

## АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОНИТОРИНГА ВЫСОТ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ МНОГПРОХОДНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

*Горячкин О.В., Дмитренко В.И., Харитонов А.А.*

В статье обсуждаются информационные возможности мониторинга высоты объектов на поверхности Земли, получаемой методом двухпроходной космической радиолокации системой с синтезированной апертурой (РСА) в X-диапазоне частот. В рамках исследования произведена экспериментальная оценка погрешности определения относительной высоты рельефа поверхности Земли по данным спутника TERRASAR-X. Обсуждаются возможности определения высот зданий и сооружений по фазовой информации РСА. Данная технология иллюстрируется соответствующими примерами. Обсуждаются информационные возможности мониторинга изменения высоты объектов на поверхности Земли, получаемой методом многопроходной, космической дифференциальной интерферометрии.

**Ключевые слова:** радиолокатор, интерферометр, синтезированная апертура, поляризация, топография, декорреляция, обработка изображений.

### Введение

В последние годы растет интерес к РСА при решении разнообразных задач радиотехнического мониторинга объектов на поверхности Земли. Одним из методов получения данных о рельефе, изменении ландшафта, подвижек земной поверхности является радиолокационная двухпроходная интерферометрия, которая осуществляется путем совместной обработки пары снимков РСА одной и той же территории. Снимки должны быть получены с РСА, разнесенных в пространстве на некоторое расстояние, называемое базовой линией. Геометрия обзора поверхности Земли при интерферометрической съемке приведена на рис. 1.

Практическое применение данной технологии для коррекции географических карт, создания 3-D моделей городов, использования полученных данных в ГИС требует анализа точности предоставляемой информации [1]. Теоретически хорошо известно, что погрешность определения высоты методом двухпроходной космической РСА интерферометрии зависит от высоты, величины и ориентации базовой линии, диапазона частот, уровня шума, временной декорреляции радиолокационного изображения (РЛИ), алгоритмов интерферометрической обработки, объектового состава на РЛИ. Расчет погрешности в этом случае

часто затруднен отсутствием точной информации о параметрах учитываемых факторов. В этой связи для практического применения данных методов актуальны экспериментальные исследования информационных возможностей радиотехнического мониторинга высоты объектов на поверхности Земли.

Таблица 1. Параметры съемки

Наименование	Значение для РСА1 (3.09.2009)	Значение для РСА2 (14.09.2009)
Угол визирования (град) Q	23,096	23,104
Высота (км) H	516,258	516,226
Наклонная дальность (км) R	561,241	561,240
Базовая линия (м) B	82,755	

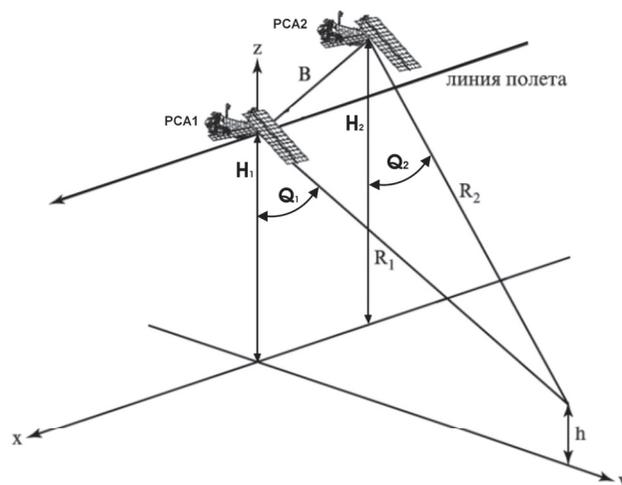


Рис. 1. Схема двухпроходной РСА интерферометрии.  $A_1$  и  $A_2$  — последовательные (за два прохода) положения РСА при съемке точечной цели P; B — величина базовой линии;  $R_1$  и  $R_2$  — наклонные дальности до цели;  $H_1$  и  $H_2$  — высота;  $Q_1$  и  $Q_2$  — углы визирования

