

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ВИСЯЧЕГО МОСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛОНАСС/GPS

А.И. Яценко («Инжиниринговый центр ГФК»)

В 1985 г. окончил МАИ по специальности «конструирование вычислительных бортовых систем». После окончания института служил в ВС СССР. С 1987 г. работал на авиапредприятии, с 1996 г. — в компании «Трансаэро», с 2001 г. — в области строительного бизнеса. С 2007 г. — ведущий специалист по системам мониторинга в региональном офисе Leica Geosystems. С 2010 г. по настоящее время — директор направления «Коммуникации и инфраструктура» ООО «Инжиниринговый центр ГФК».

О.В. Евстафьев («Инжиниринговый центр ГФК»)

В 1994 г. окончил факультет прикладной космонавтики МИИГАиК по специальности «космическая геодезия и навигация», в 2002 г. — факультет экономики и маркетинга ТУ (МАИ) по специальности «организация предпринимательской деятельности». С 1994 г. работал в компании ПРИН, с 2001 г. — в ЗАО «Геотехсервис-2000». С 2004 г. — ведущий специалист по спутниковому геодезическому оборудованию в региональном офисе Leica Geosystems. С 2010 г. по настоящее время — директор направления «Спутниковые системы позиционирования» ООО «Инжиниринговый центр ГФК».

Джоел Ван Крейненброк (Joël Van Cranenbroeck) — Leica Geosystems, Швейцария

В 1981 г. окончил Брюссельский технический институт (Бельгия). С 1979 г. работал в Администрации кадастра Бельгии, с 1983 г. — в департаменте геодезии Бельгийского национального географического института, с 1989 г. — в компании STAR Informatiс (Бельгия), с 1993 г. — в компании Van Hоррplуnus Instruments SA (представительство компании Leica Geosystems в Бельгии). С 2001 г. по настоящее время работает в головном офисе компании Leica Geosystems директором департамента по развитию бизнеса сетей ГНСС и систем мониторинга. Корпоративный член Международной федерации геодезистов (FIG).

Этой статьей авторы начинают серию публикаций о применении геодезических оптико-электронных приборов и оборудования ГНСС совместно с геотехническими датчиками для автоматизации мониторинга деформационных процессов на гражданских и промышленных объектах, таких как высотные здания, мостовые переходы, плотины и другие уникальные сооружения, расположенные на территории Российской Федерации и за рубежом.

Мониторинг — весьма распространенное понятие и часто встречающееся в различных научных публикациях. В широком смысле мониторинг — это процесс систематического или неп-

рерывного сбора информации о параметрах сложного объекта или явления для определения тенденций изменения этих параметров во времени и пространстве.

В геодезической практике под «деформационным мониторингом» или «мониторингом деформаций» понимаются периодические наблюдения, основной целью которых является определение смещения (деформаций) пространственного положения сооружения относительно первоначального (исходного) для оценки его устойчивости и принятия своевременных профилактических мер, обеспечивающих нормальную работу объекта. При мониторинге деформа-

ций геодезическими методами определяют смещения контролируемых точек сооружения в вертикальной, горизонтальной плоскостях или в пространстве в целом. Скорость перемещения, ускорение и частотный спектр колебаний контролируемых точек являются производными от измеренных деформаций.

В мировой практике наблюдений за деформациями сооружений находят применение автоматизированные системы геодезического мониторинга, основу которых составляют моторизированные тахеометры и геодезические приемники ГНСС. В настоящее время в России делаются только первые робкие шаги в использовании таких систем.

В данной статье приводится описание автоматизированной геодезической системы мониторинга деформаций, разработанной компанией Leica Geosystems (Швейцария) и установленной на мосту Yeongjong (Йонгджонг) в Республике Корея в 2007 г.

▼ Особенности мониторинга деформаций моста Yeongjong

Двухъярусный мост Yeongjong (рис. 1) проложен через пролив Желтого моря от острова Yeongjong-Yongyu до города Incheon (Инчхон). Это первый в мире висячий мост с воспринятым распором. Он является частью высокоскоростной магистрали, соединяющей международный аэропорт Incheon с Сеулом — столицей Республики Корея. По верхней и нижней деке моста проходит автомобильная дорога, а по нижней палубе — полотно железной дороги.

Строительство моста было начато в декабре 1993 г., а в ноябре 2000 г. он был запущен в эксплуатацию. Мост имеет длину 4420 м, его ширина составляет 35 м. Конструктивно он состоит из трех частей: подвесной (550 м), стропильной, в виде ферм (2250 м), и пролетной, коробчатого сечения (1620 м). Западная и восточная несущие опоры, на которые опирается подвесная часть моста, имеют высоту 107 м. Стропильная и пролетная части мостового перехода покоятся на 49 пилонах.

