

Ю.И. Кантемиров (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работал младшим научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. работает в компании «Совзонд» ведущим специалистом отдела программного обеспечения.

Обзор современных радарных данных ДЗЗ

Радарная космическая съемка в настоящее время выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C- и L-диапазоны (табл. 1). В ближайшие годы также планируется запуск первого космического радиолокатора P-диапазона (BIOMASS, Европейское космическое агентство — ESA).

Широкое применение спутниковых радарных данных началось в 1991 г. с запуском спутника ERS-1 (ESA) с радиолокатором на борту. Первоначальная цель запуска этого первого гражданского спутникового радиолокатора среднего пространственного разрешения (20 м) определялась довольно узко и ограничивалась морскими приложениями (мониторинг ледовой обстановки, айсбергов, судоходства, течений, нефтяных пятен и т. д.). Однако уже после прохождения спутником нескольких полных циклов повторения орбиты выяснилось, что, кроме морских

приложений, у этого радиолокатора имеется большой потенциал и для выполнения различных задач на суше.

Во-первых, на опытных участках были успешно построены цифровые модели рельефа (ЦМР) по результатам интерферометрической обработки пар радарных снимков, выполненных с временным интервалом, равным кратному числу полных циклов повторения орбиты. Однако, для большинства типов ландшафтов (кроме пустынь) когерентность (мера корреляции фаз радарных снимков) для построения ЦМР оказывалась недостаточной, поскольку минимально возможный период между интерферометрическими съемками составлял один полный цикл повторения орбиты, т.е. 35 дней во время основной фазы эксплуатации «С» и 3 дня во время фаз эксплуатации «А», «В» и «D».

В том числе поэтому в пару к ERS-1 был заплани-

Таблица 1

Основные характеристики снимков и условий съемки

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5,20 – 10,90	2,75 – 5,77 (2,4 – 3,8)	USGS SLAR, TerraSAR-X/TanDEM-X, COSMO-SkyMed 1–4
C	3,9 – 6,2	3,8 – 7,6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0,39 – 1,55	19,3 – 76,9 (15 – 30)	SIR-A,B, JERS, ALOS/PALSAR

рован запуск спутника ERS-2, а вместе они должны были составить тандемную пару спутников, способных выполнять тандемную интерферометрическую съемку одной и той же территории с временными интервалами в 1 сутки. В тандемном режиме пара этих спутников проработала около года (1995–1996). Затем с выходом из строя определенного оборудования на спутнике ERS-1 тандемная миссия официально закончилась. Фактически же тандемные съемки продолжались до марта 2000 г., когда прекратилась эксплуатация ERS-1, хотя в интерферометрической обработке тандемных пар после 1996 г. возникают некоторые дополнительные трудности. Всего тандемом ERS-1 – ERS-2 снята большая часть земного шара, иногда по несколько раз.

Еще одним важным практическим применением спутниковых радиолокаторов стал мониторинг смещений земной поверхности по результатам дифференциальной интерферометрической обработки. Если учесть, что спутник ERS-1 выполнял съемку с 1991 г., а спутник ERS-2 находился на орбите до середины 2011 г., а также то, что эти два спутника находились на примерно одной и той же орбите и производили радарную съемку одинаковым сенсором SAR, то на значительную часть земного шара имеются многопроходные интерферометрические цепочки снимков за период с 1991 по 2011 г. Так, например, многие европейские города снимались каждый месяц с 1995 г. (а с 1991 г. по 5–10 раз в год). То есть в настоящее время имеются 100- или 200-проходные цепочки радарных снимков, которые в случае достаточной когерентности (например, в случае застроенных территорий) могут быть обработаны всеми возможными дифференциальными интерферометрическими методиками, описанными ниже, с получением на выходе карт смещений и деформаций земной поверхности и сооружений за период до 20 лет. На территорию России и стран СНГ нередко имеются 30–40-проходные и практически всегда 15–20-проходные цепочки таких снимков.

В 2002 г. ESA был запущен спутник ENVISAT, с радиолокатором ASAR на борту, который представлял собой следующее поколение спутников по сравнению с ERS-1 и ERS-2. Этот спутник характеризуется большим количеством углов и режимов съемки, возможностью съемки в разных поляризациях (в том

числе в двух одновременно) и в широкополосном режиме. При этом снимки, сделанные в режиме Image Mode в полосе съемки IS2 и с поляризацией VV, интерферометрически совместимы со снимками ERS-1 и ERS-2. Эта особенность позволила в течение нескольких временных периодов организовать тандемную съемку ERS-2 — ENVISAT с временным интервалом в 30 минут на больших базовых линиях. Съемка в таком режиме характеризуется крайне высоким фазовым разрешением интерферограмм по высоте и при этом довольно высокой когерентностью фаз этих снимков, что позволяет строить ЦМР высокой точности (но среднего пространственного разрешения 20 м).

