

Ж.Ш. Жантаев, д.ф.-м.н., проф.
директор ДТОО «Институт ионосферы»,
АО «Национальный центр космических исследований и технологий» РК
А.Ф. Дубина, к.т.н., доц.
А.В. Андреев, к.т.н., доц.
Г.Шарипова, магистрант
Государственный университет «Житомирская политехника»

Использование интерферометрической космической радиолокационной съемки высокого разрешения для мониторинга деформации сооружений

В последние годы наиболее эффективными и актуальными являются методики с использованием дистанционного зондирования Земли с применением спутниковой радарной интерферометрии (метод интерферометрии с использованием радаров с синтезированной апертурой (РСА)). Как известно, по результатам многопроходных космических радарных съемок одной и той же территории, выполненных с одинаковыми параметрами и геометрией съемки, можно сделать оценку смещения земной поверхности, в том числе различных зданий и сооружений. Используя метод РСА интерферометрии, можно регистрировать смещения природных и техногенных объектов на любой выбранной территории с точностью до 1 мм. Для решения этой задачи спутниковый мониторинг ведется в непрерывном режиме. Город Нур-Султан республики Казахстан располагается в местах слабого грунта с близко расположенным к поверхности водоносным горизонтом. Как показывает практика, строительство высотных зданий со временем вызывает их просадку и деформации. Были выбраны строения «Транспорт Тауэр» и «Байтерек» для исследования просадочных зон. Исходными данными для последующей интерферометрической обработки служили космические радарные снимки данных объектов и прилегающих территорий, сделанные со спутников COSMO-SkyMed 1–4 (e-GEOS, Италия) в течении трех лет. В результате интерферометрической обработки радарных космических снимков в разные годы и сезоны были выявлены смещения и деформации земной поверхности и сооружений. Это может быть полезно при планировании и строительстве высотных зданий и их эксплуатации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; интерферометрическая обработка; радар с синтезированной апертурой.

Постановка проблемы. В настоящее время широко известны созданные общедоступные данные цифровой карты высот поверхности земли SRTM-3 (плановая дискретизация 90 м), полученные в ходе выполнения проекта Shuttle Radar Topographic Mission в 1999 г. [1]. Появление в последние годы космических РСА нового поколения высокого (8–10 м) и сверхвысокого (1–3 м) разрешения, таких, как ALOS PALSAR, RADARSAT-2, TerraSAR-X, CosmoSkyMed 1–4, открыли новые возможности для построения детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Технологии интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки, базирующиеся на алгоритмах интерферометрической обработки, реализованы в специализированных программных комплексах обработки данных ДЗЗ, таких как SARscape, PSP-IfSAR (e-GEOS, Италия), IMAGINE Radar Mapping, Photomod Radar, RATools. Вместе с тем на пути практического применения данных двухпроходной интерферометрической съемки для получения детальной ЦММ приходится преодолевать ряд существенных проблем. К их числу, в первую очередь, относятся пространственная декорреляция данных и проблемы «развертки фазы» при обработке радиолокационных данных сверхвысокого разрешения, содержащих большое количество областей «разрыва» фазы (при съемке городской территории – зданий и сооружений).

Столица республики Казахстан г. Нур-Султан располагается в местах слабого грунта с близко расположенным к поверхности водоносным горизонтом. Как показывает практика, строительство высотных зданий со временем вызывает их просадку [2] и деформации [3, 4]. Одними из грандиозных и показательных объектов для определения параметров этих процессов являются строения «Транспорт Тауэр» и «Байтерек». Эти сооружения были сданы в эксплуатацию в 2002 г. Административно-технологический комплекс «Транспорт Тауэр» составляет 32 этажа и имеет высоту 155,15 м. Высота сооружения «Байтерек» составляет 97 м, а с шаром, венчающим конструкцию, – 105 м. Здания имеют много таких устойчивых отражателей радарного сигнала, как углы между стеной и землей, стеной и крышей, углы балконов и т. д. (рис. 1), поэтому установка специальных отражателей радарного сигнала не требуется.

В этой статье проводится измерение динамики проседания и деформации строений «Транспорт Тауэр» и «Байтерек» г. Нур-Султан с применением метода интерферометрии с использованием РСА.



