

Д.Б. Никольский (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил факультет прикладной космонавтики МИИГАиК по специальности «исследование природных ресурсов авиакосмическими средствами». С 2007 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время – специалист по обработке радиолокационных данных.

Сравнительный обзор современных радиолокационных систем

В настоящее время идет активное развитие рынка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных направлениях: это и возможность использования новых, ранее недоступных данных, и появление новых технологий обработки, новых решений на базе данных ДЗЗ. Можно четко выделить два несколько обособленных направления получения пространственной информации о земной поверхности: съемка в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн – пассивное ДЗЗ (за исключением теплового ИК-диапазона) и съемка в сантиметровом (радио) диапазоне – активное ДЗЗ. Данные, получаемые в оптическом диапазоне, используются достаточно широко и технологии их обработки давно разработаны, в отличие от радиолокационных данных, активное применение которых для решения широкого круга задач – от классификации и до построения точных цифровых моделей местности/рельефа (ЦММ/ЦМР) и картограмм смещений земной поверхности – в России только начинается. Можно выделить ряд основных тенденций развития в этой области:

- увеличение пространственного разрешения и как результат точности радиолокационных данных;
- уменьшение периода между повторными съемками;
- возможность интерферометрической съемки;
- возможность многополяризационной съемки;
- использование данных, полученных в различных

радиодиапазонах разнообразными радиолокационными системами;

- запуск тандемных систем для проведения единовременной интерферометрической съемки.

В настоящее время на орбите находится 8 космических аппаратов с радиолокационными системами, данные с которых доступны широкому кругу пользователей. Для достижения хороших результатов при решении различных задач необходимо корректно выбрать исходные данные. Цель этого обзора – показать, какие современные радиолокационные данные представлены на ранке ДЗЗ, и какие классы задач можно решать с помощью тех или иных данных.

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Радиолокационное дистанционное зондирование Земли проводится при длинах волн от 1 мм до 1 м и соответствующих им частотах от 0,3 до 300 ГГц. Радиолокатор направляет луч электромагнитных импульсов на объект (около 1500 импульсов в секунду). Часть импульсов отражается от объекта, и радиолокационная система измеряет как характеристики отраженного сигнала, так и расстояние до объекта в зависимости от времени прохождения сигнала до объекта и обратно. Для радиолокации используют микроволновые радиодиапазоны, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Области применения микроволновых радиодиапазонов

Области применения	Диапазон
Воздушные радиолокационные системы	Ка, К, Ку
Воздушные и космические радиолокационные системы	Х, С, L
Космические радиолокационные системы	S, P

Диапазоны Ка, К и Ку применяются для воздушных радиолокационных систем, но они уже довольно редки. Диапазоны Х, С и L, как правило, используются для получения данных как с воздушных летательных аппаратов, так и из космоса, а S и P – для зондирования с космических аппаратов (КА). Радиосигнал способен проникать через облачность и дождевые капли. Эта способность определяется его длиной волны. При длине волны более 2 см радиосигнал гарантированно проникает через облачность, а при длине волны 3-4 см и больше – и через дождевые капли. Длина волны существенно влияет на амплитуду отраженного радиолокационного сигнала,

а также на характеристики обратного рассеяния от подстилающей поверхности. Радиолокация в диапазоне L (длина волны 15,0-30,0 см) обеспечивает сильные отраженные сигналы, главным образом от более крупных объектов земной поверхности, а также частичное проникновение радиоволн сквозь снежный и растительный покровы и, при определенных условиях, через песок и почву. Более короткие волны, используемые в диапазонах С (3,8-7,5 см) и Х (2,4-3,8 см), позволяют выявить границы малых объектов местности, кроме того, излучение в этих диапазонах имеет тенденцию более сильно отражаться от растительного и снежного покровов, а также от почвы.

