

ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В РОССИИ

Костюк Е.А.¹, Денисов П.В.³, Бадак Л.А.¹, Захаров А.И.²

1 – АО «Российские космические системы»

2 – ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

3 – Аналитический центр Минсельхоза России

Основные тенденции развития космических систем радиолокационного наблюдения (КС РЛН) в мире характеризуются значительным увеличением действующих космических аппаратов (КА) с радиолокационными станциями с синтезированной апертурой (РСА) высокого разрешения. Причиной этого является то, что наряду с высокой детальностью получаемых радиолокационных изображений (РЛИ), сопоставимой с оптическими средствами наблюдения, космические РСА обладают такими неоспоримыми преимуществами, как:

- независимость от погодных условий и времени суток;
- возможность широкого обзора на больших дальностях при высокой разрешающей способности;
- гибкость управления и изменения параметров РСА, позволяющая варьировать положением и размерами зоны обзора, разрешающей способностью и формами получения и представления информации;
- высокая оперативность получения данных зондирования, вплоть до реального масштаба времени;
- качественно новые виды полезной информации о земной поверхности, в т.ч. полученные в результате интерферометрической и поляриметрической обработки отраженного сигнала.

Данные радиолокационного наблюдения являются носителем ценной и многообразной полезной информации.

Накопленный к настоящему времени мировой опыт использования спутниковых РСА-систем и анализа полученной ими радиолокационной информации показывает возможность решения с их помощью

широкого перечня прикладных задач в следующих областях:

- информационное обеспечение производственной деятельности – мониторинг районов крупномасштабного строительства и зон разработки полезных ископаемых, контроль состояния нефтепроводов, транспортных систем и других крупных инженерных объектов;
- мониторинг районов чрезвычайных ситуаций – мониторинг районов наводнений, землетрясений, пожаров, техногенных катастроф, оценка их последствий;
- картография – создание и обновление карт различного масштаба, построение детальных цифровых карт рельефа;
- растительные покровы – классификация типов растительности, определение границ и характеристик лесов, мониторинг их состояния и использования, оценка объема биомассы растительности, определение влажности;
- экология – контроль загрязнений морей и участков суши;
- контроль прибрежных акваторий – обеспечение навигации во льдах, контроль рыболовства в прибрежной зоне;
- гидрология – определение влажности почв, шероховатости земной поверхности, исследования эрозии и засоления почв, определение границ водоемов;
- гляциология – исследования типов ледовых покровов, мониторинг динамики ледовых покровов морей, ледников, айсбергов, определение их границ, оценка влагозапаса снежных покровов;
- океанография – наблюдение течений, фронтов, исследования внутренних и поверхностных волн, батиметрия;

- геология – изучение морфологии поверхности, исследования в области тектоники, исследования засушливых регионов, мониторинг процессов опустынивания и многое другое.

Важной особенностью современного применения систем радиолокационного наблюдения стало создание многоспутниковых группировок КА РЛН, функционально объединенных в единую систему и обеспечивающих глобальный, высокопериодичный мониторинг поверхности Земли с оперативным предоставлением данных наблюдения и результатов их обработки широкому кругу потребителей с использованием различных веб-сервисов.

Наблюдение земной поверхности в интерферометрических режимах съемки, обеспечивающих получение взаимно когерентных за протяженный интервал времени данных радиолокационного наблюдения, в настоящее время рассматривается как один из основных способов целевого применения современных КС РЛН при решении задач по большинству из вышеуказанных направлений и является еще одним существенным отличием КС РЛН от средств оптико-электронного наблюдения.

Необходимым условием реализации интерферометрической обработки радиолокационных данных является обеспечение их взаимной когерентности. Для этого должен быть выполнен ряд условий как

по геометрии радиолокационной съемки, так и по постоянству параметров среды распространения зондирующего сигнала и отражающей подстилающей поверхности. В простейшем случае проведение интерферометрической съемки участка земной поверхности осуществляется в процессе, как минимум, двух сеансов съемки с взаимно-параллельных орбит, разнесенных на расстояние, называемое интерферометрической базой B (рис. 1).

