

На правах рукописи

ФАМ ХОАНГ ЛОНГ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ
ПРИ GPS - ИЗМЕРЕНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ВЬЕТНАМА**

Специальность: 25.00.32 – «Геодезия»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК).

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Голубев Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: Кафтан Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор
Геофизический центр Российской
академии наук,
профессор

Поляков Владимир Тимофеевич
кандидат технических наук, доцент
Российский Новый университет, кафедра
телекоммуникаций и средств связи,
профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»).

Защита диссертации состоится « » июня 2014 года в часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4 (Зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии, и на сайте:

http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionyy_sovet/zasedaniya/

Автореферат разослан « » 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вшивкова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Обоснование актуальности темы диссертации

Распространяясь сквозь атмосферную оболочку Земли, спутниковые сигналы подвергаются присущему радиоволнам воздействию со стороны ионосферных частиц, наиболее заметно проявленному в ионосферной задержке. Для ограничения такого рода негативного влияния внешних факторов с целью повышения точности и эффективности спутникового позиционирования были предложены различные мероприятия и способы, такие как использование двухчастотных приёмников, создание станций ионосферного наблюдения и т. д. В действительности же не все выпускаемые приёмники являются двухчастотными и не все потребители нуждаются в них. До сих пор не во всех частях земного шара имеется достаточно густая сеть станций слежения за ионосферой, тем более не в любой момент времени получают от неё требуемые данные, и не в каждом государстве есть подобная служба или хотя бы одна – две такие специфические станции. В этом отношении Вьетнам не является исключением.

Таким образом, возникла объективная необходимость в разработке методики автономного учёта влияния ионосферы для повышения эффективности спутникового относительного позиционирования как одночастотными, так и двухчастотными приёмниками во Вьетнаме.

Цель и основные задачи исследований

Основной целью данной диссертационной работы является разработка методики автономного учёта влияния ионосферы на основе использования измерений отдельным двухчастотным приёмником для повышения эффективности относительного позиционирования системой GPS на территории Вьетнама.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Анализ и оценка возможности применения существующих моделей ТЕС (*Total Electron Content*) для учёта ионосферной задержки спутниковых сигналов в условиях Вьетнама.
2. Анализ и оценка существующих приближённых формул для расчёта ТЕС.
3. Устранение влияния межчастотного отклонения в аппаратуре приёмника на оценку ионосферных задержек.

4. Оценка и учёт влияния многолучевой составляющей погрешности кодовых псевдодальностей на вторую разность ионосферных задержек .
5. Разработка методики и создание соответствующего математического обеспечения автономного учета влияния ионосферы на основе использования измерений отдельными двухчастотными приемниками.
6. Проведение экспериментов по практической реализации разработанной методики.

Научная новизна работы

1. Обоснована правомерность и достаточность применения существующих приближённых формул для расчёта ТЕС.
2. Предложен способ исключения влияния межчастотных отклонений в приемнике на задержку сигнала в ионосфере.
3. Разработана методика автономного учета влияния ионосферы на основе использования измерений отдельным двухчастотным приемником как рациональное решение для повышения эффективности относительного позиционирования системой GPS в условиях отсутствия сети ионосферных станций.

Практическая значимость работы

Из результатов исследования диссертации следует, что спутниковое относительное позиционирование может быть осуществлено одночастотными приёмниками с точностью порядка сантиметров при длине базовых линий до 50 км, а в случае использования двухчастотных приёмников для базовых линий от 20 км до 80 км при точности не хуже 5 см время записи данных может быть сокращено до 60 минут.

На защиту выносятся:

1. Обоснование неприменимости существующих моделей ТЕС для обеспечения требуемой для целей геодезии точности при спутниковых измерениях на территории Вьетнама.
2. Точные формулы для расчета ТЕС, на основе которых доказывается правомерность и достаточность применения существующих приближенных формул.
3. Методика практически автономного восстановления карты ионосферы по измерениям отдельным двухчастотным приемником в условиях отсутствия сети ионосферных станций.

4. Методика определения ТЕС по двухчастотным измерениям с коррекцией многолучевой составляющей погрешности.
5. Экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенной методики учета влияния ионосферы.

Вклад автора в проведенное исследование

Все результаты диссертационной работы получены её автором самостоятельно с учетом международного опыта подобных работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов основного текста и заключения. Содержит 141 страницы машинописного текста, 15 таблиц, 44 рисунка. Список литературы включает 36 наименований печатных литературных источников, а также ресурсы Internet.

Апробация результатов работы

Основные результаты по теме диссертации докладывались на научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 3 апреля 2012. Основное содержание диссертации опубликовано в 2-х статьях, в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация подготовлена в период с 2009 по 2013 гг. на кафедре Высшей геодезии МИИГАиК.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется основная задача исследования, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость работы и основные результаты исследований.

В первом разделе приведены основные сведения об ионосфере и ее влиянии на эффективность позиционирования системой GPS.

Во втором разделе «Использование системы GPS для исследования ионосферы» рассмотрены существующие методики расчета ТЕС по данным системы GPS и моделирования ионосферной задержки с помощью однослойной модели ионосферы. Из анализа опубликованных работ и результатов, полученных при экспериментальных исследованиях во

Вьетнаме, выполнена оценка возможности применения существующих моделей для коррекции ионосферной задержки во Вьетнаме. Из полученных результатов можно сделать вывод, что применение существующих моделей ионосферы для коррекции ионосферной задержки во многих практических приложениях, особенно в геодезических задачах, в которых содержатся наиболее строгие требования к точности позиционирования, является недостаточным для территории Вьетнама. Таким образом, необходима разработка методики, обеспечивающей достоверное и оперативное моделирование ионосферы с использованием сигналов рассеянной сети приемных станций, расположенных на территории Вьетнама. Для рассеянной сети приемных станций использование измерений отдельным двухчастотным приемником для построения локальной модели ионосферы является подходящим средством. Если применить существующий метод *определения величины TEC*, суть которого заключается в том, что после устранения фазовых «слипов» выполняется фильтрация (сглаживание) значений TEC, вычисленных по кодовым измерениям, с использованием значений TEC, вычисленных по фазовым измерениям, то *главным препятствием к восстановлению ионосферной модели на основе измерений одной станции, не входящей в состав сетей IGS (International GNSS Service)*, является *недостаточно точная оценка межчастотных отклонений для псевдодальностей на P_1 и P_2 кодах, называющихся DCBs (от англ. Differential Code Biases) в аппаратуре приемника*. Кроме того, по существующим методикам расчета TEC по данным системы GPS *не выполняется оценка многолучевой составляющей погрешности кодовых псевдодальностей*. Для того чтобы получить более точные значения TEC и разности TEC между спутниками, необходимо точно определить такие погрешности.

