

УДК 528 629 783

На правах рукописи

Фролова Елена Константиновна



МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ
СПУТНИКОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

25 00 32 – «Геодезия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2007



Работа выполнена в Сибирской государственной геодезической академии

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Антонович Константин Михайлович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Гуляев Юрий Павлович,
кандидат технических наук, доцент
Толстиков Александр Сергеевич

Ведущая организация – Сибирский научно-исследовательский и
производственный центр геоинформации и
прикладной геодезии (г. Новосибирск)

Защита состоится 25 мая 2007 г в 10 30 час на заседании
диссертационного совета Д 212 251 02 при Сибирской государственной
геодезической академии (СГГА) по адресу 630108, Новосибирск,
ул. Плеханова, 10, СГГА, ауд. 403

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА

Автореферат разослан 24 апреля 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



Середович В А

Изд. лиц. ЛР № от 04 03 1997

Подписано в печать 24 04 2007 Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 0,7 Уч.-изд. л. 0,98 Тираж 100 экз. Зак. 72

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА

630108, Новосибирск, 108, Плеханова 8

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. На протяжении последних 25 лет развития спутниковых радионавигационных систем (СРНС) определения местоположения произошло существенное повышение точности координатных определений. Значительную роль в этом процессе на начальном этапе сыграло совершенствование приемной и передающей аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС, а затем разработка новых алгоритмов обработки наблюдений. Кроме того, на повышение точности спутниковых координатных определений в значительной мере повлияло появление Международной ГНСС службы (МГС). Благодаря ее деятельности, точность эфемерид спутников GPS NAVSTAR сейчас находится на уровне субдециметров. На данный момент основным источником ошибок в наблюдениях ГНСС является атмосфера, физические характеристики которой влияют на скорость и траекторию распространения сигнала.

Для учета влияния среды распространения сигнала (ионосферы и нейтральной атмосферы, в состав которой включают тропосферу и нижнюю часть стратосферы) различными исследовательскими коллективами создано множество моделей. Ионосферная рефракция или почти полностью исключается при измерениях на двух частотах, благодаря использованию комбинации фаз, свободной от влияния ионосферы, или некоторым образом моделируется для одностотных наблюдений.

Учитывать тропосферную рефракцию (как часто называют влияние нейтральной атмосферы) значительно сложнее. Это влияние моделируется лишь на 90 %. Оставшееся часть, приходящаяся на долю паров воды в атмосфере, практически не поддается учету и даёт ошибку в определении дальности до спутника около 20–50 см.

Разработка способов учета тропосферной рефракции является сейчас одним из наиболее перспективных и наукоемких направлений исследования в области повышения точности спутниковых координатных определений. Таким образом, тема данной диссертации является актуальной.

Многие ведущие ученые, например, Бок И, Мишра П и Энг П, считают влияние тропосферы основным источником ошибок при проведении геодезических измерений. Большой вклад в становление и развитие этого направления внесли, например, Найселл А, Херринг Т, Бар-Север Е (США), Айфадис И (Греция), Коллинз П, Лэнгли Р, Мендес В (Канада), Аскне Ж, Нордиус Х, Элгерел Г (Швеция), Тибериус Х, Клейхер Ф (Голландия), Бок О, Доэрфлингер Э (Франция), Костецкая Я М, Торопа И М (Украина), Куштин В И, Галкин Ю С, Ахундов Т А, Стоцкий А А, Стоцкая И М, Антонович К М (Россия).

Степень разработанности проблемы. В течение последних 40 лет мировым сообществом ученых выполнен огромный объем исследований по изучению влияния тропосферы на измерения в микроволновом диапазоне радиоволн. В исследованиях принимали участия такие научные центры, как Университет

им Дж Гопкинса Годдардовский центр космических полетов, Лаборатория реактивного движения, Хайтекская обсерватория (США), Университет Нью-Брунсвика (Канада), обсерватория Онсала (Швеция) и многие другие

Пик развития исследований пришелся на 1985–1995 гг, когда в нашей стране наука испытывала серьезные финансовые трудности, и развитие многих направлений деятельности было приостановлено. С 1996 г в печати появились публикации, посвященные вычислению величины тропосферной задержки (ТЗ) фазовых спутниковых измерений и определений радио интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). Необходимо отметить работы Куштина В И, связанные с вычислениями тропосферного влияния на спутниковые определения. В применении к данным РСДБ, стохастическим моделированием ТЗ занимались сотрудники лаборатории космической геодезии и вращения Земли Института прикладной астрономии. Примерно в это же время на Украине начались активные исследования по моделированию собственно среды (построение локальной модели тропосферы для территории Западной Украины по данным азрологического зондирования) под руководством Костецкой Я М. Этим исследованиям посвящена кандидатская диссертация Торопы И М.

