

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАЗЕМНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПРИБОРТОВЫХ МАССИВОВ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Виталий Андреевич Шаворин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 6301108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)376-76-47, e-mail: shavorinva@yandex.ru

Андрей Евгеньевич Кулешов

АО «Полюс-Красноярск», 630108, Россия, г. Красноярск, ул. Цимлянская, д. 37, старший инженер-геомеханик геотехнического отдела, тел. (923)330-67-65, e-mail: kyleshovaepolyus@yandex.ru

В данной статье произведен анализ современных методов мониторинга посредством наземных интерферометрических радаров. В настоящий момент на мировом рынке имеется всего несколько компаний, которые предлагают решения по интерферометрическому сканированию. Это IDS (Италия), входящая в концерн Hexagon, Groundprobe (Австралия), Reutech (ЮАР) и весьма редко встречающиеся LISA (JRC-Lisalab) и GPRI (Gamma Remote Sensing). Такие радары могут применяться при разработке полезных ископаемых открытым способом для контроля безопасности прибортовых массивов, отвалов и дамб. Рассмотрен общий принцип работы интерферометрических радаров и различия между ними. Также описаны различные виды антенн, которые используются в настоящее время в наземном интерферометрическом сканировании. По результатам выполненного анализа подготовлены рекомендации для применения различных типов радаров в зависимости от стратегии геотехнического мониторинга.

Ключевые слова: карьер, геотехнический мониторинг, деформации, откосные сооружения, наземная радарная интерферометрия, открытые горные работы, георадар

MODERN METHODS OF GROUND-BASED INTERFEROMETRY IN MONITORING ADJACENT ROCK MASSES IN OPEN PIT MINING

Vitalij A. Shavorin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Post-Graduate Student, Engineering Geodesy and Mining Department, phone: (913)376-76-47, e-mail: shavorinva@yandex.ru

Andrej E. Kuleshov

AO "Polus- Krasnojarsk", 37, Cimljanskaja St., Krasnojarsk, 630108, Russia, Senior Engineer – Geomechanic, Geotechnical Department, phone: (923)330-67-65, e-mail: kyleshovaepolyus@yandex.ru

This article analyzes modern monitoring methods using ground-based interferometric radars. Currently, there are only a few companies on the world market that offer interferometric scanning solutions. These are IDS (Italy), part of the Hexagon group, Groundprobe (Australia), Reutech (South Africa) and the very rare LISA (JRC-Lisalab) and GPRI (Gamma Remote Sensing). Such radars can be used in the open pit mine development of mineral resources for monitoring the safety of adjacent rock masses, dumps and dams. The article considers the general principle of interferometric radars' operation and differences between them. It also describes different types of aerials, which are being used nowadays in ground-

based interferometric scanning. The analysis results enabled to formulate the recommendations for using different type radars depending on the strategy of geotechnical monitoring.

Keywords: open pit mine, geotechnical monitoring, deformations, slope constructions, ground-based radar interferometry, open pit mine operation, georadar

Введение

В настоящее время на территории России использование наземных интерферометрических радаров для мониторинга состояний откосов и бортов карьера находит все большее применение. Основой успеха этой технологии является сканирование обширных зон на безопасном расстоянии от объекта наблюдения в режиме реального времени с субмиллиметровой точностью практически в любых погодных условиях. Несмотря на то, что наземные интерферометрические радары являются технологией достаточно молодой (в сравнении с традиционными методами ведения мониторинга), они уже успешно зарекомендовали себя для контроля устойчивости бортов карьера и его уступов на объектах Российских и зарубежных компаний [1–2]. Радары эффективно используют на карьерах Лебединского, Олимпиадинского, Михайловского, Ковдорского и др. ГОКов. Прогнозируя возможные обрушения потенциально опасных мест, заблаговременно предупреждая руководство и персонал карьера об опасности, радары позволяют предотвратить несчастные случаи, связанные с работой людей и техники в местах активно развивающихся деформаций.

