обычным РСА (*X-SAR*), в котором были использованы пассивная антenna и мощный передатчик. В 1999 – 2000 гг. проведено окончательное проектирование космического аппарата и системы ДЗЗ в целом [28]. Общий вид КА *TerraSAR-X* приведен на рис. 14.

Антenna КА *TerraSAR-X* предназначена для работы в X-диапазоне на центральной частоте 9,65 ГГц с рабочей мгновенной полосой пропускания 150 МГц (экспериментальная частота 300 МГц). Он состоит из резонансной волноводной решетки с двумя линейными поляризациями. Общая излучаемая мощность составляет около 2 кВт. В диапазоне рабочих температур от  $-20$  до  $+60$   $^\circ\text{C}$  антenna обеспечивает превосходную фазовую и амплитудную стабильность, что обеспечивает надлежащую радиометрическую точность радиолокационного прибора и возможность повторной интерферометрии. Распределение апертуры может быть изменено в течение 3,6 мс с произвольной фазой на прием и передачу и амплитуды сигнала передатчика. Поляризация может переключаться независимо

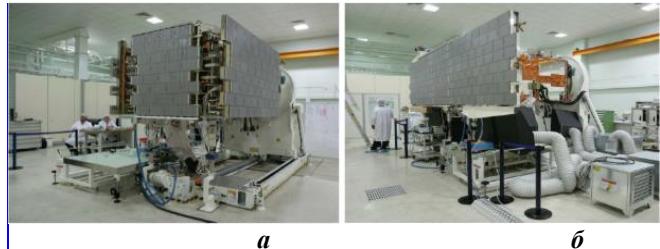


Рис. 11. Изображение активной фазированной антennы решетки космического аппарата *COSMO-SkyMed* в сложенном (а) и развернутом (б) состоянии

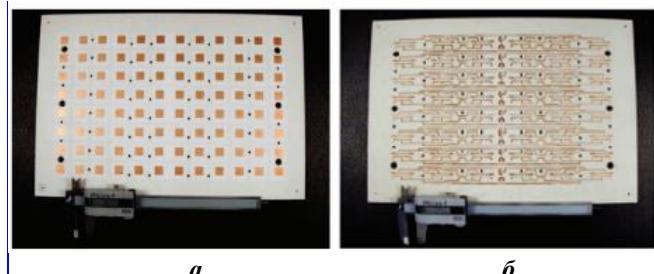


Рис. 12. Излучающий модуль активной фазированной антennы решетки космического аппарата *COSMO-SkyMed*: а – сторона патчей; б – сторона «сети формирования луча»

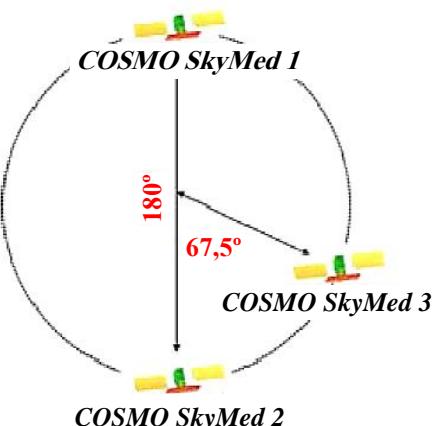


Рис. 13. Конфигурация созвездия космических аппаратов для реализации тандемоподобной схемы



Рис. 14. Общий вид КА *TerraSAR-X*: 1 – антenna радиопередатчика; 2 – выносная штанга; 3 – антenna радиолокатора с синтезированной апертурой; 4 – GPS-приемник; 5 – солнечные батареи

для приемника и передатчика от импульса к импульсу. Интегрированное диагностическое и калибровочное оборудование позволяет в полете определять распределение апертуры [29] и частотную характеристику обратной связи антенны. Экспериментальный режим двойной приемной антенны позволяет разделить приемную апертуру на две половины для проведения полных поляриметрических измерений, идентификации движущихся целей и интерферометрии вдоль траектории. Архитектура антенны, размер (мм) излучающего отверстия передней панели и его подсекций показан на рис. 15.