Съемка радиолокационными системами существенно отличается от съемки системами в оптическом диапазоне, так как она выполняется при значительном отклонении от надира. Для радиолокационных данных система координат снимка выглядит следующим образом: азимут – направление, параллельное траектории, и дальность – наклонное расстояние от радиолокатора до поверхности. Значения углов съемки меняются в зависимости от типа радиолокатора и режимов съемки и могут достигать от 8°

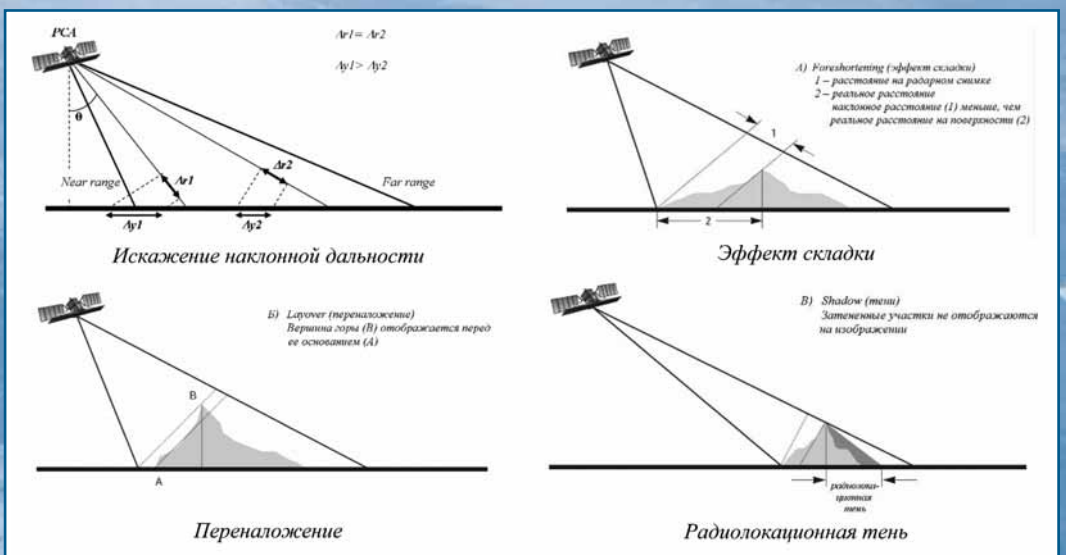


Рис. 1. Эффекты, возникающие на радарных снимках, обусловленные геометрией съемки и рельефом местности

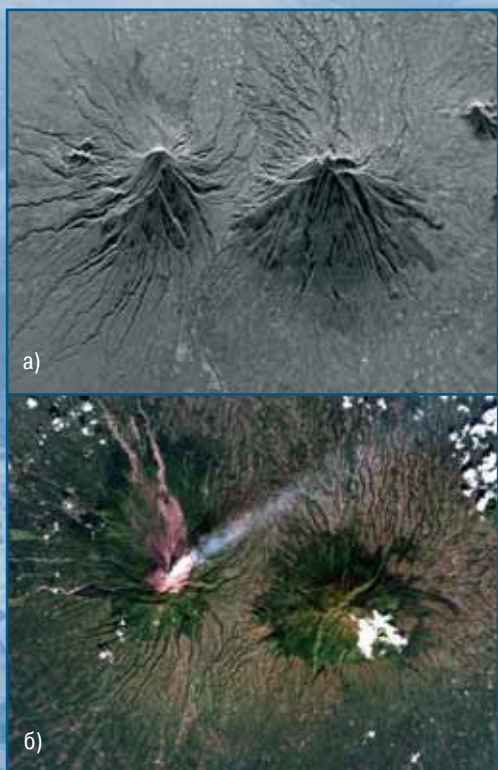


Рис. 2
Сравнение радиолокационного снимка и снимка в оптической зоне спектра:
а) TerraSAR-X (режим SCANSAR, пространственное разрешение 16 м);
б) Landsat-7 (комбинация каналов: 3-2-1, пространственное разрешение 30 м)

до 60° . Такая геометрия съемки вызывает ряд геометрических искажений на снимках (рис. 1): искажение наклонной дальности (неравномерность разрешения снимка по дальности), эффект складки, переналожения и радиолокационные тени. Устранение этих эффектов выполняется при ортотрансформировании снимков по точной ЦМР. На рис. 2 приведены два изображения, наглядно демонстрирующие значительные отличия в геометрии съемки между радиолокационными данными и данными в оптической зоне спектра.

