

Измерение смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголковых отражателей радиосигнала

И.И. Добрынин, Ф.В. Песяк, А.И. Савин, Н.Н. Севастьянов

ОАО «Газпром космические системы», Королев, 141070, Россия

E-mail: info@gazprom-spacesystems.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию точности измерения смещений земной поверхности, выполненного методом спутниковой радиолокационной интерферометрии с использованием искусственных уголковых отражателей (УО). Измерения были проведены на экспериментальном полигоне ОАО «Газпром космические системы» в 2015 г. В статье описаны размеры и форма УО, использованных в рамках эксперимента, схема их установки и ориентации, приведены параметры радиолокационной съемки, методика обработки радиолокационных данных, подходы к устранению факторов, влияющих на точность измерения смещений данным методом. В ходе эксперимента получена интерферометрическая серия из 20 радиолокационных снимков с космического аппарата TerraSAR-X. Обработка снимков проводилась в программных пакетах ENVI SARscape и QGIS. В результате их обработки измерены смещения уголковых отражателей в проекции на направление съемки. В статье показаны графики, иллюстрирующие динамику движения УО в ходе эксперимента, приведены выводы о влиянии атмосферных осадков на точность измерения смещений. Проведенный анализ рассчитанной погрешности измерений смещений уголковых отражателей позволяет оценить применимость метода космической радиолокационной интерферометрии для высокоточного мониторинга смещений земной поверхности в точках установки уголковых отражателей.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, дистанционное зондирование Земли, дифференциальная интерферометрия, мониторинг смещений земной поверхности, уголковый отражатель

Одобрена к печати: 29.08.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-113-121

Введение

Обработка радиолокационных снимков методом дифференциальной интерферометрии позволяет обнаруживать смещения земной поверхности на больших территориях. Однако возможность проведения измерений таких смещений и их точность существенно зависят от пространственной и временной когерентности радиосигнала (Rosen et al., 2000). Для большей части территории России факторы, связанные со свойствами земной поверхности, затрудняют возможность обнаружения и получения достоверных результатов измерений этих смещений с использованием космических радиолокационных снимков X- и C-диапазонов.

Существенно повысить точность измерений позволяет применение технологии стабильных отражателей радиосигнала (Aguado et al., 2015). В качестве стабильных отражателей радиосигнала могут выступать как естественные объекты (здания и сооружения, техника, открытые участки трубопроводов и т.д.) (Ferretti, Prati, Rossa, 2001), так и специально устанавливаемые искусственные отражатели радиосигнала, такие как УО (Михайлов и др., 2013; Захаров и др., 2010). В этом случае смещения земной поверхности будут соответствовать измеренным смещениям стабильных отражателей.

В статье представлены результаты эксперимента по определению точности изменения смещений земной поверхности по данным радиолокационной съемки в X-диапазоне космического аппарата (КА) TerraSAR-X с использованием УО.

Описание экспериментальных уголкового отражателя

Уголкового отражатели, использованные в эксперименте, представляют собой конструкцию из трех жестко зафиксированных между собой пластин, которые формируют четыре трехгранных угла, ориентированных под углом 90° друг к другу. Длина внутреннего ребра УО составляет 1 м. Эскиз УО представлен на *рис. 1*.

