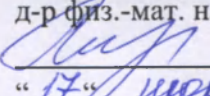


Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Физико-технический факультет
Кафедра промышленных космических систем

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 Г.Р. Шрагер

“ 17 ” июля 2019 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы

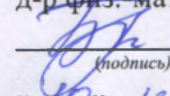
**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ
ИЗМЕРЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в
аспирантуре
направление подготовки 01.06.01 - Математика и механика

Добрынин Илья Игоревич

Научный руководитель

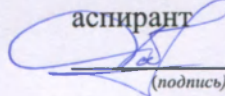
д-р физ.-мат. наук, профессор

 В.Н. Бранец

“ 10 ” июля 2019 г.

Автор работы

аспирант

 И.И. Добрынин

Томск - 2019

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Обеспечение технологической надежности и экологической безопасности протяженных объектов газовой промышленности, таких как магистральные газопроводы (МГ), на сегодняшний день является актуальной задачей. Для её решения создаются системы геотехнического мониторинга, позволяющие оперативно обнаружить опасные геодинамические процессы в коридоре прохождения трассы МГ. Одним из эффективных методов обнаружения и измерения подвижек земной поверхности является радарная интерферометрия.

Обработка радиолокационных снимков методом дифференциальной радарной интерферометрии позволяет обнаруживать смещения земной поверхности на больших территориях. Однако точность измерения смещений существенно зависит от свойств подстилающей поверхности, которые влияют на пространственную и временную когерентность радиосигнала.

Для локального повышения точности измерений применяется метод постоянных отражателей радиосигнала. Постоянные отражатели радиосигнала представляют собой яркие точечные радиолокационные цели, стабильно отражающие радиолокационный сигнал на протяжении серии измерений. Роль постоянных отражателей могут выполнять как естественные природные объекты, сооружения и конструкции, так и искусственные отражатели радиосигнала, такие как уголковые отражатели (УО).

Смещения измеряются на основе фазовой информации в точке установки УО. Однако, на фазу отраженного радиосигнала оказывает влияние множество внешних факторов, таких как состояние атмосферы в момент съемки, топография местности, электрические характеристики окружающих УО объектов и т. д. Исследованию этих факторов и посвящена данная работа.

Цель и задачи работы

Цель диссертационной работы заключалась в комплексном исследовании внешних факторов, влияющих на точность измерения смещений земной поверхности предложенным методом

радиолокационной интерферометрии с применением угловых отражателей (УО) радиосигнала.

Конкретными задачами, решаемыми в диссертационной работе являются:

1. Теоретическое исследование существующих работ и выделение внешних факторов, влияющих на точность измерения смещений.
2. Разработка методов полного или частичного устранения всех или части влияющих факторов для минимизации ошибки измерения смещений.
3. Экспериментальная проверка разработанных методов, описание и анализ результатов экспериментального исследования.
4. Программная реализация системы измерения смещений методом радиолокационной интерферометрии с применением УО радиосигнала.

Методология и методы исследования

Объектом исследования являются факторы, воздействующие на радиосигнал в частотных диапазонах от 1,2 до 9,8 ГГц.

Предметом исследования является влияние данных факторов на характеристики радиосигнала, отраженного от трехгранного УО заданных размеров, а также на точность измерения положения УО в пространстве.

Методы исследования. Анализ совокупности внешних факторов, влияющих на точность измерения смещений представляет собой генерализацию и обобщение существующих научных знаний по тематике работы и осуществлялся с учетом доступных теоретических и экспериментальных данных, полученных в рамках аналогичных исследований.

Экспериментальная проверка предложенных методов устранения влияющих факторов проводилась с использованием разработанных экспериментальных конструкций, а также программных пакетов QGIS, ESA SNAP, и разработанного программного обеспечения на языке Python.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Метод минимизации факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии,

закрывающийся в комплексном применении УО специальной конструкции, а также применении программных методов точной геопривязки и предобработки сырых радиолокационных снимков.

2. Оригинальная конструкция УО для измерения смещений земной поверхности в заданных точках, оптимизированная для работы в частотных диапазонах радиолокационной спутниковой съемки.

3. Метод установки и взаимной ориентации УО, обеспечивающий минимизацию влияния боковых лепестков отраженного радиосигнала, атмосферных искажений, а также атмосферных осадков.

4. Программное обеспечение, реализующее расчет смещений УО в проекции на ось съемки и на перпендикуляр к поверхности земли, в которой установлен данный отражатель.

Научная новизна и практическая значимость работы

На основе комплексного анализа факторов, вносящих вклад в ошибку измерения смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии разработаны методы минимизации этих факторов. Данные методы позволяют существенно снизить ошибку и повысить точность измерений, что позволит использовать данную технологию в различных прикладных областях, таких как мониторинг целостности протяженных объектов, расположенных в сложных геологических условиях (нефте и газопроводы, ЛЭП и т. д.).