В третьем разделе «Методика учета влияния ионосферы при GPS - измерениях на территории Вьетнама» предложена методика, с помощью которой можно повысить эффективность относительного позиционирования приемниками GPS за счет учета влияния ионосферы для условий Вьетнама.

1. Оценка возможности применения приближенных формул для расчета TEC базируется на полученных автором более точных аналитических интегральных соотношениях для ионосферных задержек сигнала. Полученные результаты показывают, что разность линейных задержек группового сигнала в ионосфере, вычисленных по более точной и существующей формулам, составляет не более 1,4 мм (во время геомагнитной бури 15-ого октября 2001-ого года) и не более 0,2 мм в

магнитоспокойные дни 2009-ого года. Эти отклонения вызывают соответствующую погрешность определения значений VTEC примерно 0,0086 (TECU)/105,5 (TECU) на рабочей частоте L1 и 0,0052 (TECU)/105,5 (TECU) на частоте L2 соответственно. А разница между абсолютными значениями ионосферных задержек группового и фазового сигналов не превышала 1 мм, т.е. незначительна. Таким образом, доказано, что использование приближенных формул для определения значений TEC на основе GPS-измерений вполне удовлетворяет требуемой точности в задачах исследования ионосферы в общем и в задачах повышения точности позиционирования системами GPS и ГЛОНАСС, которые широко используются в геодезических работах, за счет учета влияния ионосферы в частности.

2. Устранение влияния межчастотного отклонения в приемнике на оценку ионосферной задержки

При использовании системы GPS значение TEC может быть оценено из представления комбинации разностей измерений по существующей методике в виде:

$$TEC_{comb}(t) = TEC_L(t) - \frac{\sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} p_k [TEC_L(k) - TEC_P(k)]}{\sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} p_k}, \quad (1)$$

где: $t = 1, 2, \dots, n$; n – количество временных отсчетов; $p_k = \frac{1}{k^2}$,

$TEC_L(t)$, $TEC_P(t)$ – значения TEC, вычисленные по фазовым измерениям и по кодовым измерениям, соответственно.

С учетом составляющей погрешности кодовых псевдодалностей формулу (1) можно переписать в следующем виде

$$TEC_A^j{}_{comb}(t) = \overline{TEC_A^j}(t) + DCB^j + DCB_A + m_{Ap}^j, \quad (2)$$

где $t = \overline{1, M}$ – M : количество отсчетов в течение выборки данных; $j = \overline{1, S}$ – S : количество наблюдаемых спутников в течение M ; DCB^j – межчастотное отклонение в j -ом спутнике; DCB_A – межчастотное отклонение в приемнике в точке A ; m_{Ap}^j – многолучевая составляющая погрешности кодовых псевдодалностей пары j -ого спутника и приемника в точке A .

В формуле (2), если межчастотное отклонение в аппаратуре спутника считается известной константой и может быть взято из услуги IGS через Интернет, то влияние межчастотного отклонения в аппаратуре приемника на оценку ионосферной задержки можно устранить путем использования разностей значений TEC_{comb} между спутниками вместо

комбинации TEC_{comb} в качестве входных данных при моделировании ионосферы:

$$\Delta TEC^{j-i}(t) = TEC_{comb}^j(t) - TEC_{comb}^i(t), \quad (3)$$

$$\Delta \overline{TEC}^{j-i}(t) = [\overline{TEC}_A^j(t) - \overline{TEC}_A^i(t)] + [m_{Ap}^j - m_{Ap}^i], \quad (4)$$

где:
$$\Delta \overline{TEC}^{j-i}(t) = \Delta TEC^{j-i}(t) - [DCB^j - DCB^i]. \quad (5)$$

3. Оценка влияния многолучевой составляющей погрешности на вторую разность ионосферных задержек

Компенсация влияния ионосферы в одночастотных приемниках при относительном позиционировании не требует оценки абсолютного значения ионосферных задержек сигнала спутников, а только требует их разностей между спутниками. Вторую разность значений ТЕС можно записать в виде

$$\overline{TEC}_{AB}^{ji}(t) = [TEC_{comb}^j(t) - TEC_{comb}^i(t)] - [TEC_{comb}^j(t) - TEC_{comb}^i(t)] - [m_{Bp}^j - m_{Bp}^i] - [m_{Ap}^j - m_{Ap}^i]. \quad (6)$$

Как видно из (6), чем точнее будут определены величины $[m_{Bp}^j - m_{Bp}^i]$ и $[m_{Ap}^j - m_{Ap}^i]$, тем точнее будет оценена разность \overline{TEC}_{AB}^{ji} .

Если использовать соотношение (2), то оценка значений m_{Bp}^j и m_{Bp}^i , m_{Ap}^j и m_{Ap}^i не будет простой задачей, поскольку будет трудно определить значения этих параметров отдельно от значений DCB в аппаратуре спутника и в аппаратуре приёмника.

Поставленную задачу можно решить также с помощью использования разностей значений TEC_{comb} между спутниками.