При этом существуют жесткие ограничения на размер указанной величины, превышение которых приводит к потере взаимной когерентности радиолокационных данных и исключает возможность их интерферометрической обработки. Так, например, для частотного диапазона S размеры интерферометрической базы не должны превышать величины первых единиц километров. Для обеспечения возможности проведения интерферометрической съемки КС РЛН должны двигаться внутри «интерферометрической трубки», диаметр которой определяется предельными размерами интерферометрической базы B (рис. 2). Для обеспечения возможности проведения дифференциальной интерферометрической съемки положение данной «интерферометрической трубки» относительно снимаемой земной поверхности должно быть жестко зафиксировано

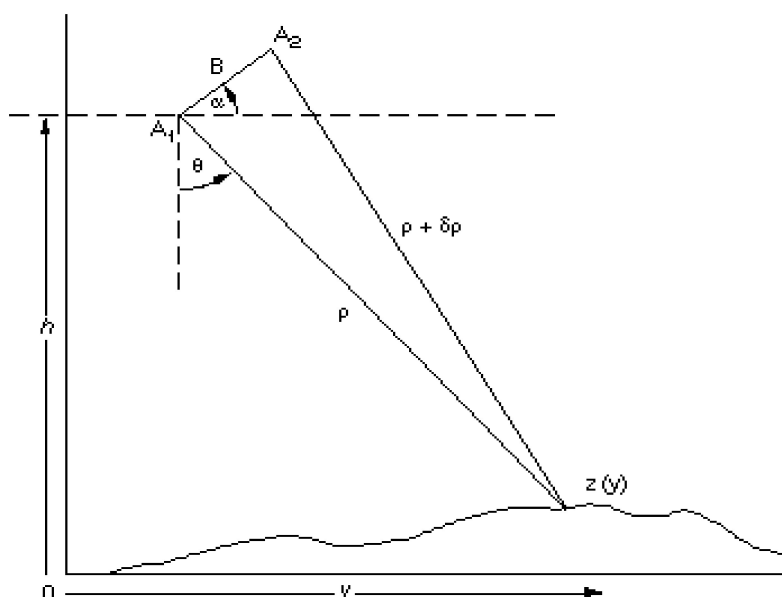


Рис. 1. Геометрия радиолокационной интерферометрической съемки

на протяжении всего срока активного существования космической системы.

Данные условия налагают жесткие требования на баллистическое построение КС РЛН. Реализация этих требований обеспечивается поддержанием неизменных параметров орбиты и значительным образом усложняет процесс управления космической системой.

Помимо выше сказанного, важным условием успешности интерферометрической съемки является идентичность параметров среды распространения зондирующего сигнала и подстилающей поверхности на момент проведения сеансов съемки. Различие указанных параметров, возникающее от сеанса к сеансу, приводит к частичной или полной потере взаимной когерентности (временной декорреляции) получаемых данных и значительно снижает точность или полностью исключает возможность их обработки. Если серия интерферометрических съемок значительно разнесена во времени, то вероятность нарушения идентичности параметров среды распространения и отражающей поверхности представляется весьма значительной. Причем, в наибольшей мере, это обстоятельство актуально для районов с нестабильной погодой, в т.ч. и для территории России. В этой связи, в общем случае, для обеспечения высокой эффективности интерферометрической съемки возникает необходимость контроля параметров среды распространения и состояния подстилающей поверхности на момент проведения съемки, что требует разработки технологий информационного обеспечения

процессов планирования целевого применения и обработки целевой информации априорными и апостериорными данными контроля среды распространения зондирующего сигнала и отражающей земной поверхности.