Радиолокационные изображения имеют ряд радиометрических особенностей: на снимках даже для однородной поверхности проявляются значительные вариации уровня яркости между соседними пикселями, создавая зернистую текстуру. Это – спекл-шум, который возникает из-за того, что результирующее значение конкретного пиксела получается в результате сложения множества значений, фиксируемых системой при различных положениях приемной антенны КА, движущегося по орбите. При получении изображений используется принцип радиолокации с синтезированной апертурой (РСА либо SAR). Все современные космические радиолокационные системы – это SAR-системы, и на всех радиолокационных изображениях присутствует спекл-шум. Применение именно SAR-систем вызвано тем, что при небольших размерах реальных антенн радиолокационных систем невозможно получить высокое пространственное разрешение. При использовании же синтезированной апертуры, когда небольшая бортовая антенна последовательно формирует антенную решетку на достаточно боль-

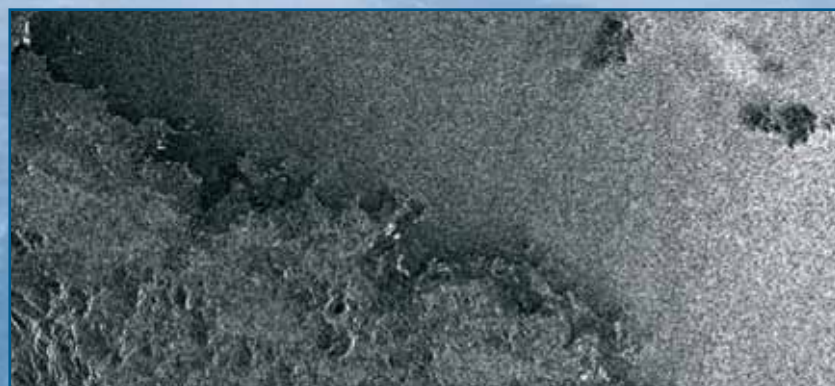


Рис. 3
Радиометрические искажения (снимок ERS-1)

шом участке орбиты, удается достигнуть высокого пространственного разрешения. Спекл-шум (зернистость на рис. 3) – это мультипликативное искажение, т. е., чем сильнее сигнал, тем сильнее искажение. Для устранения спекл-шума используются различные типы фильтрации.

Наряду со спекл-шумом, на изображении присутствуют радиометрические искажения, вызванные геометрией съемки. Так как съемка проводится под различными углами для различных точек снимка, то появляется неоднородность яркости по полю снимка: при малом угле – ярче, чем при большем угле съемки (рис. 3). Данное искажение устраняется путем введения различных коэффициентов усиления антенны по полю снимка.

Еще одна группа искажений вызвана геометрией съемки и рельефом поверхности: это области затененной и переналожений, они относятся к геометрическим искажениям, но также влияют на радиометрию.

Многие из современных радиолокационных спутниковых систем ДЗЗ (ALOS-PALSAR, TerraSAR, Radarsat-2 и др.) позволяют получать изображения при различной поляризации излучения. Поляризация определяется ориентацией вектора электромагнитной индукции, при взаимодействии с объектом поляризация изменяется и несет в себе информацию об объекте.

Параллельная поляризация – направленный и принятый сигнал имеет одну и ту же поляризацию – HH и VV. С какой поляризацией облучается поверхность, с такой же поляризацией принимается от-

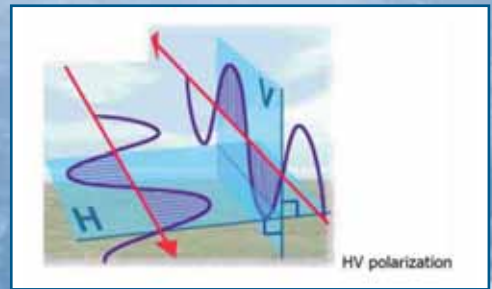


Рис. 4
Принцип кроссполяризации

раженное излучение. Такие типы поляризации имеют тенденцию фиксировать отраженное рассеяние волн от объектов, ориентированных в том же самом направлении, что и падающая радиоволна.