Предложены, разработаны и апробированы оптимальные конструкции измерительных установок (угловых отражателей), являющихся составной частью метода минимизации внешних влияющих факторов. Также предложены оптимальные способы их установки и пространственной ориентации для обеспечения максимально возможной точности измерений.

Разработано программное обеспечение, реализующее комплексный процесс измерения смещений земной поверхности в точках установки УО на основе существующих открытых источников радиолокационных снимков в различных радиочастотных диапазонах предложенными методами. Данное ПО позволяет производить расчет смещений слоя земной поверхности для выбранной местности при наличии радиолокационных снимков для данной местности.

Степень достоверности

Достоверность приведенного анализа факторов, влияющих на точность измерения смещений, подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных в рамках диссертационного исследования.

Использование достаточного теоретического материала и согласованность теоретических расчетов и практических результатов позволяют говорить о высокой степени достоверности исследования.

Апробация результатов

Основные результаты, предложенные методы и рекомендации для минимизации влияния исследованных факторов на точность измерения смещений земной поверхности, а также разработанные программные продукты предложены к использованию в рамках технологии комплексного мониторинга магистральных газопроводов.

Теоретические и практические результаты работы используются в системе геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на основе радиолокационных обследований с космических аппаратов, и, в частности, технология мониторинга земной поверхности с применением УО радиосигнала, разработанной компанией АО “Газпром космические системы” для МГ “Сила Сибири”.

Публикации

По результатам исследования опубликовано 2 работы, входящие в журналы из списка, рекомендованных ВАК [1, 2]. Общий объем публикаций - 1.09 п.л., авторский вклад - 1.09 п.л.

Личный вклад автора

В ходе работы автором был проанализирован богатый научный и практический опыт по теме диссертационного исследования, выделены основные факторы, влияющие на точность измерения смещений, предложены методы их минимизации.

В сотрудничестве с АО “Газпром космические системы” автором была предложена и разработана конструкция измерительного УО, предназначенного для установки в точках измерения смещений земной поверхности, и позволяющего производить высокоточные измерения подвижек поверхности на основе информации о фазе радиосигнала, отраженного от данного УО в разные моменты времени.

Автором была разработана программа экспериментальных исследований, позволяющих проверить предложенные методы минимизации факторов, влияющих на точность измерения смещений. На полигоне с установленными УО автором была проведена серия экспериментальных исследований, подтверждающих точность теоретических расчетов и применимость описанного метода.

Также автором было реализовано программное обеспечение, позволяющее на основе сырых радиолокационных снимков с космических аппаратов TerraSAR-X и Sentinel-1 произвести расчет смещения УО в заданных точках.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 95 страниц. Список литературы включает 56 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования и поставлены задачи, которые позволят достигнуть поставленной цели. Аргументирована научная новизна работы, показана теоретическая и практическая значимость результатов исследования, а также их достоверность на основе экспериментальных данных. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведена теория измерения смещений методом радарной интерферометрии. Подробно рассматриваются современные подходы и их ограничения. Обосновывается применение искусственных уголкового отражателей для повышения точности измерения смещений в заданных точках земной поверхности.

Технология спутниковой радарной интерферометрии основана на измерении фазовой разности двух комплексных изображений, полученных от активных радиолокационных спутниковых систем в разные моменты времени. Данная технология позволяет с высокой точностью оценить изменение положения элемента разрешения изображения в проекции на ось визирования спутника, а при наличии высокоточной цифровой модели местности - и в проекции на местную вертикаль. Однако, технология имеет ряд существенных ограничений:

1. Частотные диапазоны, используемые в данной технологии имеют ограниченную проникающую способность для различных типов подстилающей поверхности (рисунок 1). Это приводит к тому, что более высокочастотные диапазоны (X, C) не позволяют измерить смещения местности на территориях, покрытых высокой травой, деревьями и кустарниками из-за эффекта пространственной декорреляции снимков и зашумления фазовой картины.

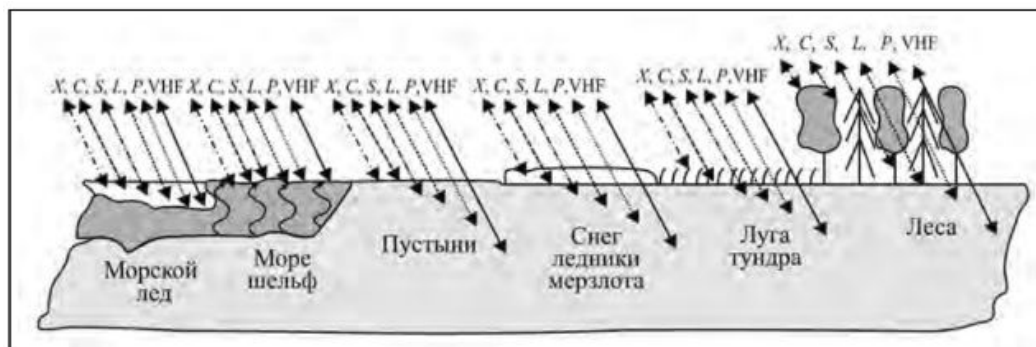


Рисунок 1. - Проникающая способность различных частотных диапазонов

2. Для задачи измерения смещений методом радиолокационной интерферометрии важно соблюдение временной корреляции. Для этого за время между съемками не должно происходить значительных изменений условий отражения электромагнитной волны от поверхности.