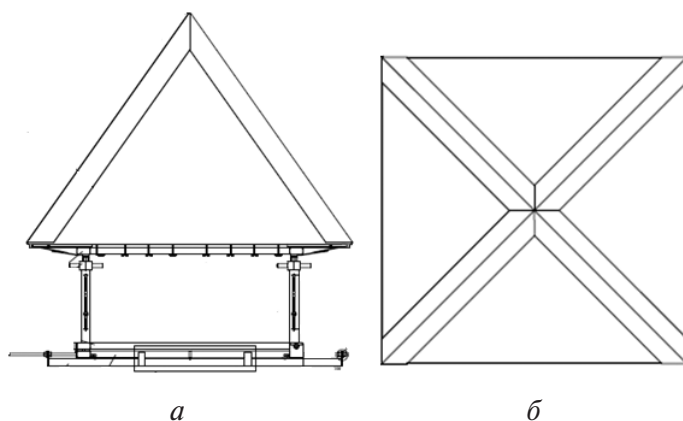


Рис. 1. Эскиз УО: а) — вид сбоку; б) — вид сверху

Выбор треугольной формы граней УО связан с тем, что такие УО обладают наиболее широкой диаграммой обратного рассеяния (Sarabandi et al., 1996), что налагает менее жесткие требования на ориентацию УО в пространстве для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум на входе радиолокатора.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) для УО с треугольными гранями вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4,$$

где λ — длина волны радиолокатора; a — длина внутреннего ребра.

Описание эксперимента

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 (*рис. 2а*), в том числе связанных с сезонными оседаниями и поднятиями пучинистых грунтов. Остальные три УО были установлены на регулируемые основания, позволяющие проводить контролируемые смещения

УО в произвольном направлении в выбранной системе координат (рис. 2б). Данные регулируемые основания были установлены на аналогичные неподвижные свайные фундаменты.

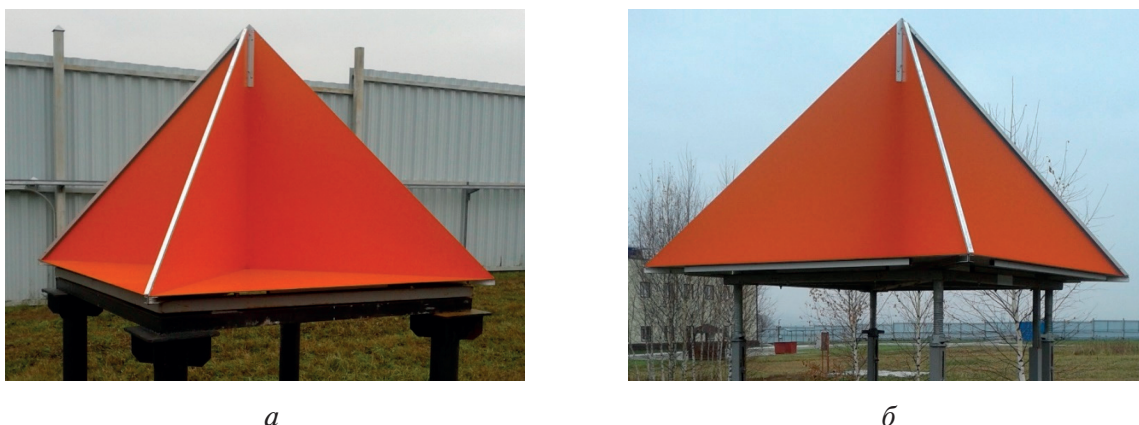


Рис. 2. УО: а) — на неподвижном основании; б) — на регулируемом основании

Угловые отражатели 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 (рис. 3). Ошибка ориентации УО в пространстве составляла не более 2° .