Для экспериментального изучения возможностей радиолокационной интерферометрии в X-диапазоне была использована пара РЛИ г. Самары, полученная с КА «TerraSAR-X» (Германия),

уровня обработки LEVEL 1B со следующими характеристиками: длина волны РСА 3,1067 см; поляризация излучаемого и принимаемого сигнала вертикальная; частота повторения импульса 4107,5855 Гц; частота дискретизации 164829 кГц; число строк дальности 32861; число отсчетов в строке дальности 14672; наклонная дальность до первого отсчета 554,5697 км; расстояние между отсчетами в строке 0,909 м; расстояние между строками 1,870 м. Съёмки проводились 03 и 14.09.2009. Параметры съёмки показаны на рис. 1 и в таблице 1.

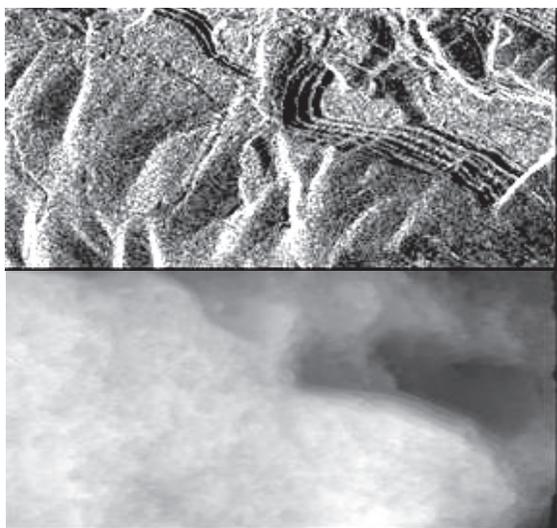


Рис. 2. РЛИ Сокского карьера (вверху) и восстановленный рельеф (внизу)

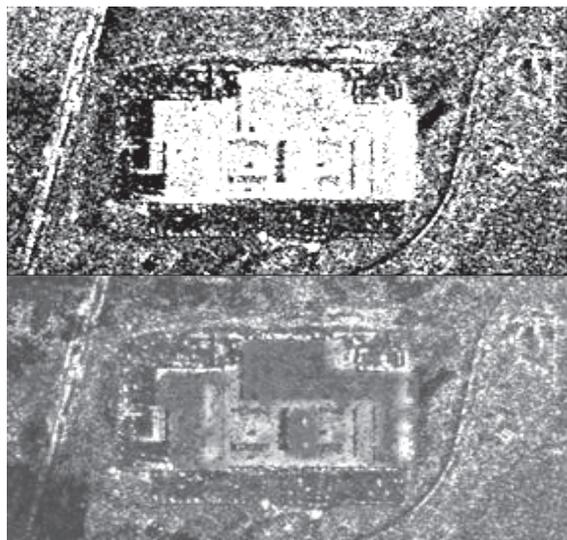


Рис. 3. Наложение цветовой маски рельефа на амплитудное изображение торгового центра

Процесс интерферометрической обработки РЛИ состоит из следующих этапов: поиск идентичных точек на паре изображений и трансформирование одного из снимков (вспомогательного)

в геометрию другого (основного) снимка; выделение интересующего участка; расчет коэффициентов компенсации набега фазы (по дальности и по азимуту): комплексное перемножение основного и трансформированного вспомогательного изображения, в результате получаем матрицы интерферограммы и когерентности; фильтрация интерферограммы; развертка фазы, пересчет относительных значений разности фаз в абсолютные; пересчет фазовых значений в высоту, в результате получаем матрицу высот. В качестве интерферометрического процессора в работе использовалось ПО PHOTOMOD-Radar, разработанное фирмой «Ракурс» (г. Москва). На рис. 2 показано исходное РЛИ Сокского карьера, используемого для иллюстрации возможностей метода. Радиолокационные системы наблюдения предоставляют возможности использования измеренной информации о высоте поверхности для улучшения дешифрируемости малоразмерных объектов на РЛИ. Данные технологии иллюстрируются на рис. 3. Наложение информации производится посредством перемножения отсчетов амплитудного изображения и цифровой модели рельефа данного участка, кодированной псевдоцветом.

