



**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ RTK-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
СМЕЩЕНИЙ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ
БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

Сафарова Мафтуна Давроновна

Навоийский государственный горно-технологический университет

*(Докторант специальности 04.00.10 – Геотехнология (открытая,
подземная и строительная))*

e-mail: maftunasafarova2806@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрено теоретическое обоснование и математическая модель функционирования RTK-геодезической системы мониторинга смещений горного массива при ведении буровзрывных работ (БВР). Показано, что традиционные методы контроля обладают недостаточной пространственной разрешающей способностью и не обеспечивают непрерывного высокоточного измерения динамических смещений. На основе фазовых спутниковых измерений и дифференциальной коррекции обоснована возможность регистрации перемещений массива с точностью по плану 5–10 мм и по высоте 10–20 мм. Сформулирована постановка задачи высокоточного определения трёхмерных векторов смещения геодезических маркеров до и после взрывного воздействия. Разработана трёхуровневая архитектура системы и математическая модель её функционирования, формализующая процессы измерения, RTK-коррекции, фильтрации, передачи данных и оценки надёжности. Установлено, что при точности RTK-измерений порядка 1,5–3,0 см минимально достоверно фиксируемое смещение составляет около 5–10 см, что достаточно для анализа перемещений горной массы при БВР.



Ключевые слова. RTK-технология, GNSS, мониторинг смещений, горный массив, буровзрывные работы, вектор смещения, математическая модель, точность позиционирования, дифференциальная коррекция, критерий надёжности.

Введение. Современное развитие горного производства в условиях интенсивного ведения БВР предъявляет повышенные требования к точности оценки геомеханического отклика горного массива на взрывное воздействие. Ключевыми параметрами, определяющими эффективность и безопасность БВР, являются величины смещений, деформаций и скоростей распространения упругопластических возмущений в массиве. Традиционные методы контроля — визуальные наблюдения, маркшейдерские съёмки, сейсмодатчики — обладают рядом ограничений: недостаточной пространственной разрешающей способностью, невозможностью непрерывного мониторинга, ограниченной точностью при малых смещениях. В этой связи необходима разработка геодезической системы, обеспечивающей высокоточное измерение динамических смещений горного массива в процессе и после взрыва. Одним из наиболее перспективных решений является использование спутниковых геодезических технологий, в частности RTK (Real-Time Kinematic), обеспечивающих высокую точность позиционирования в реальном времени. Цель настоящего тезиса — изложить теоретическое обоснование применения RTK-технологии и математическую модель функционирования разработанной системы мониторинга.

Основная часть. При детонации заряда в скважине формируется комплекс волновых процессов, включающий ударную волну, упругие (Р- и S-) волны, пластические деформации и зону трещинообразования.

Движение частиц массива описывается как функция времени и расстояния:

$$u(r, t) = f(A, r, t, \sigma_c, E, \rho), \quad (1)$$

где $u(r, t)$ — перемещение точки массива; A — энергия взрыва; r — расстояние до заряда; σ_c — предел прочности породы; E — модуль упругости; ρ — плотность. Максимальные смещения наблюдаются вблизи зарядов и быстро затухают с расстоянием, однако даже малые остаточные деформации играют критическую роль в формировании трещин, устойчивости бортов карьера, величине потерь и разубоживания руды. Следовательно, задача их высокоточного измерения имеет принципиальное значение.

RTK-технология основана на использовании фазовых измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) с применением базовой станции и подвижного приёмника (ровера).

Основное уравнение фазового измерения:

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} (R + c \cdot \Delta t + I + T + \varepsilon), \quad (2)$$

где Φ — фазовое измерение; λ — длина волны; R — геометрическое расстояние; c — скорость света; Δt — ошибка синхронизации; I , T — ионосферная и тропосферная задержки; ε — шум. RTK позволяет устранять большинство ошибок за счёт дифференциальной коррекции, что обеспечивает точность по плану 5–10 мм, по высоте — 10–20 мм.

Применение RTK-технологии в условиях взрывных работ обосновано следующими факторами: высокой точностью измерений, позволяющей регистрировать малые перемещения (мм–см), характерные для стадии упругой деформации; работой в режиме реального времени,

обеспечивающей своевременное обнаружение и анализ динамики перемещений в течение секунд после взрыва; возможностью пространственно распределённых измерений, поскольку система может включать несколько роверов, установленных на различных площадках, бортах карьера и в опасных зонах; интеграцией с геомеханической моделью, при которой данные RTK используются для настройки модели (PLAXIS 3D, FEM) с получением кривых «заряд–перемещение» и оптимизацией параметров взрывных работ.