В одностанционном варианте для восстановления ТЕС над станцией используется локальная модель для суточной вариации в виде разложения Тэйлора по широте и долготе. Для однослойной модели ионосферы получим:

$$\Delta \overline{TEC}^{j-i}(t) = \left[M(\gamma_A^j(t)) \cdot \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (\beta_A^j(t) - \beta_A)^n (s_A^j(t) - s_A)^m - M(\gamma_A^i(t)) \cdot \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (\beta_A^i(t) - \beta_A)^n (s_A^i(t) - s_A)^m \right] + [m_{Ap}^j - m_{Ap}^i], \quad (7)$$

где: $M(\gamma(t))$ - функция пересчета вертикальной ионосферной задержки в наклонную; $\gamma(t)$ - угол места спутника; n_{max}, m_{max} - максимальная степень коэффициентов в разложении Тэйлора ТЕС ионосферы; E_{nm} - (неизвестные) коэффициенты в разложении Тэйлора ТЕС ионосферы, то есть параметры локальной ионосферной модели, которые должны быть оценены; $-\beta_A, s_A$ -

широта и долгота точки, где расположен приемник; β_A^j, S_A^j - широта и долгота подионосферной точки.

Опираясь на решение системы уравнений (7), можно оценить значения $\Delta m_{Ap}^{(ji)} = m_{Ap}^j - m_{Ap}^i$ наряду со значениями коэффициентов E_{nm} . Для этого сначала необходимо выбрать подходящую модель для описания пространственного распределения VTEC (от англ. Vertical TEC).

4. Выбор модели для восстановления локальной карты ионосферы

С целью выбора модели, на которой можно достаточно хорошо описать пространственное распределение VTEC, было выполнено восстановление локальной карты ионосферы с помощью соотношения (7) без учета влияния $\Delta m_{Ap}^{(ji)}$ в трех вариантах: Вариант (1): $n_{max} = m_{max} = 1$; Вариант (2): $n_{max} = m_{max} = 2$; Вариант (3): $n_{max} = m_{max} = 3$. Для этого использовались значения VTEC (вертикальный TEC), интерполированные из GIM карты IGS, из которых были восстановлены локальные карты ионосферы двумя подходами: 1) по значениям VTEC, интерполированным в узлах локальной карты ионосферы; 2) по значениям VTEC, интерполированным в ионосферных точках для определения значений наклонного TEC вдоль трассы от спутника до приёмника и на основе решения системы уравнений (7) для оценки значения коэффициентов E_{nm} . Локальная карта ионосферы, полученная подходом (1), рассматривается как эталонная. Выбор подходящей модели базируется на сравнении результатов, полученных из подхода (2), с результатом, полученным подходом (1). Полученные результаты показывают, что при помощи полинома 2^й степени локальная карта ионосферы может быть восстановлена с меньшей ошибкой (с максимумом 0.3 TECU по величине) по сравнению с моделями варианта (1) и варианта (3) - 3 TECU и 0.8 TECU по величине, соответственно (см. рис. 1). В соответствии с этим можно сделать вывод, что с помощью полинома 2^й степени достаточно хорошо описать пространственное распределение VTEC при восстановлении локальной карты ионосферы над территорией Вьетнама.

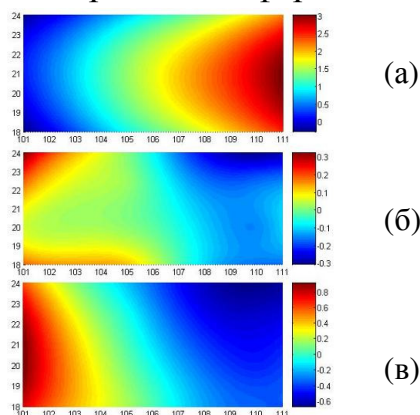


Рис.1. Разность между значениями TEC, полученными подходом (1) и с помощью моделей вариантов (1), (2), (3) – (а), (б), (в)

5. Оценка возможности применения разностей значений TEC_{comb} для восстановления локальной карты ионосферы была выполнена с помощью полинома $2^{\text{й}}$ степени **на основе данных GIM карты**. Для этого при экспериментальном исследовании используются интерполяционные значения VTEC в ионосферных точках, как в вышеуказанном случае. Чтобы избежать линейно зависимых уравнений при определении разностей $\Delta m_{Ap}^{(ji)}$, используется метод базового (опорного) спутника. Как известно, такой метод также применяется для оформления вторых разностей при решении неоднозначностей фазовых измерений. Выбор опорного спутника базируется на значении угла места и «состоянии здоровья» спутника. Как правило, чем больше величина угла места спутника, тем меньше влияние многолучевой погрешности на псевдодальности. Восстановление карт было осуществлено по разным вариантам выбора опорного спутника и была оценена погрешность полученных результатов для каждого варианта по следующей формуле

$$\delta_{\text{вариант}(i)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (VTEC_{\text{вариант}(i)}^j - VTEC_{\text{эталон}}^j)^2}{n}}. \quad (8)$$

Полученные результаты показывают, что вполне можно применить разности значений TEC_{comb} для восстановления локальной карты ионосферы с С.К.О < 0.6 TECU во всех вариантах выбора опорного спутника. Однако величина С.К.О значений VTEC восстановленной карты ионосферы зависит от угла места выбранного опорного спутника и его положения относительно точки А, где расположен приемник, и полученные результаты показывают, что при выборе спутника, имеющего наибольшее значение угла места, локальная карта ионосферы была восстановлена с наименьшей С.К.О (0.01 TECU) по сравнению с остальными вариантами выбора опорного спутника.

Систему уравнений (7) можно решить по методу наименьших квадратов, а также с помощью фильтра Калмана.

Как видно из табл.1, полученные с помощью фильтра Калмана значения VTEC имеют величину С.К.О. и средние значения, меньшие примерно (в среднем) в 2 раза, чем значения VTEC, полученные методом наименьших квадратов. Это приводит к выводу, что фильтр Калмана является более подходящим методом для оценки параметров модели при восстановления карты ионосферы в экваториальном регионе.

Таблица 1. С.К.О. и средние разности между значениями наклонного ТЕС для каждого спутника, полученными методом наименьших квадратов, фильтром Калмана и эталонными значениями в течение 30-минутного интервала.