АФАР РСА, размером  $4,8 \times 0,7$  м, состоит из 12-ти панелей, включающих 384 приемопередающих модуля с волноводно-щелевыми излучателями, которые передают и принимают радиосигналы двух видов поляризации (горизонтальной *HH* и вертикальной *VV*). Ширина ДНА  $0,33^\circ$  по азимуту и  $2,3^\circ$  по углу места. Электронное наведение луча осуществляется в двух плоскостях в пределах  $\pm 0,75^\circ$  по азимуту и  $\pm 20^\circ$  по углу места. Используемый в передатчике генератор зондирующих сигналов с цифровым управлением обеспечивает генерацию восьми типов радиосигналов с различной длительностью и шириной спектра от 5 до 300 МГц. Типы радиосигналов могут изменяться от периода к периоду (частота повторения импульсов 3 – 6,5 кГц).

Апертура панели разделена на 32 секции, контролируемые по амплитуде и фазе, которые называются подрешетками. Каждая подрешетка состоит из двух щелевых волноводов, один для горизонтальной, а другой для вертикальной поляризации, и подключена к передающему модулю (рис. 16). Общее количество подрешеток составляет  $32 \times 12 = 384$ .

Панель также содержит две радиочастотные распределительные сети: одну для приема радиолокационного сигнала и одну для калибровки и диагностики. Блок питания панели обеспечивает подачу трех напряжений постоянного тока на модули передатчика. Распределение радиочастот осуществляется с помощью микрополосковых разделителей на уровне панели и коаксиальных кабелей между панелями и центральной электроникой. Каждая панель антенны оснащена одним дополнительным передающим модулем с холодным резервированием, работающим в качестве предварительного усилителя для компенсации потерь в проводке между центральной электроникой и передающими модулями [30].

**SAR-Lupe** – серия из пяти немецких малых космических аппаратов военного назначения, запущенных в период с 2006 по 2008 гг. на три околополярные орбиты [31]. Внешний вид космического аппарата приведен на рис. 17.

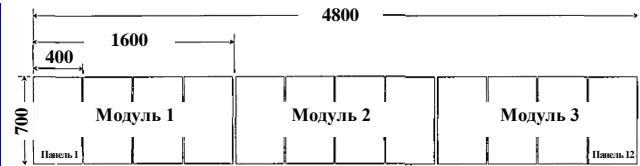


Рис. 15. Архитектура антенны космического аппарата *TerraSAR-X*

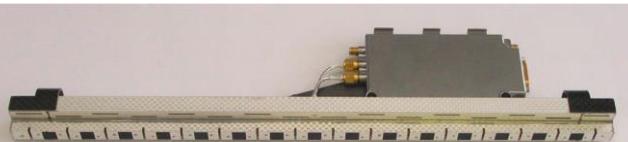


Рис. 16. Двухполяризационная подрешетка с приемопередающим модулем

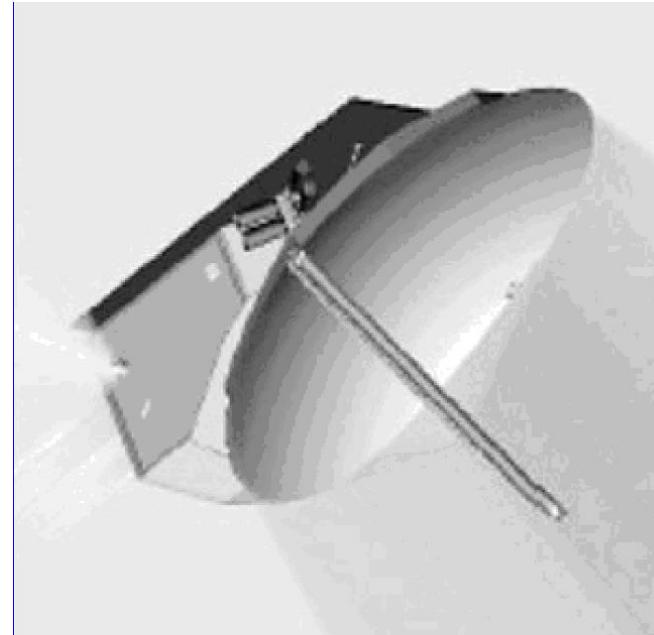


Рис. 17. Радиолокатор с синтезированной апертурой космического аппарата *SAR-Lupe*

В качестве антенны РСА используется параболическое зеркало размерами  $3,7 \times 2,7$  м.