Еще одной проблемой, возникающей при обеспечении высокого качества информационных интерферометрических продуктов, является необходимость высокой точности определения интерферометрической базы, допустимая ошибка определения которой имеет сантиметровый масштаб. Решение этой проблемы требует разработки специальной технологии навигационно-баллистического обеспечения КС РЛН, построенной на обработке большого объема измерительной информации, получаемой с использованием систем GPS, ГЛОНАСС, а также от средств наземных траекторных измерений.

Начиная с 2015 года, в рамках Федеральной космической программы России начата разработка КС РЛН «Кондор-ФКА» в составе двух КА, оснащенных РСА.

КС РЛН «Кондор-ФКА» предназначена для получения радиолокационной информации в целях решения задач социально-экономического развития РФ и должна обеспечивать круглосуточное всепогодное зондирование континентальных районов Земли и акватории Мирового океана в интересах, в том числе:

- прогноза, мониторинга и информационного обеспечения мероприятий по ликвидации последствий наводнений, лесных пожаров, снежных лавин, других

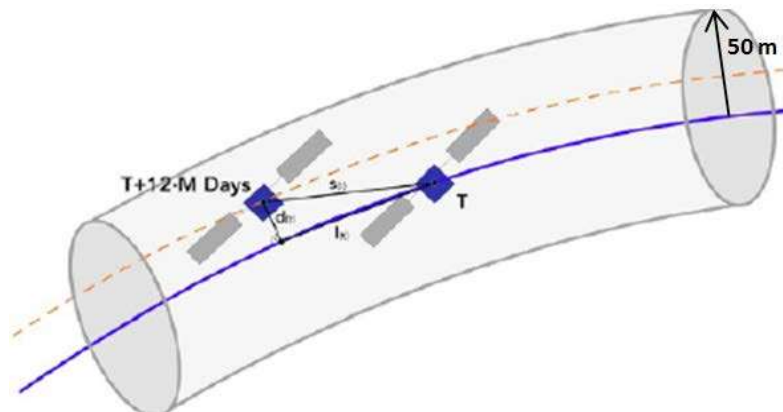


Рис. 2. «Интерферометрическая трубка» КС Sentinel-1

чрезвычайных ситуаций природного характера;

- своевременного обнаружения, определения площади, конфигурации и масштабов разливов нефтепродуктов по водной поверхности, мониторинга динамики развития загрязнения акваторий нефтепродуктами и сточными водами;
- оценки геологической, геодинамической и неотектонической ситуации, выявления потенциально опасных геологических процессов, объектов и явлений в районах строительства и эксплуатации ответственных объектов;
- выявления признаков развивающихся процессов с катастрофическими последствиями, оперативного уточнения и локализации площади, оценки характера и масштабов ущерба, отображения динамики обстановки при чрезвычайных ситуациях техногенного характера (в том числе оценки текущего и прогнозируемого состояния магистральных трубопроводов, крупномасштабных инженерных сооружений, других объектов повышенного технического риска), обеспечения поисково-спасательных работ;
- мониторинга состояния лесных экосистем и сельскохозяйственных угодий, контроля результатов применения агротехнологий, прогнозирования урожая;
- составления, ведения и актуализация кадастров сельскохозяйственных земель и др.

Запуски КА «Кондор-ФКА» планируются в 2020 и 2021 годах. Основные

целевые характеристики КА представлены в таблице 1.

КА «Кондор-ФКА» будут обладать широкими информационными возможностями, соответствующими современным космическим РСА. Наблюдение земной поверхности в интерферометрических режимах рассматривается как один из основных способов целевого применения КС «Кондор-ФКА».

Для получения взаимно когерентных данных о поверхности Земли орбитальное построение КС «Кондор-ФКА» должно обеспечивать возможность проведения многопроходной интерферометрической съемки одним или двумя КА, а также возможность квазисинхронной интерферометрической съемки с двух КА, находящихся на одной орбите и разнесенных по фазе (около 15 – 30 мин).

