

*На правах рукописи*



Казанцев Михаил Юрьевич

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В  
ОДНОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ СИСТЕМ  
ГЛОНАСС И GPS ЗА СЧЕТ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ

05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации,  
радиолокации и телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск - 2003

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника» Красноярского государственного технического университета (КГТУ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, Кокорин В.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Панько С.П.  
кандидат технических наук, Толстяков А.С.

Ведущая организация: Научно-производственное объединение прикладной механики имени академика М.Ф. Решетнева, г. Железногорск

Защита состоится « 14 » июня 2004 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.098.02 при Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Б-418.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ.

Автореферат разослан « 14 » мая 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.098.02  
кандидат технических наук, доцент



Ю.П. Саломатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность.* Эффективность современной навигационной аппаратуры потребителя (НАЛ) глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS определяется точностью определения координат и времени.

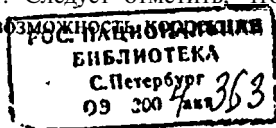
Точность определения координат и времени зависит от точности измерения псевдодальностей по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS. Погрешность измерения псевдодальностей обусловлена множеством факторов, наиболее весомыми из них являются погрешности эфемеридно-временного обеспечения, задержка сигнала в ионосфере и тропосфере, многолучевое распространение сигнала. Для одночастотной НАЛ ГЛОНАСС и GPS наибольшим источником погрешности измерения псевдодальностей является задержка сигнала в ионосфере, которая обусловлена интегральной электронной концентрацией (ИЭК) вдоль пути распространения сигнала. В данном типе аппаратуры отсутствует возможность использования сигналов на двух когерентных частотах для исключения ионосферной погрешности измерений.

Таким образом, существует проблема определения задержки сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в ионосфере, решение которой, позволит повысить точность определения координат и времени в одночастотной НАЛ. Кроме того, возможность определения задержки сигнала в ионосфере создает предпосылки к созданию на базе одночастотной НАЛ системы мониторинга состояния ионосферы. Актуальность уменьшения погрешности определения координат и времени в одночастотной НАЛ обусловлена прежде всего тем, что в настоящее время, подавляющее большинство эксплуатируемой НАЛ работает только по сигналам на одной частоте. В рамках Федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система», срок реализации которой рассчитан на период с 2002 по 2011 г., предусмотрена разработка одночастотной НАЛ гражданского назначения. Реализация данной программы должна обеспечить повышение точности и оперативности координатно-временных определений широкого круга потребителей (погрешность определения координат - 5 метров, времени — не более 10 наносекунд).

Решение поставленной проблемы не исчерпывается созданием одночастотного метода определения задержки сигнала в ионосфере. Необходимо изучить влияние задержки сигнала в ионосфере на погрешность определения координат и времени, поскольку данный вопрос остается неисследованным на протяжении всего срока проектирования и эксплуатации систем ГЛОНАСС и GPS.

Существует два подхода к определению задержки сигнала в ионосфере в одночастотной НАЛ.

Первым способом является коррекция псевдодальностей с помощью параметров модели ионосферы, передаваемых в навигационном сообщении НКА GPS. Применение модели ионосферы, используемой в системе GPS, позволяет уменьшить, только на 50% влияние ионосферы на среднеквадратическую погрешность (СКП) определения координат. Следует отметить, что в системе ГЛОНАСС не предусмотрена никакая-либо возможность коррекции влияния ионосферы для одночастотной НАЛ.



Вторым и наиболее перспективным подходом является использование свойств принимаемых сигналов, где определение задержки сигнала в ионосфере основано на применении равенства по величине и противоположности по знаку фазового и группового запаздывания в ионосфере сигналов систем ГЛОНАСС и GPS. При этом, существующие методы, разработанные на основе данного подхода, имеют один общий существенный недостаток - необходимость в дополнительном определении начальных неоднозначностей фазовых измерений. Данная проблема существенным образом усложняет реализацию и снижает эффективность работы такого метода, чем и объясняется ограниченное применение его на практике.

Анализ публикаций, выявил отсутствие работ в которых исследованы функциональные зависимости между задержкой сигнала в ионосфере и погрешностями определения координат и времени по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS.

