

Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности

Д.Ж. Акматов✉, В.В. Николайчук, А.А. Тихонов, Р.В. Шевчук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация
✉dastan.akmatov.1994@mail.ru

Резюме: Классические методы наблюдений за деформациями земной поверхности на сегодняшний день являются трудозатратными и трудоемкими, а в некоторых случаях небезопасными. В статье рассмотрен метод радарной интерферометрии исследования деформаций земной поверхности, являющийся дополнительным для традиционных методов. Исходной информацией для вычислений в этом методе служат данные дистанционного радиолокационного зондирования земли. Для интерферометрического анализа данных используется два подхода: площадной интерферометрический анализ, позволяющий строить интерферограммы всего участка, и точечный анализ постоянных отражателей, результатом которого является карта истории движений земной поверхности. Несмотря на высокий уровень развития методов дистанционного зондирования земли, метод радарной интерферометрии, позволяющий производить измерения мелких угловых деталей в радиоизлучении с неба, не может быть использован как самостоятельный метод для определения оседаний земной поверхности ввиду относительно малой изученности вопроса о влиянии внешних факторов на точность измерений.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, интерферограммы, деформации, сдвижение земной поверхности, методы дистанционного зондирования земли, космические аппараты

Для цитирования: Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.

Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement

D.Zh. Akmatov✉, V.V. Nikolaichuk, A.A. Tikhonov, R.V. Shevchuk

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
✉dastan.akmatov.1994@mail.ru

Abstract: Classical methods to observe deformations of the Earth's surface are currently labour-intensive and time-consuming, and not safe in some cases. In the paper reviews the radar interferometry method to study deformations of the Earth's surface, which is a supplementary technique for traditional methods. Remote sensing data is used as the input information for the calculations used in this method. Two approaches are used for interferometric data analysis: the area-based interferometric analysis, which allows to build interferograms of the whole area, and the point-based analysis of permanent deflectors, which is used to create historical maps of the Earth's surface displacement. Despite the high development level of remote sensing methods, the radar interferometry technique, which allows to measure small angular details with radio-frequency emissions from the sky, can not be used as an independent method to determine the subsidence of the earth's surface due to the relatively little studies of how the external factors impact the measurement accuracy.

Keywords: radar interferometry, interferograms, deformations, displacement of the earth's surface, methods of remote sensing of the earth, space vehicles

For citation: Akmatov D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(1):144–147. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.

Введение

Безопасное освоение недр и охрана месторождений от вредных факторов – главные задачи добывающих предприятий. Это регламентируется федеральным законом, инструкциями по производству маркшейдерских работ, а также требованиями руководящих документов. Предприятие обязано обеспечить эксплуатационную надежность и долговечность объектов, в том числе наблюдение за деформациями на земной поверхности.

Классические методы наблюдения за сдвигами земной поверхности в настоящее время являются трудозатратными и трудоемкими, кроме того, производство работ осложняется географическим расположением объекта, что ведет к снижению точности выполняемых работ.

В настоящее время методы дистанционного зондирования земли являются перспективным направлением, применение которых способно решить вышеуказанные проблемы при выполнении работ.

Метод радарной интерферометрии

В качестве дополнительного метода исследования деформаций земной поверхности к традиционным методам может использоваться радарная интерферометрия, позволяющая производить измерения мелких угловых деталей в радиоизлучении с неба [1; 2].

Исходной информацией для дальнейших вычислений служат данные дистанционного радиолокационного зондирования земли.

На сегодняшний день в мире уже запущено достаточно много космических аппаратов (КА) для производства этого вида работ (табл. 1), поэтому данный метод широко распространен и применяется на ряде крупных предприятий.

Таблица 1
Радарные космические аппараты высокого и среднего разрешения

Table 1
High and medium resolution radar space vehicles

Спутник	Дата запуска	Наилучшее разрешение, м	Спектральный диапазон
COSMO-SkyMed-1 (Италия)	08.06.2007	1	X
COSMO-SkyMed-2 (Италия)	08.12.2007	1	X
COSMO-SkyMed-3 (Италия)	24.10.2008	1	
COSMO-SkyMed-4 (Италия)	06.11.2010	1	
TerraSAR-X (Германия)	15.07.2007	1	X
TanDEM-X (Германия)	21.06.2010	1	X
RADARSAT-2 (Канада)	14.09.2007	3	X
RISAT-2 (Индия)	20.04.2009	3	C
ALOS/PALSAR (Япония)	24.01.2006	7	L
JERS-1 (Япония)	11.02.1992	7	L
SIR-A (NASA)	12.11.1981	7	L
RADARSAT -1 (Канада)	04.11.1995	8	C
ENVISAT (ЕКА)	01.03.2002	20	C
ERS-1 (ЕКА)	17.07.1991	20	C
ERS-2 (ЕКА)	21.04.1995	20	C

Основные преимущества метода радарной интерферометрии по сравнению с классическими методами:

- регулярная независимая дистанционная оценка смещений по всей площади снимка;
- большой охват исследуемой территории;
- для расчета смещений используется массив спутниковых данных с космических аппаратов, полученных с определенной периодичностью (до нескольких раз в месяц).