В итоге можно сказать, что рассматриваемая задача очень хорошо разработана зарубежными специалистами, но российские исследователи пока не преодолели десятилетнее отставание. Опубликованные отечественные работы посвящены, главным образом, использованию уже существующих методик.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось повышение точности учета тропосферы при обработке спутниковых координатных определений коммерческими программными продуктами, за счет разработки методики использования дополнительной информации о физических характеристиках среды распространения сигналов. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1 Оценка величины ошибок (особенно систематического характера), возникающих из-за тропосферной рефракции при выполнении спутниковых наблюдений в условиях Западной Сибири

2 Сравнение существующих в коммерческом программном обеспечении алгоритмов вычисления ТЗ и выбор из них оптимально соответствующего использованию при высокоточных спутниковых координатных определениях

3 Разработка способа учета тропосферной рефракции, основанного на современном уровне программно-аппаратного обеспечения и развития инфраструктуры СРНС и обеспечивающего миллиметровый уровень точности определения тропосферной зенитной задержки (ЗТЗ)

4 Разработка рекомендаций по учету тропосферной рефракции в равнинной местности

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является методика учета влияния слоя нейтральной атмосферы на распространение микроволновых сигналов СРНС NAVSTAR, повышающая качество вычисления базовых векторов при построении высокоточных спутниковых сетей

Предметом исследования является повышение точности определения ко-

ординат путем более корректного учета тропосферной рефракции

Теоретическая и методологическая база исследования. В процессе выполнения данной работы автором были использованы математический анализ, теория статистики, теория математической обработки геодезических измерений, теория распространения радиоволн в атмосфере, физика атмосферы

Информационная база исследования. В работе использованы архивы МГС, содержащие файлы спутниковых наблюдений станций сети МГС, точные эфемериды спутников, файлы метеорологических параметров и оцененных ТЗ, архивы Новосибирского гидрометеорологического центра, данные спутниковых измерений выполненных в СГГА при непосредственном участии автора, материалы Российской электронной библиотеки, хранящей публикации многих зарубежных геодезических изданий (таких, как «Journal of Geodesy», «GPS Solutions», «Manuscripta Geodaetica»), а также публикации в периодических изданиях «IERS Technical Notes» и «JPL Technical Report», журналах «Journal of Geophysical Research», «Radio Science», «Earth, space, planets» и других

Научная новизна.

1 Оценено влияние различных известных методик учета тропосферной рефракции на точность построения геодезической сети

2 Разработан способ выполнения коррекции спутниковых наблюдений (псевдодальностей и фаз) за влияние тропосферной рефракции

Теоретическая значимость. Выполнен обзор моделей вычисления ТЗ, способов получения метеорологической информации, и отмечены тенденции развития исследований в данной области. Приведены алгоритмы некоторых рассмотренных моделей, и указаны их ограничения

Дана критическая оценка существующих способов тропосферной коррекции и рекомендации по созданию и наблюдению высокоточных спутниковых сетей

Практическая значимость. Благодаря предложенной автором комплексной методике учета влияния тропосферной рефракции, появилась возможность более точно обрабатывать спутниковые координатные определения штатным программным обеспечением (без привлечения дорогостоящих научных программ)

Разработаны рекомендации по проектированию высокоточных спутниковых сетей и проведению наблюдений на пунктах, которые позволяют с большей достоверностью получать высоты станций

На защиту выносятся следующие основные положения

1 Оценка величины влияния тропосферы на точность параметров геодезических сетей в условиях Западной Сибири

2 Методика оценивания ТЗ и ее влияния на координаты, заключающаяся в разработке алгоритма программы позволяющей проводить вычисления тропосферной задержки по любым моделям и корректировке данных наблюдений

