

УДК 621.396.96

КОСМИЧЕСКАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ЗЕМЛИ И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ В РАМКАХ ПРОЕКТА «КОНДОР-ФКА»

А. И. Захаров¹, Е. А. Костюк², П. В. Денисов², Л. А. Бадак²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

² Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», 127490, Москва, ул. Декабристов, 51-25

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2018 г.

Аннотация. Описаны различные варианты организации космической радиолокационной интерферометрической съемки поверхности Земли – однопроходная съемка двухантенным интерферометром (или двумя близко летящими космическими аппаратами с одноантенным радаром) и двухпроходная схема со спутника с одной антенной с близких и повторяющихся орбит, изложены их возможности и ограничения. Рассмотрен альтернативный вариант – квазиодновременной съемки двумя космическими аппаратами (с интервалом между съемками в несколько десятков минут) в рамках планируемого в России проекта «Кондор ФКА» с радаром S-диапазона. Обсуждаются достоинства и недостатки рассматриваемой съемки измерений, отмечена возможность расширения круга решаемых задач радиолокационного наблюдения Земли с помощью такой радиолокационной группировки.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, однопроходная и двухпроходная съемка, радары с синтезированной апертурой, цифровая модель рельефа, динамика подстилающей поверхности.

Abstract. Different scenarios of the spaceborne radar interferometric observations of Earth covers are described in a paper. Among them is single-pass imaging with two antennas interferometer (or with single antenna radars onboard the two satellites located at close orbits) and repeat-pass observations with single antenna radar. The limitations and merits of each scheme are described. Among them are temporal

decorrelation of scattered signals in repeat-pass observations and perturbations of phase difference on interferogram because of atmosphere turbulence, as well as lower cost of single satellite repeat-pass interferometry system. Special attention is paid to the short interval between observations (from tens of minutes till one day) because of remarkably low temporal decorrelation of scattered signals in two subsequent observations. An alternative scheme of interferometric observations, which may be implemented within the prospective Russian constellation “Condor-FKA” with S-band single-antenna synthetic aperture radar onboard two satellites, is considered. The constellation is planned to be launched in 2019-2020 to conduct observations from close orbits with 10-15 minutes – 1 day repeat interval. Among the preferences of the interferometric observations scheme planned are potentially lower temporal decorrelation, lower impact of atmospheric turbulence and slow dynamics of scattering surfaces. SAR operation in S-band is also preferred because of lower temporal decorrelation compared with X and C bands. Finally, in addition to a significant simplification of the constellation control during SAR surveys, in this scheme of observations there is no need for simultaneous data downlink from satellites. An implementation of plans of creation such an original orbital constellation promises the solution of the Earth remote sensing tasks at a qualitatively new level.

Key words: radar interferometry, single-pass and repeat-pass survey, synthetic aperture radars, digital elevations model, dynamics of surface covers.

В последние десятилетия характерной тенденцией в области наблюдения Земли с помощью космических систем радиолокационного наблюдения (КС РЛН) было резкое увеличение действующих космических аппаратов (КА) с радиолокационными станциями с синтезированной апертурой (РСА) высокого разрешения. Причина в том, 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 широкозахватной съемки при высокой разрешающей способности;
- высокая оперативность получения данных зондирования, вплоть до реального масштаба времени;
- появление качественно новых видов полезной информации о земной поверхности, в том числе благодаря поляриметрическим и особенно интерферометрическим технологиям измерений.

В основе метода радарной интерферометрии лежит использование информации о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных радиолокационной системой от выбранного участка местности с двух близких точек в пространстве, для которых выполняется условие взаимной когерентности принимаемых эхо-сигналов. При этом разность фаз принятых сигналов зависит от разности расстояний до цели и несет информацию о рельефе поверхности, а в двухпроходном варианте ещё и об изменении расстояний до цели за время между съемками [1,2].

Иллюстрации геометрии съемки рельефа в случае «плоской Земли» приведена на рис. 1. Здесь точка A_1 – первая съемки, а точка A_2 вторая точка съемки, которая может находится, например, на другой траектории этого же аппарата, выполненной спустя некоторое время. Обозначим через H высоту аппарата над поверхностью в первой точке съемки. Расстояние между точками съемки l является базой интерферометра, которая ориентирована под углом α_i к горизонту. Сигнал радара из точки A_1 приходит в точку поверхности P , находящуюся на расстоянии r_1 под углом α к надирному направлению и местной вертикали.