Общий принцип работы интерферометрических радаров

Основной принцип интерферометрического сканирования заключается в передаче высокочастотной электромагнитной энергии (радиоволны) в направлении объекта, а затем в регистрации этой энергии (радиоволны), отраженной от него [3]. Антенна радара является активным датчиком и излучает импульс в направлении наблюдаемого объекта с частотой 10–17 ГГц. Электромагнитные волны, достигая наблюдаемого объекта, взаимодействуют с ним. Одна часть поглощается, а другая отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении наблюдаемого объекта путем сравнения информации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала. Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [1].

Выделяют два вида расстояний, полученных в результате сканирования радаром: абсолютное и относительное.

Абсолютное расстояние – это расстояние, которое прошла радиоволна от приемо-передающего устройства (ППУ) до объекта и вернулась обратно (рис. 1). Рассчитывается по формуле:

$$\frac{(t_2 - t_1) \cdot c}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость света;

t_1 – время, за которое радиоволна распространяется от ППУ до измеряемого объекта;

t_2 – время, за которое отраженная радиоволна распространяется от измеряемого объекта до ППУ.

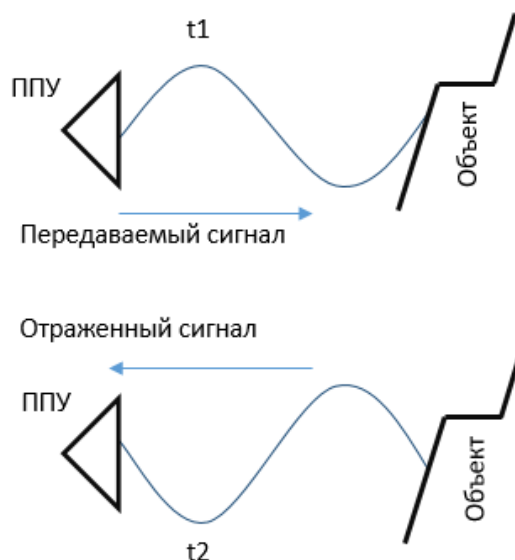


Рис.1. Схема измерения абсолютного расстояния

Современные интерферометрические радары определяют абсолютное расстояние с точностью до 0,1 м. Это расстояние используется для построения трехмерной модели склона карьера, а не для определения смещения.

Смещение, которое также называют относительным расстоянием, определяют на основе фазы радиолокационного сигнала. Благодаря этому достигается субмиллиметровая точность.

На левой части рис. 2 показано первоначальное сканирование объекта, где ППУ посылает сигнал до наблюдаемого объекта и регистрирует обратный сигнал. При этом объект не совершает движение – фаза сканирования φ_1 .

На правой части рис. 2 происходит движение сканируемого объекта в сторону ППУ – фаза сканирования φ_2 , благодаря чему появляется фазовый сдвиг $\varphi_2 - \varphi_1$. Современные интерферометрические радары с частотой около 10 ГГц при фазовом сдвиге в 5° способны регистрировать смещение сканируемого объекта до 0,2 мм [4]. Смещение объекта d вычисляется по формуле

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi}(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

где λ – длина радарной волны.