Кроссполяризация – направленный и принятый сигнал имеет различную поляризацию – HV и VH. Облучение объекта идет при одной поляризации, а принимается отраженный сигнал с другой поляризацией. Такие типы поляризации позволяют фиксировать отраженные сигналы, образующиеся в результате объемного рассеивания, которое деполаризует энергию как, например, в случае сигналов, отраженных от земной поверхности и стволов деревьев. На рис. 4 схематично показан принцип кроссполяризации.

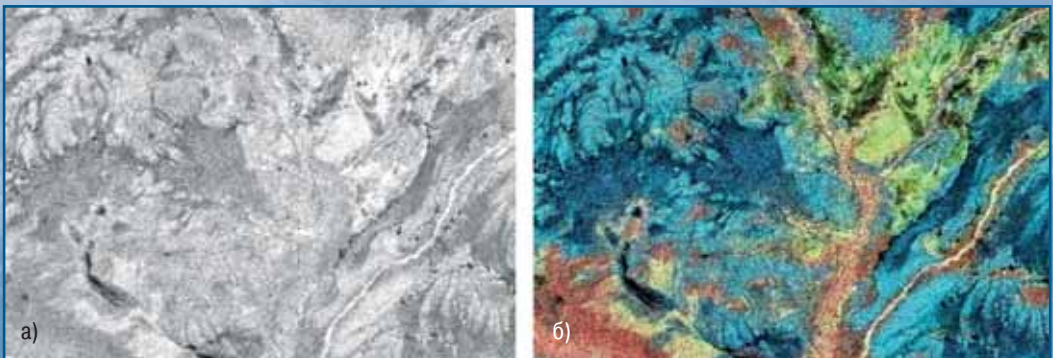


Рис. 5
Радиолокационное изображение, полученное с ALOS PALSAR PLR:
а) поляризация HH (слева);
б) композитное поляриметрическое изображение HV-HH-VV (справа)

Изображения, получаемые при различных поляризациях радиоизлучения, позволяют более корректно проводить классификацию объектов подстилающей поверхности. Как видно из приведенного примера (рис. 5), при использовании ложноцветового поляриметрического композитного изображения можно четко классифицировать объекты: голубые и синие тона – это низкорослая растительность, красные – лес, зеленые – болотная растительность, более темные оттенки свидетельствуют об увлажнении поверхности. В данном случае по снимку с единичной поляризацией достаточно сложно различить низкорослую растительность и лес, поскольку тонкие отличия минимальны.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ (SAR-СИСТЕМ)

В настоящее время в дополнение к восьми КА с радиолокационными системами, находящимися на околоземной орбите, планируется запуск довольно большого числа новых космических аппаратов. Основные технические характеристики действующих и планируемых к запуску КА с радиолокационными системами приведены в табл. 2.

Данные существующих радиолокационных систем можно разделить на несколько групп:

- среднего разрешения (ERS и ENVISAT);

Таблица 2

Современные и перспективные космические радиолокационные системы ДЗЗ

Наименование радиолокационных систем	Страна	Дата запуска, год	Диапазон	Периодичность, дней	Съемка		
					ПР, м	ПС, км	ПЛ
Действующие системы							
ERS-2	Европа	21.04.1995	C	35	30	100	–
Radarsat-1	Канада	04.11.1995	C	24	8	50	–
Envisat /ASAR	Европа	01.03.2002	C	35	25	100	+/-
ALOS / PALSAR	Япония	24.01.2006	L	46	7	70	+
COSMO-SkyMed-1*	Италия	07.06.2007	X	16	1	10	+
TerraSAR-X	Германия	15.06.2007	X	11	1	10x5	+
COSMO-SkyMed-2*	Италия	08.12.2007	X	16	1	10	+
Radarsat-2	Канада	14.12.2007	C	24	3	20	+
Перспективные системы							
COSMO-SkyMed-3	Италия	2008	X	16	1	10	+
Кондор-Э	Россия	2009	S	–	1-2	10-20	–
RISAT-1	Индия	2009	C	12	2	10	+
TanDEM-X	Германия	2009	X	11	1	10x5	+
Huan Jing-1C (HJ-1C)	Китай	2010	S	31	1	–	–
SAOCOM-1A/1B	Аргентина	2010	L	16	7	50	+
Kompsat-5	Южная Корея	2010	X	–	1	5	н/д

Примечания.

