

### Исследование интерферометрической когерентности в зависимости от интервала между радарными съёмками на примере данных X диапазона

П.В. Денисов<sup>1</sup>, А.И. Захаров<sup>2</sup>, А.С. Мартьянов<sup>1</sup>, К.А. Трошко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, строение 25, denisov@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область, aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

*Исследовано влияние интервала между съёмками на один из основных параметров качества интерферометрических продуктов – значение когерентности. Показано, как изменяется когерентность с увеличением срока наблюдения для лесных и незалесенных участков.*

*The influence of the interval between acquisitions on the value of coherence, one of the main parameters of the quality of interferometric products, is studied. It is shown how coherence changes with increasing observation period for forest and non-forested areas.*

Источниками глобальной и в то же время детальной информации о высоте рельефа земной поверхности являются цифровые модели рельефа (ЦМР), получаемые по различным данным (топографические карты, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и др.).

Территория Российской Федерации, для которой характерно ведение активной хозяйственной деятельности на обширных площадях, может быть описана несколькими открытыми ЦМР. Из них наибольшее распространение получили модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). Помимо невысокой детальности (90(30) м и 30 м соответственно), они имеют ряд существенных недостатков: первая ограничена параллелью 60° с.ш., т.е. охватывает только около 50% площади РФ (рис. 1), а вторая, несмотря на покрытие северных территорий, в целом ряде случаев содержит большое количество артефактов, пустот и прочих ошибок [1], [2].

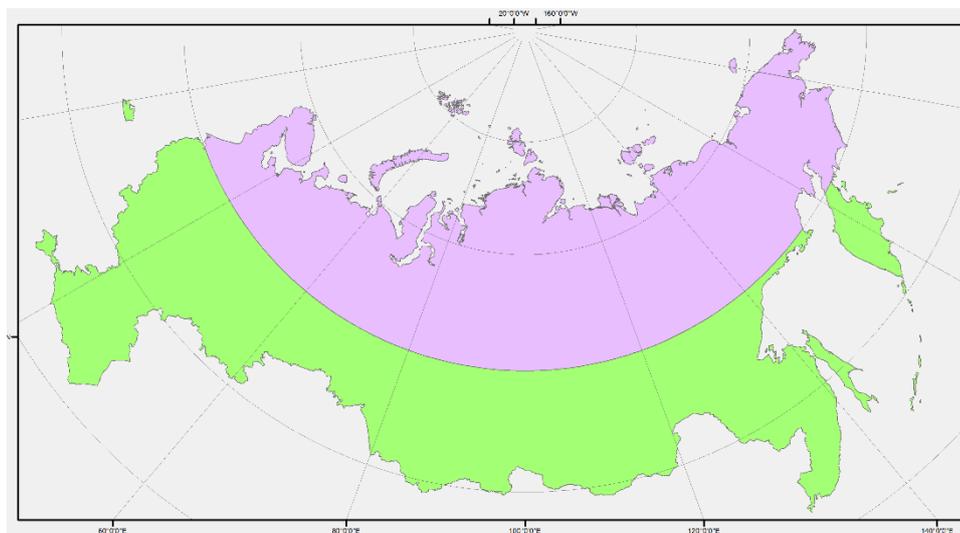


Рис. 1. Покрытие России открытыми ЦМР.

Отсутствие общедоступной глобальной, актуальной, детальной и одновременно точной ЦМР на всю территорию России ставит вопрос об оптимальных отечественных источниках её получения. Использование данных ДЗЗ для построения ЦМР является менее затратным по сравнению с наземными измерениями, аэрофотосъёмкой, воздушным лазерным сканированием. Учитывая, что более 67% поверхности Земли постоянно покрыто облачностью [3], использование материалов съёмки в оптическом диапазоне для формирования ЦМР ограничено. Таким образом, наиболее надежным и оптимальным источником информации о рельефе видится интерферометрическая спутниковая радиолокационная съёмка и технология обработки данных, которые уже более двух десятков лет демонстрируют успешные результаты, имеющие, в том числе, двойное назначение.

В настоящее время существуют различные космические системы (КС), обеспечивающие возможность проведения интерферометрической съёмки в интересах решения задачи формирования ЦМР. Например, миссия TanDEM-X (DLR, Германия), реализующая тандемную пару с так называемой «мягкой базой» и базирующаяся на основе 2 космических аппаратов (КА) TerraSAR-X с радаром с синтезированной апертурой (РСА) на борту, специально создавалась для решения задач формирования ЦМР с беспрецедентной точностью и пространственным охватом в соответствии со спецификацией HRTI-3 (High Resolution Terrain Information) [4, 5]. Такой подход к формированию космической системы имеет целый ряд преимуществ, основным из которых является практически полное исключение факторов пространственной и временной декорреляции (изменчивости) объектов наблюдения. Однако из-за высоких требований к применению прецизионной бортовой аппаратуры позиционирования, уточнению данных по наземным средствам траекторных измерений и других трудностей, он достаточно сложно технически реализуем [6].

