

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ КОМПАНИИ JAVAD GNSS

В.Я. Иодис (JAVAD GNSS)

В 1970 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». С 2005 г. работает в компании JAVAD GNSS, в настоящее время — заведующий геодезической группой. Кандидат технических наук.

Проблема мониторинга деформаций сложных инженерных сооружений в современном мире становится все более актуальной. Вовремя заметить смещение гидротехнического сооружения или опоры моста означает предотвратить катастрофу. Все чаще к решению задач мониторинга привлекаются средства измерений, основой которых являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). В настоящее время их точность достигла такого уровня, что можно определять не только пространственное положение объекта, но и отслеживать его изменение во времени. По сравнению с оптическими средствами измерений технологии ГНСС имеют ряд преимуществ, таких как всепогодность, относительная простота автоматизации процесса измерения, сравнительно небольшая себестоимость и возможность высокоточной привязки к глобальным и локальным опорным геодезическим сетям.

Компанией JAVAD GNSS разработана система мониторинга деформаций (СМД), компонентами которой являются:

— двухчастотные **приемники ГЛОНАСС/GPS** с функциями уменьшения влияния многолучевости и подавления радиопомех;

— программа **NetHub** для настройки работы сети из приемников ГНСС и управления сбором данных;

— **средства коммуникации (связи)** — WiFi, UHF и др.;

— программа **Giodis** для высокоточной обработки измерений, выполненных приемниками ГНСС, уравнивания векторов, привязки пунктов мониторинга на объекте к геоцентрической и локальной системам координат, а также контроля качества ГНСС-измерений на этих пунктах;

— программа **«Анализатор деформаций»** для строгого апостериорного статистического и геометрического анализа смещений контролируемых пунктов, а также проверки стабильности положения референционных (опорных) пунктов на объекте мониторинга;

— программа **«Архивариус»** для управления процессом мониторинга в автоматическом режиме через web-интерфейс. В базе данных этой программы сохраняются настройки проектов, данные ГНСС-измерений,

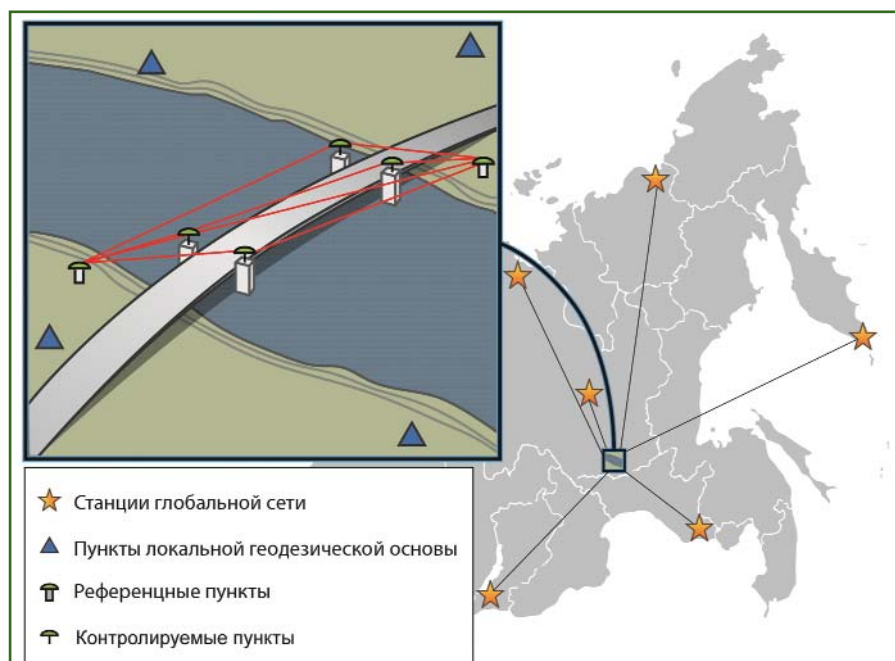


Рис. 1

Сети станций ГНСС-наблюдений, используемые в системе мониторинга деформаций



Рис. 2
Монтаж оборудования WiFi на объекте мониторинга сотрудниками компании JAVAD GNSS

каталоги координат опорных и контролируемых пунктов на объекте мониторинга и их ковариационные матрицы на эпохи наблюдений. Она может одновременно управлять сразу несколькими проектами мониторинга деформаций;

— программа **«Монитор»** для обработки результатов мониторинга в автоматическом режиме, с выдачей координат и графиков смещений контролируемых пунктов с заданной периодичностью.