Для экономии электропитания в *SAR-Lupe* используют режимы с короткими полосами съёмки. Для этой же цели в качестве усилителей зондирующего сигнала используются электронно-вакуумные приборы с коэффициентом полезного действия существенно лучшим по сравнению с твердотельными приёмопередающими модулями АФАР. Но при этом возникают проблемы с реализацией ширины полосы захвата в сотни километров, необходимой для обеспечения заданной оперативности наблюдения. В определённой мере эта важная для многих применений задача может быть решена созданием многоспутниковых (до 5-ти единиц) орбитальных

группировок малых космических аппаратов КА. Правда, экономически это не самый выгодный метод [32].

### Заключение

Дистанционное зондирование Земли из космоса началось в конце 60-х гг. прошлого века с систем, использующих оптические методы (*CORONA*). Их применение было продиктовано необходимостью военной разведки территории других государств. На этом этапе были получены первые практические навыки разработки систем дистанционного зондирования Земли.

У данных систем были существенные недостатки, так как их применение было невозможно в ночное время и в плохих метеорологических условиях, к которым относятся облачность, дождь, снег, туман и другие погодные условия. Этих недостатков лишены радиолокационные системы. Они стали чаще применяться для ДЗЗ, но системы оптического диапазона продолжают разрабатывать и по сей день.

Системы РСА первого поколения отличаются коротким временем их использования и относительно низкой рабочей частотой (1 – 3 ГГц). Антенны РСА представляют собой волноводно-щелевое полотно размерами около  $10 \times 2$  м. Разрешающая способность систем первого поколения 15 – 30 м.

Развитие второго поколения РСА проходило в 90-е гг. прошлого столетия. У этого поколения РСА в отличие от первого появляется наземная инфраструктура обработки информации, что позволяет увеличить срок эксплуатации систем. В этом поколении впервые появляется разделение антенной решетки на подрешетки, имеющие собственные системы питания и управления. Впервые на КА появляется группа антенн РСА, работающих на разных частотах. В качестве антенн применяются как волноводно-щелевые антенные решетки, так и антенные решетки из микрополосковых излучателей.

Начало развития третьего поколения РСА ознаменовалось реализацией миссии, в рамках которой были созданы цифровые модели рельефа. На этом этапе впервые был опробован метод радиолокационной интерферометрии, при котором два радиолокационных изображения формируются антennами, разнесенными в пространстве на расстояние, называемое интерферометрической базой. Различия между этими изображениями позволяют вычислить высоту поверхности или ее изменение. Разрешающая способность систем доходит до 5 м.

К современным системам РСА относятся РСА четвертого поколения. Условно их можно отнести к временной рамке 2007 г. – настоящее время. Отличительной особенностью данного поколения РСА является хорошая разрешающая способность, для некоторых типов РСА она составляет менее 1 м.

В табл. 5 приведены основные характеристики АФАР некоторых РСА космического базирования.

Анализ табл. 5 и 6 показывает, что в качестве антенн систем РСА применяются в основном АФАР, но также используются зеркальные антенны.

### Перспективы развития

К настоящему времени создано большое число РСА космического базирования как в нашей стране, так и за рубежом. Обзор систем РСА показал, что они в своем составе преимущественно используют активные фазированные антенные решетки. Данная тенденция сохранится и впредь, так как благодаря использованию АФАР возможно:

- электронное сканирование по углу места и по азимуту;
- использовать широкополосные сигналы, что позволит достичь высокой разрешающей способности (менее метра);
- использовать большее количество режимов съемки, отличающихся полосой захвата и пространственным разрешением;
- работа в нескольких поляризационных конфигурациях;
- гибкость по излучаемой мощности, что позволяет увеличить длительность использования РСА;
- решать задачи пассивного радиометрического наблюдения;
- решать задачи селекции движущихся объектов на земной поверхности.