### Экспериментальное исследование погрешности восстановления рельефа

В результате интерферометрической обработки реальных радиолокационных снимков были получены матрицы относительных высот рельефа отдельных участков территории и проведена оценка погрешности измерения относительных высот для различных подстилающих поверхностей. Для оценки погрешности были выбраны сравнительно ровные участки земной поверхности (средняя величина неровностей не более 30 см) с различными характеристиками: асфальтобетонные покрытия, с травянистой растительностью, древесная растительность. Методику измерений можно проиллюстрировать на примере РЛИ участка аэродрома.

На рис. 4в показан фрагмент матрицы относительных высот участка аэродрома (большим значениям высот соответствуют более светлые пиксели). На фрагменте четко видно, что ВВП и стоянка более равномерно окрашены, чем окружающее травяное поле, то есть имеет меньший разброс измеренных высот. Для оценки погрешности измерения высот, участка поля аэродрома с травянистым покровом размером 200×200 м<sup>2</sup> обрабатывалось 75 значений относительной высоты с шагом 30 м по поверхности. Средне-

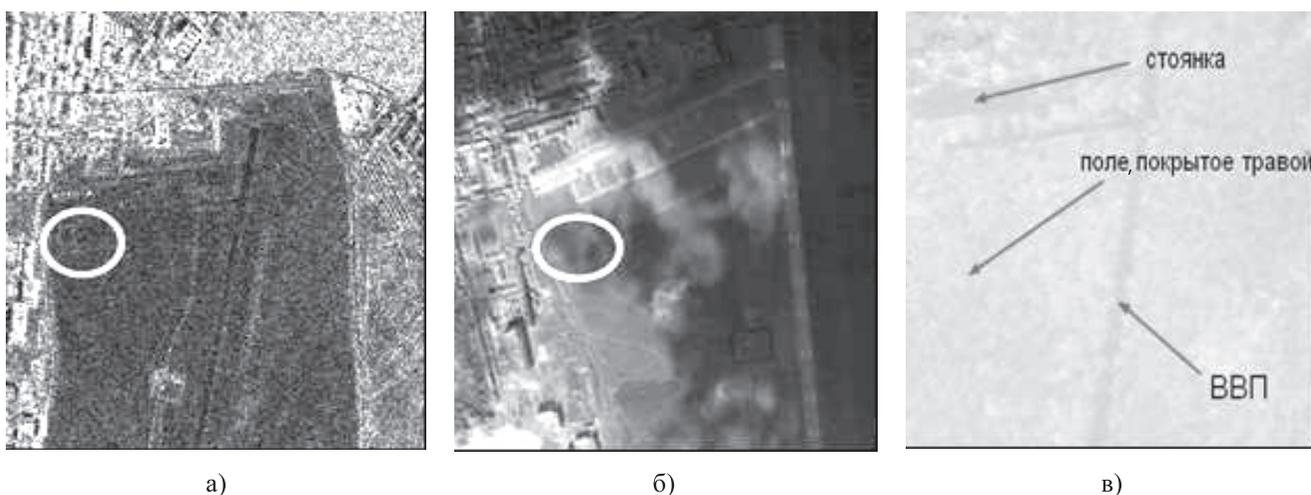


Рис. 4. Участок аэродрома с окружающим травянистым покровом:  
а) РЛИ; б) оптическое изображение; в) матрица относительных высот

квадратичное отклонение (СКО) значений высот составило 1,592 м. Данные о погрешности, полученные для других участков РЛИ, следующие: травяной покров: 1,0...1,7 м; бетонное покрытие (взлетно-посадочная полоса): 0,9...1,3 м; участок лиственного леса: 10,0...15,0 м. В рамках данного исследования была произведена оценка погрешности определения относительной высоты рельефа. Для этого проводилась оценка величины разброса измеряемых высот и высот, полученных с использованием данных топографических карт. Средняя разница высот составляет 41,5 м. Данная поправка учитывается далее при измерении абсолютного значения высот.