Рассматривается горный массив, в котором перед проведением взрывных работ формируется система опорных геодезических маркеров (GNSS-роверов), жёстко закреплённых на уступах, бортах и в контрольных точках массива. Для i -го маркера в момент времени t_0 (до взрыва) его пространственные координаты заданы в геоцентрической или локальной декартовой системе:

$$P_i(t_0) = (x_i, y_i, z_i). \quad (3)$$

После взрывного воздействия (в момент t_1) маркер занимает положение:

$$P_i(t_1) = P_i' = (x_i', y_i', z_i'). \quad (4)$$

Тогда вектор перемещения (взрывного смещения) определяется как разность координат до и после воздействия. В общем случае координаты маркера являются функцией времени:

$$P_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t)), \quad (5)$$

Задача мониторинга заключается в регистрации дискретного временного ряда координат, что позволяет определить мгновенные смещения, скорости и ускорения. Для задач БВР практический интерес

представляют максимальное смещение, остаточное смещение после затухания волн и направление вектора движения.

Реально измеряемые координаты содержат ошибки:

$$\tilde{P}_i(t) = P_i(t) + \varepsilon_i(t), \quad (6)$$

где $\varepsilon_i(t)$ — вектор суммарной погрешности RTK-измерения, включающий шум фазовых измерений, многолучевость, остаточные атмосферные ошибки и ошибки центрирования антенны. Оценка вектора смещения выполняется с учётом этих погрешностей. Среднеквадратическая погрешность определения смещения задаётся:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}. \quad (7)$$

Для RTK $\sigma_x, \sigma_y \approx 5\text{--}10$ мм, $\sigma_z \approx 10\text{--}20$ мм, следовательно $\sigma_d \approx 1,5\text{--}3$ см. При типичных величинах взрывных смещений отношение «сигнал/шум» оказывается высоким, что означает высокую достоверность измерений, возможность надёжного определения направления вектора и устойчивость к случайным ошибкам.

Измеренные смещения позволяют решать обратную задачу — установление зависимости смещения от параметров взрыва и свойств массива:

$$\Delta P_i = f(Q, r_i, \sigma_c, E, D, t), \quad (8)$$

где Q — масса заряда ВВ, кг; r_i — расстояние от заряда до i -го маркера, м; σ_c — предел прочности породы на сжатие, МПа; E — модуль упругости горных пород, МПа; D — степень трещиноватости. Цель — определить параметры функции $f(\cdot)$ и установить зависимости «заряд → смещение», «расстояние → затухание», «структура массива → направление движения». Смещение считается достоверно

зафиксированным при выполнении условия $d_i \geq k \cdot \sigma_d$, где $k = 3 \div 5$ — коэффициент надёжности. Для RTK минимально обнаруживаемое смещение составляет $d_{\min} \approx 5 \div 10$ см, однако фактические смещения при БВР значительно превышают этот порог, что обеспечивает высокую информативность метода.

Общий вид разработанной геодезической системы мониторинга представлен на рис. 1–3, где показаны два основных аппаратных компонента: GNSS-антенна, обеспечивающая приём спутниковых сигналов, и основной вычислительный блок, размещённый в защитном корпусе. Как показано на рис. 2, применяется многочастотная GNSS-антенна L1/L2/L5 с магнитным основанием, а на рис. 3 приведено внутреннее устройство корпуса с аккумуляторным блоком (4×18650), платой LG290P, микроконтроллером ESP32 и платой управления зарядом.