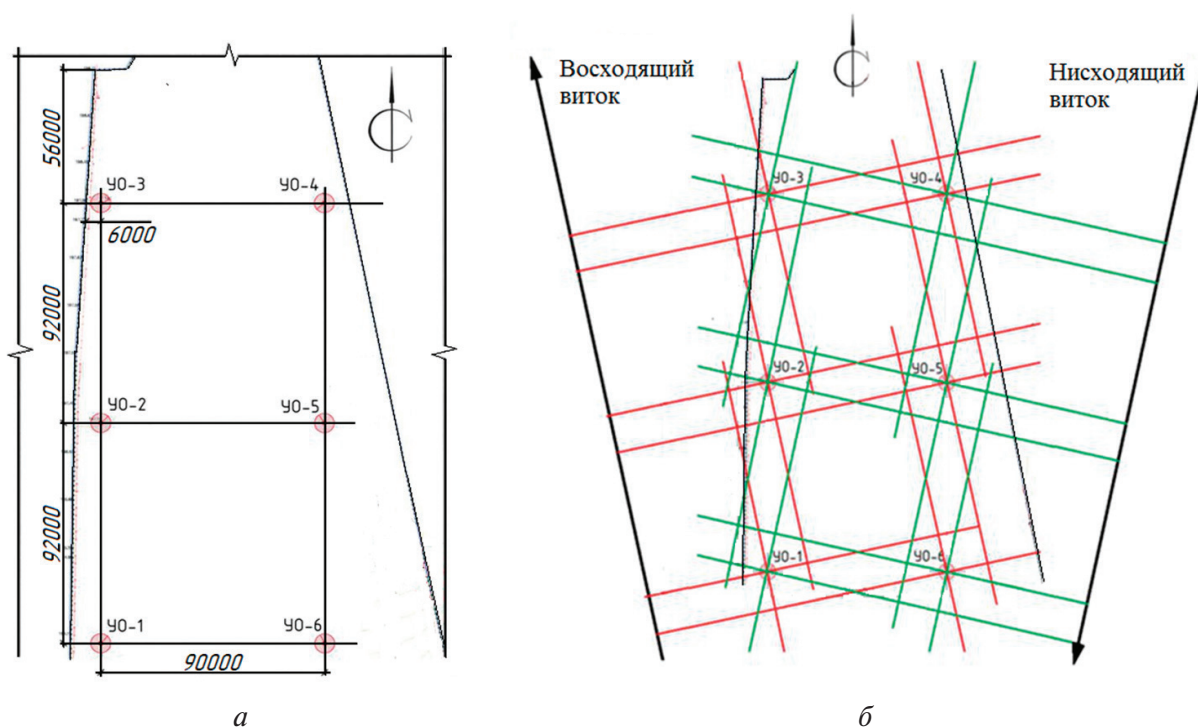


Рис. 3. Расположение УО на тестовом участке: а) — схема установки УО; б) — предполагаемая ориентация крестообразных откликов от УО на радиолокационных изображениях

Как было экспериментально доказано (Guneriusen et al., 2001), существенное влияние на значения дифференциальной фазы способен оказать снег. 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.

Для измерения смещений УО была использована интерферометрическая серия из 20 радиолокационных снимков КА TerraSAR-X. Все снимки получены с одного ракурса.

Основные параметры съемки:

Радиочастотный диапазон	X (длина волны 31,1 мм)
Виток орбиты	нисходящий
Интервал между съемками	11 сут
Пространственное разрешение снимков	3 м
Поляризационный режим съемки	НН
Направление съемки	правый борт
Диапазон углов съемки (от местной вертикали)	43,51–45,52
Угол между направлением движения спутника и местным меридианом на широте съемки	16,4°

Съемки проводились в период с 02.02.2015 по 10.09.2015. Анализ полученной серии радиолокационных снимков показал, что превышение амплитуды радиосигнала, отраженного от УО, над фоном (радиосигналом, отраженным от подстилающей поверхности разных типов, таких как поле, лес и др.) составило не менее 17 дБ, а средние значения лежали в диапазоне от 25 до 30 дБ.

Для имитации смещений земной поверхности положение подвижных УО изменялось после каждой радиолокационной съемки в соответствии с программой смещений УО. В табл. 1 приведены значения смещений УО по каждой из трех осей координат за период между двумя последовательными съемками.

Таблица 1. Программа смещений УО

Смещение по оси, мм	Номер УО					
	1	2	3	4	5	6
<i>Ox</i>	0	-4	0	-4	0	3
<i>Oy</i>	0	0	0	-4	0	4
<i>Oz</i>	0	-2	0	-2	0	-4

Описание методики обработки радиолокационных данных

Исходными данными для измерения смещений УО являлись:

- 1) сфокусированные радиолокационные снимки, полученные с КА TerraSAR-X;
- 2) файл с данными о местоположении УО;
- 3) цифровая модель местности (ЦММ) района размещения УО.