На точность восстановления рельефа методом двухпроходной радиолокационной интерферометрии большое влияние оказывает временная декорреляция полученных РЛИ. Водная поверхность является основным источником временной декорреляции и, соответственно, одним из основных источников ошибок при построении рельефа поверхности. Для снижения данной составляющей погрешности применяется маскирование динамично изменяющихся на РЛИ объектов.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия является единственным методом дистанционного зондирования, обеспечивающим высокую точность определения высот и смещений за счет использования фазовой компоненты сигнала. Однако неизбежный фазовый шум вносит значительные погрешности при определении высот и смещений земной поверхности, а в крайних случаях полностью разрушает интерферограмму. Это происходит ввиду значительных изменений условий отражения электромагнитной волны от зем-

ной поверхности за период между повторными пролетами КА (временная декорреляция). Величина когерентности (от 0 до 1) отражает степень разрушения интерферограммы и может служить мерой пригодности пары снимков для расчета интерферограммы и цифровой модели рельефа местности (ЦМР). Для оценки влияния декорреляции радиолокационных изображений на величину погрешности определения высоты был выбран участок поверхности Земли с обрабатываемыми сельскохозяйственными полями в пойме реки Сок. По паре изображений была получена цифровая модель местности, по которой измерялись относительные высоты и карта когерентности.

На рисунках ба-в цифрами обозначены участки поверхности Земли (сельскохозяйственные поля), по которым оценивалась погрешность. Были рассчитаны интерферограмма, карта когерентности двух пар РЛИ. В период между съемками (11 дней) радиометрические характеристики участка изменились (в том числе в результате проведения сельскохозяйственных работ), что привело к снижению когерентности отдельных участков. Результаты оценки значений когерентности и погрешности измерения высот отдельных участков приведены в таблице 2.

В работе проведена оценка погрешности воспроизведения рельефа пересеченной местности относительно данных топографической карты (предварительно на основе изолиний топографической карты была построена TIN-модель выбранного участка) и ЦМР SRTM, построенная по результатам миссии Shuttle Radar Topography Mission (США) в результате использования однопроходного интерферометра.