Вторым существенным моментом дальнейшего развития систем РСА является переход к цифровому формированию луча и обработки сигнала. В [33] рассматривается перспектива создания АФАР космического базирования с цифровым формированием луча. Авторы описывают технические трудности и системные проблемы проектирования РСА с использованием технологии цифрового формирования группы лучей и предполагают, что в ближайшее время подобных РСА космического базирования не появится.

Кроме АФАР используются в качестве антенн РСА и другие типы антенн. В табл. 6 приведены характеристики систем РСА.

**Таблица 5**
**Основные характеристики активных фазированных антенных решеток некоторых радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования**

Наименование КА, страна, год запуска, высота орбиты	Параметры АФАР			
	Тип излучателей, число каналов, поляризация	Размеры, м	Максимальная пиковая мощность излучения, Вт	Диапазон частот
<i>SEASAT</i> , США, 1978 г., 800 км	Микрополосковые, 1024 канала, «H/H»	11 × 2,2	1100	<i>L</i>
<i>ERS-1</i> , ЕКА, 1991 г., 785 км	Волноводно-щелевые, «V/V»	10 × 1,0	4800	<i>C</i>
<i>JERS-1</i> , Япония, 1992 г., 568 км	Нет данных, «H/H»	11,9 × 2,4	1500	<i>L</i>
<i>SIR-C/X/L</i> , США, 1994 г., 230 км	Микрополосковые, 252 ( <i>L</i> ) и 504 ( <i>C</i> ) канала, «H/H, V/V, H/V, V/H»	12 × 2,95	4400	<i>L</i>
	Волноводно-щелевые (пассивная антenna решетка), 1 канал, «V/V»	12 × 0,75	1200	<i>C</i>
<i>EnviSat</i> , ЕКА, 2002 г., 800 км	Микрополосковые, 320 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H»	10,0 × 1,3	1400	<i>C</i>
<i>TerraSAR-X</i> , Германия, 2007 г., 515 км	Волноводно-щелевые, 384 канала, «H/H, V/V, H/V, V/H»	4,8 × 0,8	2260	<i>X</i>
<i>TerraSAR-L</i> , Германия, 2008 г., 629 км	Микрополосковые	11,0 × 2,9	4740	<i>L</i>
<i>COSMO-SkyMed</i> , Италия, 2007 г., 620 км	Микрополосковые, 1280 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H»	5,7 × 1,4	5100	<i>X</i>
<i>RISAT-1</i> , Индия, 2012 г., 536 км	Микрополосковые, 288 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H», «H/H + H/V», «V/V + V/H»	6,0 × 2,0	2880	<i>C</i>
<i>Sentinel-1</i> , ЕКА, 2014 г., 693 км	Волноводно-щелевые, 280 каналов, «H/H, V/V» или «H/H + H/V», «V/V + V/H»	12,3 × 0,82	4370	<i>C</i>
<i>PALSAR-2</i> , Япония, 2014 г., 628 км	Микрополосковые, 1080 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H», «H/H + H/V», «V/V + V/H»	9,9 × 2,9	5100	<i>L</i>

**Таблица 6**
**Основные характеристики зеркальных антенн радиолокаторов с синтезированной апертурой**

Наименование КА, страна, год запуска	Высота орбиты, км	Тип антенны и размеры, м	Энергопотребление, Вт	Диапазон частот
<i>SAR-Lupe</i> , Германия, 2006 г.	500	Параболическое зеркало 3,7 × 2,7	250	<i>X</i>
<i>TecSAR</i> , Израиль, 2008 г.	550	Параболическое зеркало диаметром 3	*	<i>X</i>
<i>RISAT-2</i> , Индия, 2009 г.	Точная копия <i>TecSAR</i>			
<i>Lacrosse</i> , США, 1988 г.	*	Зеркальная антенна Кассегрена диаметром 15 – 17 м и облучателем в виде АФАР**	*	<i>X</i>
<i>FIA Radar</i> , США, 2010 г.	1100	*	*	<i>X</i>

\*нет точных данных, \*\*предположения экспертов.