Интерферограммой называется карта разности фаз сигналов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, получаемая в результате поэлементного комплексного перемножения сигналов U_1 и U_2 , принятых в точках пространства A_1 и A_2 от одного и того же элемента поверхности:

$$U_1 U_2^* = u_1 u_2 \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)) = u_1 u_2 \exp\left(\frac{j\pi 2\kappa \Delta r}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где u_1 и u_2 – амплитуды сигналов, а Δr – разность расстояний от точек съемки до выбранного элемента поверхности, λ – длина волны. Коэффициент κ перед Δr , равный 2, учитывает факт двустороннего прохождения сигналов A_1 и A_2 в двухпроходной схеме съемки; а в однопроходной бистатической схеме съемки $\kappa=1$. Связь вариаций разности фаз $\Delta\varphi_i(\Delta h)$ или топографической фазы с вариациями высот рельефа поверхности Δh может быть найдена в [2].

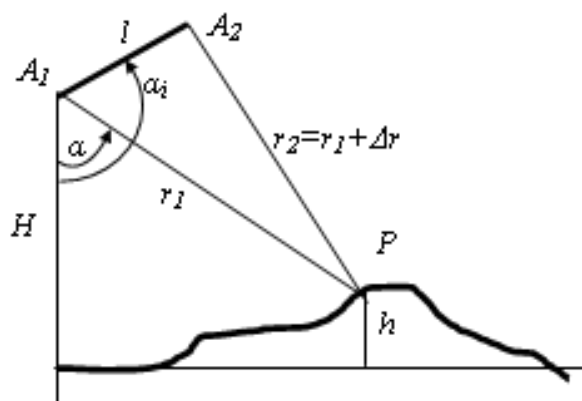


Рис. 1. Геометрия интерферометрической съёмки рельефа поверхности

Первый опыт построения и использования самолетного двухантенного интерферометра для измерения рельефа подстилающей поверхности был приведен в [3]. Космический вариант двухантенного однопроходного интерферометра в американском проекте SRTM позволил в 2001 году построить первую детальную цифровую модель рельефа земной поверхности в диапазоне географических широт -60° – $+60^{\circ}$ с абсолютной точностью измерений высот около 16 м при относительной ошибке 10 м и разрешением по поверхности 90 м для в открытой версии данных о топографии [4]. Наиболее детальная карта высот с глобальным охватом земной поверхности получена в немецком проекте TanDEM-X, стартовавшем в 2007 году. Цифровая модель рельефа имеет линейное разрешение по поверхности 12 м при относительной точности измерений высот 2-4 м и абсолютной точности 10 м [5].

Относительная или межпиксельная точность измерений высот в пределах кадра съемки определяется когерентностью отраженных сигналов в точках съемки A_1 и A_2 на рис. 1. Степень когерентности эхо-сигналов двух комплексных радарных изображений U_1 и U_2 может быть измерена непосредственно по данным радиолокационной съемки, она определяется следующим выражением:

$$\gamma = \frac{E\{U_1 \cdot U_2^*\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\}E\{|U_2|^2\}}}, \quad (2)$$

где $E\{\bullet\}$ — операция взятия математического ожидания по некоторому пространственному ансамблю отсчетов с центром в текущем элементе изображения.

Зависимость γ от геометрии съемки, радиотехнических параметров бортовых системы и условий съемки может быть получена исходя из допущения о независимости шумов, порождаемых этими факторами [6]. К основным составляющим декорреляции сигналов можно отнести, в первую очередь: декорреляцию, вызванную тепловыми шумами измерительной системы γ_N , пространственную декорреляцию отраженных сигналов ввиду изменения условий приема в различных точках пространства γ_{sp} , временную декорреляцию условий отражений γ_{td} из-за разнесения измерений по времени, объемную декорреляцию при съемке слоистых покровов с объемным рассеянием γ_v , декорреляцию из-за несовмещения Доплеровских центроидов сигналов γ_{dc} и декорреляцию из-за ошибок обработки γ_p . Ограничившись упомянутыми эффектами, в предположении их независимости можно записать

$$\gamma = \gamma_N \gamma_{sp} \gamma_{td} \gamma_v \gamma_{dc} \gamma_p. \quad (3)$$

Интерферометрическая когерентность характеризует ошибки измерений разности фаз и, соответственно, относительную, межпиксельную точность измерения высот поверхности [7].

Абсолютная точность измерения высот методами радарной интерферометрии определяется в первую очередь точностью знания положения

точек съемки в пространстве. Как отмечено в [8], для радаров X-диапазона типа TerraSAR-X требования по точности знания положения интерферометрической базы (или точек съемки) могут быть на уровне первых сантиметров при решении задачи поточной генерации цифровых карт рельефа без использования опорных измерений высот на земной поверхности.