Отличительной особенностью СМД является ее способность выполнять мониторинг как в режиме ГЛОНАСС + GPS, так и с помощью одной из спутниковых систем.

СМД может использовать данные сетей станций ГНСС-наблюдений нескольких уровней (рис. 1):

— глобальной сети станций IGS и фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) РФ;

— сети пунктов локальной геодезической основы;

— сети пунктов на объекте мониторинга.

В компании JAVAD GNSS накоплен практический опыт ор-

ганизации и сопровождения проектов по мониторингу деформаций. Каждый из этих проектов является уникальным, поскольку в зависимости от требований заказчика, касающихся периодичности и скорости передачи измерительной информации, в проектах используются разные средства измерений и дистанционного управления — через WiFi, УВЧ или проводную связь (рис. 2).

▼ Инициализация СМД

Этап инициализации системы мониторинга деформаций начинается после размещения аппаратуры и средств передачи данных с приемников ГНСС в вычислительный центр. Затем выполняется сбор ГНСС-измерений и их постобработка с помощью программы Giodis с целью привязки пунктов на объекте мониторинга к геоцентрической и локальной системам координат. Оценивается также наличие помех и их влияние на качество измерений.

На этапе инициализации системы также проводится анализ стабильности положения опорных пунктов на объекте мониторинга, если их планируется использовать при опреде-

лении деформаций. Для этого, после накопления данных наблюдений за длительный интервал времени (например, месяц) сеть пунктов на объекте мониторинга обрабатывается как свободная, т. е. не имеющая априори твердых (неподвижных) пунктов. Результаты обработки — координаты и ковариационная матрица пунктов сети на эпохи наблюдений — экспортируются в программу «Анализатор деформаций» для оценки возможных смещений пунктов сети на объекте мониторинга.

Если анализ подтвердил стабильность опорных пунктов, то их координаты фиксируются, и с помощью программ «Архивариус» и «Монитор» запускается процесс обработки данных и мониторинга деформаций в штатном автоматическом режиме.

В целом, при задании требований к СМД любого объекта, необходимо находить баланс между точностью получения координат и оперативностью их обновления. Чем большая точность требуется, тем продолжительнее должны быть интервалы измерений, результаты которых накапливаются и обрабатываются для каждой эпохи, соответствующей конкретному циклу мониторинга деформаций на объекте.

▼ Обработка данных в программе Giodis

В программе для решения задач мониторинга используются два режима постобработки ГНСС-измерений.

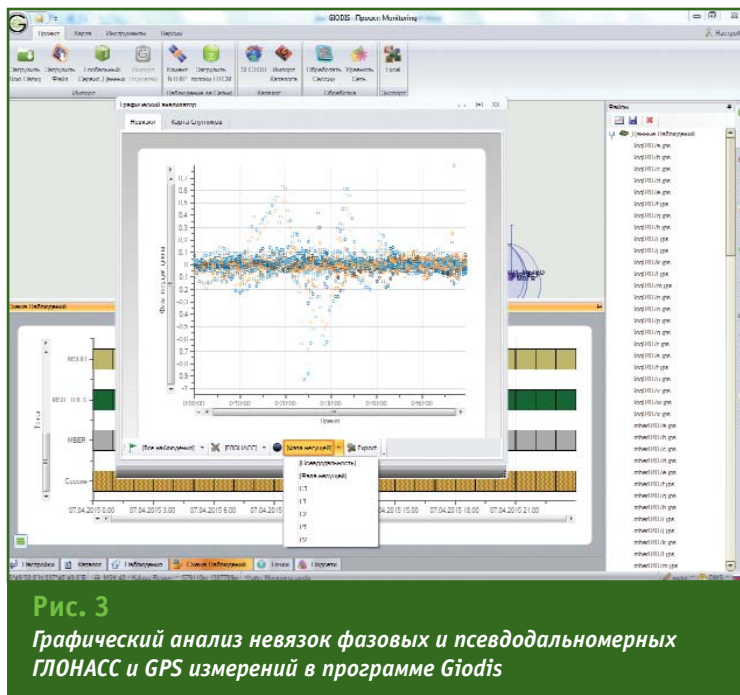
Первый режим (Undifferenced processing), который используется в ряде современных высокоточных программ ГНСС-обработки, основан на обработке безразностных (непосредственных), псевдодальномерных и фазовых ГНСС-наблюдений. Он позволяет вычислять базовые линии (векторы)

