

УДК 528.48

д.т.н., профессор Шульц Р.В.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

к.т.н., доцент Анненков А.А.,

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GNSS-ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Розглянуто основні перспективні напрямки розвитку систем геодезичного моніторингу з використанням GNSS-технологій та визначено напрямки, що потребують подальших досліджень.*

**Постановка проблемы.** Использование GNSS в решении задач геодезического мониторинга является одним из наиболее привлекательных направлений развития инженерной геодезии. Несмотря на невысокую, в сравнении с традиционными наземными оптическими и электронными геодезическими методами точность, GNSS-технологии обладают целым рядом преимуществ, которые приобретают огромное значение при наблюдениях за крупными промышленными, транспортными и энергетическими сооружениями [1-5]. В случае использования GNSS для наблюдений за небольшими по размеру объектами, когда требуется определить не только взаимные смещения точек сооружения, но и их глобальные перемещения, GNSS могут послужить основой для таких наблюдений. В мире наблюдается тенденция к созданию систем геодезического мониторинга, в которых GNSS играют самую важную роль [6-9]. Наиболее известными являются следующие системы геодезического мониторинга: DC3 разработка компании Topcon Positioning (Япония), Leica GeoMos разработка компании Leica Geosystems (Швейцария), Trimble4DControl разработка компании Trimble (США) и независимая от конкретного производителя геодезического оборудования система GOCA (Германия). Все эти системы имеют свои отличия, связанные с особенностями оборудования производителя, однако структурно они подобны друг-другу. Главным объединяющим фактором в этих системах является использование в качестве основного источника информации о деформационном процессе систем GNSS. Общеизвестно, что научные разработки в области GNSS-технологий ведутся во всем мире, при этом остается достаточно большое количество задач и проблем, которые пока не имеют своего решения. Следовательно, и в системах геодезического мониторинга, которые базируются на применении GNSS-технологий существует целый ряд вопросов, которые ждут своего решения. Для

определения перспективы дальнейшего применения GNSS в задачах геодезического мониторинга необходимо выделить эти проблемы и наметить пути их решения.

**Обзор публикаций.** Исследуя вопрос применения GNSS в задачах геодезического мониторинга следует в первую очередь проанализировать работы, которые ежегодно докладываются на конгрессах Международной федерации геодезистов. Анализируя эти публикации за последние 10 лет, можно сделать вывод, что существует четкая тенденция к расширению возможностей применения GNSS. Выполнены экспериментальные работы по применению GNSS для наблюдений за перемещениями высотных зданий, бетонных мостов, подвесных мостов, виадуков, бетонных плотин [1-5]. В этих работах оборудование GNSS выступает в качестве самостоятельного источника информации. Очевидно, что в таком случае таким наблюдениям присущи все недостатки, связанные с традиционным применением GNSS. Другим направлением является использование GNSS в комбинации с негеодезическими датчиками, такими как акселерометры и инклинометры [6-9]. Вопрос об уровне интегрирования данных GNSS и измерений с различных датчиков, а также окончательная обработка результатов измерений представляют довольно сложную задачу и требуют дополнительных исследований.

Если же анализировать результаты применения систем геодезического мониторинга, приведенных нами в постановочной части, то здесь довольно сложно получить четкую картину, поскольку зачастую единственным источником информации являются материалы рекламного характера, распространяемые фирмами-производителями. Одним из таких примеров являются ежегодные обзоры предоставляемые фирмой Leica Geosystems в которых сообщается о результатах удачного применения систем мониторинга без конкретных результатов. Здесь следует отметить, что такие системы мониторинга являются запатентованными и получить доступ к базовой информации об организации системы и алгоритмам ее работы не представляется возможным.

В таких условиях тем более становится актуальным вопрос выявления возможных проблемных мест, связанных с применением систем геодезического мониторинга на базе GNSS. Очевидно, что такая задача может быть решена только поэтапно в результате последовательного и глубокого анализа принципов функционирования и результатов экспериментального тестирования систем геодезического мониторинга на базе GNSS.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является выполнение анализа и обобщение существующего опыта применения GNSS для решения задач

геодезического мониторинга с дальнейшим определением проблем и перспектив использования GNSS.

**Основное содержание работы.** Очевидно, что сфера применения GNSS для решения задач геодезического мониторинга связана в первую очередь с точностью, которой можно достичь благодаря применению таких систем. Этот вопрос на прямую связан с особенностями построения и функционирования систем геодезического мониторинга на базе GNSS. Следует помнить, что GNSS могут обеспечивать мгновенное и точное определение местоположения. Достижимые точностные характеристики определения координат с помощью GNSS определяются сочетанием применяемых программно-аппаратных средств и типом оборудования.

Наибольшей популярностью при геодезическом мониторинге пользуется режим кинематики в реальном времени, известный как Real-Time Kinematics (RTK). Этот режим требует применения "базового" двухчастотного GNSS приёмника, установленного в пункте с известными координатами и двухчастотного приёмника, используемого для определения положений неизвестных точек. Для передачи поправок от базового приёмника к потребителю используется система связи, обеспечивающая минимальную задержку передачи данных. Применение режима RTK одновременно позволяет исключить, либо снизить влияние различных источников погрешностей измерений [10-11].