3 Низкозатратная методика учета ТЗ при построении высокоточных геодезических сетей, сопоставляя по точности с дорогими методами моделирования или измерений с дорогими приборами

Основные результаты исследования (реализация). Создан пакет программ, вычисляющих значения ТЗ по данным наземных метеорологических наблюдений, аэрологического зондирования и ЗТЗ, оцененных из спутниковых наблюдений

Получены уточненные координаты пунктов эталонного геодезического полигона СГГА (ПГЭ СГГА)

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты работы докладывались на LI научно-технической конференции преподавателей СГГА «Современные проблемы геодезии и оптики», Новосибирск, 16–19 апреля 2001 г., научно-технической конференции «Проблемы метрологического обеспечения топографо-геодезического производства и землеустроительных работ», Новосибирск, 17–21 декабря 2001 г., LIH международной научно-технической конференции «Современные проблемы геодезии и оптики», посвященной 70-летию СГГА, Новосибирск, 17–21 марта 2003 г., 7-й международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004, Новосибирск, 21–24 сентября 2004 г., международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2005», Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г., международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2006», Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.

Публикации (по теме диссертации).

Опубликованы 3 тезиса докладов, 8 научных статей, из них 4 – в сборниках материалов международных научно-технических конференций и 1 – в рецензируемом издании, рекомендованном ВАК

Структура работы.

Основной текст диссертации изложен на 146 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц и 13 рисунков, состоит из введения, четырех глав, заключения, 14 приложений, библиография содержит 125 источников, 87 из которых – на иностранных языках.

Во введении рассмотрены основные тенденции развития спутниковых технологий, отмечено повышенное внимание Роскартографии к созданию высокоточной единой геоцентрической системы координат на территорию РФ, показаны основные этапы повышения точности и источники достижения этих улучшений. Показано, что влияние тропосферы является основным источником ошибок при проведении геодезических измерений, и необходимость адекватного учета ТЗ при проведении высокоточных геодезических работ является актуальной.

В главе 1 «Основы теории позиционирования по сигналам СРНС» приведены теоретические основы спутниковых наблюдений, рассмотрены основные методики позиционирования и факторы, влияющие на точность определения местоположения. Особое внимание уделено влиянию среды распространения сигналов, существенно ограничивающей достижимую точность геодезических измерений. Указаны основные аппаратные и программные способы исключения или уменьшения влияний этих факторов.

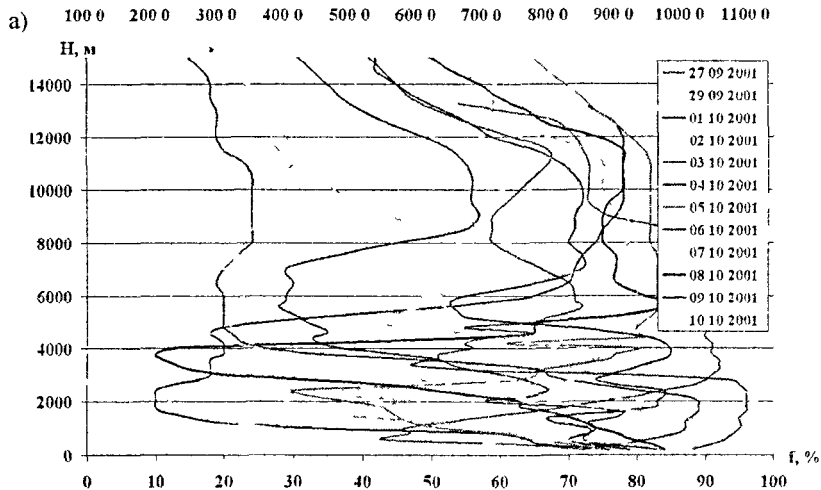
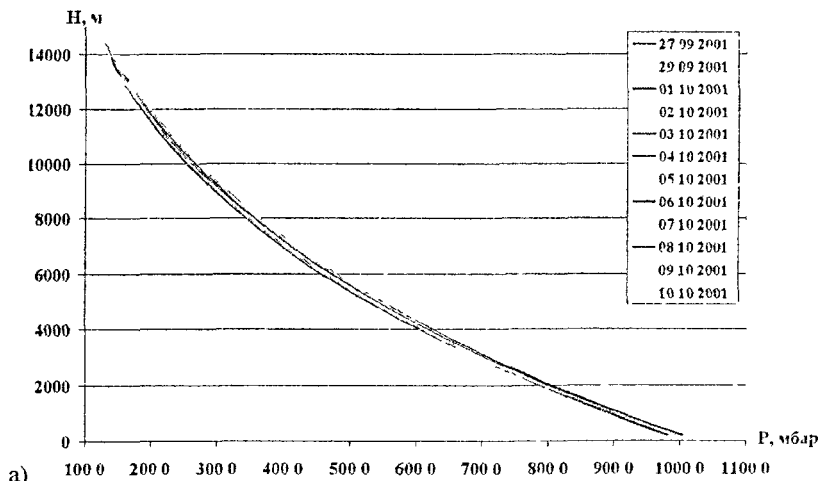
Величина влияния нейтральной атмосферы на спутниковые координатные