длиной до двух тысяч километров с погрешностью в несколько сантиметров. Благодаря этому, в разработанной СМД можно привязывать пункты на объектах мониторинга к глобальной геоцентрической системе координат, реализуемой станциями международной сети IGS, а также пунктами ФАГС РФ.

Как известно, сеть пунктов ФАГС на территории России достаточно разрежена. Возможность вычислять базовые линии длиной более тысячи километров очень важна, поскольку позволяет привязывать даже удаленные друг от друга пункты на объекте мониторинга к единой геоцентрической системе отсчета, например, WGS-84 (ITRF2008). Также может использоваться геоцентрическая система ГСК-2011, принятая в РФ.

Второй режим (Double difference processing) основан на традиционном методе обработки вторых разностей ГНСС-наблюдений. В этом режиме можно вычислить векторы длиной до нескольких десятков километров с погрешностью в несколько миллиметров. Поэтому он является основным для решения задач мониторинга деформаций.

Программа Giodis позволяет осуществлять привязку пунктов на объекте мониторинга к местным системам координат. Наряду с геоцентрической системой координат, каждый проект может быть реализован и в местной системе координат, связанной с конкретным объектом мониторинга. Для этого в программе разработаны средства для совместного уравнивания спутниковых и наземных геодезических сетей, а также локализации — вычисления параметров трансформации между двумя системами координат для набора



одноименных точек, положение которых задано в обеих системах координат. Локализация может использоваться для вычисления параметров преобразования между геоцентрической системой координат, в которой выполняются ГНСС измерения на объекте мониторинга, и системой координат объекта, в которой заданы его главные оси. Это позволяет оценивать смещения в системе координат объекта мониторинга (например, вдоль и поперек моста).

Программа Giodis позволяет выполнять графический анализ качества ГНСС-наблюдений на пунктах объекта мониторинга. Все ошибки, которые не удается обнаружить и исключить в процессе ГНСС-измерений или при их обработке, отражаются на точности измерения деформаций. В программе предусмотрено графическое отображение остаточных невязок измеренных фаз и псевдодальномерностей. Анализ этих невязок и характера их изменений помогает не только оценить общий уровень ошибок псевдодальномерных и фазовых измерений,

но и в ряде случаев выявить причины, которые их вызывают, например, многолучевость (рис. 3).

▼ «Анализатор деформаций»

Эта программа разработана для строгого апостериорного анализа деформаций, а также проверки стабильности референционных пунктов на объекте мониторинга. Выполняются два типа анализа: геометрический (превысило ли смещение заданный порог) и статистический (находится ли смещение в пределах случайного шума измерений). Для этого, в программу импортируются результаты обработки, полученные в программах Giodis и «Монитор».

Кроме того, могут анализироваться результаты, полученные в других программах постобработки (например, Bernese), при условии, что они конвертированы в формат SINEX (Software Independent EXchange format). На рис. 4 приведен график смещений положения пунктов глобальной сети IGS в течение года на территории России в восточ-

ном направлении (значимых смещений в направлениях на север и по высоте не выявлено). Общий тренд в смещении на восток соответствует характеру и скорости движения Евразийской тектонической плиты (SINEX-файлы были предоставлены ФГУП «ЦНИИГАиК», в настоящее время — ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных»).