Обработка интерферометрической серии радиолокационных снимков проводилась последовательно для каждой пары снимков. Основные этапы обработки снимков:

- 1) корректировка исходной ЦММ с использованием программных пакетов QGIS и ENVI SARscape;
- 2) импорт радиолокационных снимков в программном обеспечении ENVI SARscape;
- 3) корегистрация радиолокационных снимков;
- 4) создание интерферограммы;
- 5) удаление топографической составляющей фазы с использованием скорректированной ЦММ;
- 6) фильтрация интерферограммы;
- 7) выделение информации о дифференциальной фазе сигнала в точках установки УО;
- 8) пересчет значений дифференциальной фазы радиосигнала в значения смещений УО за период между съемками.

С целью минимизации ошибки измерения смещений УО, связанной с погрешностью измерения относительных высот объектов на опорной ЦММ, существующая ЦММ была уточнена. 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 (Zakharov, Mashurov, Dragunov, 2010). При этом условии дифференциальная фаза для данного УО, φ_0 , содержит информацию только о таких составляющих, как геометрия съемки, топография местности, влияние электромагнитного шума и среды распространения радиосигнала (атмосфера, ионосфера, снег и т. д.).

Влияние геометрии съемки и топографии местности 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. Таким образом, основная составляющая φ_0 — это влияние среды распространения радиосигнала. 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 $\Delta\varphi$:

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

На основе полученной информации для каждой последующей 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 ($\alpha_n = 16,4^\circ$) 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:

$$Pr_{\vec{e}} \vec{A} = \frac{\vec{e} \cdot \vec{A}}{|\vec{e}|},$$

где $\vec{e} = \vec{e}(\cos \alpha_n \cdot \sin \beta_n, (-1) \cdot \sin \alpha_n \cdot \sin \beta_n, \cos \beta_n)$ — единичный вектор, соответствующий направлению съемки (направление «УО-спутник») КА TerraSAR-X «правым бортом» на нисходящем витке орбиты; $\vec{A} = \vec{A}(x_{fact}, y_{fact}, z_{fact})$ — истинный вектор смещения УО, полученный по результатам наземных измерений.

На рис. 4 приведен график смещений УО. Сплошными линиями изображены суммарные значения измеренных смещений УО, пунктирными — суммарные значения теоретических смещений.

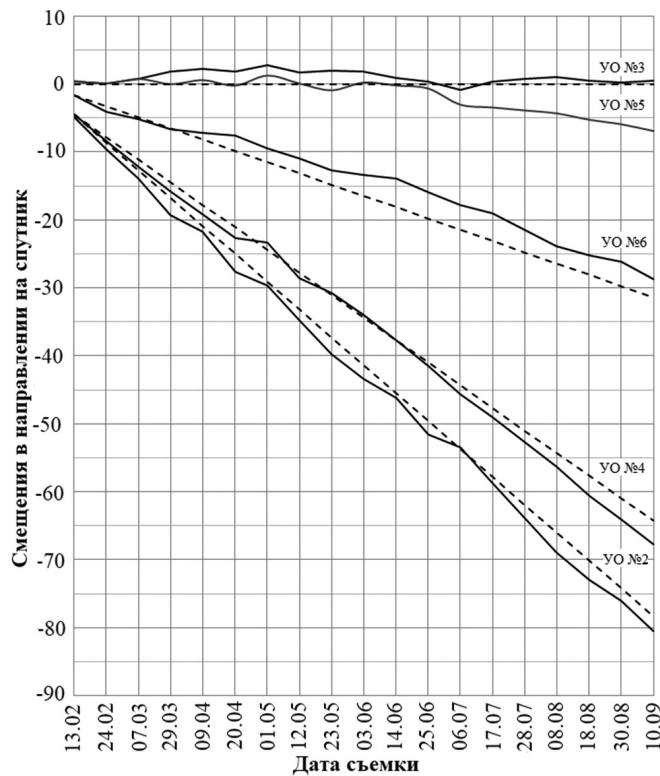


Рис. 4. График суммарных смещений УО

На период с 17.07.2015 по 28.07.2015 и с 28.07.2015 по 08.08.2015 значения составляющей фазы φ , отвечающей за смещения УО, носили случайный характер, несмотря на использование информации о стабильном УО. Это было связано с грозой с ливневым дождем в районе размещения тестового участка в момент проведения радиолокационной съемки 28.07.2015. Значения фазы и смещений для данных пар снимков приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Значения дифференциальной фазы и смещений с учетом грозы