Также авторы [33], рассматривая систему распределения СВЧ-энергии, выделяют волны оптического диапазона и утверждают, что комбинированное применение цифровых и оптических методов обработки сигнала приведет к высокому быстродействию.

Что удивительно, но анализируя современные разработки, можно прийти к выводу, что существует тенденция разделения космических аппаратов по номенклатуре рабочих частот (например, *TerraSAR-X* и *TerraSAR-L* или *COSMO-SkyMed-C*, *COSMO-SkyMed-L* и *COSMO-SkyMed-X*).

Поэтому, обобщая вышесказанное, антenna перспективных РСА должна быть больших размеров, с возможностью излучения и приема всех видов поляризационных конфигураций сигнала. В качестве зондирующего сигнала будет использоваться широкополосный ЛЧМ-сигнал. Схемы формирования диаграммы направленности, распределения СВЧ-энергии и обработки сигнала будут выполнены с использованием цифровых и оптических методов. Космические аппараты космических группировок ДЗЗ будут иметь системы РСА с индивидуальной рабочей частотой.

### Список источников

1. Baumann Paul R. Geo/SAT 2. History of remote sensing, satellite, imagery, part 2 [Электронный ресурс] // Aakash.Avinash : [сайт]. 2012. URL : <https://bduremotesensing.blogspot.com/2012/08/geosat-2-history-of-remote-sensing.html> (дата обращения: 02.10.2024).
2. Костров В. В., Толстов Е. Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // VII Всероссийские Армандовские чтения: молодая школа, Муром, 27–29 июня 2017 года. Муром : Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», 2017. С. 76–113.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.] ; под ред. В. С. Вербы. М. : Радиотехника, 2010. 680 с.
4. Коберниченко В. Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли : [учеб. пособие] / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 220 с.
5. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Космические радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенн // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн : Конспекты лекций. Всероссийские открытые Армандовские чтения : молод. школа. Муром, 2022. С. 5–20.
6. Njoku E., Christensen E., Cofield R. The Seasat Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) : Antenna Pattern Corrections – Development and Implementation // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1980. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 125–137. DOI : 10.1109/JOE.1980.1145460.
7. Jordan R. L. The SEASAT-A Synthetic Aperture Radar System // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1980. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 154–164. DOI : 10.1109/JOE.1980.1145451.
8. Булыгин М. Л. Многолучевые режимы съемки в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой: дис. ... кандидата технических наук: 05.12.14. М., 2018. 154 с.
9. Petersson R., Ingvarson P. The Planar Array Antennas for the European Remote Sensing Satellite ERS-1 // 1988 18th European Microwave Conference. Stockholm, Sweden, 1988. Pp. 289–294. DOI : 10.1109/EUMA.1988.333830.
10. Jordan R. L., Huneycutt B. L., Werner M. The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar system // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33. Iss. 4. Pp. 829–839. DOI : 10.1109/36.406669.
11. NASA Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) Guide [Электронный ресурс] // Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. 2018. URL : <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-radar-nasa-sir-c-guide#overview> (дата обращения: 24.10.2024).
12. What is SIR-C/X-SAR? [Электронный ресурс] // SIR-C [сайт]. URL : <https://courses.cs.umbc.edu/graduate/676/term%20project/files/040.html> (дата обращения: 24.10.2024).
13. Космическая съемка Земли 2007–2008 гг. Ежегодник Справочные данные и дополнения по спутникам съемки Земли. Справочно-аналитическое издание / Под ред. Ю. А. Подъездкова. М. : Радиотехника, 2008. 275 с.
14. Спутники радиолокационного зондирования Земли. Приложение № 1 на CD к Ежегоднику «Спутниковые системы связи и вещания» / Составители Е. А. Костюк и А. А. Кучайко. М. : ИПРЖ «Радиотехника», 2000. 86 с.
15. Космическая съемка Земли, 2004 – 2005 : [ежегодник]. – 3: Космическая радиолокационная съемка поверхности Земли. Справочно-аналитическое издание / Под ред. Ю. А. Подъездкова. М. : Радиотехника, 2004. 66 с.: ил.
16. Трошко К. А. Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования : дис... кандидата географических наук : 25.00.33. М., 2018. 158 с.
17. Cowan D., Cooper G. The Shuttle Radar Topography Mission – A New Source of Near-Global Digital Elevation Data // Exploration Geophysics. 2005. Vol. 36. Iss. 4. Pp. 334–340. DOI : 10.1071/EG05334.
18. Шимкин П. Е. Однoproходный бортовой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой антennы переднейбокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности : дис. ... кандидата технических наук : 05.12.14. М., 2018. 200 с.
19. The Shuttle Radar Topography Mission / Tom G Farr [et. al] // Rev. Geophys. 2007. Vol. 45. Iss. 2. DOI : 10.1029/2005RG000183.