Рис. 1. Общий вид разработанной системы: GNSS-антенна (слева) и основной блок в корпусе (справа)



Рис. 2. Многочастотная GNSS-антенна L1/L2/L5 с магнитным основанием и SMA-разъёмом



Рис. 3. Внутреннее устройство корпуса. Видны аккумуляторный блок (4×18650, синие), плата LG290P (Waveshare, синяя), ESP32, плата управления зарядом

Разработанный комплекс реализует трёхуровневую архитектуру (рис. 4). Первый уровень — аппаратно-программный комплекс, функционирующий непосредственно в зоне горных работ (GNSS-антенна

геодезического класса, RTK-приёмник, микроконтроллер, источник питания и модуль связи GSM/LTE/LoRa/Wi-Fi); его задачей является высокоточное определение координат маркеров в реальном времени с сантиметровой точностью при частоте регистрации 1–10 Гц. Второй уровень обеспечивает передачу данных и облачное хранение с синхронизацией временных рядов, первичной обработкой и контролем качества. Третий уровень предназначен для визуализации и аналитической обработки: отображения координат маркеров, построения векторов смещений, выявления динамики деформаций и определения зон низкой надёжности.

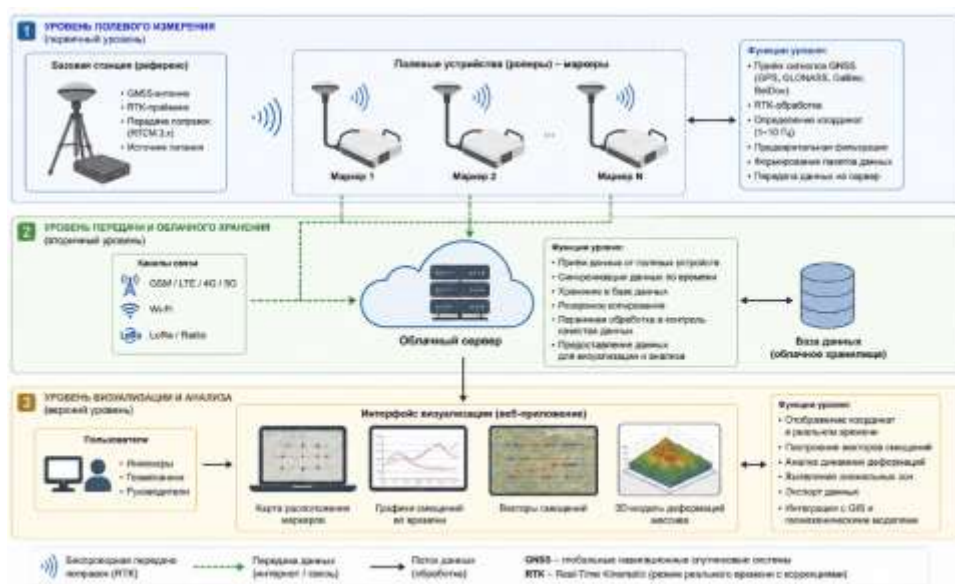


Рис. 4. Архитектура разработанной системы мониторинга взрывных смещений горного массива на основе RTK-технологии

Функционирование системы, как показано на рис. 4, можно представить в виде последовательного преобразования данных:

$$S(t) = F\{P_i(t), C(t), D(t)\}, \quad (9)$$

где $S(t)$ — состояние системы мониторинга; $P_i(t)$ — координаты маркеров; $C(t)$ — корректирующие поправки (RTK); $D(t)$ — данные обработки и фильтрации. Процесс измерения координат маркеров

описывается с учётом суммарной погрешности измерений. RTK-координаты определяются как

$$P_i(t) = P_{\text{база}}(t) + \Delta P_i(t), \quad (10)$$

где $P_{\text{база}}(t)$ — координаты базовой станции; $\Delta P_i(t)$ — дифференциальная поправка.

Для повышения точности применяется фильтрация или фильтр Калмана. Блок-схема функционирования RTK-системы приведена на рис. 5.