**Целью работы** является разработка метода определения задержки сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в ионосфере, который позволит повысить точность определения координат и времени в одночастотной НАЛ, при этом необходимо исследовать функциональные зависимости между задержкой сигнала в ионосфере и погрешностями определения координат и времени. В соответствии с поставленной целью решаются следующие **задачи исследования**:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование ионосферной составляющей погрешностей определения координат и времени.
2. Разработка одночастотного метода определения задержки сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в ионосфере по разности приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала навигационных космических аппаратов (НКА).
3. Экспериментальное исследование разработанного одночастотного метода определения задержки сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в ионосфере по разности приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала НКА.

**Методы исследования.** В диссертационной работе, для решения поставленных задач использовались аппарат теории линейной фильтрации, математический анализ, теория чувствительности, оптимизации, экспериментальные методы, методы вычислительного моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитические выражения, связывающие погрешности определения высоты и времени по сигналам ГЛОНАСС и GPS с задержкой сигнала в ионосфере.
2. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наибольшая часть (90%) ионосферной составляющей погрешности определения высоты и времени зависит только от интегральной электронной концентрации в вертикальном столбе ионосферы, остальная часть (10%) зависит в равной степени от интегральной электронной концентрации в ионосфере и от геометрии расположения наблюдаемого созвездия НКА относительно НАЛ.

3. Одночастотный метод определения задержки сигнала в ионосфере, основанный на применении разности приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и фазе несущей частоты сигнала НКА, который позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность определения задержки сигнала в ионосфере в 2.7 раза и в 1.5 раза уменьшить математическое ожидание погрешности определения высоты по сравнению с моделью ионосферы, используемой в системе GPS.

*Научная новизна* результатов работы заключается в следующем:

- Впервые получены аналитические выражения, которые описывают влияние ионосферы на погрешности определения координат и времени по сигналам НКА глобальных спутниковых навигационных систем. Полученные зависимости позволяют уменьшить вклад ионосферы в погрешность определения координат и времени по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS.
- Разработан метод одночастотного определения задержки сигнала в ионосфере, основанный на применении разности приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и фазе несущей частоты сигнала НКА.

*Практическая значимость и реализация результатов исследований.* Полученные зависимости погрешностей определения высоты и времени от задержки сигнала НКА в ионосфере дают возможность определить и уменьшить вклад ионосферы в погрешность определения координат и времени по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS.

Разработанный одночастотный метод, защищенный патентом РФ №2208809, позволил уменьшить в 2.7 раза СКП определения задержки сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в ионосфере и в 1.5 раза уменьшить мат. ожидание погрешности определения высоты, по сравнению со стандартной моделью ионосферы, применяемой в системе GPS. Разработанный одночастотный метод может быть реализован в НАЛ ГЛОНАСС и GPS, работающей на подвижных и неподвижных объектах, в аппаратуре частотно-временной синхронизации, работающей по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS, а также при создании мобильных и стационарных станций мониторинга ионосферы.

Результаты, полученные в диссертации, позволили повысить точность определения координат и времени в одночастотной НАП ГЛОНАСС и GPS, которая разрабатывается в НИИ Радиотехники (НИИРТ) КГТУ совместно с ФГУП НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск). Результаты исследований использованы в НИОКР, проводимых в НИИРТ КГТУ:

- НИОКР «Разработка аппаратно-программного комплекса для обеспечения топопривязки, ориентирования и синхронизации элементов РЛК 55Ж6М», заказчик - Нижегородский НИИРТ.
- ОКР «Разработка навигационного канала спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС-НАВСТАР», заказчик - ОАО «НПО Алмаз».
- ОКР «Разработка и изготовление беззапросных измерительных станций (БИС) в интересах эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) и обеспечения целостности космической навигационной системы ГЛОНАСС-М», заказчик —

Научно-производственное объединение прикладной механики им. академика М.Ф. Решетнева.

Разработанный одночастотный метод определения задержки сигнала в ионосфере применялся для обработки данных, полученных в ходе высокоширотной экспедиции (ВШЭ) СО РАН в 2002 г. по изучению влияния ионосферы па работу систем ГЛОНАСС и GPS.

*Достоверность научных и практических результатов*, полученных в диссертационной работе, подтверждается согласованием результатов теоретических расчетов, математического моделирования и экспериментальных исследований, проведенных с помощью НАП ГЛОНАСС и GPS. Достоверность разработанного одночастотного метода определения задержки сигнала в ионосфере подтверждается информацией об ИЭК в ионосфере, полученной на основе измерений, обработанных в аналитических центрах международной службы International GPS Service, которая постоянно проводит мониторинг состояния ионосферы.