Реализация квазисинхронной интерферометрической съемки с двух КА исключит временную декорреляцию данных ДЗЗ, возникающую из-за изменения условий распространения и отражения траекторных сигналов за время между съемками, что характерно для условий целевого применения по территории России. Кроме существенного выигрыша в оперативности получения радиолокационных данных, такой подход позволит осуществлять сброс информации на один пункт приема поочередно с обоих КА.

Как уже было сказано, практическая реализация интерферометрической съемки требует сложного навигационно-баллистического обеспечения процессов

Таблица 1. Временные оценки этапов формирования БСП

Высота орбиты – 500 км Срок активного существования – 5 лет Скорость передачи информации – 256 Мбит/с		Частотный диапазон РСА – S (10 см) Ширина полосы обзора – 2 x 500 км Диапазон углов визирования – 20 – 55 град.	
Режим съемки	Разрешение (м)	Размер кадра (км)	Суточная производительность (кв. км)/кадры
Кадровый	1	(10 x 10) – (30 x 15)	10 000 – 45 000 / 100
Маршрутный	2 – 3	(10 – 30) x (100 – 500)	100 000
Обзорный	6 – 12	(30 – 200) x (100 – 500)	500 000
Интерферометрический режим съемки обеспечивается			

планирования целевого применения КС «Кондор-ФКА» и процессов обработки целевой информации. Для обеспечения высокой эффективности интерферометрической съемки с КС «Кондор-ФКА» необходимо информационное обеспечение процессов планирования целевого применения и обработки целевой информации априорными и апостериорными данными контроля среды распространения зондирующего сигнала и отражающей земной поверхности на момент проведения съемки.

Интерферометрическая съемка с КА «Кондор-ФКА» обеспечит получение высокоточных цифровых моделей рельефа местности в интересах различных отраслей хозяйства и, прежде всего, информационного обеспечения производственной деятельности и картографического обеспечения. В настоящее время чрезвычайно актуальными являются задачи как площадной радиолокационной интерферометрической съемки обширных районов суши в целях создания их глобальных трехмерных карт, так и формирования детальных высокоточных ЦМР на отдельные районы.

Важным практическим применением КС «Кондор-ФКА» станет получение данных о высотных смещениях и деформациях земной поверхности и крупных инженерно-технических объектов по результатам дифференциальной интерферометрической съемки. При этом должна обеспечиваться очень высокая точность получаемых результатов – единицы мм. Дифференциальная интерферометрическая космическая съемка получила в мире в настоящее время широкое применение и стала одним из основных направлений целевого применения современных космических РСА в интересах оперативного мониторинга критически важных районов и крупных промышленных объектов с целью раннего выявления предпосылок возникновения и развития природных или техногенных катастроф и обеспечения принятия необходимых упреждающих организационно-технических мер.

Новой и перспективной технологией получения информации о земной

поверхности в процессе интерферометрической съемки, которая также может быть реализована с использованием данных КА «Кондор-ФКА», представляется получение и интерпретация изображений когерентности в совокупности с амплитудными изображениями наблюдаемого участка местности. Первоначально эта технология использовалась как вспомогательная в процессе реализации технологий интерферометрической обработки радиолокационной информации. Однако по мере их развития формирование изображений когерентности местности и их комплексирование с амплитудными изображениями с последующим отслеживанием динамики их изменения выделилось в самостоятельную технологию, обеспечивающую решение задач классификации типов отражающих объектов и поверхностей и их изменений, происходящих за временной интервал наблюдения. Как показывает практика, композитные РЛИ, сформированные из различных слоев, представляющих собой разновременные амплитудные РЛИ, (а также изображения в других диапазонах) и изображения когерентности, полученные в процессе их интерферометрической обработки, отличаются высокой информативностью и обеспечивают высокую эффективность процесса их интерпретации.

