

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ С ЦЕЛЬЮ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ

Людмила Константиновна Трубина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

Гузьялия Альтавовна Мусина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, тел. (777)485 -00-35, e-mail: storm2x@mail.ru

В данной статье рассмотрены радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) X-диапазона, находящихся и введенных в эксплуатацию в течение последних 5 лет. Приведены общие сведения о параметрах, приведены тактико-технические характеристики, рассмотренных РСА. Выполнен анализ возможностей их применения для мониторинга угольных карьеров.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой; X, C, L, S – диапазоны; фазированная антенна; угольный карьер

OVERVIEW OF MODERN RADARS WITH SYNTHESIZED APERTURE FOR THE PURPOSE OF THEIR APPLICATION FOR MONITORING COAL MINES DEVELOPMENT

Lyudmila K. Trubina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

Guzyaliya A. Mussina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (777)485-00-35, e-mail: storm2x@mail.ru

This article discusses radar with a synthesized aperture (RSA) of the X-band, and commissioned over the past 5 years. General information about the parameters are given, the tactical and technical characteristics considered by the RSA are given. The analysis of the possibilities of their application for monitoring of coal mines is carried out.

Keywords: radar with synthesized aperture; X, s, l, s -dapazones; phased antenna; Coal quarry

Введение

На современном этапе развития промышленности появилась необходимость проведения высокоточных актуальных мониторингов объектов. Одним из способов получения такой информации является дистанционное зондирование Земли из космоса. Радарная съемка с высоким и сверхвысоким пространственным раз-

решением насчитывает множество космических аппаратов, которые проводят съемки Земной поверхности непрерывно. Одним из важных преимуществ применения радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) можно отметить: наблюдение в любую погоду, то есть нет требований к освещенности; наличие в радиолокационном изображении информации о фазе и поляризации отраженного от элемента разрешения электромагнитной волны [1].

Радиолокационные данные используются при решении широкого круга научных, сельскохозяйственных и военных задач: в области геологоразведки и геологического картографирования, исследования природных ресурсов, мониторингов различного типа, создания топографических карт [2].

Одним из вариантов обработки радарных данных является дифференциальная радиолокационная интерферометрия, которая позволяет проводить анализ динамики смещения поверхности, при наличии материалов съемки на разные моменты времени.

В первом и самом простом случае сравниваются результаты, полученные при обработке одного объекта в разные моменты времени; во-втором, в трехпроводной интерферометрии происходит сравнение двух снимков за короткое время, отражающих стабильную ситуацию с третьим снимком, сделанным позднее, когда произошли изменения на поверхности земли; в – третьих, в четырехпроводной интерферометрии происходит сравнение двух пар снимков одного объекта за разный период времени. Изменения в рельефе получают путем вычитания разностно-фазовой информации [3].

Материалы

Выполнен обзор литературных источников о современных радиолокаторах РСА X-диапазона, которые эксплуатируются в течение последних 5 лет, а также те, которые готовятся к запуску. 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. В С-диапазоне так же, как в X – диапазоне, присутствует возможность использования сигналов для реализации субметрового разрешения. С-диапазон более пригоден для военной разведки, чем L- и S- диапазоны [4].

Результаты

Одним из востребованных является японский микроспутник ASNARO 2 (Advanced Satellite with New system Architecture for Observation), созданный на платформе NEXTAR (Next Generation Star), который успешно запущен в январе 2018 года. На борту космического аппарата установлена система наблюдения высокого разрешения с радиолокационной системой X-диапазона, мощностью 1 кВт. Он способен получать изображения Земли шириной 10 км с простран-

ственным разрешением в 1 м. Радиолокатор XSAR может работать в режиме Scanning Synthetic Aperture Radar (ScanSAR), в котором КА способен захватывать полосу более чем в 50 км, но с уменьшенным разрешением 16 метров, скорость передачи информации достигает около 800 Мбит/с в 16QAM (квадратурная амплитудная модуляция) [5,6]. КА выведен на обратную солнечно-синхронную околокруглую орбиту высотой 504 км с наклоном 97,4°.