Рис. 1. Устойчивые отражатели радарного сигнала, выявленные на сооружении «Байтерек»

Анализ последних исследований и публикаций. Принципы определения координат объекта на поверхности Земли путем цифрового некогерентного синтезирования апертуры антенны и оценка точности высоты объектов рассмотрены, например, в [5, 6]. Однако до настоящего времени картографирование движения точек на земной поверхности должным образом не развивалось. Сравнительно немногочисленные карты, основывающиеся на результатах интерферометрической обработки, имеют иллюстративный характер, не приведены к единой картографической основе, представляют информацию в чрезмерно обобщенном виде [7]. Отмеченные недостатки приводят к тому, что эти карты могут выполнять функцию визуализации результатов наблюдений, но не могут быть инструментом исследования изменений геодинамических параметров объектов на земной поверхности. В то же время значительная и постоянно возрастающая информация о движении точек на земной поверхности, обширные геологические и геофизические данные требуют создания системы картографического обеспечения геодинамических исследований, которая позволила бы выявлять пространственно-временные особенности и изменения регистрируемых геодинамических параметров. В полной мере это может быть обеспечено только с использованием ГИС-технологий, что позволит проводить геодинамический мониторинг, обновлять базы данных, систематизировать и визуализировать полученные результаты в виде различных тематических карт, выявлять взаимодействие различных явлений в геодинамике и геодезии, связанных с тектоникой литосферных плит.

Изложение основного материала. Технологическая схема построения ЦММ при интерферометрической обработке данных космических РСА содержит следующие этапы: синтезирование пары комплексных радиолокационных изображений (РЛИ); взаимопривязку изображений одной и той же области поверхности; формирование интерферограммы путем поэлементного комплексного перемножения двух РЛИ; компенсацию фазового набега от опорной поверхности; фильтрацию фазового шума; устранение фазовой неоднозначности; построение цифровой модели местности [8]. На этапе фильтрации производится построение коэффициента когерентности обрабатываемого изображения, который представляет собой отношение между когерентной и некогерентной суммами отсчетов первого и второго изображений [9]. Участки, где коэффициент когерентности меньше заданного порога (обычно 0,25), в дальнейшем исключаются из построения ЦМР. Развёртывание фазы устраняет скачки на 2π [10].

Для проведения геодинамического мониторинга, базирующегося на алгоритмах интерферометрической обработки, служили космические радарные снимки территории г. Нур-Султан и прилегающих территорий, сделанные со спутников COSMO-SkyMed 1–4 в течении трех лет. Интерферометрическая обработка снимков РСА с целью выявления смещений и деформаций земной поверхности и сооружений выполнялась в программных комплексах PSP-IFSAR и свободно распространяемой программой Google Earth. Дешифрирование и интерпретация данных многопроходных космических радарных съемок выполнялись с получением на выходе моделей смещений исследуемых объектов в миллиметрах по состоянию на каждую дату съемки (за поверхность, относительно которой рассчитывались смещения, была принята поверхность, отражающая радарный сигнал на момент первой по порядку съемки). Интерферометрическая обработка данных многопроходных космических радарных съемок выполнялась без наземных контрольных точек и без использования данных наземных наблюдений.

Нур-Султан розположен в зоні з різко-континентальним кліматом, тому в осінній період розглядається просадка в самому будинку «Байтерек» і околицях. Це пов'язано з впливом фізичних процесів і природних явищ.

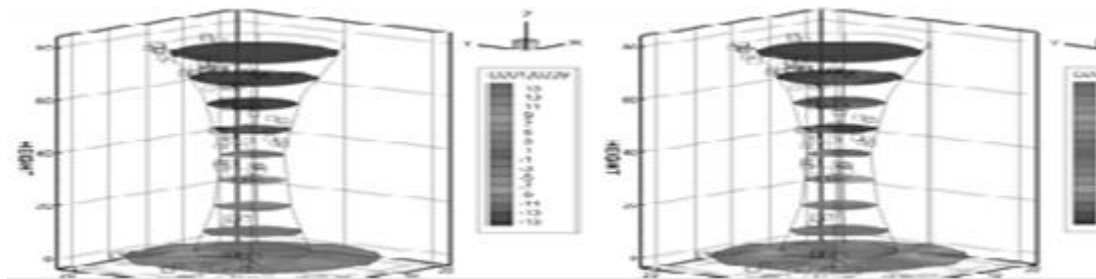


Рис. 5. Швидкості зміщення будівлі «Байтерек» за три роки (зимній період), мм/год

В зимній період, пов'язаний з сильними снігопадами і дощами, металеве спорудження (рис 5) демонструє аномальне стиснення. Аналіз знімків за літній і весняний сезони (рис. 6) показує, що будинок «Байтерек» і його околиця піднімається. Це пояснюється прямим попаданням сонячних променів на спорудження і різким зміненню погодних умов.