Другая КС, COSMO-SkyMed (ASI, Италия) реализует интерферометрическую съёмку другого вида – с повторяющихся орбит. В состав КС входят 4 однотипных КА, обеспечивающих проведение съёмки за 16-дневный цикл с временной базой (интервалом) в 1, 3, 4, 8 и 16 дней. Стоит отметить, что орбитальное построение КА №2 и №3 обеспечивает получение интерферометрических съёмок данных с временной базой в 1 день, приближаясь по интервалу между наблюдения к тандемной съёмке [7].

В настоящее время в РФ создаются аналогичные по некоторым характеристикам КС радиолокационного наблюдения (РЛН). Вполне вероятно, что на ранних этапах формирования КС, состоящей из нескольких аналогичных КА, будет обеспечиваться интерферометрическая съёмка только одним аппаратом с повторяющихся орбит за различные интервалы времени в зависимости от баллистического построения. Поэтому степень падения когерентности эхо- сигналов РСА с течением времени представляет практический интерес.

При построении ЦМР немаловажным параметром является рабочий диапазон длин волн. Зачастую особенность целевого применения КС РЛН для решения задач двойного назначения требует получение данных высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, что достигается при использовании радиолокаторов X-диапазона.

### **Тестовые участки и данные**

Для целей данного исследования были выбраны материалы радиолокационной съёмки по территории Амурской области, полученные в условиях почти точного повторения орбит космических аппаратов относительно земной поверхности. Геометрия съёмки и особенности интерферометрической обработки таких снимков и описаны, например, в [8]. Набор данных для интерферометрической обработки включал 13 пар изображений РСА COSMO-SkyMed, полученных в период с 11 ноября

2009 г. по 22 января 2010 г (табл. 1). Все сеансы были проведены в одинаковых условиях с углом обзора  $\theta = 40^\circ$ , наклонной дальностью спутника до центра кадра  $r_n = 780$  км и разрешением по наклонной дальности  $\Delta r = 1.5$  м. В период съемки в Амурской области стояли достаточно сильные морозы, что способствовало повышению временной стабильности условий отражения радиолокационных сигналов от земной поверхности.

На основе указанных изображений были сформированы три серии интерферометрических пар изображений. Общие принципы формирования каждой серии – первое из изображений серии выбиралось в качестве основного; далее в качестве парных изображений интерферометрических пар поочередно выбирались последующие по времени съемки изображения.

**Таблица 1. Описание данных.**

N	Даты съемки (master file, slave file)	Интервал между съёмками в сутках	Размер перпендикулярной компоненты интерферометрической базы, $l_p$ , м
1	20091111;20091112	1	101.787
2	20091213;20091214	1	93.3819
3	20091229;20091230	1	185.054
4	20091111;20091119	8	518.984
5	20091213;20091221	8	58.197
6	20091229;20100106	8	143.92
7	20091111;20091127	16	605.783
8	20091229;20100114	16	562.069
9	20091229;20100115	17	463.208
10	20091111;20091205	24	643.806
11	20091229;20100122	24	70.47
12	20091111;20091213	32	322.139
13	20091111;20091221	40	264.116

### Методы и результаты измерений

Карта когерентности характеризует показатель декорреляции участков интерферометрической пары. Построение карт когерентности производится на этапе создания интерферограммы и позволяет судить о характеристиках спутниковой системы, и, в конечном счете, о качестве создаваемого на основе данных РСА продукта.

Величина когерентности (от 0 до 1) отражает степень зашумления интерферограммы, она вычисляется как нулевой коэффициент пространственной корреляции двух сигналов. При вычислении значений когерентности для каждого пикселя изображения нами использовалось стандартное выражение:

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) * I_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_1(x, y)|^2 * \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_2(x, y)|^2}},$$

где  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$  – значения отсчетов сигнала первого и второго изображений интерферометрической пары,

\* – знак комплексного сопряжения,

$X$  и  $Y$  – размеры области (окна) усреднения по дальности и азимуту, которые по умолчанию задавались равными 3 (объем выборки равнялся 9).