В 2007 г. перед компанией New Airport Highway Co (NAH), отвечающей за эксплуатацию высокоскоростной магистрали от Сеула до аэропорта Incheon, возникла задача обновления системы мониторинга деформаций на мостовом переходе.

Следует отметить, что установленная ранее система мониторинга деформаций состояла из 250 струнных датчиков тросов канатной системы под-



Рис. 1

Расположение моста Yeongjong, проходящего через пролив Желтого моря от острова Yeongjong-Yongyu до города Incheon (снимок с сайта <http://maps.google.ru>)

весной части моста, акселерометров, инклинометров, анемометров и датчиков на основе лазеров. Однако, в связи со значительным увеличением трафика пассажирских перевозок и запуском в эксплуатацию скоростной железной дороги, потребовалось серьезное усовершенствование системы мониторинга. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что висячие мосты с воспринятым распором редко используются для прокладки железнодорожных путей. Это связано с тем, что под действием сосредоточенной нагрузки несущая конструкция может изменять свою форму, что уменьшает жесткость моста.

Компания NAH обратилась к ряду ведущих компаний с просьбой дать предложения по модернизации системы мониторинга, уделив особое внимание контролю геометрического положения опор подвесной части моста и несущих тросов. Новая система должна была увеличить точность и достоверность измерений в режиме, близком к реальному времени, уменьшить долю ручного труда и обеспечить данными систему управления безопасностью моста.

В этом же году специалисты компании Leica Geosystems разработали и представили компа-

нии NAH проект бюджетного, и в то же время эффективного и современного решения. При его создании был учтен опыт, накопленный за время эксплуатации данного моста. Система мониторинга включала программно-аппаратный комплекс для анализа поведения мостовых переходов, основанный на измерении трех координат контролируемых точек с помощью оборудования ГНСС с периодичностью до 20 измерений в секунду (20 Гц).

Пока другие компании только формировали свои предложения, компания Leica Geosystems предложила руководству компании NAH выполнить тестовые измерения. Результаты GPS-наблюдений, основанные на технологии RTK, позволили измерить величины деформаций несущих конструкций мостового перехода с сантиметровой точностью, доказав преимущество систем мониторинга, основанных на спутниковых технологиях. После пробных испытаний оборудование GPS системы мониторинга деформаций моста, установленное ранее, было заменено на ГЛОНАСС/GPS.

Идеология применения в системе мониторинга деформаций моста Yeongjong спутниковых технологий была предложена

Джоелом Ван Крейненброком. Он разработал проект конфигурации сети, состоящей из геодезических опорных пунктов и контрольных точек, и провел работы по предварительному анализу спутниковых наблюдений, позволившие выбрать оптимальные места для установки антенн приемников ГНСС. Монтаж спутникового оборудования, различных датчиков, а также дополнительного коммуникационного и кабельного оборудования был завершен в октябре 2008 г. специалистами инжиниринговой компании VT Engineering — партнера Leica Geosystems в Республике Корея. Был также выполнен большой объем измерений на опорных пунктах, и найдены параметры перехода из системы координат WGS-84 в систему координат моста.

Установка программного обеспечения Leica GNSS Spider, подключение к оптоволоконной локальной сети компании NAH, настройка программного обеспечения для анализа, обучение персонала и поддержание системы в рабочем состоянии осуществлялось специалистами компаний Leica Geosystems и VT Engineering.

Центр мониторинга деформаций моста Yeongjong был размещен на восточной стороне моста в офисе NAH и оборудован оптоволоконными средствами связи, внутренней аппаратурой наблюдения, информационной системой принятия решения, аварийного вызова и передачи сообщений, а также системой внутреннего громкоговорящего вещания.

▼ **Особенности геодезического мониторинга деформаций на основе технологий ГЛОНАСС/GPS**

Система геодезического мониторинга деформаций на основе технологий ГЛОНАСС и GPS, состоящая из оборудования ГНСС, средств коммуникаций и связи, вычислительной аппара-



Рис. 2
Базовая станция на крыше центра мониторинга

туры, программного обеспечения для сбора и анализа данных, а также геотехнические датчики для измерения смещений, температуры, сейсмического воздействия, наклонов в горизонтальной и вертикальной плоскостях были интегрированы в систему управления безопасностью моста Yeongjong.