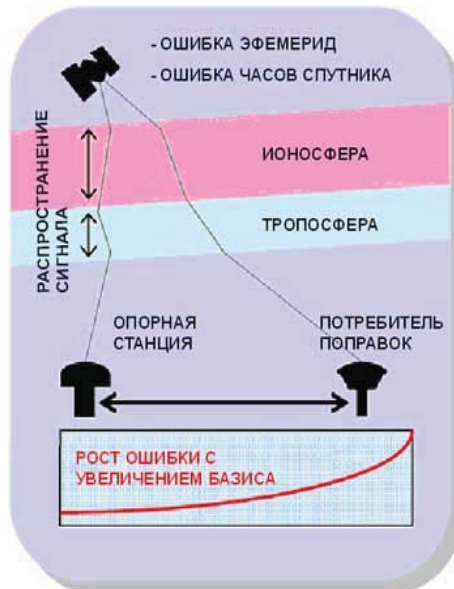


Рис. 1. RTK - устранение источников ошибок при относительном спутниковом определении

Вариант RTK с использованием поправок, формируемых сетью референционных станций [11], сокращенно именуется RTN [12]. При этом сеть, как правило, состоит из набора постоянно функционирующих референционных станций (continuously operating reference stations, CORS). По данным измерений, произведённых разнесёнными по большой площади референционными станциями сети, можно произвести разделение ошибок по источникам и, соответственно, работать на больших удалениях от базовых станций (по сравнению с традиционным методом RTK), что позволяет выполнить требования более широкого круга задач. RTN - обеспечивает точность определения на уровне миллиметров, причём этот процесс занимает всего несколько секунд. Для сетевого RTK чаще всего используется режим "виртуальной" референционной станции (Virtual Reference Station, VRS).

Общий принцип мониторинга аналогичен традиционному: периодические повторные определения положений одних и тех же пунктов. При этом чаще всего полезной информацией являются значения разностей между повторными определениями координат.

Грамотно построенные и выполненные проекты мониторинга традиционными и спутниковыми средствами, имеют много общего: независимую опорную сеть (или непрерывно функционирующие референционные станции), пункты на объекте, и средства контроля сети. При проведении мониторинга всегда задаётся некоторый пункт, который считают стабильным, и оценка положений остальных производится относительно стабильного пункта. Высотная привязка сети производится в местной системе координат, либо с применением модели геоида в системе ортометрических высот. Поскольку информацией для мониторинга являются приращения высот во времени, допустимо применение любой из систем счёта высот – необходимо лишь однообразно придерживаться одной из них.

При применении RTN возможны два варианта мониторинга: приёмник-монитор и станция-монитор.

*Приёмник-монитор (Continuously Operating Monitoring Rover – COMR):*

Процесс контроля повторяемости RTK решений во времени сам по себе является простейшим вариантом мониторинга в реальном масштабе времени и реализуется установкой постоянно функционирующего приёмника, использующего поток поправок, вырабатываемых сетью. В этом случае приёмник отличается от обычных приёмников-потребителей только тем, что его приёмная антенна размещена на долговременном основании объекта. Произведённые приёмником-монитором текущие определения координат пересылаются по каналу связи в сеть RTN с программой мониторинга.

Результаты определения координат передаются в программное обеспечение. Обычная конфигурация для периодического мониторинга с помощью RTN предусматривает установку приёмника-монитора на “стабильном” участке вблизи контролируемого сооружения, и дополнительных приёмников, осуществляющих мониторинг – непосредственно на сооружении.

*Станция-монитор (Continuous Operating Monitoring Stations – COMS):*

Недостатком некоторых проектов мониторинга являются большие интервалы между наблюдениями для детального изучения тенденций и выявления подвижек выполняют анализ измерений, с высокой частотой.

Непрерывно функционирующая станция-монитор производит измерения, а решение навигационной задачи происходит в программном обеспечении сервера сети. Решение производится в режиме реального времени, после чего осуществляется его анализ различными фильтрами.

Таков вкратце общий подход к организации системы геодезического мониторинга с применением GNSS-технологий. Анализирую принцип построения и функционирования современных систем геодезического мониторинга можно выделить следующие основные моменты, которые требуют более детального изучения:

- Анализ современного состояния и технических возможностей GNSS-технологий в задачах геодезического мониторинга инженерных сооружений (современное состояние методов и технологий решения задач геодезического мониторинга; анализ возможностей современного геодезического оборудования для решения задач геодезического мониторинга; анализ современного состояния и технических возможностей метода GNSS-технологий; анализ функций и возможностей программного обеспечения для обработки данных GNSS-наблюдений.

- Разработка теоретических основ создания высокоточных геодезических сетей методами GNSS-технологий для решения задач геодезического мониторинга (методика определения точности создания геодезической сети и предварительного расчета точности; технологические схемы создания геодезических сетей методами GNSS-технологий; математические модели трансформирования координат; моделирование геодезических сетей и выбор оптимальных схем сетей в зависимости от видов инженерных сооружений).