20. Riendeau S., Grenier C. RADARSAT-2 Antenna // IEEE Aerospace Conference, 03-10 March 2007, Big Sky, MT, USA. 2007. Pp. 1–9. DOI : 10.1109/AERO.2007.352861.
21. Uher J., Grenier C., Lefebvre G. RADARSAT-2 SAR antenna // Canadian Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 287 – 294 DOI : 10.5589/m04-009.
22. ALOS-2 (PALSAR-2) DAICHI-2 [Электронный ресурс] // ООО «ГЕО Иннотер» : [сайт]. 2000–2025. URL : <https://innoter.com/sputniki/alon-palsar/> (дата обращения: 27.10.2024).
23. Космическая съемка Земли. Космические системы радиолокационной съемки земной поверхности : 2007–2008 ; Научно-техническое справочно-аналитическое издание с приложением на СД. Вып. 3 / гл. ред. Ю. А. Сорокин. М. : Радиотехника, 2008. 86 с. : ил.
24. COSMO-SkyMed Active Phased Array SAR Instrument / Capece P. [et. al.] // 2008 IEEE Radar Conference, 26–30 May 2008. Rome, Italy, 2008. Pp 1–4. DOI : 10.1109/RADAR.2008.4720773.
25. The COSMO-SkyMed second generation SAR antenna electrical power chain and platform power distribution / Scorzafava E. [et. al.] // E3S Web of Conferences 11th European Space Power Conference. 2017. Vol. 16. Pp 1–9. DOI : 10.1051/e3sconf/20171613006.
26. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth / Covello F. [et. al.] // Journal of Geodynamics Elsevier. 2010. Vol. 49. Iss. 3–4. Pp. 171–180. DOI : 10.1016/j.jog.2010.01.001.
27. One-day interferometry results with the COSMO-SkyMed constellation / Covello F. [et. al.] // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010. Pp. 4397–4400. DOI : 10.1109/IGARSS.2010.5652236.
28. Бурцев Ю. В. Внутренняя калибровка радиолокаторов космического базирования. Зарубежный опыт // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. М. : АО «НПП «Пульсар», 2023. Вып. 3 (270). С. 16–24.
29. Soualle F., Stangl M. Correlation Based Characterization of Phased Array Components // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14–17 October 2003 Boston, MA, USA. 2003. Pp. 235–240. DOI : 10.1109/PAST.2003.1256987.
30. Stangl M., Werninghaus R., Zah R. The TERRASAR-X active phased array antenna // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14–17 October 2003 Boston, MA, USA. 2003. Pp. 70–75. DOI : 10.1109/PAST.2003.1256959.
31. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития / М. И. Нониашвили [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. С. 94–114.
32. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов / С. Л. Вногченко [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. М., 2013. Т. 134. № 3. С. 21–26.
33. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В. В. Груздов [и др.]. М. : ТЕХНОСФЕРА, 2019. 482 с.