определения зависит от метода позиционирования. Одним из наиболее простых методов является математическое вычисление величины ТЗ, основанное на стандартных представлениях о строении и свойствах атмосферы.

В главе 2 «Учет влияния нейтральной атмосферы» сделан обзор основных направлений и этапов исследований тропосферной рефракции, особенностей распространения микроволновых спутниковых сигналов в нерассеивающей среде, указаны основные физические параметры тропосферы, влияющие на наблюдения: их распределение и методики определения. Кроме того, описаны алгоритмы вычисления ТЗ и проведено их сравнение, на примере программы обработки спутниковых наблюдений Trimble Geomatics Office (TGO).

Для выявления влияния тропосферной рефракции на спутниковые сигналы результаты обработки однократных спутниковых координатных определений сравниваются с координатами, полученными из уравнивания многолетних наблюдений. Эти наблюдения сделаны при разных условиях и в разные периоды времени и поэтому могут считаться независимыми. Известно, что в уравненных координатах влияния систематических ошибок, обусловленных различными факторами, значительно ниже, и поэтому координаты можно считать эталонными. Сравнение с ними будет давать представление о точности однократных определений по внешней сходимости.

Тропосферную задержку принято разделять на два компонента: гидростатический и влажный. Гидростатический, вызванный газами, находящимися в состоянии гидростатического равновесия (составляет примерно 90 % от величины ТЗ, то есть около 2,3 м), пропорционален поверхностному давлению. Влажный компонент ТЗ (значение обычно менее 30 см) примерно пропорционален количеству паров воды. Проблема нахождения влажной ТЗ состоит в том, что распределение паров воды в приземном слое атмосферы зависит от ветра, рельефа местности, локальной температуры и множества других факторов так, что ее моделирование ограничивается точностью 10 мм. Сложность моделирования влажного компонента ТЗ, в сравнении с гидростатическим, видна из рисунка 1, где приведены профили распределения физических характеристик давления и относительной влажности с высотой.



а) давление, б) относительная влажность воздуха

Рисунок 1 – Профили распределения атмосферных параметров по результатам аэрологического зондирования за двухнедельный период

Исследования способов учета тропосферной рефракции развиваются по трем основным направлениям

1 – эмпирическое моделирование, основанное на осреднении накопленных статистических данных о распределении параметров нейтральной атмосферы и выявленных в результате закономерностях,

2 – стохастическое моделирование, в котором основная часть влияния исключается при помощи эмпирической модели, немоделируемый остаток описывают при помощи статистических законов,

3 – привлечение независимой информации для оценивания величины ТЗ

Эмпирические модели достоверно описывают гидростатическую составляющую ТЗ, но плохо подходят для учета влияния влажной ее части. Эту задачу гораздо лучше решают градиентные и стохастические модели, опирающиеся на дистанционные методы определения параметров атмосферы.

Сравнение алгоритмов вычисления ТЗ в ТГО проводилось на основании результатов обработки спутниковых наблюдений станций МГС, расположенных на территории России: Арги, Бишкек, Красноярск, Иркутск, а также постоянно действующей станции Новосибирск-Северный, входящей в состав Геодезического эталонного полигона СГГА (ПГЭ СГГА).

По результатам сравнения рекомендуется использовать для обработки спутниковых координатных определений маску угловой высоты 13° , не менее чем часовой интервал оценивания ЗТЗ и алгоритм вычисления ТЗ Найепла (или Блэка).