Оборудование ГНСС включало базовые станции, которые устанавливались вне мостового перехода, и спутниковые геодезические приемники, размещаемые на контрольных точках.

Как отмечалось ранее, на стадии разработки проекта тщательно изучались потенциальные причины возникновения

ошибок спутниковых измерений, в частности, от неудачного расположения спутникового оборудования. Основной причиной таких ошибок являются переотражения сигналов спутников ГНСС. Они возникают в результате интерференции и дифракции радиоволн от предметов, окружающих приемную спутниковую антенну, таких как поверхность земли или воды, пилоны и тросы подвесной канатной системы и др. Эти помехи индивидуальны и не могут быть устранены или скомпенсированы технологией дифференциальной обработки спутниковых сигналов. Поэтому места для установки антенн базовых станций и геодезических приемников были выбраны с учетом ослабления влияния интерференции и дифракции.

В целом, спроектированная система мониторинга состоит из двух базовых станций ГНСС, на которых установлены приемники Leica GRX1200 GG Pro и антенны AT504 GG типа choke-ring, и десяти контрольных точек с размещенными на них приемниками Leica GNSS GMX902 GG с геодезическими антеннами AX1202 GG. В ходе эксплуатации мостового перехода в 2009 г. количество приемников GMX902 GG и антенн AX1202 GG было увеличено до 12 комплектов. Следует отметить, что антенна AT504 GG обладает свойствами,



Рис. 3
Схема размещения спутниковых антенн на контрольных точках подвесной части моста



Рис. 4
Контрольные точки с антеннами приемников ГНСС:
на тропе канатной системы (слева); на опоре моста (справа)

значительно ослабляющими влияние интерференции спутникового сигнала.

Базовые станции, выполняющие роль опорных геодезических пунктов, установлены на стабильном основании. Одна базовая станция расположена на крыше центра мониторинга (рис. 2), а другая — на западной стороне мостового перехода, на крыше другого здания компании НАН. Точные координаты базовых станций и контрольных точек определялись в системе координат WGS-84.

Для измерений деформаций, определения максимального воздействия влияния кручения и других динамических характеристик подвесной части моста 12 антенн приемников ГНСС установлены в местах наибольшей подвижности мостового перехода, а именно, на 1/9, 2/9, 4/9, 5/9, 7/9, 8/9 его длины (рис. 3). Таким образом, было найдено 12 контрольных точек: 4 — на опорах и 8 — на тросах подвесной канатной системы и пролетном строении (рис. 4).

Управление оборудованием ГНСС, вычисление координат опорных и контрольных точек и архивация результатов измерений и обработки осуществлялись на специально выделенном сервере с помощью

программного обеспечения для сетей базовых станций Leica GNSS Spider с функцией позиционирования и программы Leica GNSS QC для проверки качества и целостности данных.

Функционально система геодезического мониторинга деформаций, созданная на базе программного обеспечения Leica GNSS Spider с централизованной обработкой данных в режиме RTK, значительно превосходит традиционные RTK-решения. Наличие стационарных коммуникаций дает возможность управлять оборудованием ГНСС удаленно, а результаты измерений обрабатывать в любое время.

Программное обеспечение Leica GNSS Spider позволяет управлять несколькими приемниками базовых станций, обеспечивая достаточную избыточность измерений. Надежность измерений в данном проекте была увеличена за счет установки двух базовых станций. Если связь с одной из базовых станций будет прервана (из-за поломки оборудования или обрыва коммуникаций), то в качестве резервной используется вторая базовая станция.

Leica GNSS Spider обеспечивает удобную и легкую интеграцию с любыми программными приложениями других производителей за счет обмена измеренными значениями пространственных координат через стандартный последовательный порт RS-232 или через TCP/IP-протокол обмена данными, поддерживающий формат NMEA.

В данном проекте в специально разработанное программное приложение поступали измеренные значения координат контрольных точек и, используя параметры трансформации, вычислялись их координаты в системе координат моста. Затем определялись пространственные смещения контрольных точек, а на экране монитора отображались величины деформаций (искривления, смещения, круче-