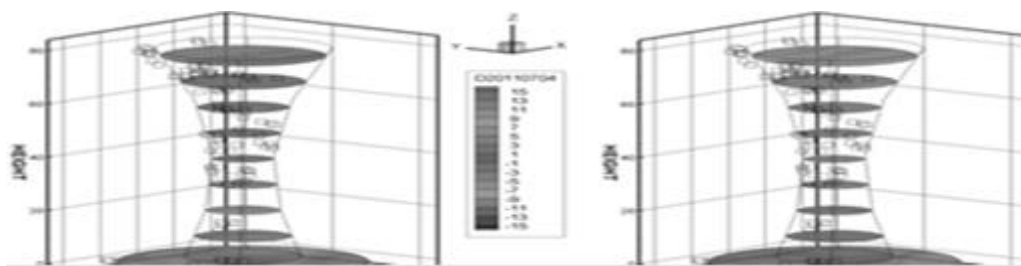


Рис. 6. Швидкість зміщення будівлі «Байтерек» за два роки (весняний і літній періоди), мм/год

Висновки. Проведена обробка і аналіз високоточних супутникових радарних знімків високого розрешення при допомозі методу інтерферометрії з використанням РСА. По отриманим даним побудовані і інтерполювані 3D-моделі споруджень «Транспорт Таур» і «Байтерек», показані рокові і сезонні зміщення. В ході будівництва і після його завершення відбуваються осадочні явища. Процес просадки повинен йти рівномірно і поступово припинитися. Якщо осадка нерівномірна, можуть виникнути різні деформації, в тому числі і крен будівлі. Спорудження висотою більше 15 м можуть деформуватися из-за вітру або нерівномірного нагріву стін сонцем. Контроль за цими процесами дуже важливий в ході експлуатації будівель. Особливо важливий моніторинг деформації таких споруджень. Важливо зареєструвати деформацію на ранній стадії, коли її усунення буде найменш затратним. Це напрямлення в області обробки даних ДЗЗ дозволяє вирішувати завдання своєчасного моніторингу зміщень і деформацій земної поверхні і споруджень з метою запобігання надзвичайних ситуацій з застосуванням методики інтерферометричної обробки серій супутникових радарних зображень. Цей метод повністю відповідає таким критеріям. Представлені способи аналізу і інтерпретації представляються достатньо обґрунтованими. Інтерполювані 3D-моделі споруджень можуть бути корисні для моніторингу і урахування зміщень і деформацій земної поверхні і споруджень міст.

Список використаної літератури:

1. *Nikolakopoulos K.G. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece / K.G. Nikolakopoulos, E.K. Kamaratakis, N.Chrysoulakis // International Journal of Remote Sensing. – London : Taylor & Francis, 2006. – Vol. 27, № 21.*
2. *Eray Can Effects of mining subsidence on mhard coal region in Turkey / Eray Can, Senol Kuscu, Murat Emre Kartal // Springer-Verlag. – 2011.*
3. *Байков В. Математическая геология / В.Байков, Н.Бакиров, А.Яковлев. – 1-е изд. – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2012. – Т. 1. – С. 227.*
4. *Кашеварова Г.Г. Методика определения предельно допустимых деформаций панельных зданий, эксплуатируемых на подработанной территории / Г.Г. Кашеварова, М.П. Сон // Вестник ЮУрГУ. Серия : Строительство и архитектура.*
5. *Андреев О.В. Алгоритм пасивного синтезування апертури антени з рухомої платформи : зб. наукових праць / О.В. Андреев, П.П. Топольницький // Житомир : ЖВІДУТ, 2014. – № 9. – С. 85–92.*