Современные космические РСА, как правило, являются системами с одной антенной, вследствие чего интерферометрические наблюдения поверхности возможны только с повторяющихся орбит с существенным, иногда очень большим интервалом между съемками. Проблемы интерферометрических наблюдений с повторяющихся орбит – во временной декорреляции отраженных сигналов вплоть до потери когерентности ($\gamma_{td}=0$ в (3)) и потери фазовой информации. Временная декорреляция вследствие изменения микрорельефа или диэлектрических свойств отражающей поверхности возрастает с ростом интервала между съемками, она существенно больше при наблюдениях в более высокочастотных диапазонах. Космические группировки типа ERS-1/ERS-2 (С-диапазон частот) или Cosmo-SkyMED (X-диапазон частот) – это способ сократить интервал между повторными съемками вплоть до одного дня [9]. В работе [10] выполнен анализ уровня когерентности для группировки Cosmo-SkyMED для различных интервалов времени (1-40 суток) между съемками района города Шимановск в зимнее время. Уровень когерентности для лесных массивов падал от 0.5 до 0.3, а для безлесных участков от 0.6 до 0.3. Наиболее резко когерентность падала при переходе от 1 к 8-дневному интервалу.

Необычная группировка из спутников ERS-ENVISAT [11] позволила проводить интерферометрические наблюдения с интервалом 20 минут между съемками. Хотя потенциал такой системы не был полностью раскрыт из-за различия в частотах несущей этих систем, выявлено, что временная декорреляция на таком коротком интервале между съемками достаточно низка. В работе [12] отмечено, что для открытых почв когерентность может быть равна 0.7, что сравнимо с когерентностью в специализированной

однопроходной топографической миссии TanDEM-X. Для растительных покровов, а также урбанизированных территорий когерентность заметно ниже, в районе 0.2-0.3, что в первую очередь объясняется высоким уровнем объемной декорреляции γ_v из-за слишком большой пространственной базы пары ERS-ENVISAT. Там же отмечено сильное влияние ветрового воздействия на микрорельеф отражающей поверхности растительных покровов, приводящее к снижению когерентности отражений на интервале повторной съемки.

Другим искажающим фактором являются меняющиеся условия прохождения сигнала от РСА до поверхности. Интерферометрическая разность фаз на радарных интерферограммах $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ является не только функцией $\Delta\varphi_t(\Delta h)$ вариаций рельефа поверхности, она зависит также от мелкомасштабных площадных смещений поверхности (динамика подстилающей поверхности) $\Delta\varphi_d$ за время между съемками, атмосферных флуктуаций электрической длины пути сигнала радара $\Delta\varphi_a$, шумов приемной системы $\Delta\varphi_n$ и неизвестной начальной разности фаз $\Delta\varphi_0$:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_0. \quad (4)$$

Атмосферные неоднородности являются причиной вариаций длины пути сигнала на несколько сантиметров, что может порождать ошибки измерений рельефа более 10 метров (в зависимости от геометрии и параметров интерферометрической съемки). Вместе с тем, съемка с повторяющихся орбит может ценным источником сведений о динамике подстилающей поверхности при решении различных задач научной и прикладной направленности (компонента $\Delta\varphi_d$ в (4)). Съемка с повторяющихся орбит может быть при некоторых условиях (снижение периода повторной съемки и проведение съемки в приемлемых одностипных метеоусловиях) использована и для построения цифровых карт рельефа поверхности.

Важной особенностью облика современных систем радиолокационного наблюдения является организация многоспутниковых группировок КА РЛН, функционально объединенных в единую систему и обеспечивающих

глобальный, высокочастотный мониторинг поверхности земного шара 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 широкого круга.

Исходя из этого, начиная с 2015 года в России в рамках Федеральной космической программы РФ начата разработка оригинальной КС РЛН «Кондор-ФКА» в составе двух космических аппаратов, оснащённых радиолокаторами с синтезированной апертурой [13]. КС РЛН «Кондор-ФКА» предназначена для получения радиолокационной информации в целях решения задач социально-экономического развития Российской Федерации 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 чрезвычайных ситуаций природного характера;

- своевременного обнаружения, определения площади и масштабов разливов нефтепродуктов по водной поверхности, мониторинга динамики развития загрязнения акваторий нефтепродуктами и сточными водами;

- выявления потенциально опасных геологических процессов, в том числе 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 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 2019 и 2020 гг. Основные целевые характеристики КА представлены в таблице 1. КА «Кондор – ФКА» будут обладать широкими информационными возможностями, не уступающими современным космическим РСА. Наблюдение земной поверхности в интерферометрических режимах рассматривается как один из основных способов целевого применения КС «Кондор – ФКА».

Таблица 1.