ПР - максимальное пространственное разрешение, которое дает система.

ПС - полоса съемки, соответствующего режима.

ПЛ - возможность поляриметрической съемки (- нет, + есть, +/- частично, н/д - нет данных).

* Вопрос коммерческого распространения данных на территории России уточняется.

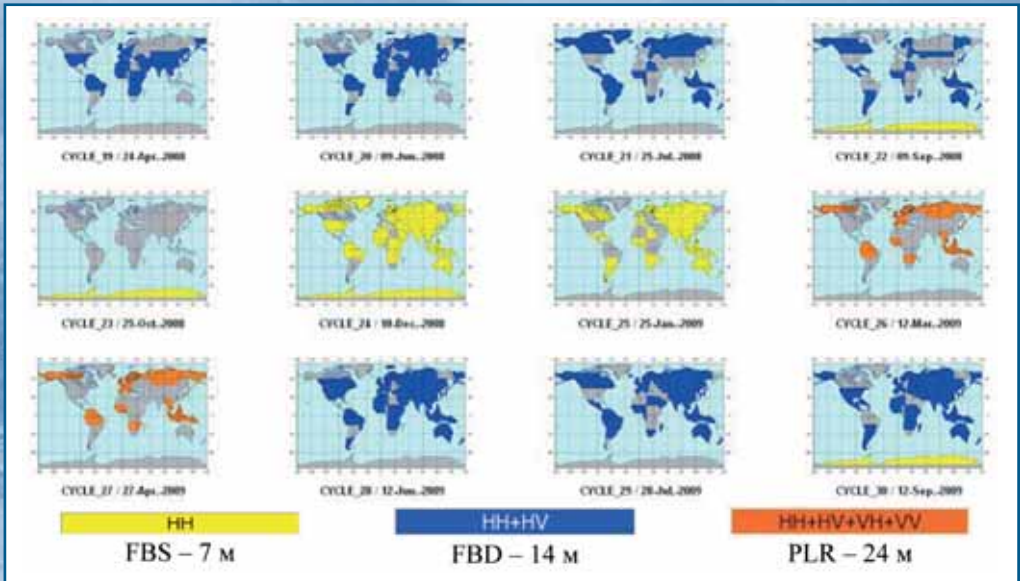


Рис. 6
План съемки земной поверхности с КА ALOS/PALSAR в трех режимах за период с апреля 2008 г. по сентябрь 2009 г.

- высокого разрешения (Radarsat и ALOS/PALSAR);
- сверхвысокого разрешения (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed).

Приведенные системы также имеют возможность выполнять съемку с более низким разрешением, но большей территории (в табл. 2 приведено максимальное разрешение). Важным параметром является период повторения орбиты – это минимально возможное время для получения интерферометрической пары радиолокационных снимков той или иной системой, либо для получения снимка территории при одинаковой геометрии съемки. На сегодняшний день минимальный период имеет спутник TerraSAR-X (11 дней), а максимальный – ALOS/PALSAR (46 дней).

Следует отметить, что для всех находящихся на орбите радиолокационных систем, за исключением ALOS/PALSAR, существует возможность заказа новой съемки, причем даты проведения съемки согласовываются с заказчиком. Что касается данных ALOS/PALSAR, съемка данным аппаратом земной поверхности выполняется по специальной программе

и архив данных постоянно пополняется. На рис. 6 приведен план съемок земной поверхности с КА ALOS/PALSAR в трех основных режимах.

Как видно из приведенного плана (рис. 6), съемка территории России ведется и планируется регулярно. Основными съемочными режимами являются FBS (единичная поляризация) и FBD (двойная поляризация). Съемка в широкополосном режиме (WS с разрешением 100 м) также проводится на регулярной основе.

Стоимость радиолокационных данных варьируется в зависимости от разрешающей способности и типа радиолокационной системы. В табл. 3 приведена обобщенная информация по основным техническим параметрам и стоимости радиолокационных данных, получаемых различными SAR-системами.