Расчет значений когерентности для изображений PCA COSMO-SkyMed проводился в данной работе после операции усреднения пространственных изображений (Multilooking) с коэффициентами некогерентного накопления по дальности и азимуту, равными, соответственно, 4 и 5. После расчета карт когерентности, они были геокодированы, затем в программном пакете ArcGIS по ним были вычислены статистические характеристики (рис. 2,3) для леса и безлесных территориям с использованием масок типа лес- безлесные участки. Важно отметить, что результирующая когерентность  $\gamma$  зависит от набора факторов. Наиболее значимыми являются временная декорреляция  $\gamma_{temp}$ , пространственная декорреляция  $\gamma_{spatial}$  и декорреляция из-за тепловых шумов приемника  $\gamma_{noise}$ . Исходя из некоррелированности перечисленных факторов, выражение для когерентности можно записать так [9]:

$$\gamma = \gamma_{temp} \gamma_{spatial} \gamma_{noise}.$$

При постоянном уровне тепловых шумов приемника определяющими временные вариации когерентности являются временная и пространственная декорреляция. Временная декорреляция является наиболее трудно формализуемым фактором. Она возникает в случае расфокусировки изображения из-за возникновения локальных неоднородностей в атмосфере или же вследствие модификации мелкомасштабного рельефа поверхности за время между съемками. Последнее может возникнуть из-за выпадения осадков, деформации микрорельефа поверхности вследствие сельхозработ или в сейсмически активных регионах, а также вследствие ветровых колебаний водной поверхности и растительных покровов.

Пространственная декорреляция возникает вследствие неодинаковой геометрии съемки изображений интерферометрической пары; для статистически однородной шероховатой поверхности она может быть выражена через размер перпендикулярной компоненты интерферометрической базы [10]:

$$\gamma_{spatial} = \left| 1 - \frac{l_p}{l_{p\max}} \right|,$$

где  $l_p$  и  $l_{p\max}$  перпендикулярная компонента интерферометрической базы и её максимально возможное значение, которое равно [9]

$$l_{p\max} = \frac{\lambda r_n \operatorname{tg}(\theta)}{2\Delta r},$$

где  $\lambda$  - длина волны сигнала PCA COSMO-SkyMed, равная 3 см.

Для указанных выше геометрии и параметров съемки  $l_{p\max} = 6500$  м.

Когерентность является важной характеристикой интерферометрических измерений, она позволяет оценить уровень фазовых шумов на интерферограмме [11] и, следовательно, точность измерений высот рельефа и подвижек постилающей поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что среднее значение когерентности уменьшается с увеличением сроков между наблюдениями (табл. 2). Наиболее драматичное снижение когерентности на интервале между съемками (табл. 3) наблюдается при переходе с суточного к восьмисуточному интервалу между съемками для лесных и безлесных территорий (0.09 и 0.13 соответственно). Наименьшее влияние на изменение когерентности оказывает переход от 16;17 суточного интервала к 24 суточному, что справедливо как для лесных (снижение на 0.02), так и для безлесных территорий (снижение на 0.01).

Среднее значение когерентности неодинаково для лесных и безлесных участков (табл. 4). Наибольшая разница между ними наблюдается на суточном интервале (0.09), затем она снижается до 0.05 на 8-суточном интервале и до незначительной величины 0.01 на 32;40 суточном интервале. На интервале 32;40 суток процессы декорреляции настолько велики, что даже на безлесных участках не встречаются значения больше 0.8.

Графики изменений значений когерентности в зависимости от интервала между съёмками для лесных и открытых участках (рис. 2,3) коррелируют между собой в части выбросов в значениях когерентности при одинаковом интервале между съёмками, что говорит о влиянии иного фактора. Вероятно, это вариации пространственной базы  $l_p$ . По этой причине наблюдается локальный подъем когерентности на графике рис. 2 и 3 для пар 6 и 11 из табл. 1, имеющих сниженное значение базы относительно среднего для 13 пар из табл. 1. Для пар 4, 7 и 10 с повышенными значениями базы наблюдается локальное снижение когерентности. Не получено свидетельств влияния изменения метеословий в дни проведения съёмок на интерферометрическую когерентность.