Данные ограничения довольно существенны, при учете того, что наиболее чувствительные измерения можно произвести в более высокочастотных диапазонах, которые наиболее подвержены пространственной и временной декорреляции.

В настоящее время существуют два основных метода преодоления данных ограничений:

1. Интерферометрия с использованием устойчивых естественных отражателей радиосигнала. Данная технология основана на использовании серии радиолокационных изображений одной и той же местности (от 30 до 100 изображений в серии) с последующим выделением на них точек, наиболее стабильно отражающих радиосигнал.

2. Интерферометрия с использованием искусственных отражателей радиосигнала. В данной технологии применяются искусственные конструкции в виде трехгранных металлических УО, которые размещаются в точках проведения измерений с ориентацией диаграммы обратного рассеяния по направлению к спутнику.

Оба способа имеют свои преимущества и ограничения.

Для интерферометрии с использованием естественных отражателей радиосигнала характерно требование к большому количеству снимков в серии и вычислительно сложному процессу отбора точек-кандидатов.

При интерферометрии с использованием искусственных УО необходимо изготовление специальных конструкций и их установка в местах измерений. Однако, данный способ позволяет произвести контролируемые измерения в заданных точках земной поверхности.

Во **второй главе** на базе анализа существующей литературы и научных публикаций по теме диссертационной работы приводится описание и анализ факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с применением искусственных УО.

В **разделе 2.1** описаны составляющие разности фаз между двумя радиолокационными снимками. Суммарная разность фаз между двумя

комплексными изображениями, полученными в разные моменты времени состоит из следующих параметров:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{topo} + \Delta\Phi_{atm} + \Delta\Phi_{noise} + \Delta\Phi_{disp} ,$$

где $\Delta\Phi_{topo}$ — разность фаз, обусловленная топографией местности; $\Delta\Phi_{atm}$ — разность фаз из-за различия длин оптических путей за счёт преломления в среде распространения сигнала; $\Delta\Phi_{noise}$ — разность фаз, возникающая в результате электромагнитного шума; $\Delta\Phi_{disp}$ — разность фаз из-за смещения УО за период между съемками.

Информация о смещениях земной поверхности содержится в составляющей $\Delta\Phi_{disp}$:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\Phi_{disp} ,$$

где λ — длина волны радиолокатора.

Разность фаз, обусловленная топографией местности, определяется по формуле:

$$\Delta\Phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta h}{R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta s}{R \tan\theta} ,$$

где B_{\perp} — длина перпендикулярной составляющей пространственной базы интерферометрической съемки; Δh — точность используемой при обработке снимков опорной цифровой модели местности; θ — угол падения радиоволны; R — наклонная дальность от космического аппарата до снимаемого УО; Δs — точность совмещения радиолокационных снимков.

Вторым слагаемым в данной формуле можно пренебречь, так как при обработке радиолокационных снимков в современных программных пакетах можно совместить изображения с точностью порядка одной сотой элемента пространственного разрешения Δr .

Разность фаз из-за различия длин оптических путей за счёт преломления в среде распространения сигнала $\Delta\Phi_{atm}$ является случайной величиной. В работе была выдвинута гипотеза, которая была подтверждена экспериментальными исследованиями, о том что при относительно стабильном состоянии атмосферы и ионосферы для отражателей, установленных на малом расстоянии (не более 200 м) друг от друга, можно считать, что среда распространения сигнала для всех УО даёт одинаковый вклад в изменение фазы. Таким образом, данную составляющую интерферометрической фазы можно исключить, установив

заведомо стабильные отражатели в непосредственной близости от подвижных. Заведомо стабильные отражатели устанавливаются на участках, не подверженных смещениям.

Разность фаз, возникающая в результате электромагнитного шума $\Delta\Phi_{noise}$ в случае использования УО, зависит от отношения сигнал/шум:

$$\delta_{\psi} = \frac{1}{\sqrt{2SNR}},$$

где SNR — отношение мощности сигнала, отраженного от УО к суммарной мощности сигнала, отраженного от фона, в одном элементе разрешения.

Ошибка измерения фазы принятого радиосигнала, в свою очередь, связана с ошибкой измерения смещения УО:

$$\Delta\rho_{\psi} = \frac{\lambda}{4\pi} \delta_{\psi}.$$

В таблице 1 приведены оцененные теоретически значения ошибки измерения смещений УО при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ, в различных частотных диапазонах.