Спутник		ЭТАЛ- МНК(TECU)	ЭТАЛ- КАЛ(TECU)
1	С.К.О	0.097	0.029
	Сред. значение	-0.041	-0.017
4	С.К.О	0.062	0.053
	Сред. значение	0.026	0.042
5	С.К.О	0.081	0.026
	Сред. значение	-0.03	-0.012
7	С.К.О	0.079	0.039
	Сред. значение	0.02	0.033
9	С.К.О	0.21	0.094
	Сред. значение	-0.057	-0.025

По экспериментальным данным во Вьетнаме значения неизвестных коэффициентов распределения ТЕС по широте и долготе $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ были определены решением системы уравнений (7) без учета влияния $\Delta m_{Ap}^{(ji)}$ по методу наименьших квадратов и показаны в табл.2:

Табл. 2

	α_1 (TECU/Deg)	α_2 (TECU/Deg)	α_3 (TECU/Deg ²)	α_4 (TECU/Deg ²)	α_5 (TECU/Deg ²)
Значение	-3.942	-0.646	-0.0755	-0.0249	-0.0078
С.К.О	0.04	0.001	0.0007	0.0005	0.00001

На рис.1 показываются изображения локальных карт ионосферы, восстановленных по коэффициентам $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ и с помощью данных GIMs карты.

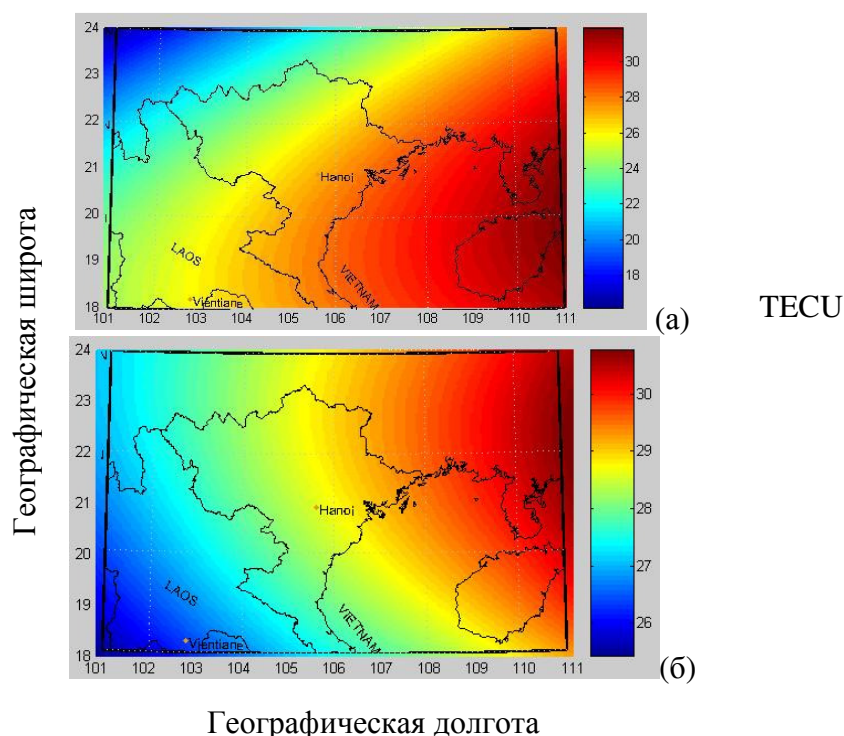


Рис. 1. Локальные карты ионосферы в 13 ч 30 мин 00 сек ($18^0 - 24^0$ по широте и $101^0 - 111^0$ по долготе), восстановленные по коэффициентам $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ по предлагаемой методике (а) и прямой интерполяцией из GIMs карты (б).

Табл.3

Средние значения (м)	GPS-03	НОАВИНН	ВН33	НН11
$\Delta D_{Klob}^H - \Delta D_{IGS}^H$	-0.492	-0.491	-0.484	-0.478
$\Delta D_{Klob}^H - \Delta D_{Method}^H$	-0.431	-0.413	-0.267	-0.214
$\Delta D_{IGS}^H - \Delta D_{Method}^H$	0.061	0.078	0.217	0.266
$\Delta D_{Klob}^V - \Delta D_{IGS}^V$	1.205	1.223	1.180	1.164
$\Delta D_{Klob}^V - \Delta D_{Method}^V$	1.429	1.534	2.479	2.291
$\Delta D_{IGS}^V - \Delta D_{Method}^V$	0.224	0.312	1.299	1.127
$\Delta D_{Klob} - \Delta D_{IGS}$	0.362	0.367	0.357	0.344
$\Delta D_{Klob} - \Delta D_{Method}$	0.454	0.494	0.859	0.790
$\Delta D_{IGS} - \Delta D_{Method}$	0.092	0.127	0.502	0.446

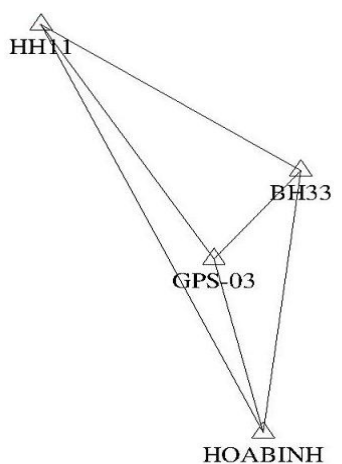
Приведенные в табл.3 результаты показывают, что при восстановлении локальной модели ионосферы по предложенной методике коррекция ионосферной задержки повышает точность пространственного положения для четырех рассматриваемых точек в среднем на 0,7м – 1,6 м, псевдодальности P_1 на 0,3 м – 0,65 м (~ 2 TECU – 4 TECU) и вертикального

положения на 0,74 м – 1,93 м по сравнению с существующими глобальными моделями ионосферы, такими как GIM-карты и модель Клобушара, соответственно. Выполненные расчеты показывают, что предложенная методика может быть реализована и её достоверность доказана. За счет того, что оценка межчастотного отклонения в приемнике не требуется при восстановлении локальной карты VTEC, предложенная методика может считаться практически автономной и полученная модель ионосферы не связана с существующими глобальными моделями за исключением информации о межчастотном отклонении в спутниках.