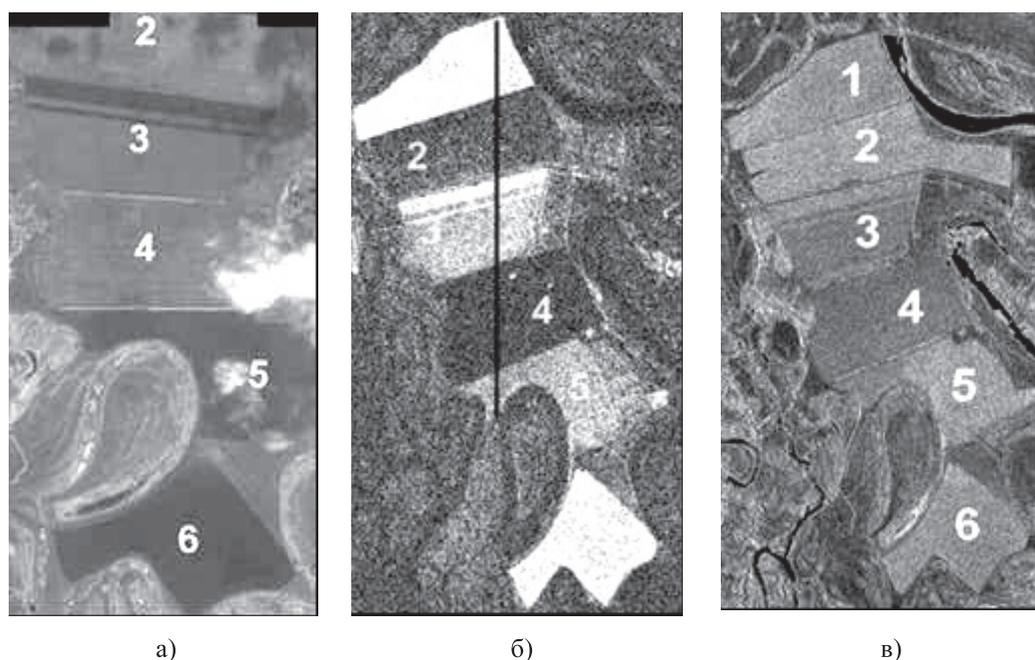


Рис. 5. Анализ влияния временной декорреляции на погрешность восстановления рельефа: а) оптическое изображение, б) карта когерентности; в) РЛИ

По участку с высокой степенью когерентности с.к. погрешность определения абсолютной высоты (относительно оф. карты) для SRTM составила 1,5 м; для TerraSAR – 2,2 м; для участка с низкой когерентностью SRTM – 1,3 м; для TerraSAR – 2,7 м. Более высокие погрешности, полученные при обработки данных TerraSAR-X, очевидно связаны с достаточно высокой временно декорреляцией снимков, и как результат, высокие фазовые шумы.

Таблица 2. Когерентность участков

№ участка	Когерентность	Погрешность (м)
1	0,8271	0,37
2	0,50238	1,88
3	0,6956	0,844
4	0,47149	13,06
5	0,6682	0,5988
6	0,7865	0,41671

### Измерение высот зданий и сооружений по данным РСА

При обновлении топографических и других тематических карт, помимо задания размеров и привязки по координатам объектов, составляющих инфраструктуру населенных пунктов, может потребоваться указание их высот относительно земли. Такая задача, например, стоит при использовании цифровых карт для выбора места располо-

жения базовых станций сотовой связи в условиях плотной городской застройки. Высота строений, составляющих инфраструктуру населенных пунктов, как правило, не превышает несколько сот метров. Это позволяет однозначно определить высоту строений относительно подстилающей поверхности, используя фазовые соотношения неразвернутой интерферограммы. Высота строения пропорциональна разности фаз между точками интерферограммы, соответствующими основанию строения и его верхней точке.

Таблица 3. Экспериментальные данные измерения высот

Номер объекта	Величина изменения фазы (рад)	Измеренная высота объекта (м)	Высота по другим источникам (м)
1	4,135	38,84	35
2	3,855	36,21	34
3	5,359	50	48
4	8,21	77,13	71

Перепад высот, соответствующий изменениям фазы на  $2\pi$  или одному «фрингу», составит 59,1м; то есть

$$h_{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \frac{R \sin \theta}{B \cos(\theta - \alpha)}, \quad (1)$$

где длина волны зондирующего импульса  $\lambda = 0,031$  м, средний угол визирования  $\theta = 23,1^\circ$ , наклонная дальность  $R = 561,241$  км; базовая линия  $B = 82,755$  м; угол наклона базовой линии  $\alpha = 22,748$  град. В качестве иллюстрации данного метода рассмотрим процесс обновления фрагмента карты г. Самары в районе Московского шоссе и ул. Советской Армии. Изменение геометрии карты осуществлялось с использованием как оптического изображения КА «Ресурс-ДК», так и высокодетального РЛИ TerraSAR выбранного участка местности. Результаты измерения высот отдельных зданий по интерферограмме указаны в таблице 3, а сами объекты показаны на рис. 6.