Основные целевые характеристики КА «Кондор – ФКА»

Высота орбиты – 500 км. Срок активного существования – 5 лет. Скор. передачи инф.–256 Мбит/с.		Частотный диапазон РСА – S (10 см). Ширина полосы обзора – 2 x 500 км Диапазон углов визирования – 20 ⁰ – 55 ⁰ .	
Режим съемки	Разрешение (м)	Размер кадра (км)	Суточная производительность (кв. км)/кадры
Кадровый	1	(10x10)–(30x15)	10000–45000/100
Маршрутный	2–3	(10–30)x(100-500)	100000
Обзорный	6–12	(30-200)x(100-500)	500000
Интерферометрический режим съемки обеспечивается			

Для получения взаимно когерентных эхо-сигналов 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 (от 15 – 30 мин до одних суток).

Благодаря квазисинхронной интерферометрической съемке с двух КА с интервалом несколько десятков минут заметно снизится временная декорреляция отраженных сигналов. Практически незаметным будет искажающее влияние медленных смещений подстилающей поверхности и вариаций высотного профиля коэффициента преломления в атмосфере на интерферометрическую разность фаз. Работа РСА КА «Кондор – ФКА» в S-диапазоне также выигрышна из-за снижения временной декорреляции по сравнению с С и Х диапазонами волн. Кроме существенного упрощения управления группировкой в ходе съемки, эта схема наблюдений позволит также осуществлять сброс информации на один пункт приема поочередно с обоих космических аппаратов.

Интерферометрическая съемка с помощью группировки 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. Важным практическим применением КС «Кондор – ФКА» станет получение по результатам дифференциальной интерферометрической съемки данных о деформациях земной поверхности и смещениях объектов промышленной инфраструктуры. 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 построение и интерпретация карт когерентности в совокупности с амплитудными изображениями местности. Комплексование карт когерентности с амплитудными изображениями местности с последующим отслеживанием динамики их изменения повысит качество решения задач классификации объектов поверхности и выявления изменений их состояния за время между повторными съемками.

Как отмечено ранее, практическая реализация интерферометрической съемки требует сложного навигационно-баллистического обеспечения процессов планирования целевого применения КС «Кондор – ФКА» и 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 о среде распространения радиолокационных сигналов и отражающей поверхности на момент проведения съемки с целью минимизации деструктивного влияния атмосферы, а также нежелательной динамики земной поверхности в случае решения задачи цифрового картирования рельефа.

Таким образом, при построении этой группировки КС «Кондор – ФКА» необходимо будет решить ряд принципиально новых проблем навигационного обеспечения, управления работой группировки, сброса и обработки и использования целевой информации. Вместе с тем, реализация планов создания этой оригинальной орбитальной группировки даст возможность решения задач дистанционного зондирования Земли на качественно новом уровне.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00816).

Литература

1. Rosen P.A., et al. Synthetic aperture radar interferometry. // Proceedings of IEEE, 2000, Vol. 3, pp. 333–381.
2. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. // Inverse Problems, 1998, Vol. 14, pp. 1–54.
3. Graham, L.C. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. // Proceedings of IEEE, 1974, Vol.62, No 6, pp. 763-768.

4. Mukul M., Srivastava V., Mukul M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. // Journal of Earth System Science, 2015, Vol. 124, No. 6, pp. 1343–1357.
5. Gonzalez J.H., Bachmann M., Krieger G., Fiedler H. Development of the TanDEM-X Calibration Concept: Analysis of Systematic Errors. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, Vol. 48, Issue 2, pp. 716-726.
6. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, Vol. 30, No. 5. pp. 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.
9. COSMO-SkyMed (Constellation of 4 SAR Satellites) [электронный ресурс]. По материалам, предоставленным Herbert J. Kramer. Сайт «Earth Observation Portal». Дата обращения 27.12.2018. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed>.
10. Денисов П.В., Захаров А.И., Мартьянов А.С., Трошко К.А. Исследование интерферометрической когерентности в зависимости от интервала между радарными съёмками на примере данных X диапазона. // VIII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн // Материалы Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-

полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 246-251. ISSN 2304-0297 (CD-ROM)

11. Guarnieri A.M., Prati C., ERS–Envisat combination for interferometry and super-resolution. // Proceedings of ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, Oct. 16–20, 2000.

12. Santoro M., Askne J.I.H., Wegmuller U., Werner C.L., Observations, Modeling, and Applications of ERS-ENVISAT Coherence Over Land Surfaces. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, Vol. 48, Issue 2, pp. 716-726.

13. Костюк Е.А., Денисов П.В., Бадак Л.А., Захаров А.И. Возможности космической радиолокационной интерферометрии и ее перспективы в России // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России, 2019, №1, в печати.

Для цитирования:

А.И.Захаров, Е.А.Костюк, П.В.Денисов, Л.А.Бадак Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и её перспективы в рамках проекта «КОНДОР-ФКА». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.2