### Reference

1. Baumann Paul R. Geo/SAT 2. History of remote sensing, satellite, imagery, part 2 [Electronic resource] // Aakash.Avinash : [website]. 2012. URL : <https://bduremotesensing.blogspot.com/2012/08/geosat-2-history-of-remote-sensing.html> (date of access: 02.10.2024).
2. Kostrov V. V., Tolstov E. F. Problems of Earth Remote Sensing Using High-Resolution Space-Based SARs // VII All-Russian Armandov Readings: Young School, Murom, 27–29 June 2017. Murom : Murom Institute (Branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stolletov", 2017. Pp. 76–113.
3. Space-based Earth Observation Radar Systems / V. S. Verba [et al.] ; edited by V. S. Verba. M. : Radiotekhnika, 2010. 680 p.
4. Kobernichenko V. G. Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth : [textbook. manual] / Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Federation, UrFU. Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016. 220 p.
5. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Space-based radar systems with a synthetic aperture antenna // Problems of remote sensing, propagation, and diffraction of radio waves : Lecture notes. All-Russian Open Armand Readings : Young School.. Murom, 2022. Pp. 5–20.
6. Njoku E., Christensen E., Cofield R. The Seasat Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) : Antenna Pattern Corrections – Development and Implementation // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1980. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 125–137. DOI : 10.1109/JOE.1980.1145460.
7. Jordan R. L. The SEASAT-A Synthetic Aperture Radar System // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1980. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 154–164. DOI : 10.1109/JOE.1980.1145451.
8. Bulygin M. L. Multipath Imaging Modes in Space-Based Synthetic Aperture Radars : PhD thesis in Engineering : 05.12.14. Moscow, 2018. 154 p
9. Petersson R., Ingvarson P. The Planar Array Antennas for the European Remote Sensing Satellite ERS-1 // 1988 18th European Microwave Conference. Stockholm, Sweden, 1988. Pp. 289–294. DOI : 10.1109/EUMA.1988.333830.
10. Jordan R. L., Huneycutt B. L., Werner M. The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar system // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33. Iss. 4. Pp. 829–839. DOI : 10.1109/36.406669.
11. NASA Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) Guide [Electronic resource] // Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. 2018. URL : <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-radar-nasa-sir-c-guide#overview> (date of access: 24.10.2024).
12. What is SIR-C/X-SAR? [Электронный ресурс] // SIR-C [сайт]. URL : <https://courses.cs.umbc.edu/graduate/676/term%20project/files/040.html> (date of access: 24.10.2024).