Также важным преимуществом является то, что использование данного метода в качестве дополнения к классическим методам позволяет повысить безопасность производства работ, и в местах, где существует риск развития неблагоприятных условий, не закладывать профильные линии, а использовать результаты дистанционного зондирования земли.

Но, несмотря на ряд существенных преимуществ данного метода, одним из условий для чистого интерферометрического анализа, среди прочих, является наличие твердой отражающей поверхности на территории зоны наблюдений за сдвигами земной поверхности [3].

Большинство поверхностей опасных зон, на которых проводятся измерения, характеризуются естественной растительностью, водными и другими нетвердыми покровами. Такие участки обладают низкой когерентностью между циклами измерений, и, как следствие, значения смещений необъективны. В этом случае на такой территории отыскиваются наиболее подходящие точки, имеющие наивысшую когерентность, по которым производится интерферометрический анализ – такой анализ называется интерферометрический анализ постоянных точечных отражателей [4; 5].

Длины волн при радарной интерферометрии являются самым главным показателем, влияющим на точность полученных величин смещений. Основным интересом представляются микроволновые диапазоны, представленные в табл. 2.

Таблица 2
Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра, в которых выполняется космическая съемка

Table 2
Radio wave bands of the electromagnetic spectrum used to perform the space survey

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5.20–10.90	2.75–5.77 (2.4–3.8)	COSMO-SkyMed-1-4; TanDEM-X/ TerraSAR-X; USGS SLAR
C	3.9–6.2	3.8–7.6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0.39–1.55	19.3–76.9 (15–30)	SIR-A,B; JERS; ALSO/PALSAR
P	0.225–0.391	40.0–76.9 (30–100)	AIRSAR

Чем короче волны, тем выше точность определения смещений (миллиметровая), но они подвержены влиянию атмосферферы.

Стоит отметить, что когерентность интерферограмм зависит от периодичности съемки, которая должна стремиться к минимальному значению, чтобы можно было установить большее число коррелирующих между собой объектов.

Интерферометрический анализ данных

Для интерферометрического анализа данных используется два подхода, реализованные в зарубежных программных продуктах. Первый и основной подход – это площадной интерферометрический анализ, позволяющий строить интерферограмму всего участка, которая позволяет использовать радиолокационные изображения, в количестве не меньше двух штук, полученные на данном участке исследования. Эта технология использует Радиолокационную синтезированную апертуру (РСА), которая может работать на различных длинах волн, например, на 6 см для С-диапазона канадского спутника RADARSAT-2 или на 3 см для Х-диапазона спутников TerraSAR-X и COSMO-SkyMed, где происходит вычитание фаз множества пар сцен, составленных из условия предельного временного интервала и максимальной разницы орбит. Результатом данного подхода является получение среднегодовой дифференциальной интерферограммы после процесса компоновки интерферограмм (рис. 1). Данный метод позволяет получить измерения вертикальных смещений земной поверхности [6; 7].

Второй подход – точечный анализ постоянных отражателей, позволяет при имеющейся модели оседаний земной поверхности произвести анализ наиболее когерентных точек местности, повысив тем самым точность и площадь исследований. Результатом анализа является карта истории движений земной поверхности.

Работы по космическому мониторингу смещений деформаций делятся на два этапа. На первом этапе получают исходные радарные данные, а на втором этапе работ про-

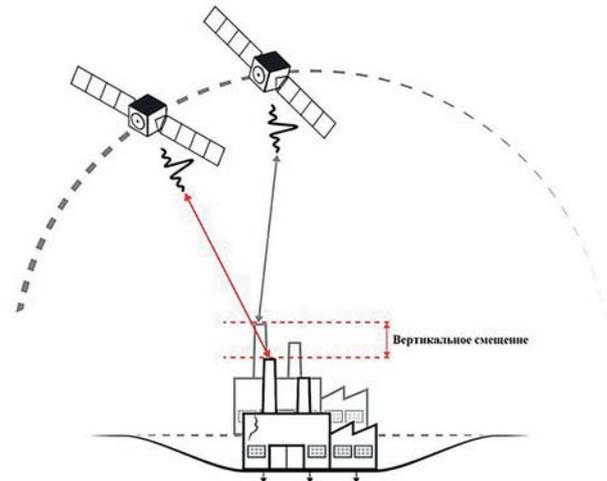


Рис. 1
Принцип дифференциальной интерферометрии

Fig. 1
Principles of differential interferometry

изводят обработку данных и строят карты смещений и деформаций земной поверхности и сооружений [8; 9].