Некоторые примеры продуктов, полученных по результатам радиолокационной интерферометрической и дифференциальной интерферометрической съемки зарубежных космических РСА, приведены на рис. 3, 4.

Проведенный анализ потребностей пользователей данных ДЗЗ выявил высокий спрос на космическую радиолокационную информацию, значительно превышающий возможности КС «Кондор-ФКА» по производительности. В этой связи обеспечение решения рассмотренных выше задач потребует реализации всех информационных возможностей КС «Кондор-ФКА». Получение информационных продуктов на базе данных космической радиолокационной интерферометрической съемки, удовлетворяющих всем запросам потребителей, будет сопряжено с выполнением

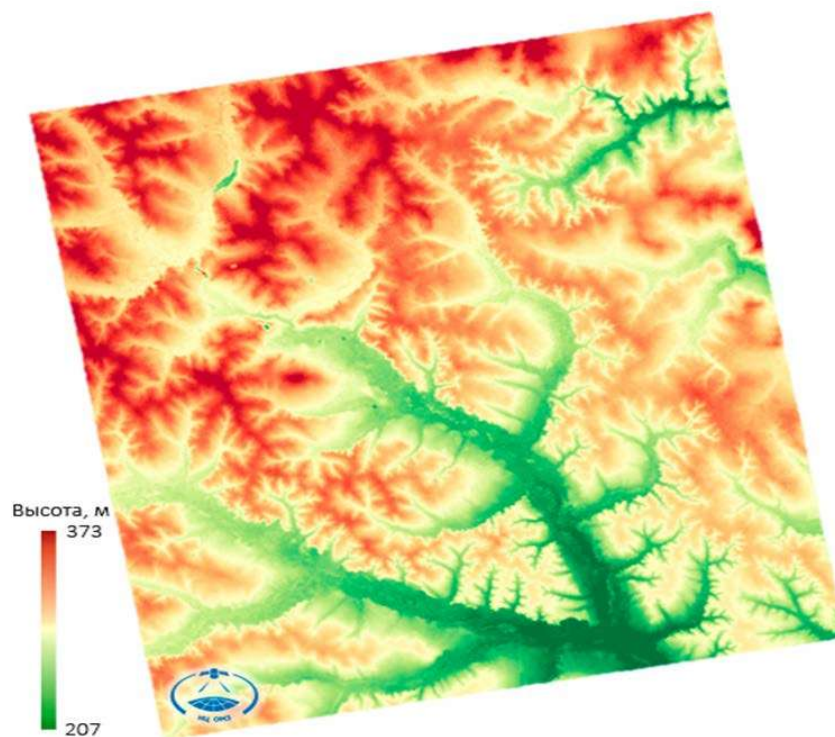
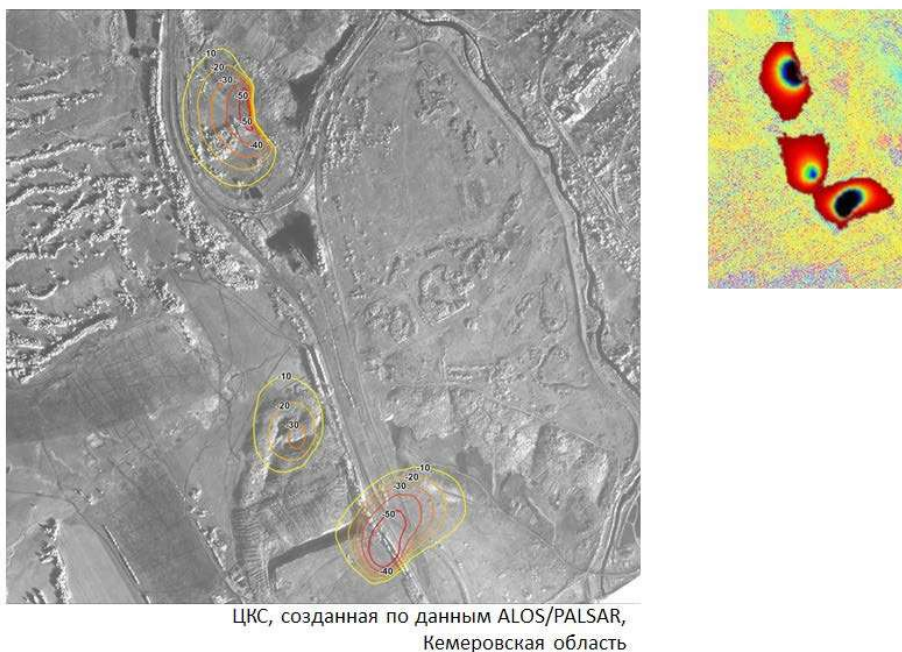