13. Space Earth Survey 2007–2008. Yearbook Reference Data and Additions on Earth Survey Satellites. Reference and Analytical Publication / Edited by Yu. A. Pod'ezdkova. M. : Radiotekhnika, 2008. 275 p.
14. Earth Radar Reconnaissance Satellites. Appendix No. 1 on CD to the Yearbook "Satellite Communication and Broadcasting Systems" / Compilers E. A. Kostyuk and A. A. Kucheyko. M. : Radiotekhnika, 2000. 86 p.
15. Space Earth Survey, 2004 – 2005 : [yearbook]. – 3: Space Radar Survey of the Earth's Surface. Reference and Analytical Publication / Edited by Yu. A. Podezdkova. M. : Radiotekhnika, 2004. 66 p. : ill.
16. Troshko K. A. Development of a methodology for using radar data for thematic mapping : PhD thesis in Geotechnical Sciences: 25.00.33. M., 2018. 158 p.
17. Cowan D., Cooper G. The Shuttle Radar Topography Mission – A New Source of Near-Global Digital Elevation Data // Exploration Geophysics. 2005. Vol. 36. Iss. 4. Pp. 334–340. DOI : 10.1071/EG05334.
18. Shimkin P. E. Single-pass on-board interferometric radar with a front-side synthetic aperture antenna for assessing the topography of the underlying surface : PhD thesis in Engineering: 05.12.14. M., 2018. 200 p.
19. The Shuttle Radar Topography Mission / Tom G Farr [et. al] // Rev. Geophys. 2007. Vol. 45. Iss. 2. DOI : 10.1029/2005RG000183.
20. Riendeau S., Grenier C. RADARSAT-2 Antenna // IEEE Aerospace Conference, 03–10 March 2007, Big Sky, MT, USA. 2007. Pp. 1–9. DOI : 10.1109/AERO.2007.352861.
21. Uher J., Grenier C., Lefebvre G. RADARSAT-2 SAR antenna // Canadian Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 287 – 294 DOI : 10.5589/m04-009.
22. ALOS-2 (PALSAR-2) DAICHI-2 [Electronic resource] // The Innoter Group of Companies : [website]. 2000–2025. URL : <https://innoter.com/sputniki/alon-palsar/> (date of access: 27.10.2024).
23. Space-based Earth imaging. Space-based systems for radar imaging of the Earth's surface : 2007–2008 ; Scientific and technical reference and analytical publication with an application on CD. Vol. 3 / editor-in-chief Yu. A. Sorokin. M. : Radiotekhnika, 2008. 86 p. : ill.
24. COSMO-SkyMed Active Phased Array SAR Instrument / Capece P. [et. al.] // 2008 IEEE Radar Conference, 26–30 May 2008. Rome, Italy, 2008. Pp 1–4. DOI : 10.1109/RADAR.2008.4720773.
25. The COSMO-SkyMed second generation SAR antenna electrical power chain and platform power distribution / Scorzafava E. [et. al.] // E3S Web of Conferences 11th European Space Power Conference. 2017. Vol. 16. Pp 1–9. DOI : 10.1051/e3sconf/20171613006.
26. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth / Covello F. [et. al.] // Journal of Geodynamics Elsevier. 2010. Vol. 49. Iss. 3–4. Pp. 171–180. DOI : 10.1016/j.jog.2010.01.001.
27. One-day interferometry results with the COSMO-SkyMed constellation / Covello F. [et. al.] // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010. Pp. 4397–4400. DOI : 10.1109/IGARSS.2010.5652236.
28. Burcev Yu. V. Internal calibration of space-based radars. Foreign experience // Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices. M. : Scientific Production Enterprise «Pulsar», JSC, 2023. Vol 3 (270). Pp. 16–24.
29. Soualle F., Stangl M. Correlation Based Characterization of Phased Array Components // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14–17 October 2003 Boston, MA, USA. 2003. Pp. 235–240. DOI : 10.1109/PAST.2003.1256987.
30. Stangl M., Werninghaus R., Zah R. The TERRASAR-X active phased array antenna // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14–17 October 2003 Boston, MA, USA. 2003. Pp. 70–75. DOI : 10.1109/PAST.2003.1256959.
31. Overview of modern space-based synthetic aperture radars and analysis of their development trends / M. I. Noniashvili [et. al.] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2012. Pp. 94–114.
32. Possibilities for creating wide-area synthetic aperture radars for small spacecraft / S. L. Vnotchenko [et. al.] // Electromechanical matters. VNIIEF studies. M., 2013. Vol. 134. № 3. Pp. 21–26.
33. New technologies for remote sensing of the Earth from space / V. V. Gruzov [et. al]. M. : TEXNOSFERA, 2019. 482 p.

*Поступила в редакцию 26.08.2025  
The article was submitted 26.08.2025*

### **Информация об авторе**

**Степан Владимирович Павлов** – аспирант, т. 8 (937) 389-69-21, e-mail: [stepan\\_cosmo@mail.ru](mailto:stepan_cosmo@mail.ru).

### **Information about the author**

**Stepan Vladimirovich Pavlov** – Graduate Student, t. 8 (937) 389-69-21, e-mail: [stepan\\_cosmo@mail.ru](mailto:stepan_cosmo@mail.ru).