В главе 3 «Способы получения метеорологической информации» описаны возможности привлечения независимых измерений для вычисления ТЗ спутниковых координатных определений. В этой главе также оценены возможности применения всех описанных методик в точных геодезических построениях для учета влияния тропосферной рефракции.

Существуют три основных способа получения независимой информации о строении атмосферы:

- контактный (наземная метеорология и аэрологическое зондирование),
- дистанционный (лидарные и радиометрические измерения),
- смешанный (цифровые модели погоды и оценивание из GPS-наблюдений).

Локальные стандартные модели атмосферы, построенные по данным наземной метеорологии, должны лучше отражать влияние тропосферы на спутниковые измерения, чем глобальная стандартная модель. Это утверждение проверено обработкой спутниковых наблюдений опытной сети TestNet, сопровождавшихся наземными метеорологическими наблюдениями. В проведенных наблюдениях автор принимала непосредственное участие.

Полученные результаты не показывают преимуществ использования реальных метеорологических параметров, измеренных с помощью барометров и психрометров. Это связано с использованием механических метеоприборов, которые не отвечают современным требованиям к точности определения метеорологических параметров: ошибка фиксирования температуры не должна превышать $0,10^\circ\text{C}$, давления – $0,10$ мбар, а влажности – $1\text{--}2\%$. Таким требованиям удовлетворяют, например, автоматические метеосенсоры Met3A корпорации Paroscientific (США). Рекомендации по использованию таких приборов следует включить в нормативные документы по созданию геодезических построений высокой точности.

Несмотря на недостоверность отражения состояния атмосферы над станцией наблюдений, результаты наземной метеорологии позволяют с достаточной точностью вычислять гидростатическую составляющую ТЗ. Если для определения влажной составляющей будет привлечен другой метод, например, аэрологическое или радиометрическое зондирование, то использование локальных моделей атмосферы можно рекомендовать для применения при построении точных геодезических сетей.

По оценкам исследователей, метод вычисления ТЗ по наблюдениям радиозондов, радиометров водяных паров или лидаров способен обеспечивать миллиметровую точность учета тропосферной рефракции. Однако на данном этапе практическая точность всех этих методик требует дополнительных исследований. Кроме того, для всех перечисленных методов необходимы дорогостоящая аппаратура на станции, развитая инфраструктура и научное ПО для обработки спутниковых наблюдений. Такие капиталовложения возможны лишь в рамках федеральных научно-исследовательских проектов или научных центров. Поэтому пока эти методики можно рекомендовать для задач точной геодезии только потенциально.

Использование цифровых моделей погоды для определения параметров тропосферы в задачах геодезии получает все более широкое распространение в США и странах ЕС. Применение этого метода в России пока затруднительно из-за недостаточной открытости архивов региональных гидрометеорологических центров и отсутствия доступной информации по краткосрочным прогнозам погоды.

Таким образом, для высокоточных геодезических работ (10^{-7} – 10^{-8}) наиболее перспективным способом учета влияния тропосферной рефракции является оценивание величины ЗТЗ из наблюдений GPS. Этот способ не требует дополнительного оборудования на пунктах спутниковых координатных определений, что является несомненным достоинством.

Глава 4 «Методика коррекции спутниковых наблюдений поправками за тропосферную рефракцию» описывает разработанную автором данной работы методику, позволяющую применять дополнительную информацию о физических характеристиках тропосферы для вычисления поправки в спутниковые координатные определения, и результаты ее применения к реальным наблюдениям. Методика названа комбинированной.

Основой разработанной методики является возможность представлять спутниковые наблюдения в формате RINEX. Этот ASCII формат имеет общедоступное описание и позволяет корректно оперировать псевдодальностями и фазами, вычисленными спутниковым приемником по сигналам СРНС. Эти величины в файле наблюдений проходят только первичную обработку (формирование сигналов ошибок следящих систем, демодуляция символов навигационного сообщения, оценка соотношения «сигнал – шум»), поэтому нет опасности дублирующего моделирования.