Рис. 3. Цифровая карта рельефа местности, сформированная по данным радиолокационной интерферометрической съемки



ЦКС, созданная по данным ALOS/PALSAR, Кемеровская область

Рис. 4. Продукт совмещения оптико-электронных данных и цифровой карты высотных смещений (просадок грунта), полученной по данным дифференциальной интерферометрической съемки районов прохождения транспортных магистралей и активной добычи полезных ископаемых шахтным способом

целого ряда жестких требований как по методологии проведения космической съемки, так и по последующей обработке значительных объемов полученных данных.

Для получения данных наблюдения потребуется проведение площадной съемки обширных районов и мониторинга большого количества разнообразных объектов наблюдения. В целях получения более полной информации о наблюдаемых поверхностях и происходящих на них изменениях целесообразно, при необходимости, использование технологий когерентной обработки разновременных РЛИ. Эффективность решения задач наблюдения может быть существенно повышена за счет комплексирования целевого применения КС «Кондор-ФКА» со средствами оптико-электронного наблюдения. Важным направлением целевого применения КС «Кондор-ФКА» может стать формирование бесшовных ЦМР на обширные районы России.

Полная реализация информационных возможностей КС «Кондор-ФКА» будет обуславливать высокую нагрузку на наземные

средства приема и обработки информации на всех этапах обработки целевой информации как в связи с высокими объемами целевой информации, так и в связи с необходимостью проведения высокоуровневой обработки и получения сложных разнообразных информационных продуктов.

Разнообразие решаемых задач и их сложность потребуют привлечения для тематической обработки РЛИ большого числа высококвалифицированных специалистов не только из состава персонала комплекса наземной обработки, но и из различных отраслей экономики.

Таким образом, целевое применение КС «Кондор-ФКА» будет сопряжено с целым рядом принципиально новых практических особенностей. Проблемы, связанные с необходимостью повышения эффективности функционирования КС «Кондор-ФКА» и оптимизации использования ее ресурса, появлением качественно новых видов данных ДЗЗ и их значительными объемами, с течением времени становятся все более актуальными.

Литература

1. Rosen P.A., et al., Synthetic aperture radar interferometry // Proceedings of IEEE, 2000. Vol. 3. P. 333–381.
2. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems, 1998. Vol. 14. P. 1–54.
3. Graham, L.C., Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. - Proc. IEEE, 1974, v62, N6, pp. 763-768.
4. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Jet Propulsion Laboratory // NASA, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
5. G. Krieger, A. Moreira, H. Fiedler et al. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Vol. 45, No. 11, November 2007 pp. 3317-3341.
6. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes // IEEE Transactions on geosciences and remote sensing, 1992. Vol. 30. N 5. P. 950–959.
7. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Леонов В.М., Сорочинский М.В. Влияние радиотехнических шумов аппаратуры РСА на точность измерения рельефа методами радарной интерферометрии // Космонавтика и Ракетостроение, 2016, №6, С. 132-139
8. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Леонов В.М. Требования к навигационному обеспечению космического интерферометрического РСА для построения высокоточных цифровых моделей рельефа // Космонавтика и ракетостроение, 2015, №6, С. 71-76