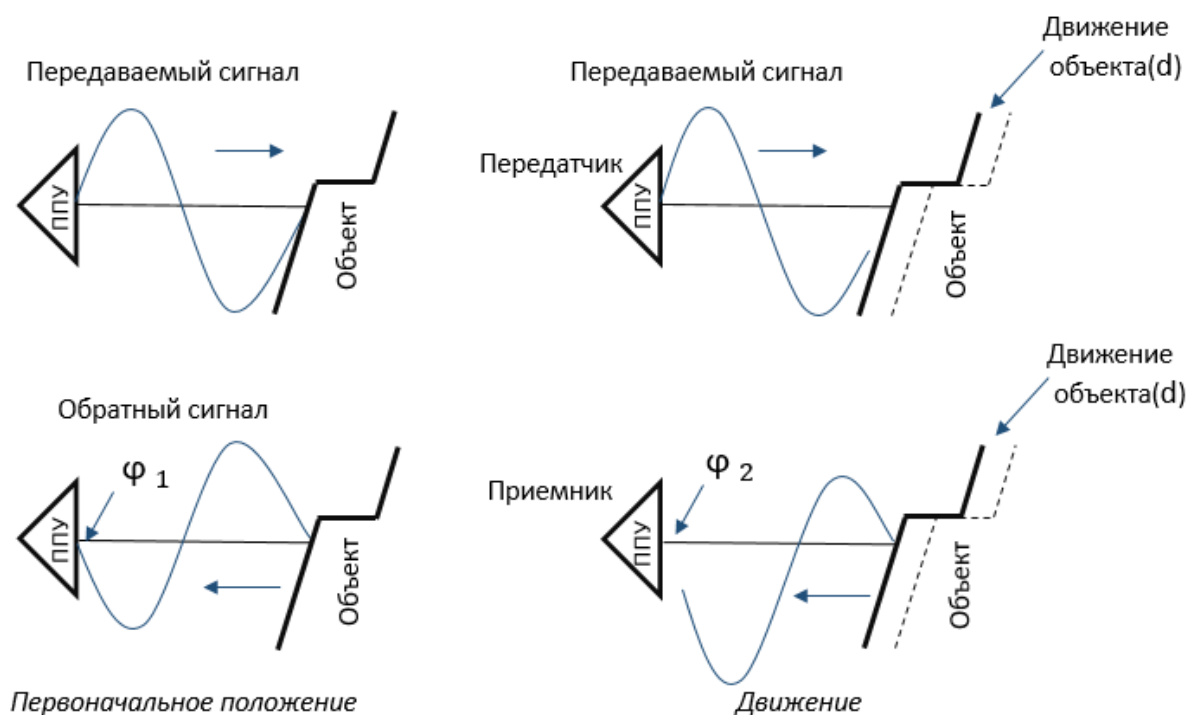


Рис. 2. Схема измерения относительного расстояния

Основные виды приборов наземной интерферометрии

В настоящий момент на мировом рынке имеется всего несколько компаний, которые предлагают решения по интерферометрическому сканированию. Это IDS (Италия), входящая в концерн Hexagon, Groundprobe (Австралия), Reutech (ЮАР) и весьма редко встречающиеся LISA (JRC-Lisalab) и GPRI (Gamma Remote Sensing). Наиболее широкое распространение в России получили радары фирм IDS и Groundprobe [1].

Важно понимать, что все радары используют один и тот же базовый метод обработки сигналов на основе фазы, называемый интерферометрией. В тоже время современные интерферометрические радары можно разделить на две группы по технологии сканирования, это SAR (Synthetic-aperture radar) – радары с синтезированной апертурной решеткой и RAR (Real Aperture Radar) – радары с реальной апертурной решеткой [5–6].

Лучи радара, используемые для сканирования бортов карьера, формируются с помощью антенн, которые имеют различную форму. На рис. 3 представлены три основных типа антенн, используемых в наземном интерферометрическом сканировании в настоящее время [7].

Первый тип – это антенна параболической тарелочной формы, создающая точный конусообразный луч, который движется слева направо и сверху вниз по азимуту и возвышению, как прожектор. Радары с такой антенной относятся к радарам с реальной апертурной решеткой (RAR). Самые распространенные модели таких радаров это Reutech MSR Modular [8] и Groundprobe SSR-XT [9].

Второй тип антенны – это антенна линейного типа. Такая антенна формирует узкий веерообразный луч, который передвигается по азимуту и формирует тонкую вертикальную полосу на склоне карьера. Известные модели таких радаров это Groundprobe SSR-FX и SSR-OMNI.

Третий тип имеет рупорную антенну, которая создает широкий конусообразный луч и захватывает сразу очень большое пятно. Это радары с синтезированной апертурной решеткой. Примером таких радаров является Groundprobe SSR-SARX и IDS IBIS-FM. На рис. 3 отображены основные типы антенн.