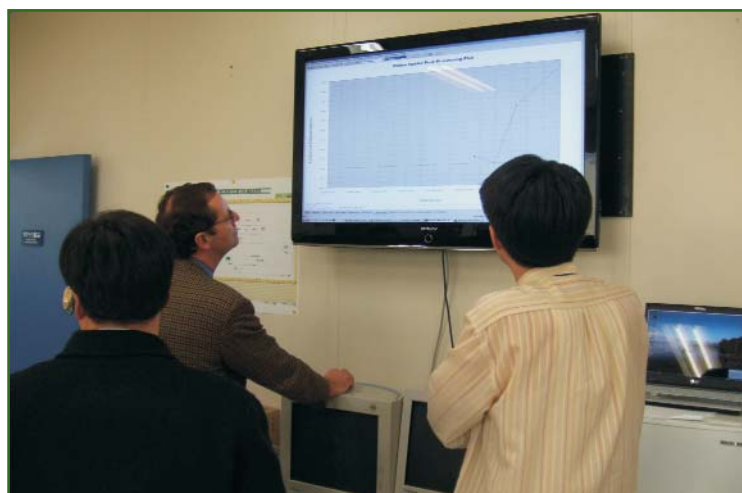


Рис. 5
Экран системы мониторинга в офисе НАН

ния и т. п.) (рис. 5). Кроме того, это приложение позволяет осуществлять хранение и анализ данных, а также выдавать и рассылать предупреждения и «тревожные» сообщения.

В настоящее время система геодезического мониторинга деформаций в режиме реального времени, созданная на основе оборудования ГЛОНАСС/GPS и RTK-технологий, обеспечивает контроль геометрических форм, линейных размеров и положения элементов мостовой конструкции Yeongjong при любых погодных условиях. Трёхмерные координаты опор и канатной системы подвесной части моста измеряются постоянно с частотой до 20 Гц, что позволяет специальному программному модулю системы мониторинга выделять резонансные частоты собственных колебаний сооружения. Эти данные полностью отражают состояние мостового перехода, могут соче-

таться со структурной моделью, учитывающей внешние воздействия, и являются одним из основных компонентов системы управления и обеспечения безопасности моста.

Согласно собранным и обработанным данным были уточнены резонансные частоты колебаний различных элементов сооружения. Исследования спектра частот колебаний подтвердили теоретические расчеты и результаты испытания модели моста на воздействие ветровой нагрузки. Отличие расчетных значений частот от частот, полученных при помощи системы мониторинга деформаций, составило всего несколько процентов.

Таким образом, система геодезического мониторинга деформаций висячего моста с использованием оборудования ГЛОНАСС/GPS обеспечивает надежный контроль поведения мостовой конструкции и своев-

ременное оповещения при возникновении внештатных ситуаций, что повышает эффективность технического обслуживания моста Yeongjong и безопасность его эксплуатации.

Автоматизированная система мониторинга деформаций моста Yeongjong является ярким примером развития и совершенствования цифровых и интеллектуальных систем мостовой инженерии.

RESUME

The article begins a series of publications on the use of geodetic opto-electronic devices and geodetic GNSS equipment in conjunction with geotechnical sensors to automate monitoring of deformations of high-rise buildings, bridges, dams and other unique buildings. An automated system for the strain geodetic monitoring, developed by the Leica Geosystems and installed on the bridge Yeongjong in the Republic of Korea is described.

Российская академия государственной службы при Президенте РФ Центр «Земля и недвижимость» Международной школы управления «Интенсив»

Подготовка и проведение конференций, семинаров и курсов повышения квалификации по темам:

- государственная регистрация прав и кадастровый учёт объектов недвижимости;
- порядок распоряжения земельными участками и их использования;
- землеустроительные работы при инвентаризации и межевании земель;
- оценка земельных участков, недвижимости и бизнеса;
- использование и оборот земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда;
- новое в управлении государственным и муниципальным имуществом.

Приглашаем принять участие в семинарах:

- 1 - 3 февраля, 29 - 31 марта 2011 г. «Управление охраной окружающей среды. Нормативно-правовое обеспечение и информационная поддержка».
- 15 - 17 февраля, 17 - 19 мая 2011 г. «Земельные участки: оформление, распоряжение и использование (новое в законодательстве РФ, опыт и практика)».
- 26 - 28 апреля, 7 - 9 июня 2011 г. «Кадастровые и землеустроительные работы. Инвентаризация и межевание земель».
- 19 - 21 апреля 2011 г. «Коммерческая недвижимость: выбор земельного участка, обоснование, финансирование, проектирование и управление».

Участникам семинаров выдаётся удостоверение (сертификат) установленного образца о повышении квалификации.

Место проведения семинаров: Российская академия государственной службы при Президенте РФ, Москва, проспект Вернадского, 84.

Подробная информация: тел./ф: (495) 436-05-21, 436-90-27, 436-03-25

E-mail: sokolov@ur.rags.ru, shtykin@ur.rags.ru

Интернет: www.intensiv77.ru, www.rags.ru, www.ipkr.ru