Как видно из табл. 2 и табл. 3, на рынке представлены достаточно разнообразные радиолокационные данные как по разрешению, диапазонам съемки, так и по стоимости. По этим причинам при их использовании важно правильно выбрать необходимые снимки для решения конкретных задач.

Таблица 3

Основные технические параметры и стоимость радиолокационных данных

Наименование радиолокационных систем	Режим съемки	ПР, м	Размер сцены, км	Поляризация ¹	Стоимость данных ² , руб.			
					Архив ³		Новая съемка ⁴	
					сцена	1 км ²	сцена	1 км ²
TerraSAR-X	HighSpot	1	5×10	HH/VV	121500	2430	243000	4860
	SpotLight	2	10×10	HH/VV или HH+VV	121500	1215	243000	2430
TerraSAR-X	StripMap	3	30×50	HH/VV/ HV/VH или HH+HV/ VV+VH/ HH+VV	94500	63	135000	90
	ScanSAR	16	100×150	HH/VV	69300	4,6	99000	6,6
Radarsat-2	Ultra-Fine	3	20×20	HH/VV/ HV/VH	138000	345	135000	337,5
	Fine ⁵	8	50×50	HH/VV/ HV/VH или HH+HV/ VV+VH	93000	37,2	90000	36,0
	Standard ⁵	25	100×100		93000	9,3	90000	9,0
	Wide ⁵	30	150×150		93000	4,1	90000	4,0
	ScanSAR Narrow ⁵	50	300×300		93000	1,03	90000	1,0
	ScanSAR Wide ⁵	100	500×500	93000	0,4	90000	0,36	
	Extended High	25	75×75	HH	93000	16,5	90000	16,0
	Fine Quad-Pol	12	25×25	полная	138000	220,8	135000	216
Standard Quad-Pol	25	25×25	138000		220,8	135000	216	
ALOS / PALSAR	Fine Beam Single (FBS)	7	70×70	HH/VV	13750	2,8	–	–
	Fine Beam Dual (FBD)	14	70×70	HH+HV/VV+VH	13750	2,8	–	–
	Polarimetric (PLR)	24	35×70	Полная	13750	5,6	–	–
	ScanSAR	100	350×350	HH/VV	13750	0,1	–	–
Radarsat-1 ⁶	Fine	8	50×50	HH	94375	37,8	90000	36,0
	Standard	25	100×100		94375	9,4	90000	9,0
	Extended High	25	75×75		94375	16,8	90000	16,0
	Wide	30	150×150		94375	4,2	90000	4,0
	Extended Low	35	170×170		94375	3,3	90000	3,1
	ScanSAR Narrow	50	300×300		94375	1,05	90000	1,0
	ScanSAR Wide	100	500×500		94375	0,4	90000	0,36
Envisat / ASAR	Image (IM)	25	100×100	VV	10800	1,1	18000	1,8
	Alternating Polarisation (AP)	25	100×100	VV+VH	10800	1,1	18000	1,8
	Wide Swath (WS)	100	400×400	VV	10800	0,07	18000	0,1
ERS-2	Image (IM)	30	100×100	VV	6480	0,65	10800	1,1

Примечания.

¹ Знак «/» означает, что при заказе может быть выбрана какая-то одна поляризация из указанных.

² Стоимость данных приведена без учета НДС.

³ Для разных КА, данные являются архивными по истечении следующих сроков:

- TerraSAR-X - HighSpot и SpotLight (6 месяцев), StripMap и ScanSAR (12 месяцев);
- Radarsat-1 и Radarsat-2 после выполнения съемки;
- ALOS-PALSAR после выполнения съемки;
- ENVISAT, ERS-2 после выполнения съемки.

⁴ Стандартный режим съемки (при заказе новой съемки для ряда спутников существует понятие приоритетной съемки, при которой стоимость данных увеличивается).

⁵ При заказе данных Radarsat-2 возможно выбрать единичную или двойную поляризацию, при этом за двойную необходимо доплатить 5000 руб.

⁶ Архивные данные Radarsat-1, полученные до 1 января 1999 г. предлагаются по сниженной цене 37500 руб.