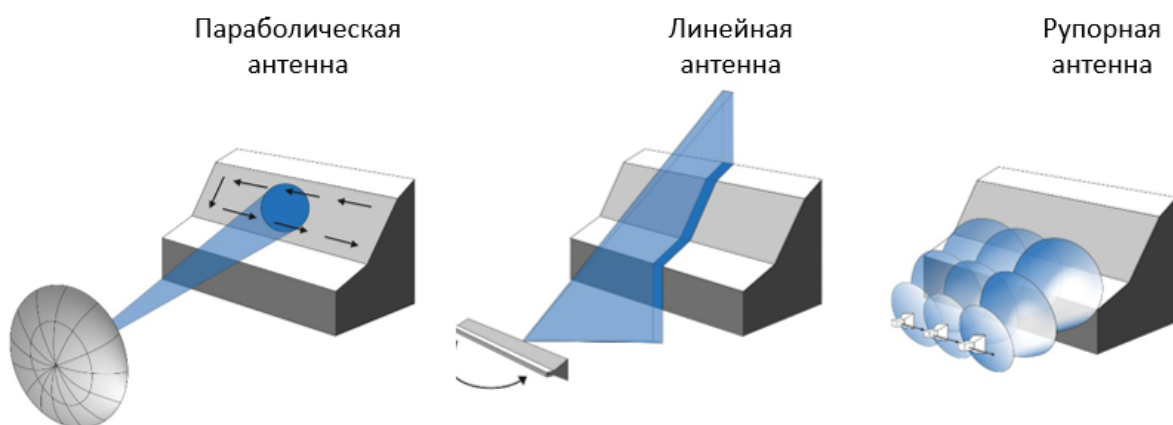


Рис. 3. Основные типы антенн наземных интерферометрических радаров

Каждый тип антенны имеет свои преимущества и недостатки. Выбор радаров для мониторинга откосов карьеров зависит от поставленных задач и стратегии ведения мониторинга [10]. Так, выделяют две основные стратегии мониторинга устойчивости откосов: целевой мониторинг и мониторинг обширной территории [5]. Целевой мониторинг является тактическим, т.е. сосредоточен на известных областях риска, критических для безопасности ведения работ. Для данной стратегии целесообразны радары 3D радары с параболической антенной с реальной апертурной решеткой.

Мониторинг обширной территории, он же стратегический, охватывает большие участки карьеров, чтобы выявить новые потенциально опасные зоны. Для данной стратегии характерно длительное сканирование, определение большой опасной зоны или медленно развивающейся деформации, поэтому выбирают 2D радары с синтезированной или реальной апертурой с линейной или рупорной антенной.

Дальнейшее представление результатов сканирования радаров в ПО также отличается в зависимости от типа антенны и, как следствие, радарной установки.

На рис. 4 изображено ПО НМИ радара Reutech MSR Modular с антенной параболического типа [2, 11–12]. Данные представлены в виде синтетической 3D модели, наложенной на DTM модель карьера. Красным цветом подсвечена зона, в которой скорость движения горной массы превышает 1 мм/ч за последние 12 часов.