*Апробация работы.* Результаты исследований докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Спутниковые системы связи и навигации» в г. Красноярске (1997 г.); Всероссийских научно-технических конференциях молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» в г. Красноярске (1998, 1999, 2001 г.г.); Международной научно-технической конференции «DORIS Days» в г. Тулузе (Франция) (2000 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых специалистов «Решетневские чтения» в г. Красноярске (2000 г.); Международной научно-практической конференции САКС-2001 в г. Красноярске (2001 г.); Региональной научно-технической школе-семинаре студентов, аспирантов, молодых ученых «Современные проблемы радиотехники (СПР-2001)» в г. Новосибирске (2001 г.); IX, X Санкт-Петербургских международных конференциях по интегрированным навигационным системам (2002, 2003 г.); Всероссийской научной конференции «Физика радиоволн» в г. Томске (2002 г.); Международной научно-технической конференции посвященной 80-летию гражданской авиации России «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» в г. Москве (2003 г.).

*Публикации.* Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 1 статья в рецензируемом журнале, 7 статей в научных сборниках, 7 тезисов докладов, 1 патент РФ на изобретение.

*Структура диссертации.* Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста и двух приложений. Объем работы составляет 124 страницы основного текста, список использованных источников из 113 наименований, в том числе 16 работ автора (13 в соавторстве).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Первая глава* посвящена анализу влияния ионосферы на сигналы систем ГЛОНАСС и GPS.

В системах ГЛОНАСС и GPS применяется псевдодальномерный способ измерения дальности до НКА. Псевдодальности измеряются по дальномерному коду сигнала НКА, а так же по фазе несущей частоты сигнала НКА. Псевдодальность, измеренная по дальномерному коду в момент дискретного времени  $k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), определяется выражением

$$r_i(k) = \rho_i(k) + I_i(k) + T_i(k) + c\tau(k) + s_i(k) + \xi_i(k), \quad (1.1)$$

где  $r_i(k)$  - псевдодальность, измеренная по дальномерному коду НКА;  $\rho_i(k)$  - дальность до НКА;  $I_i(k)$  - задержка сигнала НКА в ионосфере, выраженная в единицах дальности;  $T_i(k)$  - задержка сигнала НКА в тропосфере, выраженная в единицах дальности;  $c$  - скорость распространения радиоволн в вакууме;  $\tau(k)$  - расхождение шкалы времени НАЛ относительно шкалы времени систем ГЛОНАСС или GPS;  $s_i(k)$  - систематическая погрешность по каждому НКА, в состав которой входят погрешности определения эфемерид НКА, рассогласование шкалы времени НКА относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС или GPS и т.д.;  $\xi_i(k)$  - случайная погрешность измерений по дальномерному коду;  $i$  - порядковый номер НКА,  $i = \overline{1, n(k)}$ ;  $n(k)$  - число наблюдаемых НКА. Псевдодальность, измеренная по фазе несущей частоты сигнала НКА определяется выражением

$$\varphi_i(k) = \rho_i(k) - N_i\lambda_i - I_i(k) + T_i(k) + c\tau(k) + s_i(k) + \zeta_i(k), \quad (1.2)$$

где  $\varphi_i(k)$  - псевдодальность, измеренная по фазе несущей частоты сигнала НКА;  $\lambda_i$  - длина волны сигнала;  $N_i$  - начальная неоднозначность фазовых измерений;  $\zeta_i(k)$  - случайная погрешность фазовых измерений. Начальная неоднозначность фазовых измерений является целочисленной величиной и определяет расстояние между НАЛ и НКА в момент захвата сигнала НКА, выраженное числом длин волн сигнала несущей частоты. Начальная неоднозначность фазовых измерений является постоянной величиной от момента захвата сигнала НКА до срыва слежения за фазой сигнала НКА.

В современной НАЛ ГЛОНАСС и GPS при измерении псевдодальности по дальномерному коду НКА, для уменьшения случайной составляющей погрешности, используется измеренное значение приращения фазы сигнала несущей частоты НКА. В результате, случайную составляющую погрешности измерения псевдодальности по дальномерному коду удастся уменьшить до величины, сопоставимой с погрешностью фазовых измерений. При этом остаются более низкочастотные погрешности, величина которых составляет  $\sigma_{\zeta} = 0.1 \div 0.2$  м. На интервале наблюдения 1с, обеспечивается значение случайной составляющей погрешности измерения псевдодальности по фазе несущей частоты сигнала НКА, равной  $\sigma_{\zeta} = 0.5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3}$  м.