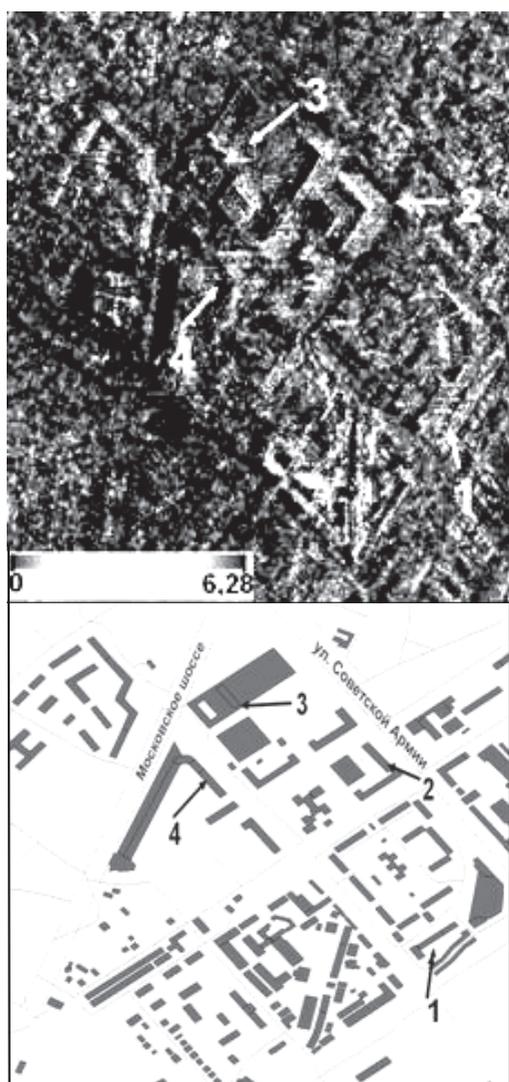


Рис. 6. Обновление цифровой карты по данным высокодетальной радиолокационной съемки: цветокодированная интерферограмма, совмещенная с РЛИ выбранного фрагмента (вверху), фрагмент топографической карты (внизу)

### Экспериментальные исследования погрешности изменения высоты методом дифференциальной интерферометрии по уголковым отражателям

Для иллюстрации возможностей дифференциальной интерферометрии были проведены радиолокационные съемки участка г. Самары с параметрами, указанными в таблицах 1-2. Далее были рассчитаны интерферограммы двух пар РЛИ. На их основе были получены карты смещения подстилающей поверхности. Для оценки погрешности измерения смещений были установлены уголкового отражатели с эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) порядка  $1400 \text{ м}^2$ . Уголкового отражатели были установлены как на поверхности земли, так и на различных объектах городской инфраструктуры. В период между второй и третьей съемкой отражатель, установленный на земле, был намеренно смещен вниз на 10 мм.

Расположение уголкового отражателя на РЛИ показано на рис. 7, где различные интенсивности цвета соответствуют различным значениям смещения. Результаты измерений смещения высот уголкового отражателей внесены в таблицу 4. Разность между измеренным смещением первого уголка и средним значением полученных на элементах 2-6 составляет  $-0,0114$  м, что вполне согласуется с известным заранее значением 10 мм, на которое был смещен первый уголкового отражатель в процессе измерений. СКО оценки смещения высоты уголкового отражателя по шести отражателям составило 1,43 мм.

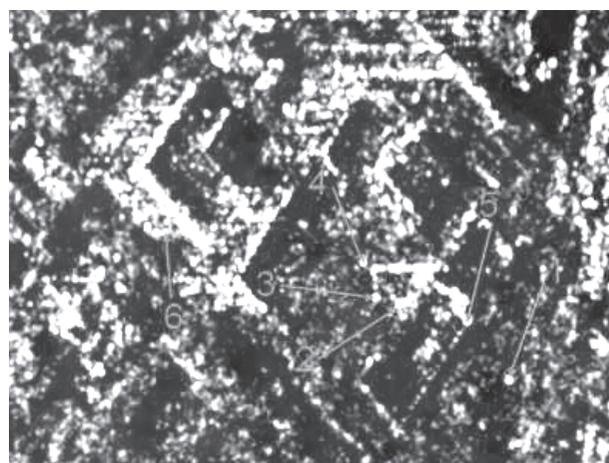


Рис. 7. Фрагмент РЛИ, совмещенный с закодированной матрицей смещений

Таблица 4. Характеристики отражателей

Номер отражателя	1	2	3	4	5	6	СКО по отраж.	Изм.
Яркость (отн. ед.)	4702	2783	2283	1784	1818	936		
Смещение, м	-0,0171	-0,0051	-0,0075	-0,0043	-0,0074	-0,0042	0,00143	-0,0114