Таблица 1. Ошибка измерения смещений УО

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
Ошибка измерения смещения УО, мм	0,6	1	1,7	4,4

Таким образом, основными слагаемыми интерферометрической фазы, определяющими погрешность измерения смещений УО, становятся:

1. $\Delta\Phi_{topo}$, зависящая от перпендикулярной составляющей пространственной базы и точности используемой при обработке снимков опорной ЦММ;
2. $\Delta\Phi_{noise}$, зависящая от пространственного разрешения радиолокационных снимков и размера УО.

В разделе 2.2 приводится подробный теоретический расчет составляющих фазы $\Delta\Phi_{topo}$ и $\Delta\Phi_{noise}$.

Вклад $\Delta\Phi_{topo}$ в погрешность измерения смещений УО определяется как:

$$\Delta\rho_B = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\Phi_{topo} = \frac{B_{\perp} \Delta h}{R \sin\theta}.$$

Ошибка измерения смещений, обусловленная вкладом топографической составляющей местности, не зависит от длины волны радиолокатора.

Принятая в расчетах высота орбиты спутников ДЗЗ составляет 620 км, диапазон углов съемки (углов между лучом радиолокатора и надиром) лежит в пределах от 20 до 60°. Наибольший вклад геометрии съёмки в погрешность измерений смещений УО будет при угле падения 20°. Наклонная дальность до снимаемого УО при $\theta = 20^\circ$ составит 664 км.

В расчётах необходимо учитывать точность ЦММ в точке установки УО. Следовательно, для учёта составляющей Δh достаточно определить положение УО в пространстве, что позволяют сделать современные GPS-приемники с вполне высокой точностью (1 м и выше). Примем в расчётах значение $\Delta h = 1$ м.

На рисунке 2 изображен график зависимости погрешности измерения смещений УО (Δp_B) от величины перпендикулярной базовой линии (B_\perp):

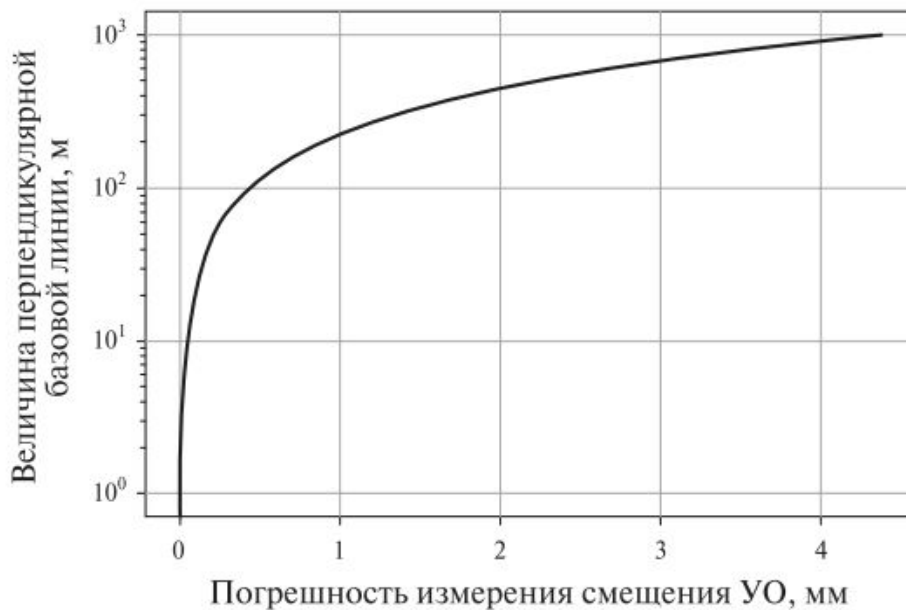


Рисунок 2 - Зависимость погрешности измерения смещения УО от величины перпендикулярной базовой линии

Для современных систем ДЗЗ перпендикулярная базовая линия лежит в пределах от 10 до 500 м, что позволяет обеспечить вклад в ошибку измерения смещений не более 2,2 мм.

Значение геометрической площади элемента радарного изображения, обеспечивающей требуемое превышение полезного сигнала над фоновым, определяется выражением:

$$\sigma_{\text{фона}} = \sigma_{\text{УО}} - \sigma_{\text{зап}} - \sigma_{0 \text{ фона}} - SNR,$$

$$\sigma_{\text{зап}} = \sigma_{\text{аз}} + \sigma_{\text{ум}} + \sigma_{\text{погр}} + \sigma_{\text{зат}},$$

где $\sigma_{\text{УО}}$ — теоретически максимальное значение ЭПР УО для заданных геометрических параметров и материала; $\sigma_{0 \text{ фона}}$ — удельная ЭПР фона местности, на которой установлен УО; $\sigma_{\text{аз}}$ — падение ЭПР УО при отклонении максимума диаграммы обратного рассеяния УО от направления на КА в момент съемки на 10° по азимуту; $\sigma_{\text{ум}}$ — падение ЭПР УО при отклонении максимума диаграммы обратного рассеяния УО от направления на КА в момент съемки на 20° по углу места; $\sigma_{\text{погр}}$ — запас на погрешности изготовления УО; $\sigma_{\text{зат}}$ — затухание сигнала при прохождении через защитные радиопрозрачные панели.