6. Проблема коррекции ионосферной задержки при относительном позиционировании

В первом варианте исправление ионосферной задержки базируется на локальной модели ионосферы, восстановленной одним двухчастотным приёмником, расположенным в точке GPS-03 (см. рис.2). В остальных точках, а именно НОАВИНН, будут рассматриваться как одночастотный приемник и для измеренных им псевдодальностей необходимо исправить ионосферную задержку. В этом варианте определение наклонных задержек сигнала вдоль трассы от спутника до приёмника базируется на однослойной модели ионосферы.

Табл.4



Базовая линия		ТС-Мод1	ТС-Мод2
GPS-03 НОАВИНН	$\Delta X(\text{м})$	0.455	0.434
	$\Delta Y(\text{м})$	0.523	0.521
	$\Delta Z(\text{м})$	0.010	0.005
	$\Delta S(\text{м})$	0.290	0.282
	КД	73	66

Рис.2. Схема расположения точек

Приведенными в табл.4 результатами являются отклонения разности компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий (в метрах) между точными решениями и решениями с коррекцией ионосферной задержки из локальной модели ионосферы (Мод1 – без учета влияния

многолучевой составляющей погрешности и Мод2 – с учетом влияния многолучевой составляющей погрешности), восстановленной фильтром Калмана. Коэффициент дисперсии решения (безразмерная величина) – КД. Полученные результаты показывают, что при помощи Мод2 коррекция ионосферной задержки улучшает решение базовой линии GPS-03 – НОАВІНН с длиной ~ 33 км по сравнению с Мод1, однако погрешность составляет величину порядка дециметров. В соответствии с этими можно сделать вывод, что на локальной модели ионосферы, восстановленной измерениями одним двухчастотным приемником, компенсация ионосферной задержки не может повысить точность решения базовой линии с длиной более 20 км до сантиметров. Одним из недостатков такого варианта коррекции ионосферной задержки является применение однослойной модели ионосферы, где предполагается, что все электроны сосредоточены в одном тонком слое, расположенном на некоторой высоте h над поверхностью Земли для оценки наклонной задержки сигнала спутников в ионосфере. Кроме того, с помощью такого варианта коррекции ионосферной задержки невозможно устранить влияние многолучевой составляющей погрешности в псевдодальностях на решение базовой линии.

С целью устранения недостатков первого варианта исправления ионосферной задержки далее будет рассматриваться **второй вариант**, суть которого заключается в том, что коррекция ионосферной задержки для одного приемника в точке D базируется на линейной интерполяции из наклонных задержек сигнала спутников в ионосфере, полученных тремя приёмниками в точках А, В, С, находящимся вокруг точки D. В этом случае предполагается, что для каждого наблюдаемого спутника и на каждый момент времени t существует одна плоскость, образуемая тремя значениями наклонных ионосферных задержек вдоль трассы от спутника до каждого приёмника в трех точках А, В и С. Следовательно, такую плоскость можно определить с помощью уравнения

$$STEC^j(t) = a^j(t)\varphi + b^j(t)\lambda + c^j(t). \quad (9)$$

Из решения системы уравнений (10) можно оценить коэффициенты a , b , c плоскости ABC

$$\begin{bmatrix} STEC_A^j(t) \\ STEC_B^j(t) \\ STEC_C^j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_A & \lambda_A & 1 \\ \varphi_B & \lambda_B & 1 \\ \varphi_C & \lambda_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^j(t) \\ b^j(t) \\ c^j(t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $STEC_A^j(t), STEC_B^j(t), STEC_C^j(t)$ – значения наклонного ТЕС вдоль трассы от спутника j -ого до в точках А, В, С, соответственно; φ – широта; λ – долгота.

Для того, чтобы исправить ионосферную задержку для приёмника в любой точке D, находящейся внутри треугольника ABC, используется следующее соотношение

$$STEC_D^j(t) = a^j(t)\varphi_D + b^j(t)\lambda_D + c^j(t). \quad (11)$$

Во втором варианте исправления ионосферной задержки значения наклонного TEC, используемые для образования плоскости ABC, можно определить по следующей формуле

- В случае опорного спутника i – ого:

$$STEC_A^i(t) = TEC_{A_{comb}}^i(t) - DCB^i - DCB_A; \quad (12)$$

$$STEC_B^i(t) = TEC_{B_{comb}}^i(t) - DCB^i - DCB_B; \quad (13)$$

$$STEC_C^i(t) = TEC_{C_{comb}}^i(t) - DCB^i - DCB_C; \quad (14)$$

- В случае остальных спутников с номером j :

$$STEC_A^j(t) = STEC_A^i(t) + \widetilde{\Delta TEC}^{j-i}_A(t) - \Delta m_{Ap}^{(ji)}; \quad (15)$$

$$STEC_B^j(t) = STEC_B^i(t) + \widetilde{\Delta TEC}^{j-i}_B(t) - \Delta m_{Bp}^{(ji)}; \quad (16)$$

$$STEC_C^j(t) = STEC_C^i(t) + \widetilde{\Delta TEC}^{j-i}_C(t) - \Delta m_{Cp}^{(ji)}. \quad (17)$$

Для того, чтобы оценить величину DCB в аппаратуре приёмника в точке A, B и C можно применить следующую формулу

$$DCB_A = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_M} (TEC_{A_{comb}}^i(t) - DCB^i - \widetilde{TEC}_A^i(t))}{M}, \quad (18)$$

где \widetilde{TEC}_A^i – значение наклонного TEC вдоль трассы от спутника i – ого до в точке A, вычисленное первым вариантом коррекции ионосферной задержки.