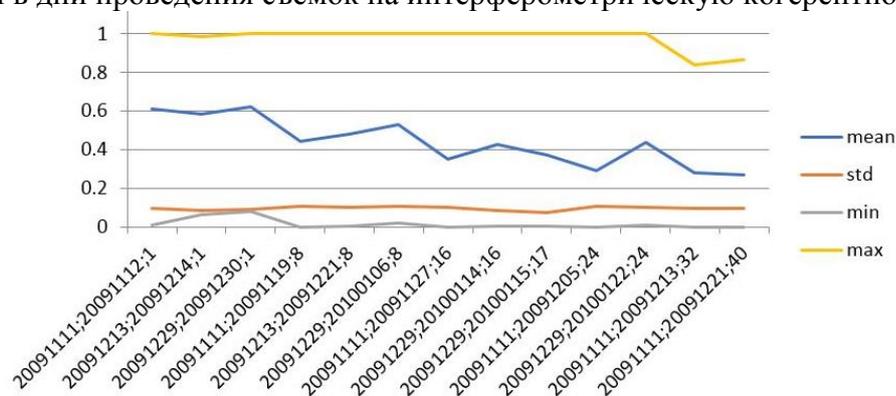


Рис. 2. Параметры когерентности по безлесным территориям, сортировка по возрастанию интервала между съёмками.

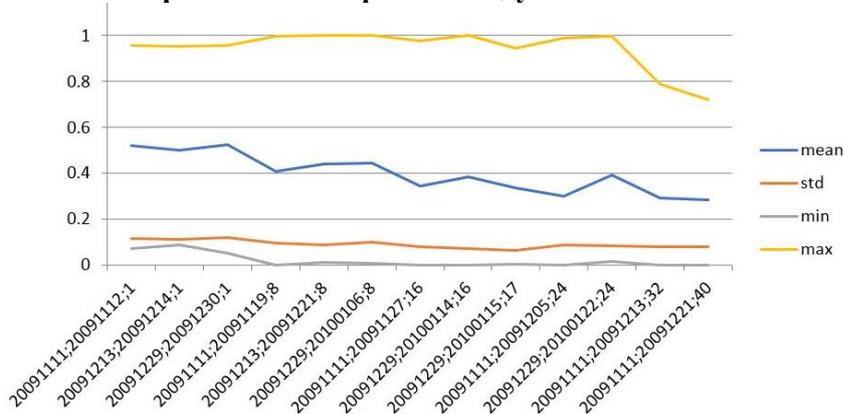


Рис. 3. Параметры когерентности по залесенным территориям, сортировка по возрастанию интервала между съёмками.

Таблица 2. Среднее значение когерентности в зависимости от интервала между съёмками.

	Суточный	8-суточный	16;17-суточный	24-суточный	32;40-суточный
Лес	0.52	0.43	0.36	0.34	0.29
Не лес	0.61	0.48	0.38	0.37	0.28

Таблица 3. Разность между соседними средними значениями когерентности в зависимости от интервала между съёмками.

	1-8 суточный	8-16;17 суточный	16;17-24 суточный	32;40-24 суточный
Лес	0.09	0.07	0.02	0.05
Не лес	0.13	0.10	0.01	0.09

**Таблица 4. Разность средней когерентности между лесными и безлесными участками в зависимости от интервала между съёмками.**

Суточный	8-суточный	16;17-суточный	24-суточный
0.09	0.05	0.02	0.01

### **Выводы**

Исследовано влияние интервала между съёмками на один из основных параметров качества интерферометрических продуктов – уровень интерферометрической когерентности. Получены оценки когерентности, отмечено, её снижение с увеличением интервала между наблюдениями для лесных и безлесных участков. Отмечено влияние размера пространственной базы на уровень интерферометрической когерентности.

Вопрос учета особенностей целевого применения КС РЛН в части решения задач формирования ЦМР на основе метода спутниковой радиолокационной интерферометрии с повторяющихся орбит КА целесообразен для дальнейшего исследования как в плане увеличения количества типовых территорий, типов поверхности, а также широтных/зональных поясов.

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

### **Литература**

1. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и время*. 2015. №3(21). С. 278-291
2. EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data
3. Земля оказалась пасмурной и облачной планетой – National Geographic Россия. URL: <http://www.nat-geo.ru/planet/190988-zemlya-pasmurnaya-i-oblachnaya-planeta/>
4. Zink M., Krieger G., Fiedler H., Hajnsek I., Moreira A., Werner M. TanDEM-X – The First Bistatic SAR Formation in Space // *Advanced RF Sensors for Earth Observation (ARSI)*, 05.12.2006 – 06.12.2006, ESA/ESTEC, Netherlands
5. Стандарт HRTI
6. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования /Ред. В.С. Верба. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
7. COSMO-SkyMed – eoPortal Directory – Satellite Missions. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed>
8. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.:КРАСАНД, 2012. 248 с.
9. Zebker, H., & Villasenor, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5), pp. 950–959.
10. Bamler and P. Hartl, Synthetic aperture radar interferometry// *Inverse Problems*, 1998, vol. 14, pp.: R1–R54
11. 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*, № 6 (91), 2016, с. 132-139.