Вычислив (любым из доступных способов) ТЗ на пункте, можно вводить ее в наблюдения и передавать скорректированные файлы в TGO в качестве «сы-

рых» наблюдении (рисунок 2) При этом, чтобы избежать повторной коррекции, встроенное в TGO исправление тропосферы следует отключать

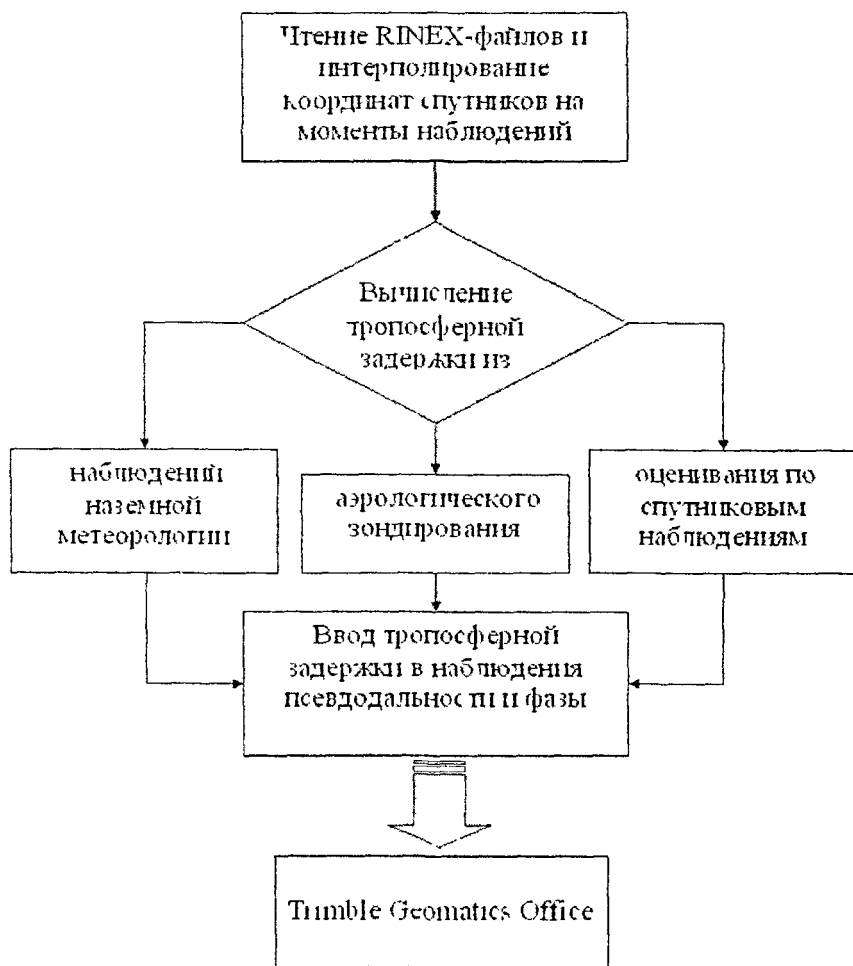


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема комбинированной методики учета тропосферной рефракции

Таким образом, появляется возможность комбинировать внешние (дополнительные) данные о параметрах реальной тропосферы, алгоритмы вычисления ТЗ и обработку спутниковых координатных определений. Предложенная методика была опробована на реальных спутниковых наблюдениях с разными до-

полнительными данными

Наблюдения опытной сети TestNet были исправлены по комбинированной методике с привлечением данных аэрологического зондирования и обработки. Применение данных аэрологического зондирования атмосферы не дало ожидаемого улучшения точности спутниковых координатных определений. Причины этого очевидны: чрезвычайная разреженность сети аэрологических станций Сибирского региона, непродолжительный интервал фиксирования зондом метеорологических элементов (время полета около 2 часов), сложность получения и предварительной обработки данных зондирования.

Таким образом, нельзя рекомендовать непосредственное применение аэрологической информации для корректирования тропосферной рефракции в спутниковых координатных определениях. Однако, эти данные могут успешно использоваться для построения, исследования и уточнения моделей локальной тропосферы над станциями спутниковых наблюдений и даже районами, охватываемыми этим видом метеонаблюдений.

Оценивание величины ЗТЗ из наблюдений GPS уже признано наиболее перспективным и точным способом получения информации о тропосфере. Некоторые станции МГС, в том числе и станции, расположенные в Новосибирске (NOVJ и NVSK), уже несколько лет публикуют файлы оцененных ЗТЗ.