7. Влияние межчастотного отклонения в приемнике на коррекцию ионосферной задержки

С помощью второго варианта коррекции ионосферной задержки при относительном позиционировании погрешность оценки величины DCB не влияет на определение разности ионосферных задержек. Таким образом, отклонение вторых разностей ионосферной задержки зависит только от линейной интерполяции и разностей многолучевой составляющей погрешности Δm .

Рассматривая значения TEC, интерполированные из GIM карты, как эталонные значения, были оценены отклонения вторых разностей значений

ТЕС, вычисленных по первому варианту и по второму варианту коррекции ионосферной задержки. Полученные результаты показывают, что при помощи второго варианта коррекции ионосферной задержки С.К.О отклонения вторых разностей значений ТЕС меньше в среднем в 10 раз по сравнению с первым вариантом. В соответствии с этим можно заключить, что при помощи второго варианта компенсации ионосферной задержки можно повысить точность решения базовой линии с длиной более 20 км до нескольких сантиметров.

8. Блок-схема алгоритма коррекции ионосферной задержки

На рис.3 приведена блок-схема алгоритма, реализующего разработанную методику коррекции ионосферной задержки вторым вариантом.

1. Выполняется обнаружение и устранение возникающих в ходе измерений циклических фазовых скачков (т.н. «слипов»).
2. После устранения фазовых «слипов» разности $\Delta \widetilde{TEC}^{J-l}(t)$ определяются по формуле (5).
3. Для оценки значений $M(\gamma(t))$ - функции пересчета вертикальной ионосферной задержки в наклонную и координат подионосферных точек φ_i, λ_i требуются координаты спутников (X,Y,Z). Определение координат спутников основывается на информации, сохраняемой в файлах «Rinex.N».
4. Затем из решения системы уравнений (7) фильтром Калмана определяются значения коэффициентов модели ионосферы $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ и разностей многолучевой составляющей погрешности Δm^{ji} .
5. Оценка значения $STEC_A^j(t), STEC_B^j(t), STEC_C^j(t)$ с помощью формул (12 - 17) и (18).
6. Оценка $a(t), b(t), c(t)$ базируется на решении системы уравнений (10).
7. Опираясь на оцененные значения $a(t), b(t), c(t)$, вычисляются $STEC_D^j(t)$ по формуле (11).

Значениями $STEC_A^j(t), STEC_B^j(t), STEC_C^j(t)$ и $STEC_D^j(t)$ являются ионосферные задержки в единицах TECU, с которыми были скорректированы псевдодальности, содержащиеся во входных файлах данных для GPsurvey 2.35 в формате «Rinex», созданных программой «создание файлов RINEX.O».

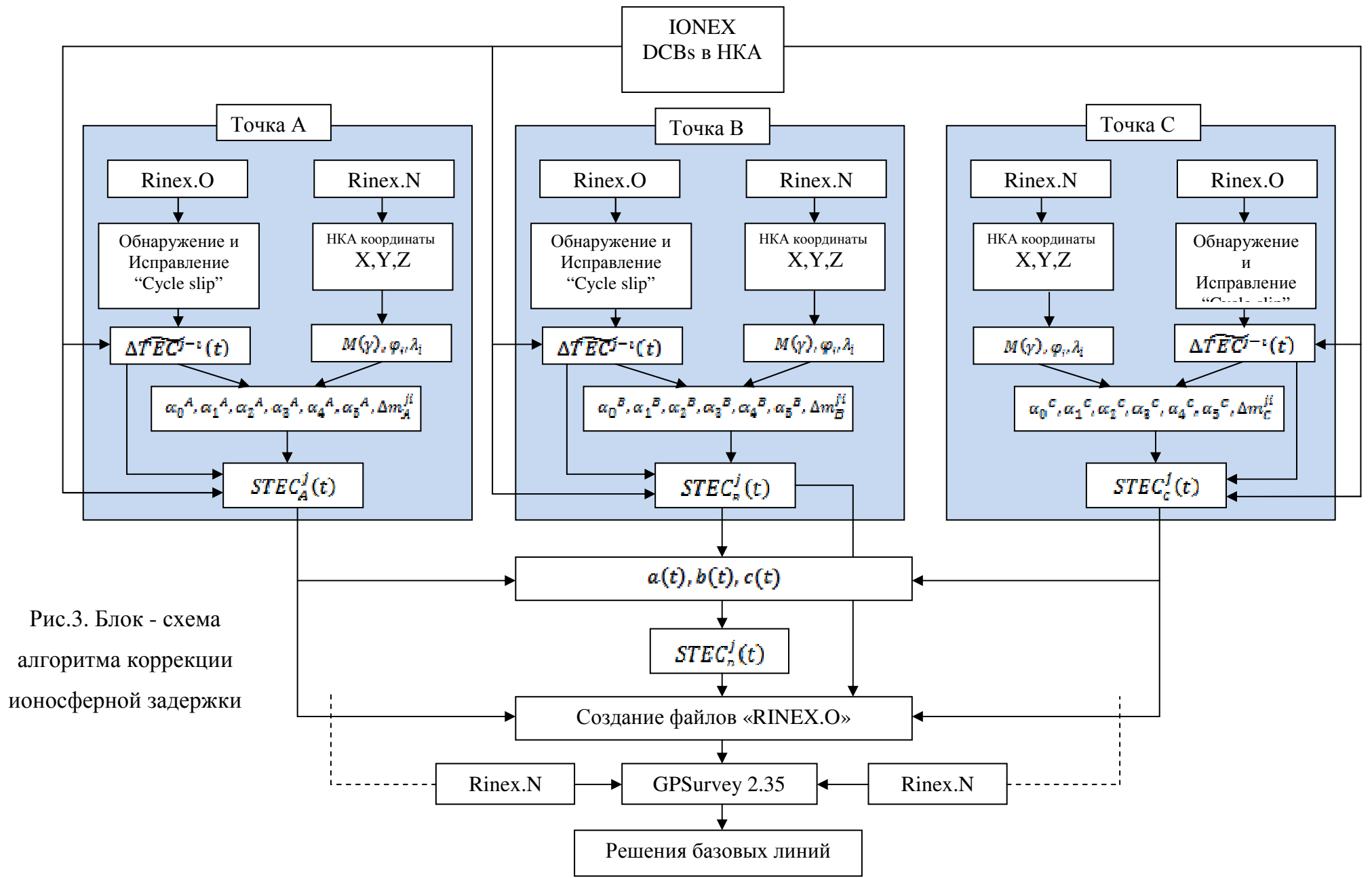


Рис.3. Блок - схема алгоритма коррекции ионосферной задержки

В четвертом разделе выполнены экспериментальные исследования разработанной методики с целью проверки влияния многолучевой составляющей погрешности в псевдодальностях на качество решений базовых линий при помощи разработанной методики.