- Разработка методики геодезического мониторинга методами GNSS-технологий (исследование и классификация основных источников погрешностей при наблюдениях методом GNSS-технологий; анализ и совершенствование существующих моделей учета погрешностей GNSS-наблюдений; разработка методики предварительного расчета точности и интервалов наблюдений при выполнении геодезического мониторинга

методами GNSS-наблюдений; методика GNSS-наблюдений при выполнении геодезического мониторинга инженерных сооружений).

- Совершенствование методов и моделей обработки результатов GNSS-наблюдений для задач геодезического мониторинга.

- Разработка и исследование методики комбинированного использования GNSS-измерений и наземных измерений (методика предварительного расчета точности и интервалов наблюдений комбинированных наземных и GNSS-наблюдений; математическая модель совместной обработки результатов комбинированных наземных и GNSS-наблюдений при выполнении геодезического мониторинга инженерных сооружений).

Комплексное решение поставленных выше задач позволит более полно использовать GNSS-технологии для решения задач геодезического мониторинга инженерных сооружений.

**Вывод.** Спутниковые методы могут использоваться в качестве мощного инструмента мониторинга состояния инженерных сооружений, экономически выгодного и дополняющего традиционные методы. В прошлом GNSS-технологии были дорогостоящими или не обеспечивали достаточного уровня точности при решении задач в реальном времени. Современное GNSS-оборудование позволяет достичь требуемой точности, являясь доступным геодезическим инструментом. Однако остается целый ряд вопросов, ответ на которые позволит получить более качественные и надежные результаты и расширить сферу применения GNSS-технологий.

### Список литературы

1. Ali R., Cross P., Ali El-Sharkawi A. High Accuracy Real-time Dam Monitoring Using Low-Cost GPS Equipment. // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 43 – Deformation Measurement and Analysis, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005 pp. 1-20.
2. Baraka M.A., El-Shazly E.H. Monitoring Bridge Deformations During Static Loading Tests Using GPS // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 40 – Deformation Measurement and Analysis, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005 pp. 1-10.
3. Wan Aziz W.A., Zulkarnaini M.A., Shu K.K. The Deformation Study of High Building Using RTK-GPS: A First Experience in Malaysia // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 43 – Deformation Measurement and Analysis Cairo, Egypt, April 16-21, 2005 pp. 1-11.
4. Roberts G., Brown C., Ogundipe O. The Use of Kinematic GPS to Monitor the Deflections and Frequencies of a 174m Long Viaduct under Traffic Loading // Integrating Generations FIG Working Week 2008, TS 5C - Structural Monitoring, Stockholm, Sweden, 14-19 June 2008 pp. 1-12.
5. Schäfer T., Wasmeier P., Ratke K., Foppe K., Preuß G. Motion detection at Munich's Olympic Tower with a multi-sensor system operating at different sampling rates // Shaping the Change XXIII FIG Congress, TS 78 – Survey Control and Monitoring of Buildings, Munich, Germany, October 8-13, 2006 pp. 1-15.

6. Cazzaniga N.E., Pinto L., Forlani G., Abruzzi P. Monitoring Oscillations of Slender Structures with GPS and Accelerometers // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 22 – New Measurement Technology and Its Application to Archaeological and Engineering Surveys, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005 pp. 1-15.

7. Hooshmandzadeh M. Principles of Using Integrating GPS and Triaxial Accelerometers in Surveying Displacement of Large Span Bridges // Shaping the Change XXIII FIG Congress, TS 58 – Deformation Measurements of Bridges, Munich, Germany, October 8-13, 2006 pp. 1-25.

8. Brownjohn J., Rizos C., Tan G-H., Pan T-C. Real-Time Long-Term Monitoring of Static and Dynamic Displacements of an Office Tower, Combining RTK GPS and Accelerometer Data // 1<sup>st</sup> FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Session 1 - Surveying in Construction Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004, pp. 1-15.

9. Li X., Ge L., Peng G-D., Rizos C., Tamura Y., Yoshida A. Seismic Response of a Tower as Measured by an Integrated RTK-GPS System // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Session 2 - Seismic Response of Structures, Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004, pp. 1-17.

10. Height Modernization Study – A Report to Congress \_June 1998. Prepared for the National Geodetic Survey by Dewberry & Davis and Psomas & Associates. NGS/NOS/NOAA U.S. Department of Commerce

11. Vollath U., Landau H., Chen X., Doucet K., Pagels C. Network RTK versus Single Base RTK - Understanding the Error Characteristics. Trimble Terrasat GmbH, Hoehenkirchen, Germany - Institute of Navigation Conference September 2002, Portland.

12. RTN101 – Fundamentals of Real-Time Networks – Ongoing series in The American Surveyor, Part 1 Sept. 2006, - Gavin Schrock PLS [www.amerisurv.com/content/view/3812/150/](http://www.amerisurv.com/content/view/3812/150/)

### **Аннотация**

Рассмотрены перспективные направления развития систем геодезического мониторинга с использованием GNSS-технологий и определены направления, требующие дальнейших исследований.

### **Abstract**

The main prospective directions of geodetic monitoring system using GNSS-technology and identified areas for further research.