Кроме того, спутник ENVISAT также вел многопроходную интерферометрическую съемку значительных территорий, в том числе России и стран СНГ, что позволяет выстраивать 20–40 проходных интерферометрических цепочек снимков для мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений.

Компания MDA (Канада) в 1995 г. запустила радарный спутник RADARSAT-1 несколько иной концепции. Спутник мог вести съемку с пространственным разрешением от 100 до 7 м, под многими углами съемки и с разными площадями кадра. Наличие большого количества режимов съемки позволяло выполнять мониторинговые задачи, поскольку одна и та же территория могла сниматься не только через полный цикл орбиты (как в случае ERS-1 и ERS-2), но и через каждые 2–3 дня (но под разными углами съемки). Другим принципиальным отличием от спутников ESA являлась ориентация на съемку на заказ (в отличие от ERS и ENVISAT, ведущих более или менее регулярную съемку всего земного шара). Поэтому для RADARSAT-1 архивные снимки, как правило, есть только на те территории, где выполнялась съемка на заказ.

Логическим продолжением спутника RADARSAT-1 стал запущенный в 2007 г. спутник RADARSAT-2 (MDA, Канада). Этот спутник характеризуется пространственным разрешением от 100 до 1 м, возможностью съемки во всех возможных поляризационных режимах, широким диапазоном площадей кадров и очень высокой производительностью, а также возможностью мониторинговой съемки через 2–3 дня. Главным преимуществом этого радарного спутника

является наилучшее среди всех радарных спутников соотношение «пространственное разрешение — площадь сцены» (по состоянию на начало 2012 г.). Так, в режиме съемки Wide Fine пространственное разрешение составляет 7 м при размере сцены 150 x 170 км с возможностью съемки в двух поляризациях одновременно; в режиме Wide Ultrafine — разрешение 3 м при размере сцены 50 x 50 км; в режиме Spotlight A — разрешение 1 м при размере сцены 18 x 8 км.

Германские спутники сверхвысокого пространственного разрешения TerraSAR-X и TanDEM-X (Astrium GEO-Information Services) также предлагают все возможные режимы съемки и комбинации поляризации сигнала, а также большой диапазон площадей кадров и углов съемки. Среди важных особенностей этого спутника следует отметить крайне высокую точность определения орбиты, а следовательно, и крайне низкую (субпиксельную) ошибку геолокации снимков (естественно, это соблюдается только при использовании ЦМР в процессе геокодирования). Для мониторинга смещений земной поверхности и деформаций сооружений данные TerraSAR-X могут быть

использованы только в условиях пустынь, степей и застроенных территорий, поскольку при съемке в X-диапазоне с периодом 11 дней и более даже незначительная растительность резко ухудшает когерентность даже между соседними по времени съемками (полный цикл орбиты — 11 дней, а интерферометрическая обработка возможна для снимков, сделанных через целое число полных циклов орбиты). С запуском спутника TanDEM-X в пару к спутнику TerraSAR-X для выполнения одновременной тандемной интерферометрической съемки начался проект по построению беспрецедентной по точности и пространственному разрешению глобальной ЦМР, который должен завершиться к 2015 г.

Радиолокатор PALSAR, расположенный на японском спутнике ALOS, в период с 2006 г. по начало 2011 г. являлся единственным спутниковым радиолокатором L-диапазона. Он выполнял съемку всей поверхности Земли ежегодно по несколько раз, поэтому на любую точку на Земле, скорее всего, найдется архив в 10–20 интерферометрических проходов. Данные ALOS/PALSAR пригодны для построения