Площадь элемента пространственного разрешения радиолокационного снимка связана с $\sigma_{\text{фона}}$ следующим выражением:

$$S = 10^{\frac{\sigma_{\text{фона}}}{10}}.$$

Экспериментальные исследования показали, что для уверенной идентификации УО на изображении, превышение мощности отраженного от него сигнала над мощностью сигнала, отраженного от фона (SNR), должно составлять не менее 10 дБ. Исходя из этого, можно рассчитать пространственное разрешение для снимков в различных частотных диапазонах, минимальное для выполнения условия:

Таблица 2. Пространственное разрешение радиолокационных снимков

	Частотный диапазон			
	X	C	L	S
Площадь элемента пространственного разрешения, м ²	346	106	37,6	6,7
Пространственное разрешение (\sqrt{S}), м (при квадратном элементе разрешения)	18,5	10,3	6,1	2,6

Как следует из результатов расчётов, для достижения требуемого значения SNR для УО с указанными характеристиками в L-диапазоне пространственное разрешение радиолокационных снимков должно быть не хуже $2,6 \times 2,6$ м. Однако разрешённая в РФ для космической радиолокации полоса частот в L-диапазоне позволяет получать снимки с наилучшим пространственным разрешением от 4,3 до 11 м в зависимости положения луча радиолокатора в пределах полосы обзора. На снимках с таким пространственным разрешением параметр SNR будет составлять соответственно от $-3,5$ до $4,6$ дБ, что не позволит обнаруживать и уверенно идентифицировать УО принятого в статье размера на радиолокационных снимках.

В разделе 2.3 приведены результаты теоретического расчета суммарных значений ошибки измерения смещений УО ($\Delta\rho = \Delta\rho_\psi + \Delta\rho_B$) для различных значений базовой линии. В таблице 3 приведены значения:

Таблица 3. Суммарные значения ошибки измерения смещений УО

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
Пространственное разрешение съемки, м, не хуже	18,5	10,3	6,1	2,6
$\Delta\rho$, мм при $B_\perp = 500$ м	5,06	5,46	6,16	8,86
$\Delta\rho$, мм при $B_\perp = 200$ м	2,83	3,23	3,93	6,63
$\Delta\rho$, мм при $B_\perp = 100$ м	1,49	1,89	2,59	5,29

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию факторов, влияющих на точность измерения смещений УО и методов их минимизации.

В разделе 3.1 приводится описание экспериментальных УО, предложенных для установки на экспериментальном полигоне, и методика их установки и ориентации. Эскиз УО представлен на рисунке 3.

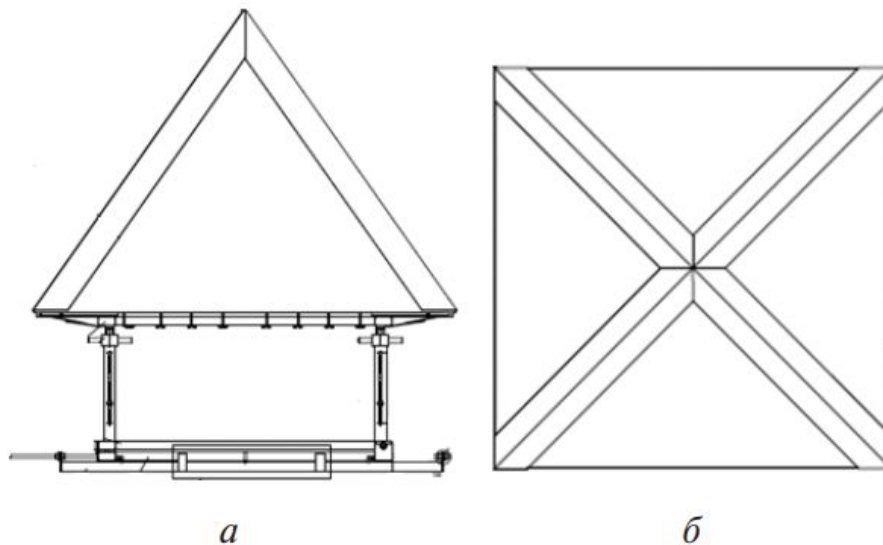


Рисунок 3. Эскиз углового отражателя: а) - вид сбоку; б) - вид сверху

Выбор треугольной формы граней УО связан с тем, что такие УО обладают наиболее широкой диаграммой обратного рассеяния, что налагает менее жесткие требования на ориентацию УО в пространстве для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум на входе радиолокатора.

На рисунке 4 представлена схема установки и ориентации сети УО.