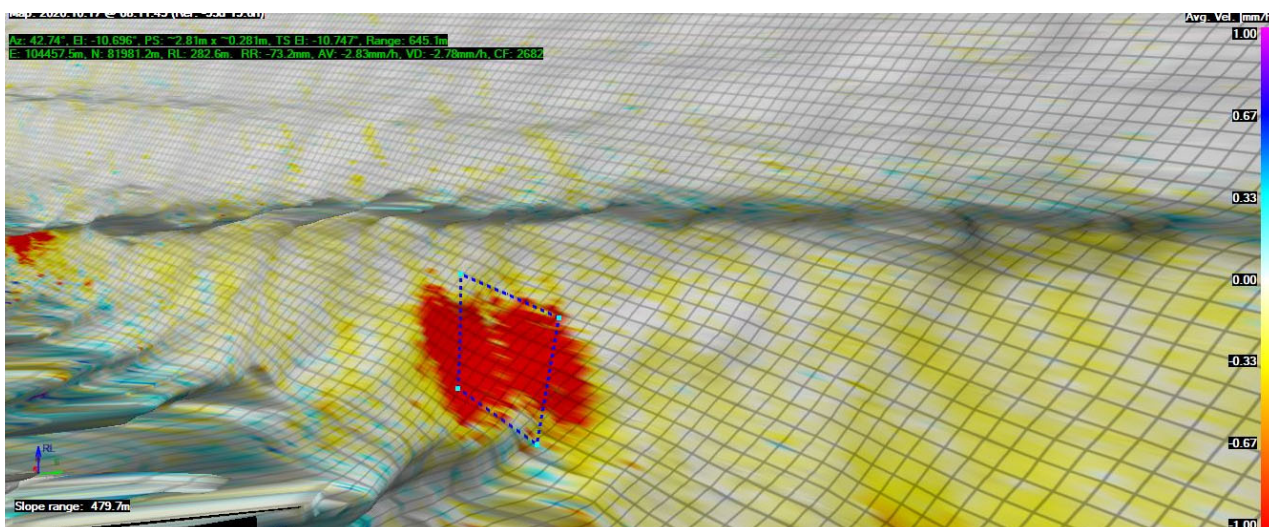


Рис.4. Окно ПО НМІ радара Reutech MSR Modular с антенной параболического типа

Развитие деформации произошло 17 октября 2020 года и было спрогнозировано радаром Reutech MSR300 за несколько часов до вывала. Техника и люди были предупреждены и выведены из опасной зоны.

Заключение

С каждым годом количество компаний, использующих интерферометрические наземные радары в целях контроля бортов и уступов карьеров, растет, что лишний раз доказывает положительный опыт их использования. Однако их применение весьма часто начинается только после произошедших деформаций.

Одним из ярких примеров раннего прогноза обрушения карьера по результатам сканирования наземных интерферометрических радаров является событие, произошедшее 10 апреля 2013 года на карьере Бингем-Каньон (США) [6], находящийся к юго-западу от города Солт-Лейк-Сити, штат Юта. Карьер имеет глубину 1200 м и охватывает площадь порядка 7,7 км² (рис. 5).

В 2010 году на карьере были установлены радары компаний Groundprobe (Австралия) и IDS (Италия). Несколько радаров IDS IBIS-FM были направлены на зону деформации и подали первый сигнал тревоги 10 апреля в 6 утра. Техника и люди были выведены из опасной зоны. Обрушение произошло в 9:30 вечера примерно через 15 часов после первой тревоги.

Доказанная эффективность технологии наземного интерферометрического сканирования на карьерах зарубежных компаний положительно влияет на формирование Российской нормативно-методической базы по применению радаров в отечественной горной промышленности.

В ближайшей перспективе радары будут находить все большее применение в горном производстве для контроля состояния устойчивости откосов.



Рис.5. Сход горной массы на карьере Бингем-Каньон

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Исмагилов Р.И., Захаров А.Г., Бадтиев Б.П., Сенин Н.В., Павлович А.А., Свириденко А.С. // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84–90.
2. Макеев М.А. Инновации на службе промышленной безопасности: опыт использования передовых радарных систем контроля устойчивости бортов карьеров – Reutech на предприятиях РФ // Горная промышленность. – 2017. – № 2(132). – С. 48–49.
3. H. Mitri, I. Vennes. Rock Slope Surface Monitoring Technologies with Focus on Ground-Based Synthetic Aperture Radar//Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – С. 1251–1263.
4. Шаворин В.А., Горилько А.С. Исследование точности систем измерения сдвигов бортов на примере 3D радара Groundprobe SSR-XT // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2020 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Т. 1, ч. 1. – С. 144–151.
5. P. Bellett, D. Noon, D. Leva. 3D and 2D radars for open-pit slope monitoring. // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Slope Stability. – 2015. – С. 1–14.
6. Мельников Н.Я., Мельницкая М.Е., Использование сейсмического и радарного мониторинга при оценке оползневых явлений на карьерах // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации, сборник статей международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 209–213.
7. R. Caduff, F. Schlunegger, A. Kos. A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. // Earth Surf. Process. Landforms. – 2014. – С. 208–228.
8. Оф.сайт Reutech mining [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.reutechmining.com/msr-modular-series> (дата обращения 18.04.2021).
9. Оф.сайт GroundProbe [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.groundprobe.com/product/ssr-xt/?lang=ru> (дата обращения 18.04.2021).

10. Рид Д., Стейси П. Проектирование бортов карьера. // АО «Полиметалл Инжиниринг», 2015. – С. 351–399.
11. Бурцев С.В., Рыбак Л.В. Радиолокационные системы контроля устойчивости бортов на разрезе «Черниговец» // Известия ТулГУ. – 2018. – Вып. 1. – С. 203–209.
12. Клебанов А.Ф., Макеев М.А., Монахов Н.В. Современная система контроля устойчивости бортов карьеров на основе использования радаров MSR // Горная промышленность. – 2015. – № 1(119). – С. 75–79.

© В. А. Шаворин, А. Е. Кулешов, 2021