Заключение

Технология радарного интерферометрического мониторинга показала высокую эффективность на ряде крупных предприятий, однако как самостоятельный метод для определения оседаний земной поверхности его применять нельзя ввиду относительно малой изученности вопроса о влиянии внешних факторов на точность измерений.

Список литературы

1. Гришин А.В., Шевчук С.В. К вопросу организации геомеханического мониторинга при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом на больших глубинах. *Маркшейдерский вестник*. 2017;(1):51–55.
2. Соломенников М.Ю., Мусихин В.В., Харина Н.М. Оценка точности определения оседаний, полученных методами радарной интерферометрии по спутниковым снимкам ENVISAT и TERRASAR-X на территории промышленной объекта г. Березники. *Маркшейдерский вестник*. 2017;(2):44–49.
3. Кузнецов В.Д. *Физика твердого тела*. Томск: Красное Знамя; 1941.
4. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. *Геомеханика*. М.: Изд-во МГУ, 2005.
5. Thompson A.R., Moran J., Swenson Jr.G.W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Springer International Publishing; 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4
6. Altiner Y. *Analytical Surface Deformation Theory: For Detection of the Earth's Crust Movements*. Springer Verlag Berlin Heidelberg; 1999. DOI: 10.1007/978-3-662-03935-9.
7. Кантемиров Ю.И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas. *Геоматика*. 2012;(1):22–26. Режим доступа: <http://geomatika.ru/clauses/244/>
8. *FRINGE workshop to focus on satellite interferometry*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FRINGE_workshop_to_focus_on_satellite_interferometry
9. Gosselin C. *Obtaining millimetre precision using satellite sensors: science or fiction?* Available at: <https://effigis.com/en/obtaining-millimetre-precision-using-satellite-sensors-science-or-fiction/>.

References

1. Grishin A.V., Shevchuk S.V. To the organization of geomechanical monitoring in the development of mineral deposits by open method. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2017;(1):51–55. (In Russ.)
2. Solomennikov M.Y., Musikhin V.V., Kharina N.M. Estimation of the accuracy of the determination of subsidence obtained by radar interferometry from satellite images of ENVISAT and TERRASAR-X on the territory of the industrial site of Berezniki. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2017;(2):44–49. (In Russ.)
3. Kuznetsov V.D. *Solid State Physics*. Tomsk: Krasnoe Znamya; 1941. (In Russ.)
4. Pevzner M.E., Iofis M.A., Popov V.N. *Geomechanics*. Moscow: MGGU, 2005. (In Russ.)
5. Thompson A.R., Moran J., Swenson Jr.G.W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Springer International Publishing; 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4
6. Altiner Y. *Analytical Surface Deformation Theory: For Detection of the Earth's Crust Movements*. Springer Verlag Berlin Heidelberg; 1999. DOI: 10.1007/978-3-662-03935-9.
7. Kantemirov Y.I. Brief theoretic principles of radar interferometry and its multipass variations: PS and SBas. *Geomatics*. 2012;(1):22–26. Available at: <http://geomatika.ru/clauses/244/>
8. *FRINGE workshop to focus on satellite interferometry*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FRINGE_workshop_to_focus_on_satellite_interferometry
9. Gosselin C. *Obtaining millimetre precision using satellite sensors: science or fiction?* Available at: <https://effigis.com/en/obtaining-millimetre-precision-using-satellite-sensors-science-or-fiction/>

Информация об авторах

Акматов Дастан Женешбекович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Dastan.akmatov.1994@mail.ru.

Николайчук Виктор Вадимович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Nikovitek@gmail.com.

Тихонов Алексей Анатольевич – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Tikhonov.alexey95@mail.ru.

Шевчук Роман Васильевич – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Shevchuk.002@mail.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.01.2020

Поступила после рецензирования: 19.01.2020

Принята к публикации: 03.02.2020

Information about the author

Dastan Zh. Akmatov – postgraduate student, Department of Geology and Surveying (major: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Dastan.akmatov.1994@mail.ru.

Viktor V. Nikolaichuk – postgraduate student, Department of Geology and Surveying (major: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Nikovitek@gmail.com.

Aleksei A. Tikhonov – postgraduate student, Department of Geology and Surveying (major: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Tikhonov.alexey95@mail.ru.

Roman V. Shevchuk – postgraduate student, Department of Geology and Surveying (major: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Shevchuk.002@mail.ru.

Article info

Received: 13.01.2020

Revised: 19.01.2020

Accepted: 03.02.2020

XVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И РАЦИОНАЛЬНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР

Ufi
Approved
Event

Mining Week

KAZAKHSTAN '2020

23-25
ИЮНЯ 2020

КАРАГАНДА
СТАДИОН «ШАХТЕР»

👤 📞 ✉️

TNT Productions, LLC
тел. +7 727 250 19 99
факс +7 727 250 55 11
e-mail: mintek@tntexpo.com

www.miningweek.kz