

ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР: АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ GPS/УРАВНИВАНИЯ

S. Erol^{a,*}, B. Erol^a, T. Ayan^a

^a - İTÜ, строительный факультет, геодезии отдела, 34469 Маслак Стамбул, Турция - (Эрол, Битер, Аян)^a@itu.edu.tr

Комиссия VII, WG VII/5

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геодезия, инженерия, структура, стихийные бедствия, мониторинг, анализ

РЕЗЮМЕ:

Очень важно быть уверенным в том, что прогресс технической структуры, который служит человеческой жизни в современном мире, демонстрирует безопасность. Так, многие мониторинговые исследования деформаций для определения и анализа различных видов инженерных сооружений, таких как высотные здания, плотины, мосты, путепроводы, промышленные комплексы и т.д., уже реализованы. В ходе этих исследований, использовались методы измерений и систем, которые могут быть геодезическими или негеодезическими, определяющиеся с учетом типа, структуры контролируемых деформаций, экологических условий и ожидаемой точности измерений. Связь используемых методов мониторинга измерений деформации оборудования разнообразны. Также, в зависимости от профессий людей, которые применяют методы мониторинга деформации, эти методы и приборы традиционно были разделены на две группы: *геодезические изыскания*, которые включают в себя обычные (наземные точные измерения нивелирования, измерение углов и расстояний и т.д.), *фотограмметрические* (наземные, антенна и цифровая фотограмметрия), *спутниковые* (Глобальная система позиционирования-GPS, InSAR), а также некоторые специальные методы; *геотехнические/структурные измерения* (с использованием лазеров, наклономеров, деформографов, экстензометров, совместных метров, отвесной линии, микрометров и т.д.). В этой статье некоторые из этих методов измерения деформаций, которые считались более важными и которые в основном использовались в геодезии специалистами, будут пересмотрены. Так же, будет уделяться особое внимание важности и необходимости проведения периодических измерений деформаций инженерных сооружений.

Кроме того, пример, который посвящен реализации анализа деформации большого виадука с использованием GPS и точных измерений уравнивания, будет обсуждаться здесь. Как известно, инженерные сооружения (например, виадук) подвержены деформации в связи с такими факторами, как изменение уровня грунтовых вод, приливных явлений, тектонический явлений и т.д. В этом исследовании, разработка, выполнение и анализ деформаций дороги виадука будут упомянуты и подробно разъяснены, как пример реализации двух геодезических методов в деформации мониторинга крупных инженерных сооружений. В ходе исследования, контрольные точки сети были расположены с методикой измерений GPS и разницы высот поддерживались точными уравненными измерениями. Как результат измерения, X, Y, Z декартовой системы координат и разницы высот были определены из измерений GPS, как и точные уравненные измерения. Позже, анализ деформации с использованием разницы высот в зависимости от предоставленных данных GPS и данных из точного уравнивания выполнялись отдельно. Тогда, 3D анализ деформаций с использованием GPS данных измерений, был так же выполнен. Полученные результаты будут приведены ниже в статье.

1. ВВЕДЕНИЕ

Инженерные сооружения (плотины, мосты, путепроводы, высотные здания и т.д.), подвергаются деформации вследствие таких факторов, как изменение уровня грунтовых вод, приливные явления, тектонические явления и др. Мониторинг и анализ деформаций этих структур является специальной отраслью науки в геодезии. Есть несколько методов для измерения деформаций, как было сказано ранее. Они могут быть сгруппированы в следующих двух: геодезические и негеодезические методы.

Каждый из приведенных методов измерений имеет свои преимущества и недостатки. Геодезические методы, через сеть пунктов между собой, угол и/или измеренные расстояния, как правило, предоставляют достаточную избыточность наблюдений для статистической оценки их качества и для обнаружения ошибок. Они дают глобальную информацию о поведении структуры, которая деформируется, в то время как негеодезические методы дают локализованную и масштабированную информацию о нарушении без всякой

проверки, если сравнивать с другими независимыми измерениями. С другой стороны, инструменты, которые используются в негеодезических измерениях, легче адаптировать для автоматического и непрерывного контроля, чем обычные инструменты геодезических измерений. Геодезические методы традиционно используются в основном для определения абсолютного перемещения выбранной точки на поверхности объекта относительно некоторых исходных точек, которые считаются статическими. Негеодезические методы в основном используются для измерения относительной деформации в пределах деформируемого объекта и его окрестностях (Аноним, 2002).

Основной мотивацией этого исследования являются геодезические методы в мониторинге деформаций инженерных сооружений и анализа. При определении деформаций в соответствии с геодезическими методами используют наземные методы измерения или космические методы позиционирования и/или комбинацию обоих этих методов. До начала 1980-х годов, деформации в инженерных сооружениях можно было определить только с помощью обычных методов измерения. После этого, с началом использования GPS методики измерений в геодезических и изыскательских приложениях, появились точные спутниковые измерения (Эрол, 1999).

GPS технология имеет преимущества высокой точности и одновременного 3-D позиционирования, однако существуют недостатки с вертикальным положением при использовании этой техники. Так, высота компоненты менее точно определяет GPS координаты, преимущественно за счет существующих геометрических проблем и атмосферных ошибок (Фезерстоун и др., 1998;.. Челик и др., 2001).

Поэтому, используя GPS методику, в измерении деформации с точностью до миллиметра уровня, требуются специальные меры предосторожности, которые повышают точность измерений в наблюдаемых GPS посредством ликвидации или сокращения некоторых источников ошибок, таких как использование принудительного центрирования оборудования, применяя специальные методы измерения, как быстрый статический метод для короткой базы или проектирование специального оборудования для точного считывания высоты антенны (Эрол и Аян, 2003).

В некоторых случаях даже этих специальных мер предосторожности может оказаться недостаточно, чтобы достичь необходимого уровня точности; в это время для поддержки GPS измерений с другой измерительной техникой было бы очень полезно, как улучшающее решение.

В этом исследовании реализованы 1D и 3D анализ деформации большого виадука с использованием GPS и точных уравниваемых измерений. Контрольные точки сети были расположены с измерительной техникой GPS и разностью высот, поддерживая точные измерения уравнивания. Как результат измерения кампаний, X, Y, Z декартовой координаты и разности высот, были определены из измерений GPS и точных уравниваемых измерений. Позже, анализ деформации с использованием разности высот, в зависимости от предоставленных GPS данных и данных из точного уравнивания, проводились отдельно. Тогда, 3D анализ деформаций с использованием GPS данных был так же проведен. Объяснение от используемых методов анализа и найденных результатов будет дано в дополнении к общему обзору методов анализа деформаций в следующих разделах.

2. ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Как отмечалось в вводной части, методы измерения были разделены в основном на две разные группы методов: геодезические и негеодезические. Эти основные методы также могут быть разделены субтехнологии. В дальнейшем будет найдено краткое описание используемых методов измерения деформаций.

GPS; система глобального позиционирования дает преимущества по сравнению с обычными наземными методами. Прямая видимость между станциями не является строгой необходимостью, что позволяет большую гибкость в выборе местоположения станций, чем для наземных геодезических изысканий. Измерения можно проводить в течение ночи или дня, при различных погодных условиях, что делает GPS измерения экономическими, особенно, когда несколько приемников могут быть развернуты на структуру в ходе обследования. С недавних пор разработаны быстрые статические методы позиционирования, по которым время для измерений на каждой станции сокращено до нескольких минут (Аноним, 2002).

Фотограмметрия; Если объект фотографируется из двух или более точек съемки с известным относительным положением (известными координатами) с известной относительной ориентацией камер(ы), относительное положение какой-либо определенной точки объекта может быть найдена из геометрических отношений между пересекающимися оптическими лучами, которые соединяют изображения и объекты пунктов. Аэрофотограмметрия широко использовалась при определении движений земли в исследованиях оседания грунта в горных районах, а также наземная фотограмметрия была использована в мониторинге инженерных сооружений. Основные преимущества использования фотограмметрии: сокращение времени

работы на местах; одновременные трехмерные координаты, и, в принципе контроль неограниченного числа (Аноним, 2002).

Наклон и измерение склона; измерения наклона, как правило, понимается как определение отклонений от горизонтальной плоскости, а склон интерпретируется как отклонение от вертикали. Тот же инструмент, который измеряет наклон в точке можно назвать либо наклономером или склономер в зависимости от интерпретации результатов (Аноним, 2002).

Некоторые из новых методов мониторинга деформации могут быть перечислены следующим образом.

Инсар; Фасады могут быть получены из Synthetic Aperture Radar (SAR) изображений методами интерферометрии. Это предполагает использование двух антенн, перемещаемых либо вертикально, либо горизонтально, которые установлены на платформе этого же спутника или самолета. Одна из антенн передает сигнал, и после получает его, в результате чего создаются два изображения. Наиболее точная форма интерферометрических измерений - дифференциальная интерферометрия (InSAR), которая включает определение разностей высот между двумя периодами измерений местности. В этом случае, изменения фазы сигнала радара определяется между двумя периодами, которые показывают местность деформации поверхности, которая может возникнуть между двумя случаями, когда изображения были записаны. Было утверждено, что такие малые разности высот, как один сантиметр можно обнаружить с помощью этого метода. Такой метод, следовательно, имеет экономически эффективный потенциал, почти непрерывный, удаленный метод измерения оседания местности из-за добычи полезных ископаемых и наземного движения из-за оседания грунта, землетрясений или вулканической активности, и т.д. (<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/work/insar.htm>, по состоянию на май 2004 года).

Псевдолиты; Хорошо известно, что GPS-система мониторинга деформаций, точности, доступности, надежности и целостности позиционирования решений в значительной степени зависит от количества и геометрического распределения отслеживаемых спутников. Тем не менее, в некоторых ситуациях, например, в городских каньонах, мониторинг в долинах и в глубоких карьерах, количества видимых спутников может быть недостаточно, чтобы достоверно определить точные координаты. Кроме того, нельзя использовать GPS для съемки внутри помещений и в случае с ограничением геометрии GPS спутников; точность высоты компоненты, как правило, в 2 или 3 раза хуже, чем точность горизонтальной компоненты. Эти факторы затрудняют решение применение GPS мониторинга деформаций в областях, где число видимых спутников ограничено или спутниковая геометрия плохая, особенно там, где необходима в режиме реального времени высокая точность мониторинга высоты компоненты, к примеру, в таких ситуациях, как оседание грунта или деформация контроля за искусственными сооружениями. Таким образом, для того, чтобы улучшить производительность только GPS-системы мониторинга деформации, интеграции GPS с другими технологиями должны быть исследованы.

Псевдолиты (псевдо-спутники), которые являются наземными передатчиками GPS-подобных сигналов, могут значительно повысить спутниковую геометрию и даже в некоторых случаях изменить созвездия GPS спутников (например, в случае мониторинга деформации в помещении).

Геометрия спутников может быть улучшена путем тщательного выбора места псевдолита(ов). В случае GPS, измерения с малыми углами возвышения обычно отвергаются во избежание серьезной многоточечной, тропосферной и ионосферной задержки смещения. Тем не менее, это не является необходимым в случае псевдолитов. Качество измерений с менее, чем 0.5° угла возвышения (передачи от псевдолита на GPS приемник) по-прежнему очень высоко. Таким образом, высокое качество измерения псевдолитом с малыми углами возвышения, когда он включен в обработку данных, можно ожидать значительного повышения производительности, разрешения неоднозначности и точность решения, особенно по отношению к высоте компоненты. Доступность также увеличилась, потому что псевдолит обеспечивает дополнительный круг источников для увеличения GPS созвездия (Dai и соавт., 2001).

Лазерное сканирование; Существующие методы (например, геодезические, GPS), которые используются для мониторинга больших структур, таких как здания, путепроводов, плотин и мостов, в то время как точность полученных данных при съемке значительно ухудшена из-за низкой плотности точек. Ограничения по времени сбора данных, контролируемых только несколько выборок, располагались в стратегических точках структуры. Наземное лазерное сканирование - это новая технология, которая позволяет быстро и дистанционно измерить миллионы точек, тем самым обеспечивая беспрецедентный объем пространственной информации. Это, в свою очередь, позволяет более точно прогнозировать силы, действующие на структуры. В основе новой технологии существует несколько проблем, касающихся калибровки приборов, анализа чувствительности, обработки данных и фильтрации данных и требуют исследования (<http://www.cage.curtin.edu.au/~geogrp/projlaser.html>, май 2004 г.).

Для любого конкретного применения измерения деформации, наиболее подходящий метод (или комбинации методов), которые будут использоваться, определяются по связи с типом структуры, необходимой точностью, а также экономическими аспектами.

3. СЕТИ И ДАННЫХ

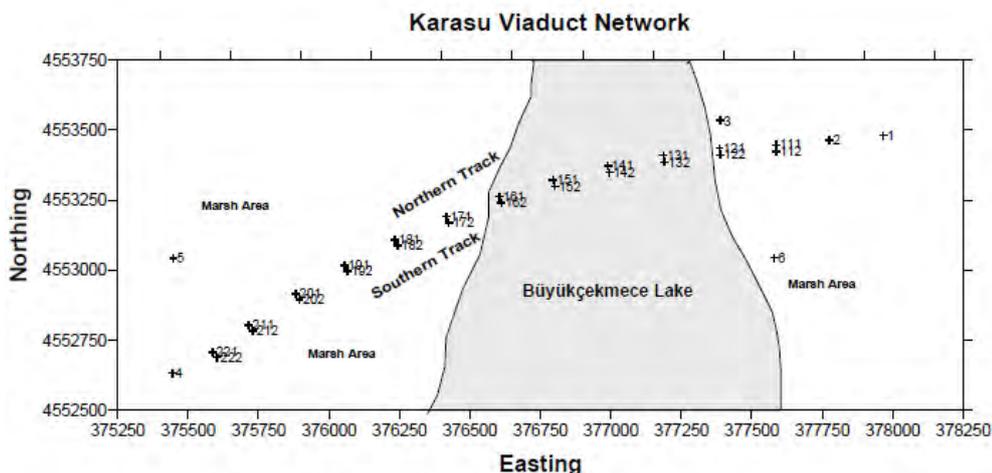
В этом исследовании деформации виадукта Карасу были исследованы с помощью GPS и точных уравниваемых данных. Виадукт Карасу составляет 2160 м в длину. Как самый длинный виадукт Турции, он находится в западной части Стамбула в одной части из европейской автомагистрали «Транзит». Первые 1000 метров этого виадукта пересекают озеро «Büyükçekmece» и эстакады структуры были построены в это озеро (см. Рисунок 1).

Виадукт состоит из двух отдельных трасс (северная и южная), и он построен на 110 причалах (каждая трасса имеет 55 причалов). Существует 40-метровая ширина между двумя причалами, а также одна точка деформации создана в каждом 5 последовательных причалах.

Для измерения деформации Карасу привлечено четыре кампании. Первая кампания была проведена в июне 1996 года, вторая - в марте 1997 года, третья - в октябре 1997 года и последняя - в апреле 1998 года. Эти четыре кампании включают GPS измерения и точные уравниваемые измерения. С целью изучения деформации этой структуры, перед проведением измерений кампаний, были созданы хорошо разработанные местные геодезические сети, и в соответствии с разработанным планом сессии были проведены измерения с помощью GPS техники. Кроме того, точный метод измерения выравнивания был применен между пунктами сети.

Во время измерений GPS, были использованы двухчастотные приемники Trimble 4000 SSI и Leica System 300. Уравнивание измерений проводилось с использованием точного уровня «Koni 007».

Сеть состоит из 6 опорных точек, расположенных вокруг виадукта и 24 пунктов деформации, установленных на здании виадукта, и они же устанавливают особенности трассы, где ожидаются наиболее стабильные места в структуре (см. Рисунок 1).



$$d = H_2 - H_1 \quad S_0^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2}{f_1 + f_2} \quad f_0 = f_1 + f_2$$

$$T_H = \frac{d^T Q_{dd}^{-1} d}{r S_0^2} \quad Q_{dd} = Q_{H_1 H_1} + Q_{H_2 H_2} \quad r = f_G - f_0$$

Если $T_H > F_{r, f_0, 1-\alpha}$, то высота точки существенно изменилась. В противном случае, разница высот d не является смещением и это вызвано случайными ошибками измерений (Эрол и Аян, 2003).

Традиционный метод анализа деформаций применяется ко всем трем наборам данных (уравнивание полученных разностей высот, GPS полученных разностей высот и их комбинация), как это будет расписано ниже. Результаты, которые получаются после оценки этих трех наборов данных, приведены на графиках (см. Рисунок 2, Рисунок 3 и Рисунок 4).

Стохастическая информация включает в себя количество настроек прибора при оценке уравнивания высоты, полученных из различия в алгоритме анализа деформации.

С другой стороны, в алгоритме второй оценки, эллипсоидальные различия высоты (dh_{ij}), полученные из решений базовой линии GPS, используются в качестве измерений. Кроме того, измерения стохастической информации происходит от решений базовой линии GPS.

В третьей оценке, разница высот, полученная от двух измерительных техник, которые используются вместе и анализа деформаций, применяется в соответствии с результатами оценки комбинированных групп данных. Очень важный момент, который должен быть рассмотрен на первом этапе такой оценки, это то, что оба измерения группы, полученные из обоих методов, не имеют такую же точность. Поэтому, стохастическая информация между этими группами измерений (относительно друг друга) должна быть выведена. В данном исследовании, для вычисления веса обоих групп измерений, была использована техника Оценки Компоненты Дисперсии Гельмерта (HVCE).

Здесь даются только те графики, которые показывает разницу высот северных точек трассы. Из-за того, что деформации в обоих направлениях пунктов имеют одинаковый характер, они были достаточно обнаружены, чтобы дать результат по принадлежности только одного трека из виадукта.

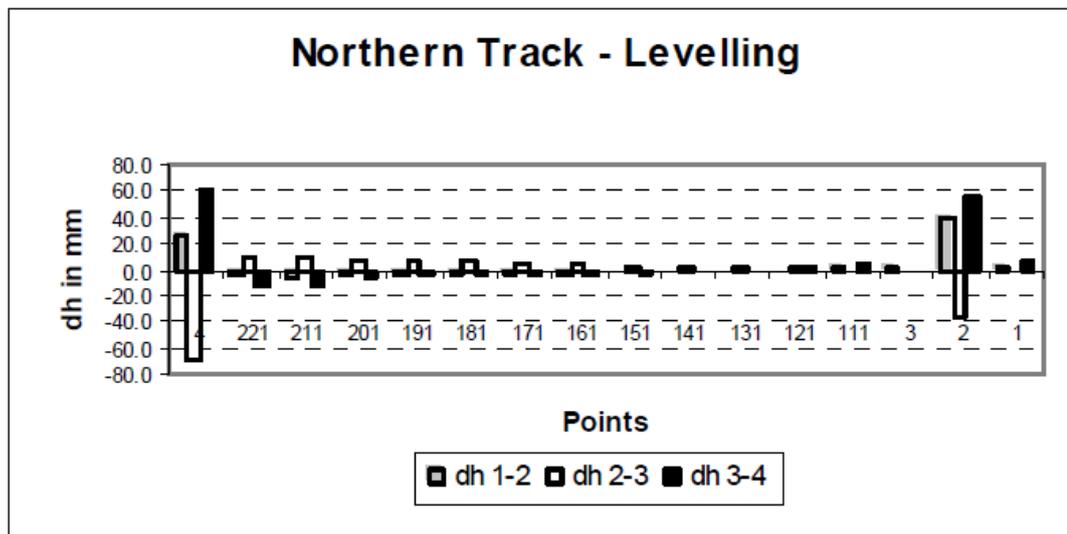


Рисунок 2: Уравнивание разницы высот между последовательными периодами для каждой точки в северной трассе

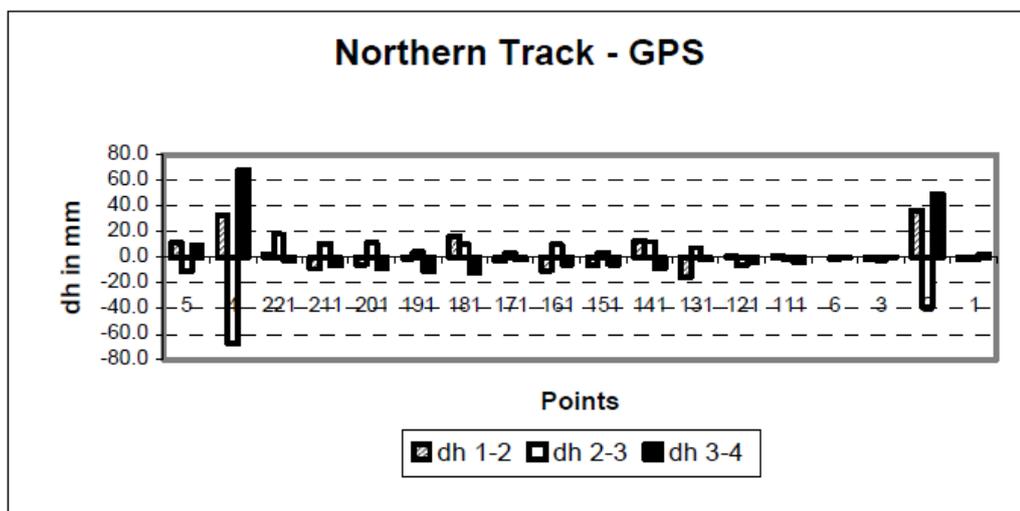


Рисунок 3: Полученные GPS разницы высот между последовательными периодами для каждой точки в северной трассе

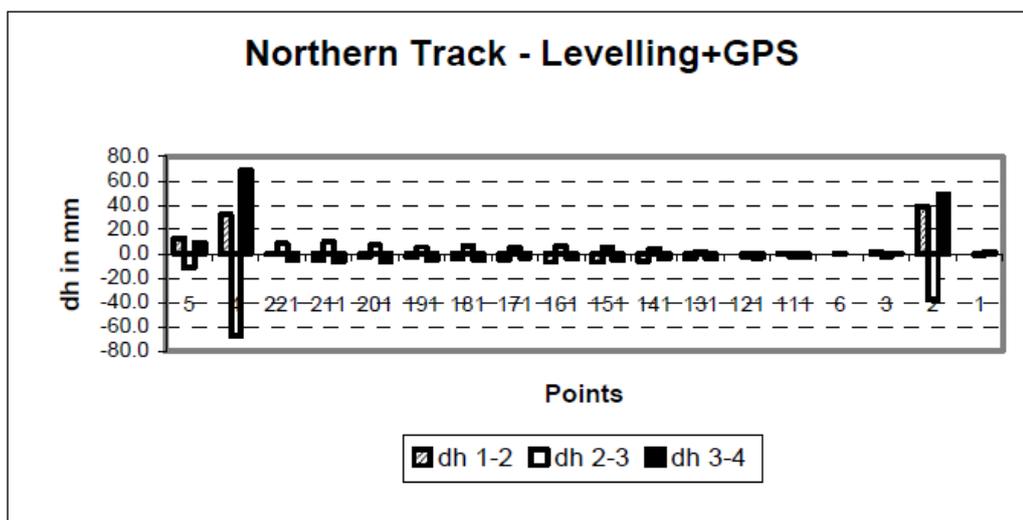


Рисунок 4: Полученные комбинированные разницы высот между последовательными периодами для каждой точки в северной трассе

5. S-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GPS-ДАННЫХ

Данное согласование может быть достигнуто между различными периодами, используя S-трансформации. Кроме того, движущиеся точки определяются путем последовательного применения этого преобразования. S-преобразованием является операция, которая используется для перехода от одних данных к другим, не используя новый расчет корректировки. Так же, S-преобразованием является преобразование вычисления неизвестных параметров, которые были выявлены в данных, и их кофактор матрицы от текущих данных к новым данным. Уравнения, которые предполагают переход от данных i к данным k , приведены ниже (Демирель, 1987; Баскайя, 1995).

$$\underline{x}^k = \underline{S}_k \underline{x}^i$$

$$\underline{Q}_{xx}^k = \underline{S}_k \underline{Q}_{xx}^i \underline{S}_k^T$$

$$\underline{S}_k = \underline{I} - \underline{G} \left(\underline{G}^T \underline{E}_k \underline{G} \right)^{-1} \underline{G}^T \underline{E}_k$$

5.1 Глобальный тест с использованием S-преобразования

Управление сетью состоит из исходных точек и точек деформации. При помощи исходных точек контроль сети, который был измерен в t_i и t_j периодах, трансформируется в той же системе координат.

При осмотре значительных сдвигов точек, необходима непрерывная трансформация данных. Из-за этого, в первую очередь сети, которые будут сравнивать друг с другом, корректируются в любые данные, такие как использование свободных корректировок.

В результате свободной трансформации, координаты контролируемой сети пунктов, которые были измерены в любой период, делятся на две группы: f (опорные точки) и p (точки деформации).

Тогда, данные i и данные j могут быть преобразованы в аналогичные данные k при помощи исходных точек. В результате, векторы неизвестных координат, а также их кофактор матрицы, находятся для исходных точек в аналогичных данных k .

По глобальному тесту определяется, есть ли какие-либо значительные сдвиги в исходных пунктах или нет. В результате, если глобальный тест показал, что есть значительные деформации в одной части исходных пунктов, определяющие существенные изменения на пункте начался этап с помощью S -преобразования (локализации деформаций). На этом этапе предполагается, что каждая из исходных точек может изменить свое местоположение для каждой части: первая часть включает в себя опорные точки, которые рассматриваются как стабильные и вторая часть включает в себя опорную точку, которая рассматривается как нестабильная. Все шаги вычисления повторяются для каждой исходной точки. Таким образом, для всех исходных точек была испытана вероятность на стабильность или нестабильность. В конце концов, получают точные контрольные точки.

5.2 Определение значения деформации

После определения существенных изменений на точке, должен быть определен блок исходных пунктов, который не имеет никаких деформаций. При помощи этих исходных точек, оба периода сдвигают те же данные и значения деформации вычисляются, как описано ниже.

Деформацию вектора точки P :

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} x_k^j - x_k^i \\ y_k^j - y_k^i \\ z_k^j - z_k^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}$$

и величина вектора:

$$d = \sqrt{\underline{d}^T \underline{d}}$$

Для определения значимости деформации этих векторов, которые рассчитываются в соответствии с уравнением, описанным выше, H_0 нулевой гипотезы осуществляется, как указано ниже.

$$H_0 : d = 0$$

И тестовое значение:

$$T = \frac{\underline{d}^T Q_{dd}^{-1} \underline{d}}{3s_0^2}$$

Пока это тестовое значение сравнивается с критическим значением $F_{3, f, 1-\alpha}$, и если $T > F_{3, f, 1-\alpha}$, это говорит о том, что существует значительная 3D деформация в точке P (Denli, 1998).

После оценки данных GPS, был проведен анализ 3D-деформации, как это упоминалось ранее. После анализа, найденные горизонтальные смещения можно увидеть на рисунке 5.

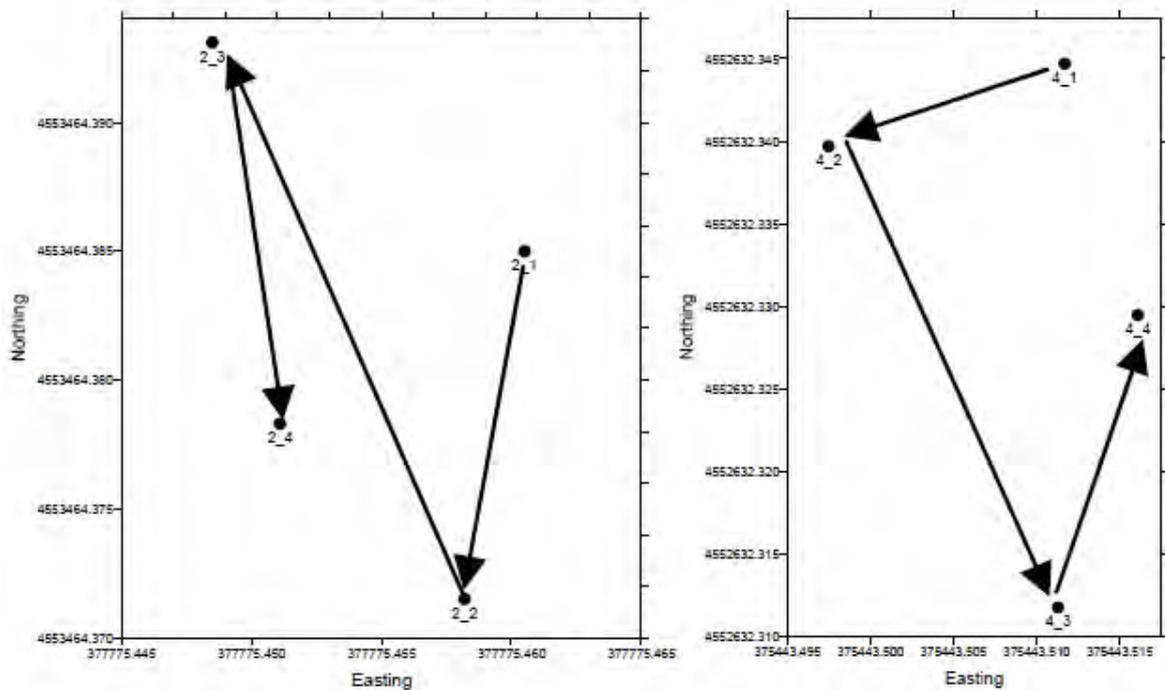


Рисунок 5: Горизонтальное смещение в пунктах 2 и 4.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Как хорошо известно, самой слабой составляющей местоположения, полученной при помощи GPS, является высота компоненты. Это происходит главным образом из-за слабости геометрической структуры GPS. В связи с этим, GPS технологии в определении вертикальных деформаций, должны быть поддержаны точными уравнивающими измерениями в вертикальном позиционировании.

На первом этапе этого процесса данные, которые рассматривались двумя методами измерения, были обработаны для каждого периода отдельно. Таким образом, результаты, которые были получены из независимых решений для каждого периода, были сопоставлены. Это было сделано, чтобы получить впечатление о качестве данных, возможных внутренних проблемах и получить первые намеки на нестабильных пунктах, таким образом, позволив применить подходящую стратегию анализа деформаций. Эта операция затрагивает только высоту компоненты. В результате этого сравнения, были замечены преимущества точного измерения уравнивания. Они эффективны для проверки высоты, полученной из GPS измерений, а также для уточнения высоты антенны в связи с проблемами, которые могут произойти во время измерений GPS и влиять на высоту компоненты напрямую.

После этих процессов, анализ деформации был проведен с помощью разности высот от уравнивания измерений из измерений GPS, а также с помощью сочетания разности высот от обеих GPS и уравнивания измерений соответственно. В общем смысле, результаты подтверждали друг друга. В результатах, неожиданно было обнаружено, что максимальное изменение высоты было в пунктах 2 и 4 (как это видно на графике), которые были приняты как стабильные в начале проекта и, несмотря на то, что их конструкция была в виде колонны. Согласно анализу точных данных уравнивания, обратная ситуация сложилась в пунктах 2 и 4, там не было видно никаких изменений в высотах деформации точек на виадуке. С другой стороны, согласно второй оценке (с помощью GPS производных разности высоты) в некоторых точках на виадуке, об изменениях высоты сообщалось.

В третьей оценке, в результате оценки компонент дисперсии Гельмерта было вычислено, что вес разности высот от уравнивания отличался в 30 раз от веса полученных разностей высот GPS. Этот результат был достигнут в третьем шаге итерации.

На графиках замечено изменение высоты в зависимости от последовательных измерительных кампаний. На графиках первой, второй и третьей оценки были сравнены, это недостаточно надежно для использования GPS измерений без специальных мер предосторожности по отношению к источникам ошибок GPS, например, многолучевого и атмосферного эффектов, проблем с высотой антенн и т.д., в анализе вертикальных деформаций инженерных сооружений. Согласно исследованию результатов второй оценки, были видны изменения в высоте нескольких точек виадука. Тем не менее, в то время как первая и третья оценки принимаются во внимание, понятно, что эти изменения были деформации на объектом

пункте виадук по результатам второй оценки и не были значительными и вызваны источником ошибок в GPS измерениях из-за особенности проблемы высоты антенны.

После этого, 3D-анализ деформации проводили в соответствии с теоретическими аспектами, которые были описаны в разделе 5 и результаты корректировок монастыря и помощь 1D анализа деформации на этапе принятия решения 3D-анализа деформации, в то время как сеть точек группируется как стабильная или нестабильная. По результатам анализов, горизонтальные перемещения были исследованы в пунктах 2 и 4 в пределах виадука (см. Рисунок 5).

Тем не менее, на первый взгляд, было удивительно найти деформации в точках 2 и 4, которые были выбраны в качестве базисных точек, что после геологических и геофизических исследований и привлекло происхождение этих результатов. Согласно этому, область – это область болота, что характеризует возможность расширения и под этими двумя опорными точками, 2 и 4. Верхний слой почвы в регионе не кажется стабильным и построение опорных точек не основано на глубине опоры виадука и таким образом это влияет на условия окружающей среды. Эти условия поддерживаются результатами анализа, что в объекте точки на виадуке не подвергались существенным передвижениям. С другой стороны, можно упомянуть о корреляции между вертикальными движениями на двух опорных точках 2 и 4, и влажные/сухие сезоны, так как поднятие и опускание этих базисов кажется очень синхронным в связи с сезонными изменениями количества воды (см. рис 2, 3 и 4).

Результаты этого исследования, опыт работы с измерениями виадука Карасу, считаются очень важными замечаниями для исследований анализа деформации с использованием GPS измерений. В качестве первого замечания, методика GPS измерений может быть использована для определения деформаций с учетом некоторых специальных мер предосторожности для устранения источников ошибок GPS. Они включают: использование принудительного центрирования механизма, избежание ошибок центрирования, использование специального оборудования для точного отображения высоты антенны, а так же использование специальных типов антенн, чтобы избежать влияния многолучевого эффекта и т.д. Кроме того, во время процессов данных необходимо очистить промахи цикла от данных и рассмотреть недостатки используемых тропосферных и ионосферных моделей.

Однако, несмотря на эти меры предосторожности, чтобы обеспечить лучшие результаты при анализе деформаций GPS измерений, должны поддерживаться точные измерения уравнивания.

ИСТОЧНИКИ

1. Anonym, 2002. *Structural Deformation Surveying* (EM 1110-2-1009), US Army Corps of Engineers, Washington, DC
2. Ayan, T., 1982. General Review of Deformation Analysis in Geodetic Networks, *ITU Journal*, Vol 1., Istanbul, Turkey (*in Turkish*)
3. Ayan, T., Tekin, E., Deniz, R., Külür, S., Toz, G., Çelik, R. N., Özşamlı, C., 1991. Determining Landslides Deformations in the Region of Büyükçekmece Gürpınar Village Using Geodetic Methods, Technical Report, February 1991, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey (*in Turkish*)
4. Başkaya, B., 1995. *S-Transformasyonu ve Yatay Kontrol Ağlarında Deformasyon Analizi*, MSc Thesis, ITU Institute of Natural Sciences, June-1995, Istanbul, Turkey (*in Turkish*)
5. Çelik, R. N., Ayan, T., Denli, H., Özlüdemir, T., Erol, S., Özöner, B., Apaydın, N., Erincer, M., Leinen, S., Groten, E., 2001. Monitoring Deformation on Karasu Viaduct Using GPS and Precise Levelling Techniques, *Kluwer Academic Publisher*, Netherlands
6. Dai L., Wang, J., Rizos, C., Han, S., 2001. Pseudo-satellite applications in deformation monitoring, *GPS Solutions*, 5(3), 80-87
7. Demirel, H., 1987. *S-Transformasyonu ve Deformasyon Analizi*, Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, February 23-27 1987, Chamber of Surveying Engineers of Turkey, Ankara, Turkey (*in Turkish*)
8. Denli, H. H., 1998. GPS ile Marmara Bölgesindeki Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi, ITU Institute of Natural Sciences, PhD Thesis, February, 1998, Istanbul, Turkey (*in Turkish*)
9. Erol, S., 1999. *Deformation Measurements and Analysis in Karasu Viaduct Using GPS Technique*, MSc Thesis, June 1999, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, Turkey (*in Turkish*)
10. Erol, S., Ayan, T., 2003. An Investigation on Deformation Measurements of Engineering Structures With GPS And Levelling Data Case Study, *International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World*, 6-7 November 2003, Sofia, Bulgaria
11. Featherstone, W. E., Denith, M. C., Kirby, J. F. 1998. Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights from GPS, *Survey Review* 34, 267 (January 1998), pp.278-296