6. Визначення точності виміру висот об'єктів при автоматичній обробці стереознімків / О.Ф. Дубина, О.В. Андреев, Т.М. Нікітчук, О.М. Свінцицька // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2020. – Вип. 82. – С. 67–73.
7. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук ; под ред. В.С. Вербы. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
8. Коберниченко В.Г. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки / В.Г. Коберниченко, А.В. Сосновский // Физика и технические приложения волновых процессов. – Самара : Изд-во Самарского государственного университета, 2010. – № 3.
9. Synthetic aperture radar interferometry / R.M. Goldstein, Fuk K.Li et al. // Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88, № 3. – P. 333–381.
10. Hanssen Ramon F. Radar Interferometry / Ramon F. Hanssen. – Kluwer Academic Publishers, 2002. – 308 p.

References:

1. Nikolakopoulos, K.G., Kamaratakis, E.K. and Chrysoulakis, N. (2006), «SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece», *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, London, Vol. 27, No. 21.
2. Can, Eray, Kuscü, Senol and Emre Kartal, Murat (2011), «Effects of mining subsidence on mhard coal region in Turkey», *Springer-Verlag*.
3. Baikov, V., Bakirov, N. and Yakovlev, A. (2012), *Matematicheskaya geologiya*, 1st ed., Institut komp'yuternykh issledovaniy, Izhevsk, Vol. 1, pp. 227.
4. Kashevarova, G.G. and Son, M.P., «Metodika opredeleniya predel'no dopustimykh deformatsii panel'nykh zdaniy, ekspluatiruemykh na podrabotannoi territorii», *Vestnik YuUrGu, Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura*.
5. Andrejev, O.V. and Topol'nuc'kyj, P.P. (2014), *Algorytm pasyvnogo syntezyuvannja apertury anteny z ruhomoi' platform, zb. naukovykh prac', ZhVIDUT, Zhytomyr*, No. 9, pp. 85–92.
6. Dubyna, O.F., Andrejev, O.V., Nikitchuk, T.M. and Svincyc'ka, O.M. (2020), «Vyznachennja tochnosti vymiru vysot ob'ektiv pry avtomatychnij obrobci stereoznimkiv», *Visnyk NTUU «Kyiv's'kyj politehničnyj instytut»*, Serija Radiotekhnika. Radioaparatobuduvannja, Issue 82, pp. 67–73.
7. Verba, V.S., Neronskii, L.B., Osipov, I.G. and Turuk, V.E. (2010), *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya.*, in Verba, V.S. (ed.), *Radiotekhnika*, M., 680 p.
8. Kobernichenko, V.G. and Sosnovskii, A.V. (2010), «Analiz algoritmov interferometričeskoj obrabotki dannykh kosmicheskoi radiolokatsionnoi s'emki», *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov*, Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo universiteta, Samara, No. 3.
9. Goldstein, R.M., K.Li, Fuk et al. (2000), «Synthetic aperture radar interferometry», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 3, pp. 333–381.
10. Hanssen, Ramon F. (2002), *Radar Interferometry*, Kluwer Academic Publishers, 308 p.

Жантаев Жумабек Шабденамович – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН Республики Казахстан, директор ДТОО «Институт ионосферы», АО «Национальный центр космических исследований и технологий».

Научные интересы:

- GPS-мониторинг региональных движений земной коры;
- обработка радиолокационных космических снимков, полученных с РСА;
- математическое моделирование сейсмотектонических процессов в земной коре.

Дубина Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии и телекоммуникаций Государственного университета «Житомирская политехника».

Научные интересы:

- обработка сигналов в радиотехнических системах;
- цифровая обработка изображений.

E-mail: Fedorovich_daf@ukr.net.

Андреев Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии и телекоммуникаций Государственного университета «Житомирская политехника».

Научные интересы:

- моделирование и обработка информации в радиотехнических системах.

E-mail: Oleks.andreyev@gmail.com.

Шаринова Гульнар – магистрант гр. ТРМ-19-2 специальности «Телекоммуникации и радиотехника» Государственного университета «Житомирская политехника».

Научные интересы:

- цифровая обработка изображений;
- обработка радиолокационных космических снимков, полученных с РСА.

Статья поступила в редакцию 31.07.2020.