### Экспериментальные исследования погрешности изменения высоты методом дифференциальной интерферометрии по стабильным отражателям

Как показано в предыдущем разделе, эффективность метода дифференциальной интерферометрии по уголковым отражателям весьма высока, однако часто нет возможности установить специальные отражатели или нет возможности их точно идентифицировать на РЛИ. В этом случае смещения высоты могут быть вычислены по имеющимся стабильно рассеивающим элементам конструкции объекта.

Представленный ниже пример демонстрирует потенциальные возможности трехпроходной дифференциальной интерферометрии при регистрации микросмещений (микродеформаций) высотных объектов городской застройки при использовании «стабильных» естественных отражателей. В данном примере используются три РЛИ здания «Вертикаль», самого высокого здания на сегодняшний день в г. Самаре.

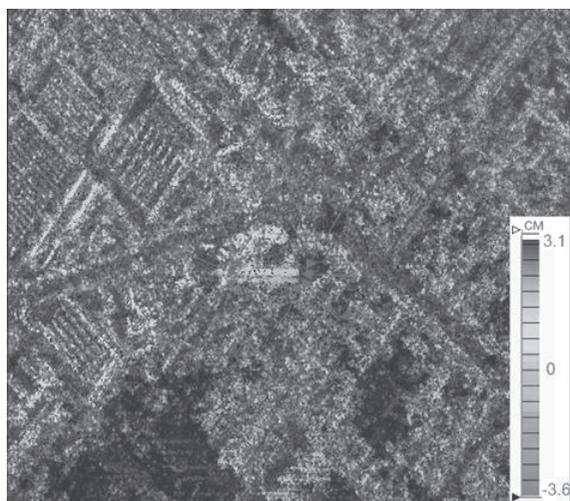


Рис. 8. Фрагмент РЛИ, совмещенный с цветосинтезированной матрицей смещений высот

В результате дифференциальной интерферометрической обработки снимков высотного здания «Вертикаль» сформирована цифровая карта смещений рельефа обработанного участка и проведена оценка погрешности микродеформаций здания. Расположение контрольных точек, по которым фиксировались измерения смещений высоты, здания «Вертикаль» показано на рис. 8, поле смещений в см показано цветовой шкалой. Результаты измерений смещений высоты здания внесены в таблицу 5.

Таким образом, по результатам измерений мы видим, что точки 1-4, находящиеся наверху здания, имеют наибольшее значение смещения, чем точки 1'-4', находящиеся внизу здания. Следовательно, разность между измеренным средним значением смещения верхних точек (1-4) и средним значением смещения точек у основания здания составляет 0,0158 м; что демонстрирует наличие смещения здания «Вертикаль», обусловленное, по-видимому, ветровой нагрузкой.

Таблица 5. Результаты измерений смещений здания «Вертикаль»

Точки		Смещение, м
1 пара	1	0,0149
	1'	0,0015
2 пара	2	0,0170
	2'	0,0014
3 пара	3	0,0191
	3'	0,0018
4 пара	4	0,0188
	4'	0,0022
Среднее значение смещения по 1-4 точкам, м		0,0175
Среднее значение смещения по 1'-4' точкам, м		0,0017
Разность средних значений смещений, м		0,0158

На рис. 9 показан пример эффективного использования данной технологии при наблюдении за состоянием объектов инфраструктуры железных дорог. Комбинированное радиолокационное изображение и матрица деформаций наглядно иллюстрируют отсутствие смещений на поверхности железнодорожного моста, представляющего собой набор стабильных отражателей с большой ЭПР.