Использование комбинированной методики учета ТЗ, с применением файлов ЗТЗ, при передаче координат от станций МГС Арти, Иркутск, Бишкек и Норильск на пункт NVSK, позволило ощутимо улучшить результаты. Около 70 % решений увереннее прошли критерий Фишера, что для векторов длиной около 1 500 км является важным показателем качества и достоверности решения. В некоторых случаях комбинированная методика позволяет получить фиксированное решение тогда, когда «обычная» обработка дает плавающее. Точность вычисления высоты станции NVSK по комбинированной методике несколько лучше, чем по «обычной» методике (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение точности координат станции NVSK, полученных по «обычной» и комбинированной методикам

Методика	m_N	m_E	m_H
«Обычная»	0,001	0,026	0,025
Комбинированная	0,001	0,029	0,020

Следует отметить, что ошибка долготной составляющей координатных спутниковых определений, m_E , связана с тангенциальной составляющей ошибки определения орбит спутников, особенно в области вертекса. Учитывая, что два базовых вектора из четырех, вычисляемых при передаче координат станции NVSK, имеют почти строго долготное простигание, закономерно, что величина m_E значительно больше широтной составляющей m_N .

Сверхдлинные базовые линии не являются характерными для задач точной

геодезии (создание опорных сетей и геодинамических полигонов), поэтому разработанная методика была применена для коррекции одного из циклов наблюдений ПГЭ СГГА

Значения ЗТЗ, оцененные из наблюдений станции NOVJ и опубликованные в Интернет, были экстраполированы на наблюдения станций ПГЭ СГГА (расстояния от 5,5 до 41,5 км и превышения до 52 м) Использование этих значений ЗТЗ с помощью комбинированной методики для коррекции тропосферной рефракции позволило значительно повысить точность вычисления высоты станций и практически не сказалось на длине базовых линий (таблица 2)

Таблица 2 – Сравнение точности результатов применения «обычной» и комбинированной методик

Станция	m_D		m_H	
	«обычная»	комбинированная	«обычная»	комбинированная
TECO	0,008	0,005	0,011	0,001
KRSN	0,006	0,006	0,009	0,001
BIGS	0,002	0,002	0,017	0,025
SIIEP	0,007	0,005	0,020	0,002
POL2	0,004	0,001	0,011	0,002

На основании проведенных расчетов можно утверждать, что не менее чем 50 % решений, полученных с использованием комбинированной методики, имеют улучшение определения высоты из спутниковых наблюдений Это относится к линиям разной длины – от малых (до 5 км), средних (13–15 км) и длинных (35–40 км) до сверхдлинных (около 1 500 км)

Как показали проведенные эксперименты, комбинированная методика учета влияния тропосферной рефракции вполне применима при обработке спутниковых координатных определений Возможность использования широкого набора алгоритмов коррекции и дополнительных исходных данных для них делает ее перспективным средством повышения точности геодезических сетей

Разработанный в рамках комбинированной методики обработки спутниковых координатных определений комплекс программ пока весьма чувствителен к составу исходных данных и требует существенных затрат при их подготовке В случае подключения к работе готовых модулей чтения файлов «сырых» спутниковых данных и интерполирования орбит спутников на эпохи измерений или оптимизации разработанных программ, время вычислений значительно уменьшается В любом случае, пакет программ коррекции тропосферной задержки с использованием продуктов МГС существенно легче в использовании, нежели наземные метеорологические измерения на пункте и привлечение данных аэрологического зондирования

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по учету тропосферной рефракции при выполнении высокоточных геодезических

работ.