В программе предусмотрен анализ для двух вариантов мониторинга деформаций:

— с использованием референчных пунктов. Это наиболее распространенный и простой сценарий, однако он требует

регулярного контроля стабильности положения референчных пунктов;

— при отсутствии априори стабильных пунктов. Это наиболее сложный случай, который используется, в частности, для проверки стабильности референчных пунктов на этапе инициализации СМД и, периодически, в процессе ее работы в штатном режиме.

В основе статистического анализа деформаций лежит тест на конгруэнтность — геометрическую эквивалентность векторных сетей пунктов на объекте, вычисляемых в разные циклы мониторинга. Если тест не пройден, это означает, что один или несколько пунктов сети сместились.

При анализе данных мониторинга без использования опорных пунктов, сеть ГНСС векторов для каждого цикла на объекте мониторинга обрабатывается как свободная и поэтому вычисляется, по сути, в собственной системе координат. Отсюда возникает необходимость дополнять анализ деформаций еще и определением параметров трансформации между координатами пунктов, полученными в разных циклах. При помощи этих параметров все данные приводятся к единой системе отсчета, например, к системе координат начального цикла мониторинга.

На рис. 5 представлены результаты обработки данных мониторинга на гидростанции, который проводился с помощью аппаратуры компании JAVAD GNSS в течение месяца. Согласованность изменений координат всех четырех пунктов на объекте мониторинга показывает, что точность мониторинга деформаций с помощью ГНСС оборудования составляет 1–2 мм в плане и 2–4 мм по высоте. На фоне такой точности было выявлено смещение, имевшее место в последние трое суток наблюдений. Наиболее вероятной его причиной является перемещение антенны на референчном (пятом) пункте.

В программе «Анализатор деформаций» можно выбрать начальный и конечный циклы мониторинга деформаций, исключить из анализа отдельные пункты и некачественные эпохи ГНСС-измерений (координаты для которых получены с большими ошибками). Показывается карта сети пунктов мониторинга и различные виды графиков смещений. По результатам анализа смещений составляется отчет в формате программы Excel.

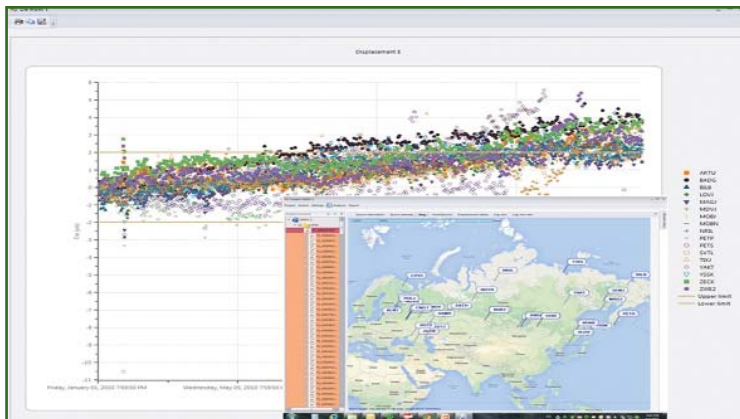


Рис. 4

Анализ смещений пунктов глобальной сети IGS на территории России. Данные за 2010 г.



Рис. 5

Изменения координат четырех пунктов на объекте мониторинга в направлениях на восток, на север и по высоте