Данные для экспериментального расчета были выбраны в течение интервала времени с 6ч 00 м до 7ч 00м 17-ого мая 2008 года . Запись данных производилась с помощью GB1000 в точках НОАВІНН, GPS-03 и с помощью SouthGps в точках НН11и ВН33. В табл.5 приведены геодезические координаты экспериментальных точек и на рис. 1 показана схема расположения таких точек. Количество общих наблюдаемых спутников составляет 7, а именно Спутник с номером 5, 12, 14, 18, 21, 22, 30, среди которых спутник с номером- 18 имеет наибольшее значение угла места ($\sim 60^0$), и он был выбран в качестве опорного спутника при образовании разностей Δm^{ji} .

Табл.5. Геодезические координаты экспериментальных точек

Название точки	Геод. Широта	Геод. Долгота
НОАВІНН	20 ⁰ 51' 43''	105 ⁰ 20' 51''
НН11	21 ⁰ 33' 29''	105 ⁰ 00' 24''
ВН33	21 ⁰ 18' 33''	105 ⁰ 24' 19''
GPS-03	21 ⁰ 09' 30''	105 ⁰ 16' 21''

Полученные разработанной методикой значения Δm^{ji} в единицах TECU показаны в табл.6.

Табл.6

	Δm^{5-18}	Δm^{12-18}	Δm^{14-18}	Δm^{21-18}	Δm^{22-18}	Δm^{30-18}
GPS-03	1.49	0.05	-0.14	0.26	-0.58	2.19
НВІНН	1.27	-0.37	0.39	0.54	0.45	3.02
ВН33	1.02	-0.99	0.78	0.89	-0.63	1.66
НН11	2.15	0.54	-0.56	0.32	0.92	2.45

В табл.9 приведены отклонения разности компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий НОАВІНН-НН11 (1), GPS-03-НН11 (2), ВН33-НН11 (3), НОАВІНН-ВН33 (4), НОАВІНН-GPS-03 (5) и GPS-03-ВН33 (6), между точными решениями (ТС) и решениями, полученными следующими подходами коррекции ионосферной задержки:

- С помощью разработанной методики без учета влияния многолучевой составляющей погрешности - (Me1); Решение базовой линии базируется на L_1 псевдодальностях;

- С помощью разработанной методики с учетом влияния многолучевой составляющей погрешности - (Me_2); решение базовой линии базируется на L_1 псевдодальнотях;
- Использованием дисперсионного метода - (Me_3);

Как видно из табл.7 , для того чтобы получить решения базовых линий дисперсионным методом с точностью, соответствующей точности решений, полученных при помощи разработанной методики (Me_2) в течение одно часового интервала времени записи данных, требуется запись данных во временном диапазоне от 1ч 40м до 2ч 00м.

Табл.7

Базовые линии			Тип решения	Отношение (Ratio)	Промежуток времени записи данных
1	$\Delta X(m)$	0.036	Iono free fixed	1.5	1ч 40м
	$\Delta Y(m)$	0.006			
	$\Delta Z(m)$	-0.030			
	$\Delta S(m)$	-0.012			
	КД	12			
2	$\Delta X(m)$	-0.009	Iono free fixed	10.3	1ч 58м
	$\Delta Y(m)$	0.028			
	$\Delta Z(m)$	0.016			
	$\Delta S(m)$	-0.004			
	КД	1.5			
3	$\Delta X(m)$	-0.008	Iono free fixed	7.8	1ч 51м
	$\Delta Y(m)$	0.032			
	$\Delta Z(m)$	0.150			
	$\Delta S(m)$	0.002			
	КД	1.9			
4	$\Delta X(m)$	0.056	Iono free fixed	1.6	1ч 47м
	$\Delta Y(m)$	0.100			
	$\Delta Z(m)$	0.006			
	$\Delta S(m)$	-0.045			
	КД	14.1			
5	$\Delta X(m)$	0.021	Iono free fixed	1.9	2ч 00м
	$\Delta Y(m)$	-0.019			
	$\Delta Z(m)$	-0.020			
	$\Delta S(m)$	-0.017			
	КД	10.2			
6	$\Delta X(m)$	-0.018	Iono free fixed	8.1	2ч 00м
	$\Delta Y(m)$	0.061			
	$\Delta Z(m)$	-0.023			
	$\Delta S(m)$	0.001			
	КД	2.0			

Далее в ходе эксперимента при помощи разработанной методики коррекции ионосферной задержки рассматриваются в точках НОАВІНН, НН11и ВН33, как двухчастотные приемники, по измерениям которых была выполнена оценка значений ионосферных задержек линейной интерполяцией для одночастотного приемника, находящегося в точке GPS-03. Данные для экспериментального расчета были выбраны также в течение времени с 6ч 00

м до 7ч 00м. В табл.8 приведены отклонения разности компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий GPS-03-НН11 (1), НОАВІНН-GPS-03 (2) и GPS-03-ВН33 (3), между точными решениями (ТС) и решениями, полученными разработанной методикой исправления ионосферной задержки с учетом влияния многолучевой составляющей погрешности (Ме4)и без учета такого влияния (Ме5).

Приведенные в табл.8 результаты показывают, что с помощью разработанной методики исправления ионосферной задержки Ме4 отклонение разностей компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий при сравнении с точными решениями составляет величину порядка сантиметров, а с помощью разработанной методики Ме5 отклонение составляет более одного дециметра для компонентов координат X, Y в среднем.