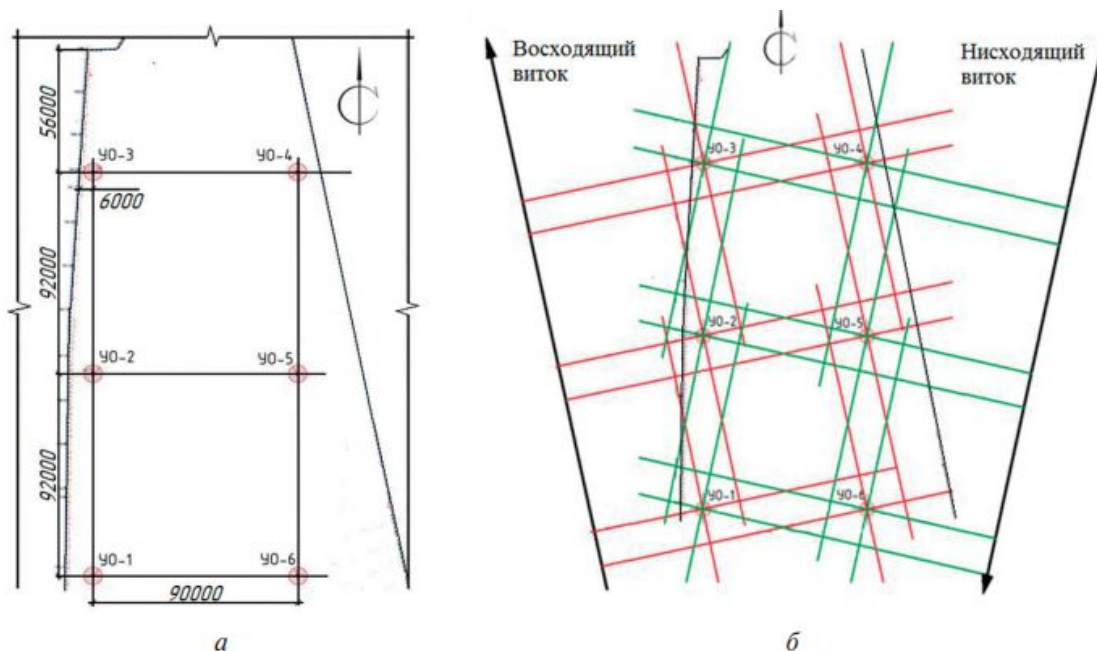


Рисунок 4. Расположение УО на тестовом участке: а) — схема установки УО; б) — предполагаемая ориентация крестообразных откликов от УО на радиолокационных изображениях

В эксперименте использованы шесть УО, установленных таким образом, чтобы максимумы их диаграмм обратного рассеяния были ориентированы вдоль осей в топоцентрической системе координат OXYZ (Ox — направление запад-восток, Oy — направление юг-север, Oz — совпадает с местной вертикалью). Три УО устанавливались на неподвижные свайные фундаменты, исключающие возможность смещения УО на всем периоде эксперимента, в том числе связанных с сезонными проседаниями и поднятиями пучинистых грунтов. Остальные три УО были установлены на регулируемые основания, позволяющие проводить контролируемые смещения УО в произвольном направлении в выбранной системе координат.

УО были установлены на территории тестового участка таким образом, чтобы исключить взаимное наложение крестообразных откликов от УО на радиолокационных изображениях при съемке на восходящем и нисходящем витках солнечно-синхронной орбиты, характерной для радиолокационных КА.

Для уменьшения влияния снега и других атмосферных осадков все УО были оборудованы радиопрозрачными тканевыми чехлами, защищающими их внутренние грани от попадания снега, воды и других частиц, способных существенно повлиять на значения фазы.

В **разделе 3.2** приводится описание методики обработки радиолокационных данных.

Исходными данными для эксперимента являются:

1. Сфокусированные радиолокационные снимки;
2. Координаты установки УО;
3. Цифровая модель местности (ЦММ) зоны установки УО.

Основные этапы обработки:

1. Корректировка исходной ЦММ;
2. Корегистрация радиолокационных снимков;
3. Создание интерферограммы;
4. Удаление топографической составляющей фазы с использованием скорректированной ЦММ
5. Фильтрация интерферограммы;
6. Выделение информации о разностной фазе сигнала в точках установки УО;

7. Пересчет значений дифференциальной фазы радиосигнала в значения смещений УО за период между съемками.

В процессе обработки радиолокационных изображений и выделения фазовой информации возникла необходимость уточнения цифровой модели местности в зонах установки УО. Уточнение произведено на основе результатов геодезических измерений с использованием ГНСС-оборудования (глобальная навигационная спутниковая система), обеспечивающего погрешность определения взаимного положения УО не более 20 см. На исходную ЦММ был наложен слой с «буферными зонами» радиусом 30 м с центрами в точках установки УО. Высота в этих зонах соответствовала измеренной высоте расположения фазовых центров УО.

При обработке информации о дифференциальной фазе радиосигнала один из стабильных УО принимался за опорный с предположением, что за период между съемками в данной точке не происходило смещений. При этом условии дифференциальная фаза для данного УО, $\Delta\Phi$, содержит информацию только о таких составляющих, как геометрия съемки, топография местности, влияние электромагнитного шума и среды распространения радиосигнала (атмосфера, ионосфера, снег и т. д.) и не содержит составляющей фазы из-за смещений.