Дата	Номер УО											
	1		2		3		4		5		6	
	φ , рад	d , мм	φ , рад	d , мм	φ , рад	d , мм	φ , рад	d , мм	φ , рад	d , мм	φ , рад	d , мм
17.07.2015 28.07.2015	1,17	0	-1,79	7,3	2,23	-2,6	-1,19	5,8	2,02	-2,1	1,54	-0,9
28.07.2015 08.08.2015	1,02	0	1,87	-2,1	-0,30	3,3	0,10	2,3	-1,92	7,3	1,49	-1,2

Следует отметить, что гроза не оказала существенного влияния на амплитуду отраженного радиосигнала. При построении графика данные за 28.07.2015 не учитывались, а в качестве интерферометрической пары были взяты снимки за 17.07.2015 и 08.08.2015.

Погрешность определения смещений уголкового отражателя

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

- рассчитывались проекции истинных векторов смещения каждого УО на направление «УО-спутник» по результатам наземных измерений;
- определялись значения смещений УО вдоль направления «УО-спутник» за периоды между съемками по данным интерферометрической обработки радиолокационных снимков;
- для каждого УО рассчитывались средние арифметические значения измеренных по спутниковым данным смещений УО вдоль направления «УО-спутник»:

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

- для каждого УО определялись максимальные отклонения значений смещений, измеренных по данным спутниковой съемки, от результатов наземных измерений;
- 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 приведены в *табл. 3*. Для УО № 1 расчеты не проводились, так как он использовался в качестве опорного, относительно которого и проводились вычисления смещений.

Таблица 3. Результаты расчета погрешностей УО

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

Заключение

В статье рассмотрены результаты эксперимента по измерению смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголковых отражателей радиосигнала. Описан проведенный эксперимент по оценке точности измерения смещений УО с размером внутреннего ребра 1 м по данным съемки в X-диапазоне.

Эксперимент проводился с 02.02.2015 по 10.09.2015, в том числе и в зимний период, что позволило также учесть влияние снежного покрова на измерение смещений, а также проанализировать методы его уменьшения. Как показали результаты эксперимента, использование радиопрозрачных чехлов на УО, а также информации о фазе стабильного УО позволили минимизировать отклонение в снежный период экспериментальных значений смещений от теоретических. Однако гроза, при которой была проведена съемка с 28.07.2015 по 08.08.2015, не позволила точно определить значения смещений.

Проведенный анализ точности показал, что среднеквадратическое отклонение от истинных значений смещений УО составляло 1,07 мм, а максимальные отклонения не превышали 2,65 мм. Результаты эксперимента показали возможность применения УО в рамках технологии измерения смещений земной поверхности методом радарной интерферометрии.

Литература

1. *Захаров А.И., Захарова Л.Н., Лебедева М.А.* Применение РСА-интерферометрии для мониторинга транспортной инфраструктуры в зонах с опасной динамикой земных покровов // Рос. науч. конф. «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой»: электрон. сб. докл. Улан-Удэ, 2010. С. 32–38. URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/c1_4.pdf.
2. *Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., Голубев В.И.* Мониторинг оползневых процессов на участке северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизич. исслед. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–22.
3. *Aguado V., Vink A., James B., Biescas E.* An improved combination of Natural Reflectors and Corner Reflectors to monitor surface heave generated by SAGD operations using InSAR satellite technology // World Heavy Oil Congress 2015 WHOC15-321. URL: http://tre-altamira.com/uploads/2015_03_Aguado-et-al-WHOC15-321.pdf.
4. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. No. 1. P. 8–20.
5. *Guneriussen T., Hogda K.A., Johnsen H., Lauknes I.* InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. No. 10. P. 2101–2108.

6. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. Vol. 88. No. 3. P. 333–382.
7. Sarabandi K., Chiu T. Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1996. Vol. 44. No. 10. P. 1348–1361.
8. Zakharov A., Mashurov S., Dragunov A. Application of TerraSAR-X Data for Monitoring of Potential Landslide and Karst Areas in Railway and Pipeline Corridors // 8th European Conf. Synthetic Aperture Radar (EUSAR). 2010. P. 548–551.

Measurement of Earth surface displacements by SAR interferometry using corner reflectors

I.I. Dobrynin, F.V. Pesyak, A.I. Savin, N.N. Sevastyanov

Gazprom Space Systems JSC, Korolev 141070, Russia

E-mail: info@gazprom-spacesystems.ru

The paper is dedicated to experimental study of Earth surface displacement measurements accuracy by satellite synthetic aperture radar (SAR) interferometry method using corner reflectors. The measurements were carried out at Gazprom Space Systems' test site in 2015. The paper describes the experimental corner reflectors characteristics, their layout and orientation diagram as well as SAR acquisition parameters, SAR data processing procedure and approaches to eliminate the factors influencing the displacement measurements accuracy. In the course of the experiment, an interferometric series of 20 TerraSAR-X images was obtained. The SAR images were processed by ENVI SARscape and QGIS software. As a result, the corner reflectors displacements in the projection on the satellite corner reflector line were measured. The paper shows the graphs illustrating the dynamics of the corner reflectors motion during the experiment as well as conclusions on the atmospheric precipitation effect on the accuracy of displacement measurements. The analysis of the calculated measurement error of the corner reflectors displacements makes it possible to evaluate the applicability of space radar interferometry method in high-precision monitoring of the Earth surface displacements in corner reflectors installation points.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), radar interferometry, Earth remote sensing, differential interferometry, Earth surface subsidence monitoring, corner reflector

Accepted: 29.08.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-113-121

References

1. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Lebedeva M.A., Primenenie RSA-interferometrii dlya monitoringa transportnoi infrastruktury v zonah s opasnoi dinamikoi zemnyh pokrovov (RSA-interferometry application for transport infrastructure in the areas with dangerous soil dynamics), *Konf. "Zondirovanie zemnyh pokrovov radarami s sintezirovannoi apperturoi"* (Conf. "Remote sensing of the Earth using synthetic aperture radars"), Ulan-Ude, 2010, pp. 32–38, URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/c1_4.pdf.
2. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smolyaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubeva Yu.A., Isaev Yu.S., Dorokhin K.A., Timoshkina E.P., Khairatdinov S.A., Golubev V.I., Monitoring opolznevyh processov na uchastke severokavkazskoi zheleznoi dorogi s ispol'zovaniem sputnikovoi radarnoi interferometrii v razlichnyh diapazonah dlin voln i ugolkovogo otrazhatelya (Soil slip monitoring on the North Caucasian railway area using satellite radar interferometry in the different wave bands and corner reflector), *Geofizicheskie issledovaniya*, 2013, Vol. 14, No. 4, pp. 5–22.
3. Aguado V., Vink A., James B., Biescas E., An improved combination of Natural Reflectors and Corner Reflectors to monitor surface heave generated by SAGD operations using InSAR satellite technology, *World Heavy Oil Congress*, 2015, WHOC15-321, URL: http://tre-altamira.com/uploads/2015_03_Aguado-et-al-WHOC15-321.pdf.
4. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20.
5. Guneriusen T., Høgda K.A., Johnsen H., Lauknes I., InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 10, pp. 2101–2108.
6. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M., Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE*, 2000, Vol. 88, No. 3, pp. 333–382.
7. Sarabandi K., Chiu T., Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, Vol. 44, No. 10, pp. 1348–1361.
8. Zakharov A., Mashurov S., Dragunov A., Application of TerraSAR-X Data for Monitoring of Potential Landslide and Karst Areas in Railway and Pipeline Corridors, *8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2010, pp. 548–551.