Таблица.8. Отклонения разности компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий между точными решениями (ТС) и решениями, полученными Ме4 и Ме5.

Базовые линии		ТС-Ме5	ТС-Ме4
1	$\Delta X(m)$	-0.264	-0.016
	$\Delta Y(m)$	-0.222	0.030
	$\Delta Z(m)$	0.084	-0.012
	$\Delta S(m)$	-0.065	-0.014
	КД	51.1	8.6
2	$\Delta X(m)$	-0.155	0.044
	$\Delta Y(m)$	-0.177	-0.015
	$\Delta Z(m)$	-0.061	-0.027
	$\Delta S(m)$	-0.056	-0.042
	КД	19.2	13.1
3	$\Delta X(m)$	-0.045	0.091
	$\Delta Y(m)$	-0.127	0.081
	$\Delta Z(m)$	0.007	-0.029
	$\Delta S(m)$	-0.074	0.064
	КД	10.3	9.4

Таблица 9. Отклонения разности компонентов координат (X,Y,Z) и наклонных длин (S) базовых линий между точными решениями (ТС) и решениями, полученными Me1 и Me2 и Me3.

Базовые линии		ТС-Me1	ТС-Me2	ТС-Me3
1	$\Delta X(m)$	-0.109	-0.065	0.162
	$\Delta Y(m)$	0.161	0.035	-0.179
	$\Delta Z(m)$	-0.101	-0.053	-0.147
	$\Delta S(m)$	-0.111	-0.075	-0.088
	КД	17.1	11.3	7.8
2	$\Delta X(m)$	-0.096	0.009	0.060
	$\Delta Y(m)$	0.065	0.021	0.103
	$\Delta Z(m)$	-0.006	-0.022	-0.070
	$\Delta S(m)$	-0.052	-0.009	-0.037
	КД	11.9	8.7	6.8
3	$\Delta X(m)$	-0.025	0.014	-0.012
	$\Delta Y(m)$	0.075	0.005	0.030
	$\Delta Z(m)$	0.026	0.014	0.013
	$\Delta S(m)$	-0.007	0.019	-0.003
	КД	14.4	11.9	2.1
4	$\Delta X(m)$	0.129	0.112	0.026
	$\Delta Y(m)$	0.208	0.005	0.068
	$\Delta Z(m)$	-0.104	0.009	0.107
	$\Delta S(m)$	-0.015	0.015	-0.124
	КД	25.3	11.8	10.5
5	$\Delta X(m)$	-0.041	0.006	-0.045
	$\Delta Y(m)$	-0.077	-0.017	-0.180
	$\Delta Z(m)$	-0.032	-0.005	-0.045
	$\Delta S(m)$	-0.037	-0.007	-0.087
	КД	17.6	13.4	6.9
6	$\Delta X(m)$	0.032	-0.015	-0.022
	$\Delta Y(m)$	0.076	-0.003	0.063
	$\Delta Z(m)$	-0.052	-0.045	-0.026
	$\Delta S(m)$	0.037	-0.030	-0.002
	КД	15.3	6.1	2.1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе доказано, что применение существующих моделей ионосферы не является оптимальным решением для территории Вьетнама, поскольку при этом на основе измерений одной станции, не входящей в состав сетей IGS, не учитываются межчастотные отклонения для псевдодальностей на P_1 и P_2 кодах в аппаратуре приемника и не выполняется оценка многолучевой составляющей погрешности кодовых псевдодальностей.
2. На основе полученных автором более точных аналитических интегральных соотношений для ионосферных задержек сигнала установлена правомерность использования существующих приближенных формул.
3. При восстановлении локальной карты ионосферы над территорией Вьетнама можно достаточно хорошо описать пространственное распределение VTEC с помощью полинома 2^й степени.
4. Разработанная методика учета влияния ионосферы включает в себя как частные случаи методики, сформулированные в пп.3) и 4) положений, выносимых на защиту, т.е. в работе решены задачи учета как межчастотных отклонений, так и многолучевой составляющей.
5. Предложено применить разности TEC между спутниками для восстановления локальной карты ионосферы, что даёт возможность устранения влияния межчастотного отклонения в двухчастотном приемнике.
6. Применение разработанной методики коррекции ионосферной задержки с учётом влияния многолучевой составляющей погрешности в псевдодальностях с использованием линейной интерполяции обеспечивает решение базовой линии с длиной до 50 км с точностью порядка сантиметров при относительном позиционировании одночастотными приемниками.
7. По сравнению с дисперсионным методом при решении базовых линий с длиной от 20 км до 80 км разработанная методика коррекции ионосферной задержки позволяет сократить время записи данных, а именно до 60 минут при требуемой точности решения баз не хуже 5 см, и тем самым повысить эффективность относительного позиционирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Фам Хоанг Лонг. Методика определения значений ТЕС и восстановления локальной карты ионосферы на основе измерений отдельным двухчастотным спутниковым приемником М.: Геодезия и аэрофотосъемка. – № 4, 2012. – С.20 – 26.
2. Фам Хоанг Лонг. К оценке точности определения интегральной электронной концентрации в ионосфере при измерениях глобальными спутниковыми системами. М.: Геодезия и аэрофотосъемка. – № 5, 2012. –С.14 – 19.
3. Фам Хоанг Лонг. Результаты применения метода LAMBDA для решения неоднозначности фаз несущих волн при GPS- измерениях во Вьетнаме. Научно-технический журнал горного дела и геологии. Горно-геологический университет. - № 32, 2010.
4. Фам Хоанг Лонг. К оценке точности определения интегральной электронной концентрации в ионосфере при измерениях глобальными спутниковыми системами. Доклад на 67-й научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, 3-4 апреля 2012 г.

Подписано в печать . . 2014 Гарнитура Таймс
Формат 60?90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная
Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 80 экз. Заказ № Цена договорная
Издательство МИИГАиК
105064, Москва, Гороховский пер., 4