Составляющая фазы, обусловленная топографией местности ($\Delta\Phi_{topo}$) минимизируется за счет использования при обработке уточненной ЦММ. Влияние электромагнитного шума мало за счет использования УО с ЭПР, обеспечивающим отношение сигнал/шум не менее 17 дБ, то есть составляющая фазы $\Delta\Phi_{noise}$ также минимизируется. Таким образом, основная составляющая $\Delta\Phi$ — это атмосферная составляющая фазы $\Delta\Phi_{atm}$.

Так как УО установлены на тестовом участке на расстоянии 90 м друг от друга, предполагается, что условия среды распространения радиосигнала для них можно считать приблизительно одинаковыми.

С учетом принятых допущений дифференциальная фаза для остальных УО, φ_k , содержит те же составляющие, что и дифференциальная фаза опорного УО — φ_0 , плюс фазовый набег, вызванный смещением рассматриваемого УО $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_0.$$

Для каждой интерферометрической пары радиолокационных снимков были вычислены значения смещений для всех УО:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi.$$

Для проверки значений смещений УО, полученных в результате обработки радиолокационных снимков, проведено их сравнение с результатами наземных измерений смещений УО в проекции на направление съемки КА. Это направление (прямая «УО-спутник») в местной системе координат определяется углом между направлением движения спутника и местным меридианом ($\alpha_n \approx 44^\circ$) и углом, под которым проводится съемка ($\beta_n \approx 44^\circ$).

Проекция истинного вектора смещения УО на направление «УО-спутник», полученного по результатам наземных измерений, определяется как:

$$\text{Pr}_{\bar{e}} \bar{A} = \frac{\bar{e} \cdot \bar{A}}{|\bar{e}|},$$

где $\bar{e} = \bar{e}(\cos \alpha_n \cdot \sin \beta_n, (-1) \cdot \sin \alpha_n \cdot \sin \beta_n, \cos \beta_n)$ — единичный вектор, соответствующий направлению съемки (направление «УО-спутник»); $\bar{A} = \bar{A}(x_{fact}, y_{fact}, z_{fact})$ — истинный вектор смещения УО, полученный по результатам наземных измерений.

В разделе 3.3 приводятся графики измерений смещений УО за период съемки, а также расчет погрешностей определения смещений уголкового отражателя.