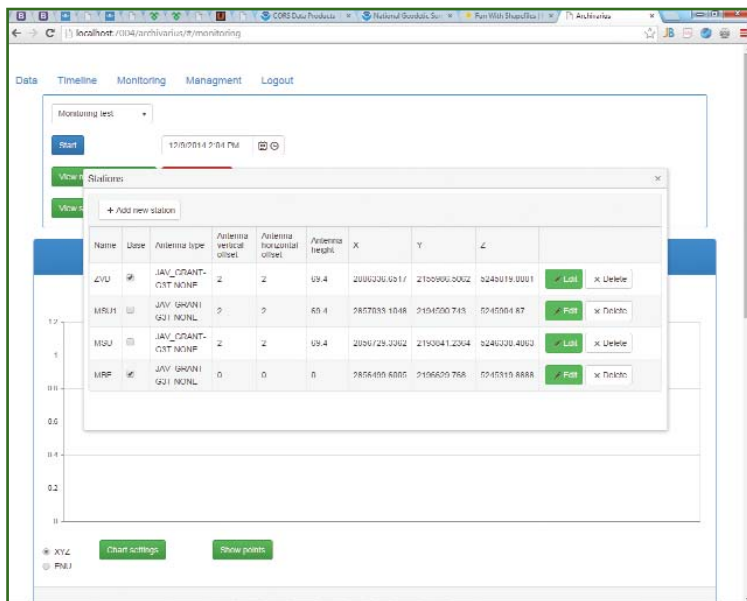


Рис. 6
Ввод параметров антенн и координат пунктов в программе «Монитор»

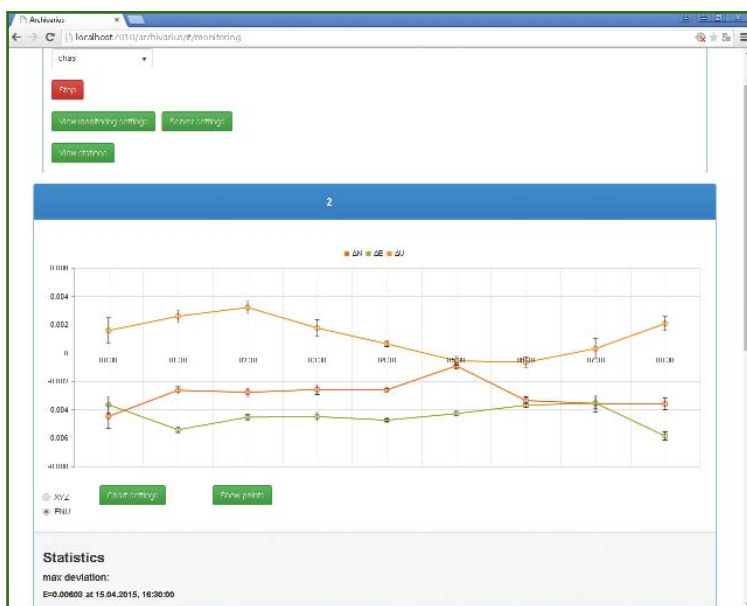


Рис. 7
Графики мониторинга деформаций, выводимые в автоматическом режиме в программе «Монитор»

▼ «Монитор»

В программе «Монитор» осуществляется мониторинг деформаций с использованием референсных пунктов и применяется метод постобработки данных ГНСС в автоматическом режиме. В ней может одновременно поддерживаться несколько проектов мониторинга деформаций.

Для каждого проекта в программе вводится исходная информация: типы антенн, координаты референсных пунктов и начальные координаты контролируемых пунктов (рис. 6). Координаты референсных пунктов могут быть предварительно вычислены с высокой точностью в программе Giodis по результатам обработки ГНСС-

измерений, накопленных за продолжительный интервал времени.

Задаются также доверительный уровень, дискретность ГНСС-измерений и допустимые пределы изменения координат пунктов мониторинга, стандартная длина обрабатываемых интервалов наблюдений и другие настройки, необходимые для начала обработки в автоматическом режиме.

После ввода настроек выполняется автоматическая загрузка файлов ГНСС-данных, измеряемых на референсных и контролируемых пунктах, и их постобработка в программе Giodis с использованием вторых разностей фаз и псевдодальностей.

В результате обработки вычисляются координаты контролируемых пунктов и оценка их точности для каждого цикла мониторинга, которые выводятся в виде графиков, обновляемых с заданной периодичностью (рис. 7).

Эти и другие результаты сохраняются в базе данных программы «Архивариус», которая управляет работой программы «Монитор». При превышении допустимых значений деформаций могут выдаваться тревожные сообщения.

Предварительные результаты мониторинга деформаций в автоматическом режиме показывают, что использование часовых стандартных интервалов ГНСС-наблюдений позволяет выявлять смещение контролируемого пункта в пределах нескольких миллиметров. Условиями для обеспечения такой точности должны быть отсутствие многолучевости и помех в полосе частот спутниковых измерений, выполняемых на референсных и контролируемых пунктах, а также правильное размещение этих пунктов на объекте.