- 1 При обработке спутниковых координатных определений в программном комплексе ТГО не следует использовать маски отсечки угловых высот ниже 10–13°. Интервал оценивания зенитных тропосферных задержек следует устанавливать равным 1 часу. Несколько лучшие результаты по сравнению с остальными дают алгоритмы Бизка и Найелла.
- 2 При обработке коротких базовых линий с малыми разностями высот следует использовать измеренные метеоданные только базовой станции. Значения температуры, давления и влажности для мобильной станции лучше вычислять, используя градиенты из стандартных атмосферных моделей. Для разностей высот, меньше чем 100 м, ошибки такой модели обычно немного меньше чем ошибки инструментов или влияние приземных инверсий.
- 3 При использовании дополнительных данных о строении атмосферы вычисление ТЗ рекомендуется производить по алгоритму Херринга с функцией отображения Айфадиса или Найелла. Функция Найелла предпочтительнее, так как она имеет коэффициенты для вычисления как смешанной тропосферной задержки, так и разделенной на гидростатический и влажный компоненты.
4. При создании высокоточных геодезических сетей спутниковые координатные определения следует дополнять измерениями метеорологических параметров только при условии использования автоматических метеосенсоров. Эти данные можно использовать для определения гидростатического компонента тропосферной задержки. Для определения влажного компонента следует привлекать градиентные или стохастические модели и дополнительную информацию (например, радиометрическое зондирование).

Заключение В результате выполненных исследований разработана методика учета влияния тропосферной рефракции на результаты спутниковых координатных определений. Применение разработанной методики для обработки реальных данных показало ее корректность и эффективность.

В настоящее время, в связи с трудностями в приобретении дорогостоящих приборов (радиометров водяных паров, лидаров) и научного программного обеспечения, разработанный алгоритм является оптимальным средством учета влияния тропосферной рефракции на спутниковые наблюдения. В случае приобретения современных программно-аппаратных комплексов (автоматических метеостанций или ПО с доступными исходными кодами, типа GAMIT) данную разработку можно будет объединять с ними для выполнения дальнейших поисковых исследований в области учета влияния внешней среды.

Результаты, связанные с вычислением ТЗ по данным наземной метеорологии, аэрологии и оцененных из спутниковых наблюдений ЗТЗ, в дальнейшем могут быть использованы при создании цифровой модели погоды на территории Новосибирской области. Цифровая модель погоды в комплексе с постоян-

но действующей в СГГА базовой станцией спутниковых наблюдений позволит на более высоком уровне реализовать режим измерений в реальном времени на территории Новосибирска и его окрестностей

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ,
отражающих основное содержание диссертации

- 1 Антонович, КМ О моделировании тропосферы при GPS-измерениях [Текст] / КМ Антонович, ЕК Фролова // Вестник СГГА – 2002 – Вып 7 – С 9 – 15
- 2 Фролова, ЕК Эволюция моделей тропосферной задержки для GPS-измерений [Текст] / ЕК Фролова // Материалы III международной научно-техн. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики», посвященной 70-летию СГГА Новосибирск, 17–21 марта 2003 г Ч III, Новосибирск СГГА, 2003 – С 203 – 205
- 3 Антонович, КМ Совместное использование метеоданных наземных и аэрологических наблюдений при обработке спутниковых измерений [Текст] / КМ Антонович, ЕК Фролова // Вестник СГГА – 2003 – Вып 8 – С 8 – 13
- 4 Антонович, КМ Эталонный пространственный полигон СГГА аттестация 2004 [Текст] / КМ Антонович, ЮВ Сурнин, АН Клепиков, ЕК Фролова // Материалы 7-й междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004, Новосибирск, 21–24 сент. 2004 Т 3 Новосибирск НГТУ, 2004 – С 259 – 262
- 5 Фролова, ЕК Современные модели тропосферных поправок микроволновых спутниковых измерений [Текст] / ЕК Фролова // Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии Вып 1 – Новосибирск СГГА, 2004 – С 111 – 116
- 6 Фролова, ЕК Использование тропосферных зенитных задержек для учета рефракции при обработке GPS-наблюдений [Текст] / ЕК Фролова // Материалы междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2005», Новосибирск, 25–29 апр. 2005 г Том 5 Новосибирск СГГА, 2005 – С 158 – 162
- 7 Антонович, КМ Обзор современных методов получения метеорологической информации для использования в ГНСС [Текст] / КМ Антонович, ЕК Фролова // Материалы междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», Новосибирск, 24–28 апр. 2006 г Т 1 Ч 2 Новосибирск СГГА, 2006 – С 70 – 75
- 8 Фролова, ЕК Учет тропосферной рефракции при определении местоположения по сигналам ГНСС [Текст] / ЕК Фролова // Известия вузов Горный журнал – 2007 г – № 2 – С 48 – 52