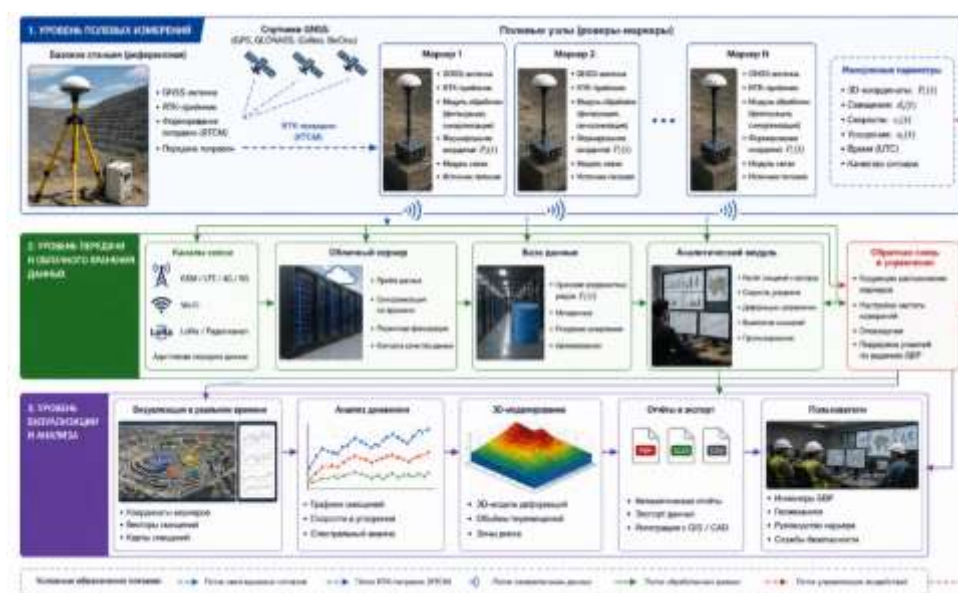


Рис. 5. Блок-схема функционирования RTK-системы мониторинга смещений горного массива

Экспериментально установлено, что смещения подчиняются зависимости затухания, где $d(r)$ — смещение на расстоянии r ; d_0 — смещение на опорном расстоянии r_0 ; n — коэффициент затухания ($n = 1,2-2,5$). Система функционирует с частотой измерений $f = 1 \div 10$ Гц. Задержка передачи складывается из составляющих:

$$\tau = \tau_{\text{измер}} + \tau_{\text{перед}} + \tau_{\text{обработки}}. \quad (11)$$

Общий поток данных описывается выражением

$$Q_{\text{дата}} = N \cdot f \cdot V, \quad (12)$$

где N — число маркеров; f — частота измерений; V — объём одного пакета данных. Надёжность функционирования оценивается критерием $R = T_{\text{раб}} / T_{\text{общ}}$ (формула 3.28), где $T_{\text{раб}}$ — время корректной работы, $T_{\text{общ}}$ — общее время наблюдений.

Закключение. Теоретически обоснована целесообразность применения RTK-геодезической системы для мониторинга смещений горного массива при ведении БВР: показано, что RTK-технология позволяет перейти от периодического и визуального контроля к высокоточному определению пространственных координат маркеров в режиме, близком к реальному времени. Разработана структурно-функциональная (трёхуровневая) схема системы, включающая полевой измерительный уровень, уровень передачи и облачного хранения данных, а также уровень визуализации и аналитической обработки, что обеспечивает полный цикл работы с геодезической информацией — от регистрации координат до построения векторов смещения и экспорта результатов. Сформирована математическая модель функционирования RTK-комплекса, учитывающая координаты маркеров, RTK-поправки, погрешности измерений, фильтрацию данных, задержку передачи, информационный поток и критерий надёжности. Установлено, что при точности RTK-измерений порядка 1,5–3,0 см минимально достоверно фиксируемое смещение составляет около 5–10 см, что достаточно для анализа перемещений горной массы при БВР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thornton D., Sprott D., Brunton I. Measuring blast movement to reduce ore loss and dilution // Proceedings of the 31st Annual Conference on



Explosives and Blasting Technique. – Cleveland: ISEE, 2005. – Vol. 2. – P. 95–108.

2. Tordoir A., Sarma B., Weatherley D., Chitombo G. A new methodology for the measurement and evaluation of blast-induced ore movement // Fragblast 9: Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. – London: CRC Press, 2009. – P. 367-374.

3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Vienna: Springer, 2008. – 516 p.

4. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (eds.). Springer handbook of global navigation satellite systems. – Cham: Springer, 2017. – 1327 p.

5. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS satellite surveying. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2015. – 840 p.

6. Quectel Wireless Solutions. LG290P GNSS Module Datasheet. – Rev. 1.3. – Shanghai, 2024. – 62 p.

7. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – Rev. 5.3. – Shanghai, 2024. – 723 p.

8. Weber G., Dettmering D., Gebhard H. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) // Proceedings of ION GNSS 2005. – Long Beach, CA, 2005. – P. 2243-2251.

9. RTCM Special Committee 104. RTCM Standard 10403.3: Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services. – Arlington: RTCM, 2016.