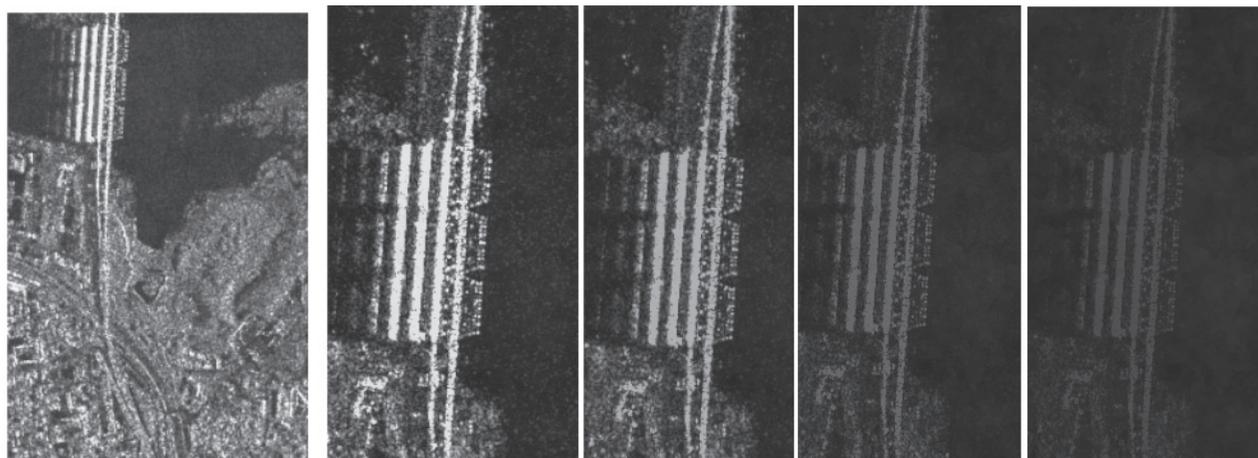


Рис. 9. Измерение микросмещений металлических конструкций железнодорожного моста

По мере уменьшения при обработке яркости РЛИ относительно матрицы смещений на рис. 9 слева направо проявляется стабильный участок железнодорожного полотна и конструкций моста (сплошная полоса на крайнем справа изображении), а флуктуации фазы, вызванные нестабильными, в том числе и вторичными, отражениями, исчезают.

#### Заключение

Проведенные исследования позволили получить количественные оценки погрешности восстановления высотной информации по данным

двухпроходной космической интерферометрии в X-диапазоне частот. Проведенные исследования позволили получить количественные оценки погрешности восстановления изменений высот объектов по данным многопроходной космической интерферометрии в X-диапазоне частот.

#### Литература

1. Горячкин О.В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. №2, 2010. – С.92-104.

### MONITORING OF HIGH-RISE OBJECTS BEING BASED ON MULTIPASS SAR INTERFEROMETER IN X-BAND

Goriachkin O.V., Dmitrenok V.I., Kharitonova A.A. Goriachkin O.V., Dmitrenok V.I., Kharitonova A.A.

**In the article discusses the possibility of monitoring the height information of objects on the Earth's surface, obtained by two-pass, space interferometer SAR X-band frequencies. In the study, the experimental estimation of the error in determining the relative height of the relief surface of the Earth by satellite data TER-RASAR-X. The possibilities of determination you-hundred buildings on the SAR phase information. This technique is illustrated by relevant examples. We discuss the possibility of monitoring information changes the height of objects on the earth's surface, obtained by multi-pass, space differential interferometer.**

**Keywords:** radar, interferometer, synthetic aperture radar (SA), polarization, topography, decorrelation, image processing.

Горячкин Олег Валериевич, д.т.н., заведующий Кафедрой «Теоретические основы радиотехники и связи» (ТОРС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-72. E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com

Дмитренко Виктор Иванович, инженер Кафедры ТОРС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-72.

Харитоновна Анна Александровна, старший преподаватель Кафедры ТОРС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-72. E-mail: annasamara@list.ru