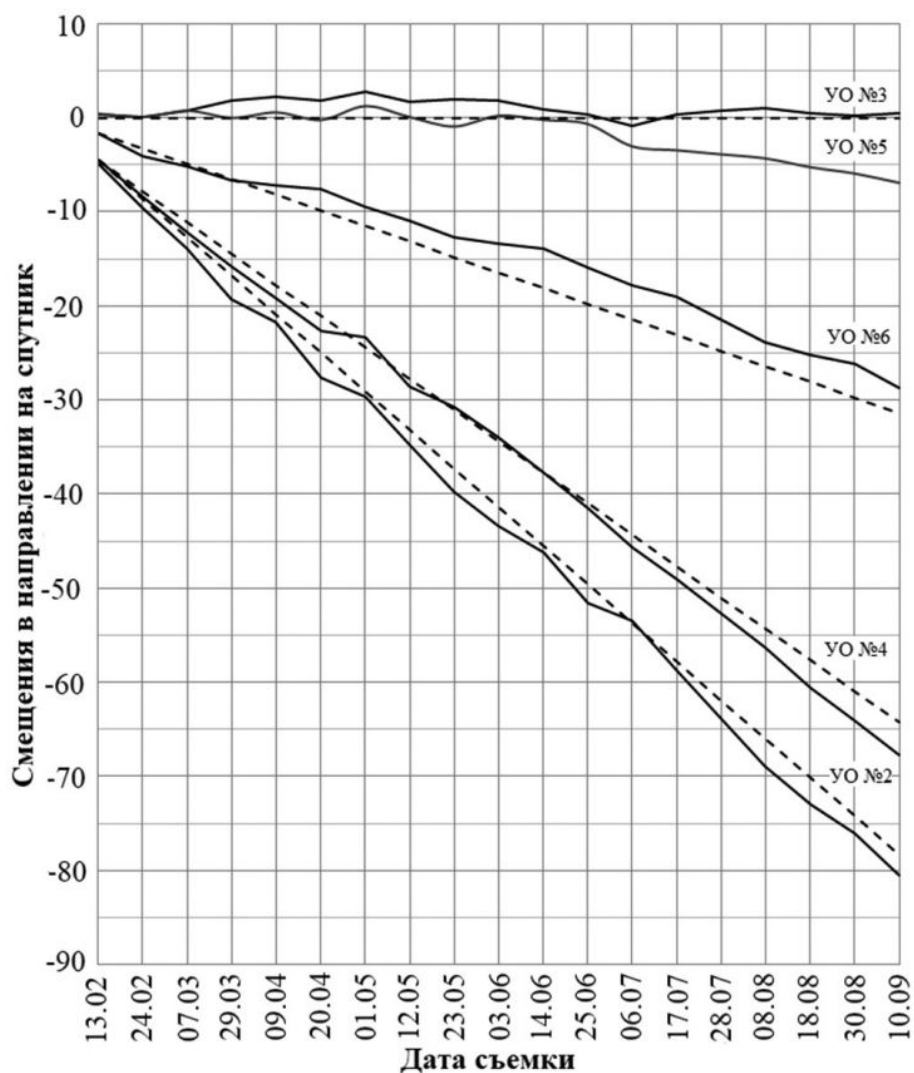


Рисунок 5. График суммарных смещений УО

При проведении эксперимента было подтверждено существенное влияние грозы на результат измерений фазы радиосигнала между съемками.

Расчет погрешности определения смещений УО по данным радиолокационной съемки состоял из следующих этапов:

1. Рассчитывались проекции истинных векторов смещения каждого УО на направление «УО-спутник» по результатам наземных измерений;

2. Определялись значения смещений УО вдоль направления «УО-спутник» за периоды между съемками по данным интерферометрической обработки радиолокационных снимков;

3. для каждого УО рассчитывались средние арифметические значения измеренных по спутниковым данным смещений УО вдоль направления «УО-спутник»:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

4. Для каждого УО определялись максимальные отклонения значений смещений, измеренных по данным спутниковой съемки, от результатов наземных измерений;

5. Для каждого УО рассчитывались среднеквадратические отклонения результатов измерения их смещений σ по всей интерферометрической серии снимков:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Результаты расчета погрешностей приведены в таблице 4. Для УО № 1 расчеты не проводились, так как он использовался в качестве опорного, относительно которого и проводились вычисления смещений.

Рассчитанные характеристики	Номер УО				
	2	3	4	5	6
Значения смещений по результатам наземных измерений, мм	-4,10	0	-3,32	0	-1,66
Среднее арифметическое значение измеренных смещений, мм	-4,13	-0,01	-3,55	-0,36	-1,40
Максимальное отклонение от истинного значения смещения, мм	2,12	1,25	2,65	2,37	1,25
Среднеквадратическое отклонение, мм	1,07	0,64	0,61	0,71	0,53

В заключении приведены основные результаты исследований.

1. Проанализированы факторы, оказывающие влияние на результирующую фазу радиолокационного сигнала при измерении смещений методом дифференциальной радарной интерферометрии с использованием искусственных УО. На основе анализа выделены основные влияющие факторы, которые необходимо минимизировать для получения достоверных результатов.

2. На основе анализа основных влияющих факторов был предложен способ их минимизации, основанный на:

- использовании стабильных УО, устанавливаемых в непосредственной близости от подвижных УО, и служащих для компенсации атмосферной составляющей фазы;
- использовании высокоточных измерительных приборов при начальной установке УО для получения информации о местоположении УО с точностью порядка 20 см;
- уточнении ЦММ на основе информации о местоположении УО, позволяющем компенсировать топографическую составляющую фазы;
- разработанной конструкции УО, обеспечивающей превышение мощности сигнала, отраженного от УО, над мощностью окружающего фона более чем на 10 дБ, что позволяет компенсировать шумовую составляющую фазы.

3. Теоретически рассчитаны значения суммарной ошибки измерения смещений УО для различных частотных диапазонов и значений базовой линии.

4. Проведена серия экспериментальных исследований, призванных проверить теоретические значения, с использованием разработанной конструкции УО. Результаты экспериментальных исследований хорошо сочетаются с результатами теоретических расчетов.

5. Создано ПО для реализации процесса интерферометрической обработки радиолокационных снимков.

Список работ по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Добрынин И. И.** Измерение смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголкового отражателя радиосигнала / И. И. Добрынин, Ф. В. Песяк, А. И. Савин, Н. Н. Севастьянов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 113–121. – 0.53 п.л.

2. **Добрынин И. И.** Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголкового отражателя / И. И. Добрынин, А. И. Савин, Н. Н. Севастьянов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – №3. – С. 29–36. – 0.56 п.л.

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Добрынин Илья hola.92@mail.ru / ID: 6924915

Проверяющий: Добрынин Илья (hola.92@mail.ru / ID: 6924915)

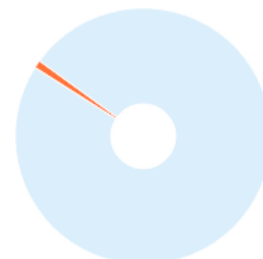
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://users.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 2
Начало загрузки: 17.06.2019 10:12:42
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: ВКР
Размер текста: 727 кБ
Символов в тексте: 29751
Слов в тексте: 3581
Число предложений: 166

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 17.06.2019 10:12:44
Длительность проверки: 00:00:02
Комментарии: не указано
Модули поиска: Модуль поиска Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
0,29%	0%	99,71%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общепотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
011	0,29%	http://gningi.ru/images/journal/nig27.pdf	http://gningi.ru	16 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет