



003489223

На правах рукописи

НИКИТЧИН АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ВАНТОВЫХ
МОСТОВ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ**

Специальность: 25.00.35 – Геоинформатика

17 ДЕК 2009

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в государственных образовательных учреждениях высшего профессионального образования Петербургском государственном университете путей сообщения и Московском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент

Брынь Михаил Ярославович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук

Кафтан Владимир Иванович

кандидат технических наук

Кужелев Павел Дмитриевич

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО НИИАС)

Защита диссертации состоится 24 декабря 2009 г. в 15 ч на заседании диссертационного совета Д 218.005.11 при Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) по адресу: 127994, Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9, ауд. № 1235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан 24 ноября 2009 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Ю.А. Быков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: В современных условиях резко возрастают требования к обеспечению безопасных условий эксплуатации инженерно-технических объектов. К их числу относятся вантовые мосты. Пролетные строения таких конструкций состоят из балок жесткости и поддерживающих их растянутых, гибких, прямолинейных стержней – вант, закрепленных на пилонах. В мире насчитывается более 1100 вантовых и подвесных мостов, в том числе с длиной пролета более 300 м – порядка 60. Вантовые мосты могут выполнять функции не только автомобильных, но и железнодорожных мостов.

На этапах строительства и эксплуатации вантовых мостов практически непрерывно изменяется схема и напряженно-деформированное состояние их конструкции под воздействием внешних факторов, среди которых следует отметить ветровое воздействие, транспортную нагрузку, суточную смену температуры воздуха, солнечную активность, количество осадков и сейсмические толчки.

Постоянные воздействия нагрузок и изменения внешних факторов приводят к постепенному износу сооружения, необратимым деформациям и разрушению элементов конструкции. Поэтому необходимым становится разработка централизованной и постоянной системы, способной осуществлять сбор, систематизацию, хранение, анализ, преобразование, отображение и распространение пространственно-координированных данных о контролируемых элементах сооружения для своевременного выявления критичных величин деформаций, установления причин их возникновения, составления прогнозов развития деформаций, выработки и принятия мер для устранения нежелательных процессов.

Назовем такую систему системой геоинформационного мониторинга (СГМ) вантовых мостов.

В качестве основного средства мониторинга в настоящее время следует рассматривать спутниковые геодезические приемники, поскольку они обладают возможностью непрерывного выполнения измерений вне зависимости от погодных условий. Это делает актуальными исследования, направленные на реализацию их возможно-

стей для осуществления геоинформационного мониторинга вантовых мостов, в том числе разработки методов мониторинга деформаций геодезических разбивочных сетей (ГРС), являющихся основой строительства, и мониторинга основных конструктивных элементов вантовых мостов.

Нынешний уровень развития методов обеспечения строительства и эксплуатации вантовых мостов геоданными – это результат, в достижение которого внесли вклад известные специалисты в области как геодезии, так и геоинформатики: Берлянт А.М., Бойко Е.Г., Глушков В.В., Коугия В.А., Маркузе Ю.И., Мартыненко А.И., Масленников А.С., Матвеев С.И., Машимов М.М., Цветков В.Я. и др.

Существенный вклад в развитие проектирования и расчетов вантовых мостов внесли Бахтин С.А., Казакевич М.И., Качурин В.К., Перельмутер А.В., Петропавловский А.А., Протасов К.Г., Смирнов В.А. и др.

Цель диссертационной работы. Разработка методических и технологических основ геоинформационного мониторинга вантовых мостов.

Идея работы. В качестве средств геоинформационного мониторинга предлагается применение спутниковой аппаратуры и специализированных программных продуктов.

Задачи исследований:

- анализ современного состояния обеспечения строительства и эксплуатации вантовых мостов геоданными;
- обоснование требований к точности создания плановой геодезической разбивочной сети;
- совершенствование методов предрасчета точности геодезической разбивочной сети, а также расчета точности выполняемых измерений;
- обоснование допустимых отклонений результатов измерений при мониторинге деформаций планово-высотной геодезической сети в ходе строительства вантовых мостов;
- разработка структуры систем геоинформационного мониторинга основных конструктивных элементов вантовых мостов;

– совершенствование методов обработки и интерпретации спутниковых геодезических измерений в системах мониторинга вантовых мостов;

– разработка программного обеспечения по вычислению основных частот отклика конструкции от внешних воздействий.

Объектом исследования являются мосты вантовой системы.

Предметом исследования является система мониторинга на основе спутниковых технологий.

Методы исследований. Теоретические методы: математико-статистические методы, метод наименьших квадратов, теория ошибок измерений, методы спектрального анализа. Экспериментальные методы: анализ производственных данных, модельные исследования, натурные эксперименты.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методы обеспечения точности разбивочной сети вантовых мостов путем оптимизации схемы и состава измерений, опоры на спутниковую каркасную сеть и мониторинга деформаций разбивочной сети.

2. Система геоинформационного мониторинга вантовых мостов на основе непрерывных спутниковых измерений с вычислением амплитудно-частотных характеристик методами спектрального анализа.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

– конкретизирован алгоритм оценки проектов планово-высотных геодезических разбивочных сетей для обеспечения строительства вантовых мостов;

– предложены методы мониторинга деформаций геодезических сетей;

– разработана технологическая схема системы геоинформационного мониторинга вантовых мостов;

– предложен модульный состав структуры системы геоинформационного мониторинга, определены требования к техническим характеристикам, режимам работы и местам установки элементов системы;

– предложены методы обработки данных геоинформационного

мониторинга вантовых мостов на основе спектрального анализа;
– разработаны предложения по выявлению закономерностей влияния внешних воздействий на динамические колебания элементов конструкции вантовых мостов.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть положены в основу новых технологий и программных продуктов, обеспечивающих мониторинг вантовых мостов.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждается применением строгих научных методов исследований, а также сходимостью теоретических положений и выводов с расчетами на математических моделях и результатами натурных экспериментов на реальных объектах работ.

Апробация работы. Материалы исследований и основные положения работы докладывались на семинарах Санкт-Петербургского отделения Русского географического общества (декабрь 2008 г., апрель 2009 г.), IX научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” (Москва, октябрь 2008 г), научно-технической конференции “Современные мосты в транспортной инфраструктуре города” (Москва, ноябрь 2008 г), 68 и 69-ой научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, апрель 2008 г, 2009 г), 12 и 14-ой международной научно-технических конференциях “ГЕОФОРУМ” (Львов-Яворов, апрель 2007 г, 2009 г), 5-й международной научно-технической конференции “Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід”(Чернигов, май 2009 г) и на заседаниях кафедр “Инженерная геодезия” ПГУПС и “Геодезия, геоинформатика и навигация” МГУПС.

Личный вклад автора заключается в проведении комплексного анализа современного состояния обеспечения строительства и эксплуатации вантовых мостов геоаннными; разработке алгоритма обоснования требований к точности геодезических работ по созданию разбивочных сетей; разработке методов предоперационного мониторинга деформаций планово-высотной геодезической разбивочной сети; разработке структуры систем геоинформационного мониторинга вантовых мостов на основе применения спутниковой аппаратуры; разработке алгоритма определения основных частот коле-

баний вантовых мостов от внешних воздействий на основе спектрального анализа; разработке предложений по определению источника колебаний и их форм.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 10 публикациях, две из которых в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение, заключение и библиографический список из 123 наименований, 8 приложений. Работа содержит 21 рисунок и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Методы обеспечения точности разбивочной сети вантовых мостов путем оптимизации схемы и состава измерений, опоры на спутниковую каркасную сеть и мониторинга деформаций разбивочной сети.

Строительство вантовых мостов сопряжено с рядом особенностей, которые необходимо учитывать при создании геодезической разбивочной сети, являющейся основой строительства. К наиболее важным из них относятся: необходимость обеспечения стабильности пунктов сети на всех этапах строительства; оптимальное расположение пунктов сети, обеспечивающее максимальную видимость на возводимые элементы вантового моста и обеспечение требуемой точности построения сети.

Выполненные расчеты, которые опирались на требуемую точность вынесения в натуру центра мостовой опоры на монолитном бетоне, показали, что точность определения координат $m_{x,y}$ пунктов ГРС относительно исходного должна составлять 4 мм.

Для обеспечения требуемой точности выполнения геодезических работ при создании разбивочной сети в диссертации усовершенствован существующий алгоритм оценки проектов, основными этапами которого являются:

1. обоснование требуемой точности определения координат пунктов сети;
2. составление схемы сети;
3. определение по алгоритму параметрического способа уравнивания обратной весовой матрицы координат пунктов;

4. подбор значения средней квадратической ошибки единицы веса μ , обеспечивающего требуемую точность определения координат пунктов сети;

5. выбор приборов и расчет необходимого числа приемов угловых измерений;

6. установление допусков на разброс результатов измерений.

При создании сети предложено предусмотреть каркасную сеть из четырех пунктов длительной сохранности, расположенных парами на противоположных подходах к вантовому мосту. Определение координат пунктов каркасной сети следует выполнить спутниковыми методами относительно одного исходного пункта. При этом также задается исходное направление на соседний пункт каркасной сети, находящийся на стороне противоположного подхода к мосту. Таким образом, созданная каркасная сеть станет основой для развития и контроля остальной части сети сочетанием спутниковых и линейно-угловых измерений.

При оценке проекта для определения обратной весовой матрицы координат необходимо составить для всех "измеряемых" величин соответствующие уравнения поправок. Исходя из того, что сеть, как правило, является вытянутой и может иметь соотношение максимальной длины стороны к минимальной, превышающее 10 и более раз, в диссертации предложено, учитывать веса всех видов различных измерений.

Среднюю квадратическую ошибку измерения направления следует принять равной единице, а средние квадратические ошибки измерения расстояний электронными тахеометрами и приращений координат спутниковой геодезической аппаратурой исходя из паспортных характеристик этих приборов.

Средняя квадратическая ошибка определения плановых координат спутниковых измерений можно принять 5 мм + 1,5 мм/км. Если при оценке проектов потребуется переход от прямоугольных координат к полярным, то это будет означать, что средняя квадратическая ошибка в длине вектора будет равна 5 мм + 1,5 мм/км, а средняя квадратическая ошибка (сек) в его направлении равна

$$\frac{5 + 1,5 \cdot D}{D \cdot 10^6} \rho''$$

где D выражено в км.

Таким образом, при составлении соответствующих уравнений поправок и последующем нахождении максимального элемента обратной весовой матрицы $Q_{x,y,max}$, становится возможным определить среднюю квадратическую ошибку единицы веса по формуле

$$\mu = \frac{m_{x,y}}{\sqrt{Q_{x,y,max}}},$$
 характеризующую точность измерений. Это позволяет

обеспечить выбор прибора необходимого класса точности и произвести расчет требуемого числа приемов измерений и допусков на разброс угловых измерений.

При оценке проектов целесообразно рассматривать различные варианты, изменяя при этом расположение пунктов сети, состав измерений (например, устанавливать дополнительные связи между пунктами спутниковыми измерениями, увеличивать число измеренных длин сторон) и предполагаемых к использованию приборов для линейных и спутниковых измерений.

Для оценки проекта высотной сети предложен аналогичный алгоритм. При этом предложено выполнять оценки проектов сети отдельно для каждого берега, а также выполнять оценку точности передачи высот.

Для апробации предложенных методов выполнена оценка проектов плановой и высотной сетей на объекте строительства мостового перехода на о. Русский через пролив Босфор Восточный в г. Владивосток.

При оценке проектов плановой сети (рис.1), последняя рассматривалась как построенная: только угловыми измерениями; только линейными; как линейно-угловая сеть; как линейно-угловая со спутниковыми измерениями на пунктах каркасной сети. Во всех вариантах за исходный был принят только один пункт – это пункт существующей спутниковой государственной геодезической сети СГГС-2 - pp3836. В качестве исходной стороны была принята сторона pp3836-Nahimov (дирекционный угол $\alpha = 58^{\circ}38'44''$, длина стороны - 2227,882 м). Оценка проектов сетей выполнялась в программе NW (автор – профессор В.А. Коугия), при этом вычислялись обратные весовые матрицы координат пунктов сети.

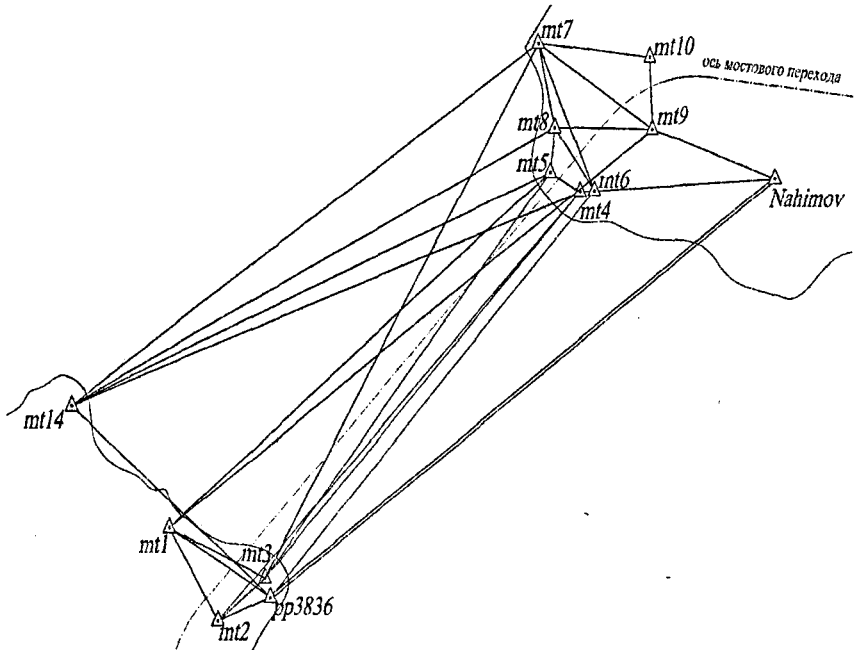


Рис. 1. Схема плановой геодезической сети

Результаты вычислений (табл. 1) показали, что применение метода триангуляции требует выполнения большого объема угловых измерений высокоточными приборами.

Таблица 1

Результаты вычисления необходимого числа приемов угловых измерений

Точность прибора	Триангуляция, $\mu = 0,32''$	Линейно-угловая сеть, $\mu = 1,333''$	Комбинированная сеть, $\mu = 1,633''$
1"	5	1	1
2"	20	2	1
3"	—	3	2
4"	—	5	3
5"	—	7	5

Комбинация линейных и угловых измерений ожидаемо улучшила результат, расширив диапазон выбора средств измерений. Наличие каркасной сети из четырех пунктов pp3836, Nahimov, mt7 и

mt14, созданной спутниковыми методами, не только улучшило точностные характеристики общей сети, но и позволило установить надежную связь между частями сети, расположенных на противоположных берегах.

В ходе оценки проектов высотной сети средние квадратические ошибки единицы веса для материковой части и части на о. Русский получились равными соответственно $\mu=3,8$ мм и $\mu=3,5$ мм. Полученные значения μ сравнивались со средней квадратической ошибкой единицы веса μ_0 , принимаемой для определенного класса нивелирования, которое в нормативных документах не указывается. Ее можно определить косвенно по предельным допустимым невязкам, указанным в Инструкции по нивелированию. Таким образом, для обеспечения требуемой точности определения высот пунктов, задаваемой СНиП 2.05.03-84* и составляющей 3 мм, было выбрано проведение нивелирования по программе III класса.

Пункты созданных ГРС в ходе строительства вантового моста испытывают смещения по ряду причин, например: движение техники, перемещение больших объемов грунтов вблизи пунктов и их недостаточная глубина заложения.

Поэтому, в связи с короткими сроками строительства вантовых мостов и повышением требований к точности геодезических работ необходимым становится выполнение контроля стабильности пунктов перед каждым циклом разбивочных и других работ, исходя при этом из того, что такой контроль целесообразно выполнять с наименьшими затратами времени. В диссертации такой вид контроля назван предоперационным мониторингом деформаций пунктов геодезической разбивочной сети.

Предложены формулы вычисления допустимых расхождений между результатами непосредственных измерений и данными каталога в зависимости от используемых средств измерений.

В случае, если геодезические работы выполняются с пункта ГРС, то контроль его стабильности можно выполнить измерением расстояний до смежных пунктов или углов между направлениями на смежные пункты. Анализируя результаты измерений, можно установить какой пункт испытал смещение.

Допустимое расхождение между результатами линейных изме-

рений с данными каталога можно рассчитать по формуле $\Delta d = t \sqrt{m_{d_{\text{кат}}}^2 + m_{d_{\text{ком}}}^2}$, где t – коэффициент перехода к предельным ошибкам; $m_{d_{\text{кат}}}$ – средняя квадратическая ошибка измерения расстояния; $m_{d_{\text{ком}}}$ – средняя квадратическая ошибка расстояния, вычисленного по координатам x_1, y_1, x_2, y_2 , пунктов ГРС по формуле $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

Эту ошибку можно определить по обобщенной формуле оценки точности $m_{d_{\text{ком}}} = \sqrt{FK_E F^T}$, где K_E – ковариационная матрица 4 порядка плановых координат двух пунктов, F – строка частных производных.

Матрица K_E может быть получена из уравнительных вычислений разбивочной сети.

Если принять, что $m_{x_1} = m_{y_1} = m_{x(y)_1}$ и $m_{x_2} = m_{y_2} = m_{x(y)_2}$, тогда для независимых определений координат пунктов ГРС

$$m_{d_{\text{ком}}} = \sqrt{m_{x(y)_1}^2 + m_{x(y)_2}^2}.$$

При условии равенства ошибок положений пунктов $m_{p_1} = m_{p_2} = m_p$, где $m_{p_i} = m_{x(y)_i} \sqrt{2}$, будем иметь $m_{d_{\text{ком}}} = m_p$.

Аналогичным является вывод формул для определения допустимых расхождений результатов измерения контрольного угла с данными каталога.

При выполнении работ по геодезическому обеспечению строительства вантовых мостов, часто удобным является метод свободно-го стационарирования, при котором тахеометр устанавливается в любом месте, а его координаты определяются обратной засечкой. В процессе выполнения обратной засечки современные тахеометры выполняют оценку точности m_x, m_y определяемых координат по методу наименьших квадратов. На основе анализа этих ошибок при разном сочетании наблюдаемых пунктов можно определить, какой пункт изменил свое плановое положение.

Определение отметок при строительстве вантовых мостов осуществляется нивелирами, и в последние годы, преимущественно, –

электронными тахеометрами.

При использовании для выноса в натуру проектных отметок электронного тахеометра следует с целью контроля стабильности пунктов измерить по стороне сети превышение методом тригонометрического нивелирования.

Допустимое расхождение между данными непосредственных измерений и данными каталога не должно, на наш взгляд, превышать 1 см. И только после того, как возникнут сомнения в стабильности пункта, следует перейти к контролю высотного положения методом геометрического нивелирования.

При использовании для определения высот геометрического нивелирования необходимо перед выполнением работ измерить превышение между двумя соседними пунктами по программе нивелирования, которое использовалось для определения высот. Допустимое расхождение между превышением, измеренным непосредственно, и данными каталога не должны превышать $\Delta h = t\sqrt{m_{\text{кат}}^2 + m_{\text{изм}}^2}$,

где $m_{\text{изм}}$ – средняя квадратическая ошибка определения превышения нивелиром; $m_{\text{кат}}$ – средняя квадратическая ошибка определения превышения по высотам, представленным в каталоге, она может быть вычислена по ковариационной матрице высот по формуле

$m_{\text{кат}} = \sqrt{m_{H_1}^2 + m_{H_2}^2 - 2r_{H_1H_2}m_{H_1}m_{H_2}}$, где $r_{H_1H_2}$ – коэффициент корреляции.

При $r_{H_1H_2} = 0$ и $m_{H_1} = m_{H_2} = m_H$ будем иметь $m_{\text{кат}} = m_H\sqrt{2}$.

При решении задачи слежения за стабильностью пунктов с помощью спутниковых технологий один из приемников устанавливается на пункт, принятый за исходный и относительно него определять положение других пунктов. На определяемых пунктах устанавливаются мобильные приемники. По результатам синхронных наблюдений спутников вычисляются разности координат приемников, позволяющие вычислить координаты определяемых пунктов относительно исходного.

Рассмотренные методы позволяют обеспечить требуемую точность создания геодезической основы строительства, пункты кото-

рой станут исходными для развертывания системы геоинформационного мониторинга вантовых мостов.

2. Система геоинформационного мониторинга вантовых мостов на основе непрерывных спутниковых измерений с вычислением амплитудно-частотных характеристик методами спектрального анализа.

Целью организации геоинформационного мониторинга вантовых мостов, как определено в диссертации, является повышение надежности системы обеспечения безопасных условий их строительства и эксплуатации.

Система геоинформационного мониторинга вантовых мостов предназначена для решения следующих задач:

- определение пространственного положения элементов конструкции мостов и их изменений во времени;
- определение геометрических параметров и выявление причин их изменения;
- вычисление динамических характеристик вантовых мостов и установление их зависимости с внешними воздействиями;
- выдача предупреждения в случае несоответствия геометрических и динамических характеристик сооружения их проектным значениям.

К функциям системы геоинформационного мониторинга следует отнести: измерение физических величин, передачу, обработку, накопление и предоставление информации обслуживающему персоналу в непрерывном режиме.

Структуру СГМ предложено проектировать как модульную (рис. 2). Именно таким образом обеспечивается возможность ликвидации, замены или дополнения ее основных элементов. Модули входят в два различных блока, разделенных выполняемыми функциями: сбора геоданных и обработки и анализа поступающей информации.

Входящие в состав СГМ спутниковые базовые станции предлагается использовать в качестве основы геодезической инфраструктуры объекта, закрепляющей систему координат сооружения. При этом предложено приемники базовых станций устанавливать на пунктах каркасной разбивочной сети. Для обеспечения работы СГМ

и выполнения геодезических работ в районе строительства целесообразно организовывать минимум две базовые станции, располагаемые в районах противоположных подходов к мосту.

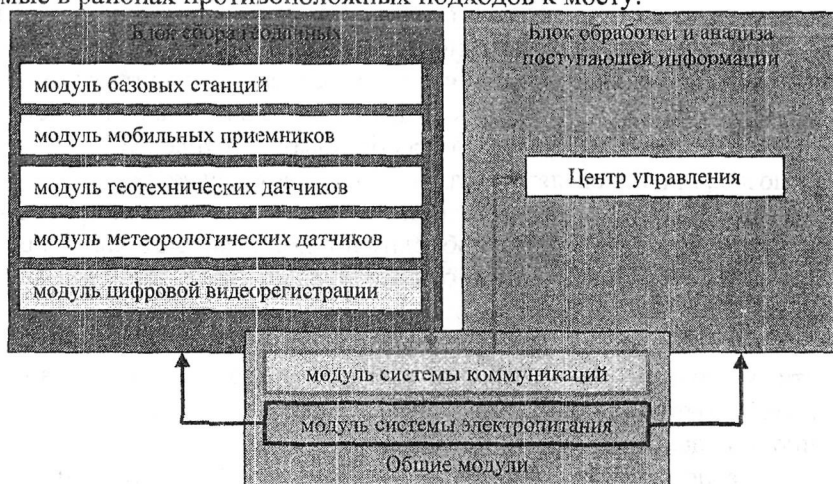


Рис. 2. Схема структуры СГМ

Выбору мест для расположения элементов модуля мобильных приемников следует уделять особое внимание еще на стадии проектирования СГМ. Логичным является назначение контролируемых точек в местах, подверженных наибольшему изменению пространственного положения. Для вантовых мостов такие точки находятся на верхних площадках пилонов и в середине пролетных строений.

Тем не менее, следует отметить, что для мониторинга динамического поведения вантовых мостов необходимым является установка дополнительных мобильных приемников. Это обусловлено тем фактом, что каждая конструкция может колебаться по многим формам колебаний.

В блок обработки и анализа поступающей информации входит один главный элемент – Центр управления системой мониторинга, который предназначен для контроля и управления датчиками (сенсорами) на объекте мониторинга, базовыми станциями, линиями энергоснабжения и коммуникаций. Центр должен функционировать постоянно, осуществляя сбор данных, визуализируя информацию о смещениях точек мониторинга мостовой конструкции, выполнять

обработку измерений и осуществлять автоматизированную рассылку информации о критических значениях должностным лицам.

Одними из основных результатов геоинформационного мониторинга вантовых мостов, кроме геометрических параметров, должны быть динамические характеристики, прежде всего амплитудно-частотные. Для оценки динамических характеристик вантовых мостов предложено использовать методы спектрального анализа, основанные на алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ), которые позволяют определять частоты откликов сооружения от внешних воздействий. Для получения оптимальных результатов проведения спектрального анализа необходимым является тщательная подготовка данных. Особенно это относится к массивам реальных данных, получаемых в ходе геоинформационного мониторинга.

Однако следует заметить, что алгоритмы БПФ являются только частным случаем применения метода дискретного преобразования Фурье, и поэтому им присущи те же недостатки, обусловленные конечностью данных и выбором шага дискретизации.

Согласно теореме Котельникова исследуемый аналоговый сигнал восстанавливается однозначно и без потерь по своим дискретным значениям в случае, если частота дискретизации больше удвоенной максимальной частоты спектра исследуемого сигнала, т.е. частоты Найквиста. Другими словами – спектр исследуемого сигнала восстанавливается однозначно до критической частоты Найквиста. Следовательно, при выборе эпохи измерений для спутниковой геодезической аппаратуры необходимо назначать значение указанной величины как минимум в два раза превышающее значения собственных частот конструкции по основным формам колебаний.

Основным источником ошибок при практической оценке спектра является конечность области спектрального преобразования. Любая обрабатываемая информация имеет конечную область определения. Если исследуемая функция $h(t)$ периодическая, то достаточно знать ее только на отрезке длиной в период. В том случае, если функция $h(t)$ является непериодической, то ее необходимо знать на всей оси. На практике функция изучается на конечном интервале N , который меньше периода изучаемой функции.

Для ослабления краевых эффектов применяются специальные

весовые функции, называемые окнами. В диссертации рассмотрены несколько основных окон, являющихся оптимальными для обработки данных геоинформационного мониторинга. Для частотной фильтрации оптимальными представляются колоколообразные косинусные окна, поскольку они в меньшей степени изменяют дисперсию данных. Например, при оценке спектральной плотности мощности сигнала окно Hanning можно считать оптимальным.

Для выполнения БПФ количество данных исходного вектора должно быть равно 2^n , где n –любое целое число. По понятным причинам для массива реальных данных это условие практически невыполнимо. Поэтому в диссертации предложено выполнять симметрию исходного массива данных относительно первого и последнего элемента на ближайшем интервале 2^n .

При выборе оптимального размера обрабатываемого массива данных предложено исходить из разрешающей способности спектра по частоте, которое определяется соотношением $\frac{f}{N}$. Таким образом, для четкого разделения частотных составляющих сигнала необходимо соблюдение следующего условия:

$$(f_1 - f_2) \geq \frac{f}{N},$$

где $(f_1 - f_2)$ –разница между соседними определяемыми частотами; f – частота дискретизации исследуемого сигнала; N – ширина окна.

Важной особенностью практической оценки спектра, непосредственно связанной с конечностью интервала спектрального образования, является проблема выделения трендов. Под трендом будем подразумевать компоненты периодов, превышающих и сопоставимых с интервалом задания данных. При ДПФ координат контролируемых точек вантовых мостов на конечном интервале N , включающих часть интенсивных компонент, особо опасным может оказаться утечка тренда в рабочую область за счет боковых лепестков используемого окна.

Задачу выделения тренда предложено решить методом аппроксимации полиномиальными функциями, таким образом, чтобы оставшиеся данные были максимально лишены элайзинговых эффек-

тов. Для этого, наилучшим образом, на наш взгляд, подходит фильтрация по методу Савицкого-Голай.

В простейшем случае фильтры Савицкого-Голай аналогичны фильтрации скользящим средним. Такой фильтр, примененный к исходному массиву данных, заменит каждое значение h_i – линейной комбинацией $g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n h_{i+n}$, где n_L – количество значений функции перед исправляемым значением h_i , а n_R после этого значения. Коэффициент c_n постоянен и вычисляется как $c_n = \frac{1}{n_R + n_L + 1}$.

Основная идея фильтрации методом Савицкого-Голай заключается в том, чтобы аппроксимировать основную функцию с помощью подвижного окна не с постоянными коэффициентами c_n , а с коэффициентами, полученными вписыванием полиномиальной функции высокого порядка, обычно четвертой или шестой степени. Для каждого значения h_i производится вписывание полинома по всем $n_R + n_L + 1$ точкам в пределах подвижного окна методом наименьших квадратов. Значение g_i принимается равным значению полинома в точке i . Вычисленные значения полинома в остальных точках не используются. Затем переходят на следующую точку h_{i+1} и выполняется полностью новый цикл вписывания.

В диссертации разработан алгоритм (рис.3) автоматизированного вычисления основных частот колебаний вантовых мостов, основанный на циклической обработке массивов координат контролируемых точек сооружения.

В процессе работы алгоритма происходит буферизация, т.е. накопление требуемого для анализа массива данных. Длительность данного периода зависит от выбранной частоты записи данных, а также рассчитанного размера ширины окна.

Для вычисления основных частот колебаний вантового моста предлагается производить $N - m$ циклов БПФ каждой координаты траектории, где в качестве входных данных в каждом цикле i используются разности h_{R_i} , которые вычисляются по формуле $h_{R_i} = h - h_{S_i}$. В последней формуле h – исходный вектор координат, h_{S_i} – вектор сглаженных данных.

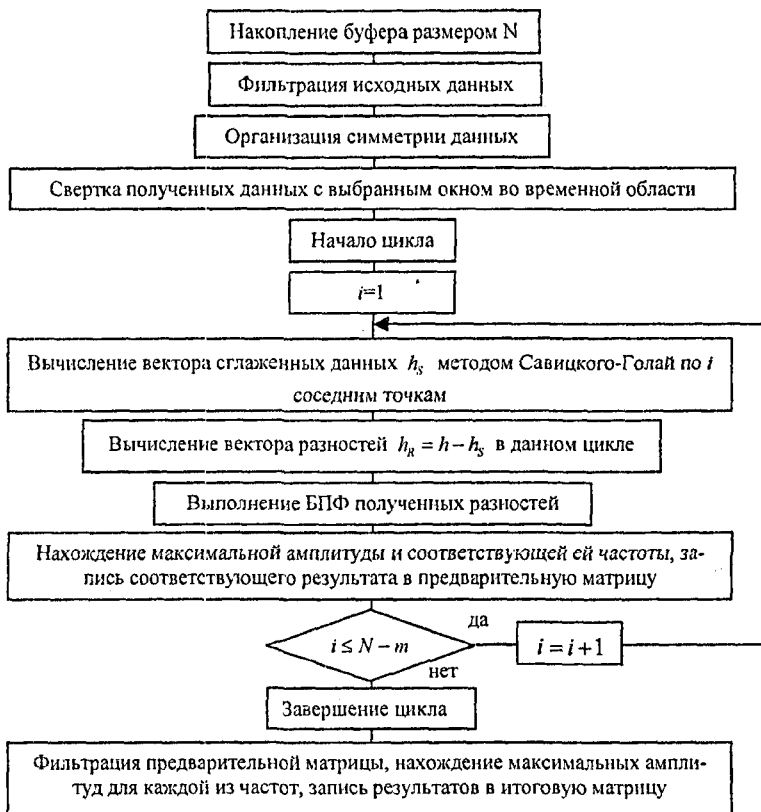


Рис. 3. Блок-схема алгоритма автоматизированного вычисления амплитудно-частотных характеристик колебаний элементов конструкции вантовых мостов в реальном времени

Вектор h_s в каждом цикле i от 1 до $N - m$ вычисляется методом полиномиальной аппроксимации на основе алгоритма Савицкого-Голай. Количество точек, используемых для вычисления, увеличивается с каждым циклом на единицу. Минимальное количество таких точек m определяется в зависимости от используемой при фильтрации степени полинома.

Таким образом, обрабатываемые БПФ, данные постепенно изменяются. На каждом цикле обработки находится максимальный

отклик сооружения и соответствующая ему частота, эти данные записываются в матрицы XFv , YFv , ZFv для координат x , y , z соответственно. Поскольку полученные матрицы содержат большое количество повторяющейся информации, выполняется их фильтрация. Данные, характеризующие максимальную амплитуду на каждой из вычисленных частот, записываются в новые матрицы XF , YF , ZF . Результирующие матрицы содержат все частоты, на которых произошли максимальные в данном цикле отклики моста на внешние воздействия. Таким образом, результирующие матрицы содержат максимально полную информацию о частотах, на которых произошло внешнее воздействие. Важным моментом является то обстоятельство, что результирующие матрицы также могут содержать ложные отклики, вызванные наличием шума. Для выявления действительных частот необходимым является выполнение параллельной обработки в других контролируемых точках вантового моста. При свертке результатов, в случае совпадения частот, произойдет резкое увеличение амплитуды, что будет свидетельствовать о действительном отклике сооружения на данной частоте. В зависимости от мест расположения контролируемых точек можно сделать вывод о соответствующей форме колебания.

Для подтверждения работы алгоритма были выполнены модельные исследования. В качестве исследуемой была задана функция

$$y_j = \sum_{i=1}^6 A_i \sin(2\pi f_i x_j),$$

где y_j – значение j -го элемента функции y ; A_i – значение амплитуды; f_i – значение частоты; x_j – значение j -го элемента вектора времени x .

В качестве ее параметров были заданы шесть значений частот и соответствующих им амплитуд. Функция была ограничена размером меньше ее суммарного периода, а также был добавлен шум, не имеющий спектральной окраски. Частота дискретизации функции была задана 200 Гц. Результатом обработки (табл. 2) по предложенному алгоритму явилась матрица содержащая отклики функции на основных частотах.

Таблица 2

Заданные и вычисленные значения амплитуд и частот

Значение i	Частоты			Амплитуды			
	заданная, Гц	выявленная, Гц	абсолютная погрешность Δ , Гц	заданная	выявленная	абсолютная погрешность Δ	относительная погрешность, %
1	10	10,156	0,156	10	9,803	-0,197	1,97
2	20	20,313	0,313	10	9,168	-0,832	8,32
3	30	29,688	-0,321	10	9,151	-0,849	8,49
4	40	39,844	-0,156	10	9,923	-0,077	0,77
5	50	50	0	10	10,038	0,038	0,38
6	52	52,344	0,344	10	9,803	-0,197	1,97

Таким образом, модельные исследования подтвердили состоятельность применения данного алгоритма. На его основе разработано автономное приложение для вычисления основных частот колебаний вантовых мостов.

Предложенные методы геоинформационного мониторинга вантовых мостов экспериментально исследованы в ходе научного эксперимента на объекте "Большой Обуховский мост" (вторая очередь) кольцевой автодороги вокруг Санкт-Петербурга.

Спутниковые измерения на объекте работ выполнены комплектом спутниковой аппаратуры Leica (Швейцария). В качестве базовых станций использовались приемники, установленные на двух пунктах мостовой разбивочной сети. Два мобильных приемника были установлены на середине руслового пролета и на верхней площадке пилона. Их пространственное положение определялось относительно базовых станций. Эпоха измерений спутниковыми приемниками была выбрана 0,05 с на пролете и 1 с на пилоне.

Результаты статистической обработки результатов представлены в табл. 3. Результаты обработки по предложенному алгоритму в табл. 4. Амплитуда колебаний верхней площадки пилона вдоль оси моста больше, чем в поперечном направлении в 1,6 раза и составляет 8,4 см. А для центра руслового пролета амплитуда в поперечном направлении больше в 3,0 раза, чем по оси моста и составляет 17 см. При этом амплитуды колебаний центра руслового пролета по высоте находились в пределах 29 см.

Таблица 3

Статистический анализ результатов спутниковых измерений

Место установки мобильного приемника	Координата	Минимум, м	Максимум, м	Диапазон изменения координаты, м	Медиана
верхняя площадка пилона	x	60428.093	60428.177	0.084	60428.151
	y	20.170	20.223	0.052	20.203
	h	130.149	130.240	0.091	130.190
центр руслового пролета	x	60249.644	60249.700	0.056	60249.673
	y	30.427	30.597	0.170	30.521
	h	36.872	37.163	0.290	37.046

Таблица 4

Проектные и выявленные частоты собственных колебаний

Форма колебания	Проектная частота, Гц	Выявленная частота, Гц	Отклонение, %
1	0,297845	0,296875	0,326
2	0,362997	0,359375	0,998
3	0,392238	не выявлена	—
4	0,405291	0,406250	0,237

Эксперимент показал, что выявленные частоты собственных колебаний практически совпадают с их проектными значениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Усовершенствована схема и программа проектирования и создания плано-высотных геодезических сетей для строительства вантовых мостов. Показано, что оценку проектов сети следует выполнять исходя из требуемой точности определения координат пунктов относительно исходного.

2. Предложено выполнять мониторинг деформаций пунктов геодезической сети, необходимых в конкретный момент времени для выполнения геодезических работ. Приведены формулы, по которым, имея ковариационную матрицу координат пунктов сети и зная среднюю квадратическую ошибку выполненного измерения, можно вычислить допустимое расхождение результата измерения с данными каталога.

3. Сформулированы цели, задачи и функции системы геоинформационного мониторинга вантовых мостов.

4. Определен состав структуры системы геоинформационного

мониторинга, состоящей из двух основных блоков: сбора геоданных и обработки и анализа поступающей информации.

5. Показано, что одними из основных результатов геоинформационного мониторинга вантовых мостов, кроме геометрических параметров, должны быть динамические характеристики, прежде всего амплитудно-частотные. Для вычисления этих характеристик вантовых мостов предложено выполнять спектральный анализ на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Для получения оптимальных результатов, особое внимание уделено предварительной подготовке данных, а также выбору оптимального окна.

6. Предложен метод непрерывной обработки данных геоинформационного мониторинга вантовых мостов.

7. Проведенные модельные и экспериментальные исследования показали состоятельность предложенного метода автоматизированного определения основных частот откликов элементов конструкции вантовых мостов.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Уравнивание спутниковых и наземных измерений параметрическим способом в плоских координатах для построения мостовых разбивочных сетей / М.Я. Брынь, П.А. Веселкин, А.А. Никитчин и др. // Изв. Петербургского гос. ун-та путей сообщения. – 2007. – №1(10). – С. 135-140.

2. Геодезические работы при строительстве Большого Обуховского моста в Санкт-Петербурге / О.П. Сергеев, О.Н. Малковский, А.А. Никитчин и др. // Транспортное строительство. – 2008. – №7. – С. 48–52.

3. Никитчин А.А. Применение спутниковой геодезической аппаратуры для сезонного контроля геодезических разбивочных сетей // Шаг в будущее (Неделя науки–2008). Материалы научно–технической конференции.– СПб.: Петербургский гос. ун–т путей сообщения, 2008. – С. 85-88.

4. Никитчин А.А., Канашин Н.В., Копцев А.В. Исполнительная съемка железнодорожного моста через реку Свирь в Подпорожье и создание его пространственной модели в AutoCad // Шаг в будущее (Неделя науки–2008). Материалы научно–технической конференции. – СПб.: Петербургский гос. ун–т путей сообщения, 2008. – С. 80–84. .

5. О мониторинге деформаций инженерно-технических сооруже-

ний на основе спутниковых технологий / А.А. Никитчин, Е.Г. Толстов, О.В. Евстафьев и др. // Труды IX научно-практической конференции безопасность движения поездов. – М.: МИИТ, 2008. – С. IX-15 – IX-16.

6. О контроле геодезической разбивочной сети в ходе строительства внеклассных мостов / М.Я. Брынь, А.А. Никитчин, О.П. Сергеев и др. // Труды IX научно-практической конференции безопасность движения поездов. – М.: МИИТ, 2008. – С. IX-16 – IX-17.

7. Никитчин А.А. О совершенствовании методики анализа и интерпретации спутниковых геодезических измерений в системах мониторинга вантовых мостов // Геодезия и картография. – 2009. – №4. – С. 34–36.

8. О выборе электронного тахеометра для геодезического сопровождения строительства высотных сооружений / М.Я. Брынь, Е.Г. Толстов, А.А. Никитчин и др. // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід: Зб. наук. пр. – Чернігів, 2009. – вип.5. – С. 60-63.

9. О мониторинге геодезической сети в ходе строительства вантовых мостов / М.Я. Брынь, А.А. Никитчин, О.П. Сергеев и др. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2009. – вип.1(17). – С.98–102.

10. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М.Я. Брынь, А.А. Никитчин, Е.Г. Толстов и др. // Изв. Петербургского гос. ун-та путей сообщения. – 2009. – №2(19). – С. 120-128.

НИКИТЧИН АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ВАНТОВЫХ
МОСТОВ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ**

Специальность: 25.00.35 – Геоинформатика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать - 19.11.09.	Усл.-печ.л. – 1,5
Печать офсетная.	Бумага для множит. Апп. Формат 60×90 1/16
Тираж 80 экз.	Заказ № 745.

Типография МИИТ, 127994, Москва, вл. Образцова, 15.