Основные направления решения задач с применением снимков: создание и обновление топографических карт масштаба 1:10 000; мониторинг разнообразных процессов от смещений земной поверхности, включая оценку сейсмической опасности, прогноз возможных землетрясений и извержений вулканов, до ледовой обстановки; а также мониторинг нефтяных загрязнений в акваториях; отслеживание нелегальных карьеров; всепогодный непрерывный мониторинг за природными и антропогенными катастрофами (половодья, засухи, оползни, аварии и др.), формирование высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ); [7,8]. Тактико-технические характеристики приведены в таблице.

Тактико-технические характеристики РСА,
введенных в эксплуатацию с 2016 г.

Параметр	Радиолокатор с синтезированной апертурой				
	Asnaro-2	SEOSAR/Paz	CSG-1	IceYe X1-3	Capella X-SAR
Год запуска, Страна	2018 Япония	2018 Испания	2019 Италия	2018-2019 Финляндия	2020 США
Продолжительность эксплуатации	5 лет	7 лет	7 лет	2-3 года	5 лет
Диапазон	X	S, X	S, X	S, X	X
Масса, кг	450	1350	600	85	100
Высота орбиты, км	504	514	619	505 км	525
Наклонение орбиты, град	97,4	97,44	97,86	97,55	90,9
Центральная частота, ГГц	9,6	9,65	9,6	9,6	9,4-9,9
Тип и размер антенны, м	АФАР	АФАР 4,8 x 0,7	АФАР 5,7x1,4	АФАР 3,25	Сетчатая рефлектор- ная 3,5
Средняя потребляе- мость, Вт	1200	850	11 Квт	-	400
Полоса обзора, км	10-50	4-250	40-200	50 x 50	5-30
Разрешение, м	1x1	20 x40; 5 x 20; 5 x 5; 1 x 1	10x10	20x20; 3x3;/ 1,5x1,5;1x1	0,5x 0,5
Поляризация	Одинар- ная (по выбору – VV или HH)	Одинарная (по вы- бору – VV или HH); двойная (по вы- бору – VV/HH или HH/HV или VV/VH)	Одинарная (HH либо VV) или двойная (HH/HV либо VV/VH)	VV	HH
Канал передачи РЛИ	400-800 Мбит/с	300 Мбит/с	2048 Кбит/с 2 x 260 Мбит/с	100+	1,2Гбит/с
Периодичность	2-35 д	2,5 д	10 д	-	1 час

Испанский спутник SEOSAR/PAZ («мир» по-испански), ранее известный как SEOSAR / PAZ (Satélite Español de Observación SAR, является миссией SAR X-диапазона [9]. На его борту установлен радар с синтезированной апертурой диапазона X, базирующийся на платформе TerraSAR-X, для обеспечения безопасности и обороны. Миссия PAZ - это миссия двойного назначения (гражданская / оборонная), финансируемая и принадлежащая Министерству обороны и управляемая Hisdesat (Hisdesat Servicios Estratégicos, SA, испанская частная коммуникационная компания, предоставляющая также свои услуги Министерству обороны с 2001 года) [10]. Владельцем наземного сегмента PAZ является INTA. Двойное использование (гражданское / оборонное) миссии ПАЗ подразумевает ограничения безопасности в ее наземном сегменте [11]. Космический корабль: При общей массе около 1350 кг спутник имеет длину 5 м и диаметр 2,4 м. SM (Сервисный модуль), платформа и внутренняя часть инструмента основаны на TerraSAR-X и TanDEM-X.

Сгенерированные данные полезной нагрузки (SAR) хранятся на борту в блоке SSMM (твердотельная массовая память) емкостью 256 Гбит, со скоростью передачи данных 300 Мбит / с. Антенна X-диапазона установлена на выдвижной стреле длиной 3,3 м (единственный развертываемый элемент на ПК), чтобы предотвратить помехи работе прибора SAR для X-диапазона. Такая компоновка обеспечивает одновременные наблюдения SAR и нисходящую линию X-диапазона [12,13].

КА CSG-1 является дальнейшим развитием аппаратов Cosmo-SkyMed первого поколения. CSG базируется на последних технологических достижениях итальянской промышленности. Был выведен на орбиту в декабре 2019. На борту аппарата установления радиолокационная система S, X- диапазонов [14].

Основными изменениями являются: увеличены объем бортового запоминающего устройства (удвоен), в два раза скорости передачи данных на Землю и приема информации от радара SAR. Внесены значительные изменения во все элементы такие как, бортовая память, система управления и программное обеспечение, система шифрования данных, схема модуляции и коммуникационные устройства [15]. Спутники будут работать на той же круговой солнечно-синхронной орбите рассвет-сумерки, что и спутники первого поколения с номинальной высотой 619 км и наклоном 97,86°. Спутники работают в одной орбитальной плоскости.

Космический корабль оснащен 3-осевой системой стабилизации с гироскопом, датчиками солнечного света и STT (Star Tracker), что обеспечивает высокую точность наведения и знание и определение орбиты в реальном времени [16].

Емкость встроенной памяти, обеспечиваемая одним блоком DSHA, рассчитана на хранение изображений очень больших размеров, общая скорость входных данных до 2400 Мбит / с и общие выходные данные. [17].

Орбита: круговая солнечно-синхронная орбита рассвета и заката, номинальная высота = 619,6 км, наклонение = 97,86°, период = 97,1 мин, с LTAN (местное время восходящего узла) в 6:00 часов (орбита рассвета / пыли), 14,8125 об./ день

(или 14 13/16). Все космические аппараты группировки SAR будут расположены в одной орбитальной плоскости.

ICEYE-X1 - это первый испытательный микроспутник ICEYE, использующий датчик SAR в X-диапазоне, запуск которого состоялся в начале 2018 года. Цель миссии - проверить работоспособность спутника на орбите и начать работу с избранными клиентами ICEYE. Данные, полученные со спутника в космосе, могут быть использованы для самых разных целей, включая мониторинг изменения морского льда, отслеживания разливов нефти в море и помощь в предотвращении незаконного рыболовства [18].

Космический корабль ICEYE-X1 был разработан и интегрирован компанией ICEYE (шина серии IXEYE). Платформа представляет собой космический аппарат трехосной стабилизации массой 85 кг. Питание обеспечивается одной фиксированной солнечной батареей. Размеры микроспутника в стартовой конфигурации составляют 70 см в высоту и 60 см в ширину. Антенна SAR имеет длину 3,25 м. Срок службы космического корабля составляет 2-3 года.

Радиочастотная связь обрабатывается через S-диапазон для служебных данных в нисходящем канале со скоростью 256 кбит / с и командного восходящего канала со скоростью 32 кбит / с, в то время как X-диапазон используется для нисходящего канала данных полезной нагрузки со скоростью 50 Мбит / с. Добавление лазерной системы связи позволит передавать данные на скорости до 1 Гбит / с. Орбита: солнечно-синхронная орбита с высотой 505 км и наклоном 97,55°.

Созвездие Capella X-SAR Space разработана коммерческой компанией Capella Space из Пало-Альто, Калифорния, запуск был произведен в 2019 году с первоначальным развертыванием 6 спутников в двух орбитальных плоскостях. Среднее время повторного посещения составляет от 3 до 6 часов, а максимальное время повторного посещения - 6 часов. Спутники Capella SAR будут работать в X-диапазоне с полосой пропускания до 500 МГц. Разрешение на местности и ширина полосы обзора зависят от угла обзора. Поляризация: однополярная (HH) [19].

Многоканальный поиск уменьшает количество пятен и увеличивает обнаруживаемость объектов на SAR-изображении. Однако во многих системах SAR за многогранность приходится платить более грубым азимутальным разрешением. Поскольку космический аппарат Capella может смотреть в точку на земле в течение десятков секунд, Capella может предоставлять многослойные изображения, построенные из десятков просмотров с очень высоким конечным разрешением, например, 0,3 м [20].

Заключение

Дистанционное зондирование один из информативных методов для проведения мониторинга в разных отраслях, в том числе и для территорий с угольными карьерами. Особое место по качеству и точности данных занимают спутники сверхвысокого пространственного разрешения: до 30 см (оптико-электронные спутники) и 25 см (радарные аппараты). Поскольку радарная съемка с высо-

ким и сверхвысоким пространственным разрешением проводится почти непрерывно, то использование таких материалов для мониторинга территорий имеет большие перспективы.

Применение методик интерферометрической обработки серий спутниковых радарных изображений для мониторинга смещений и деформаций земной поверхности на территориях с угольными карьерами обеспечит определение деформации земной поверхности с высокой точностью [21]. Внедрение подобных методик в систему маркшейдерско-геодезических наблюдений будет способствовать предотвращению чрезвычайных ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Занин К.А., Клименко Н.Н. Возможности космических систем радиолокационного наблюдения по периодичности наблюдения объектов и районов // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 4. С. 88-99.
2. А.В. Комиссаров, Е.Н. Кулик. Современные средства дистанционного зондирования. Новосибирск: 2020. - 290 с.
3. Сборник рабочих материалов по Международному регулированию планирования и использования радиочастотного (с учетом изменений, принятых ВКР-2007: Т. 1–4. – М.: НПФ «Гейзер», 2009. <http://www.geyser.ru/rus/products>
4. Бачманов М.М., Исков Д.А. Решение задачи оценивания детальности радиолокационного изображения объектов, расположенных на земной поверхности // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 2. С. 117-125.
5. Rei Sonobe. Combining ASAR-2 X-SAR HH and Sentinel-1 C-SAR VH/VV Polarization Data for Improved. Crop Mapping. Remote Sensing. 2019. Т. 11. № 16. С. 1920-1935.
6. Lang T., Yang Y., Jia K., Zhang C., You Z., Liang Y. Estimation of winter wheat production potential based on remotely-sensed imagery and process-based model simulations. Remote sensing. 2020. т. 12. № 17. с. 1-15.
7. Fontanelli, G.; Paloscia, S.; Zribi, M.; Chahbi, A. Sensitivity analysis of X-band SAR to wheat and barley leaf area index in the Merguellil Basin. Remote Sens. Lett. 2013, 4, 1107–1116.
8. National Research and Development Agency and Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Launch Result, Epsilon-3 with ASAR-2 Aboard. Available online: https://global.jaxa.jp/press/2018/01/20180118_epsilon3.html (accessed on 5 June 2019).
9. Нафиева Е.Н., Гречищев А.В. Космические радиолокационные системы мониторинга земли. Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 89-95.
10. Б. А. Дворкин, с. А. Дудкин. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования земли. Геоматика. 2013. № 2. С. 16-36.
11. Кулик Е.Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня завтра. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 136-141.
12. Нафиева Е.Н., Гречищев А.В. Космические радиолокационные системы мониторинга земли Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 89-95.
13. Бахтин А.А., Омельянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний. Труды МАИ. 2017. № 96. С. 18.
14. Нониашвили М.И., Крючков И.В., Лесников Г.А., Нефедов С.И., Семенов А.Н. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. С. 94-114.

15. M.Daraio, M.L. Battagliere, P. Sacco, M. Virelli. Cosmo-SkyMed data utilization and applications. 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada. 2014. P. 1-12.
16. Занин К. А. Обобщенный метод определения разрешающей способности радиолокатора с синтезированием апертуры // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2020. № 1. С. 4-12.
17. Занин К. А. Анализ качества координатной привязки изображений космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2013. № 4. С. 34-39.
18. Клименко Н.Н., Занин К.А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой. Воздушно – космическая сфера I Aerospace Sphere Journal. 2019. №2(99). С. 72-82.
19. Занин К. А., Клименко Н. Н. Выбор параметров орбитального построения космических систем радиолокационного наблюдения // Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 2. С. 30-41.
20. Клименко Н. Н., Занин К. А. Методика определения величины интерферометрической базы космической радиолокационной системы наблюдения для задач когерентного дешифрирования // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 2. С. 22-34.
21. N Drizhd, R Mussin, A. Alexandrov. Improving the Technology of Hydraulic Impact Based on Accounting Previously Treated Wells. International science and technology conference "Earth science". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272 (2019) 022031.

© Л. К. Трубина, Г. А. Мусина, 2021