Таблица 2

Планируемые к запуску радарные спутники

Название спутника	Оператор	Диапазон длин волн	Планируемые годы запуска	Пространственное разрешение, м
RISAT-1	ISRO (Индия)	C	2012	3 – 15
Sentinel-1 A/B	ESA (Европа)	C	2013–2015	5 – 20
SAOCOM-1 A/B	CONAE (Аргентина) ASI (Италия)	L	2013–2015	5
ALOS-2	JAXA (Япония)	L	2012–2013	3 – 15
COSMO-SkyMed-5/6/7/8	ASI (Италия)	X	2013–2015	1 – 15
RADARSAT constellation mission (RCM)	CSA, MDA (Канада)	C	2014–2015	1 – 100
BIOMASS	ESA (Европа)	P	2015–2017	50
NovaSAR-S	SSTL (Англия)	S	2015	6 – 30 м

ЦМП и мониторинга смещений интерферометрическим методом, для мониторинговых задач лесного и сельского хозяйства (по архивным данным) и т. д. L-диапазон позволяет дольше сохранять когерентность и в некоторой степени компенсировать ее падение, вызванное влиянием растительности. Плотный лес и джунгли все же являются ограничением для интерферометрии даже в L-диапазоне. Значительным недостатком ALOS/PALSAR является отсутствие возможности съемки на заказ.

Одной из наиболее многофункциональных и интересных на сегодняшний день, по мнению автора, группировок радарных спутников является группировка из 4 спутников COSMO-SkyMed 1-4 (e-GEOS, Италия). Среди основных особенностей этой группировки можно отметить частоту интерферометрических съемок до 8 раз в месяц, наличие различных поляризационных режимов, пространственное разрешение до 1 м. Высокая частота интерферометрических съемок, в частности, позволяет генерировать высококачественные когерентные мультитременные композиты высокого разрешения, находящие широкое применение в сельском и лесном хозяйстве, а также при мониторинге землепользования. Немаловажным фактором является также очень привлекательная ценовая политика, особенно на данные высокого разрешения (3 и 1 м) при заказе многопроходных новых съемок (от 15 проходов над одной и той же территорией и больше). Стоимость же мониторинговых сервисов, основанных на широкополосных режимах съемки ScanSAR спутников COSMO-SkyMed, приближается к стоимости сервисов, основанных на данных ERS, ENVISAT и других научных спутников.

В настоящее время компания Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) завершает разработку нового бюджетного радарного спутника NovaSAR-S. Этот спутник будет представлять собой платформу SSTL-300 с инновационным радаром для съемки в S-диапазоне длин волн. Подход SSTL к инжинирингу и проектированию позволяет развернуть миссию NovaSAR-S в полном объеме в течение 24 месяцев с момента заказа. Компания SSTL также участвует в обеспечении поддержки наземного сегмента будущей миссии NovaSAR и разрабатывает технологии обработки, архивирования и передачи данных съемок.

Система NovaSAR-S (предположительно группировка из трех радарных спутников) будет вести радарную съемку в четырех режимах с разрешением 6–30 м в различных комбинациях поляризации. Технические параметры спутников будут оптимизированы для широкого спектра задач, таких, как мониторинг наводнений, оценка сельскохозяйственных культур, мониторинг лесов, классификация растительного покрова, борьба со стихийными бедствиями и наблюдения за акваториями, в частности для слежения за кораблями, обнаружения разливов нефти. Планируется реализация и интерферометрического режима съемки. S-диапазон длин волн, в котором будут вести съемку спутники NovaSAR, представляется крайне интересным именно для территории России, поскольку волны S-диапазона характеризуются частичным проникновением через растительный покров, но в то же время не теряются мелкие детали изображений, что происходит, например, в случае L-диапазона. В табл. 2 приведен список планируемых к запуску радарных спутников.

Важной тенденцией в развитии спутниковых радарных систем (помимо повышения пространственного разрешения и увеличения числа режимов съемки) является расширение поляризационных возможностей, и в особенности появление возможности одновременной съемки в четырех возможных поляризациях (такая съемка позволяет в дальнейшем генерировать так называемую полную поляризационную матрицу). Многополяризационные режимы съемки, в частности, открывают новые возможности для использования радарных съемок в задачах лесного и сельского хозяйства.

Компания «Совзонд» поставляет данные со всех вышеперечисленных радарных спутников, предоставляет программное обеспечение для обработки радарных данных SARscape (SARMAP, Швейцария) и оказывает услуги по тематической обработке данных радарных съемок, а также по обучению работе в SARscape. В статье автора «Обзор основных методик обработки радарных данных ДЗЗ и их реализация в программном комплексе SARscape» (с. 30–43) приводятся основные методики обработки данных радарных съемок, их реализация в программном комплексе SARscape и примеры практического применения этих методик.