Ионосфера является наибольшим источником систематической погрешности измерения псевдодальностей. Систематические погрешности измерения псевдодальностей по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала НКА, вызванные влиянием ионосферы, равны, имеют разный знак и определяются выражением

$$I = I_r = -I_\phi = \frac{40.4}{f^2} \int_0^s N_e(s) ds = \frac{40.4}{f^2} N_s, \quad (1.3)$$

где  $I_r$  - ионосферная погрешность измерения псевдодальности по дальномерному коду НКА;  $I_\phi$  - ионосферная погрешность измерения псевдодальности по фазе несущей частоты сигнала НКА;  $N_e(s)$  - концентрация электронов в ионосфере;  $s$  - радиус-вектор траектории сигнала в ионосфере;  $N_s$  - интегральная электронная концентрация вдоль пути сигнала НКА.

Погрешности измерения псевдодальностей  $I_r$ ,  $I_\phi$  зависят от протяженности пути сигнала НКА в ионосфере. Длина пути сигнала в ионосфере будет зависеть от угла места НКА. Различают вертикальную задержку (угол места НКА  $\gamma = 90^\circ$ ) и наклонную задержку (угол места НКА  $\gamma < 90^\circ$ ).

Наиболее существенные свойства задержки сигнала в ионосфере — ее зависимость от угла места НКА и высоты слоя ионосферы отражает однослойная модель ионосферы (ОМИ). В ОМИ предполагается, что все электроны сосредоточены в тонком слое, расположенном на высоте  $h$  над поверхностью Земли. На основе представления ионосферы в виде однослойной модели, взаимосвязь погрешностей измерения псевдодальностей, обусловленных вертикальной и наклонной задержками сигнала в ионосфере, определяется следующим выражением

$$I(k) = Ob(\gamma(k)) I_v(k), \quad (1.4)$$

где  $I_v(k)$  - погрешность, обусловленная вертикальной задержкой сигнала в ионосфере;  $I(k)$  - погрешность, обусловленная наклонной задержкой сигнала НКА в ионосфере;  $\gamma(k)$  - угол места НКА;  $Ob(\gamma(k))$  - функция, применяемая для пересчета вертикальной ионосферной задержки в наклонную, которая определяется как отношение погрешностей, вызванных наклонной и вертикальной задержками сигнала в ионосфере

$$Ob(\gamma(k)) = \frac{I(k)}{I_v(k)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{R_\oplus}{R_\oplus + h} \cos \gamma(k) \right)^2}}, \quad (1.5)$$

где  $R_\oplus$  - радиус Земли;  $h$  - высота слоя ионосферы. В зависимости от угла места НКА, значение функции  $Ob(\gamma)$  будет изменяться в диапазоне от 1 до 4.

С помощью методов теории чувствительности исследованы погрешности ОМИ, обозначены границы ее применимости на практике. На рис. 1 представлена погрешность пересчета вертикальной задержки сигнала в ионосфере в наклонную, при вариации высоты слоя ионосферы, равной

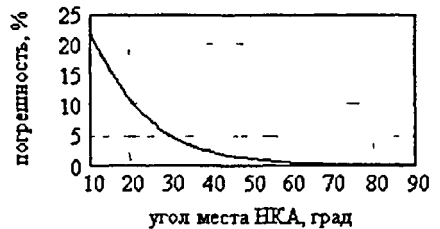


Рис 1. Погрешность функции  $Ob(\gamma)$

$\Delta h = 100$  км, относительно принятой высоты слоя ионосферы  $h = 432.5$  км.

Вторая глава посвящена исследованию влияния ионосферы на погрешность определения координат по сигналам ГЛОНАСС и GPS.

В ходе решения навигационной задачи по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS определяются координаты, скорость объекта, на котором установлена НАЛ, а также расхождение шкалы времени НАЛ со шкалой времени ГЛОНАСС или GPS, что позволяет с высокой точностью определить время. Погрешность привязки шкал системного времени ГЛОНАСС и GPS, соответственно, к шкале UTC(SU) и к шкале UTC(USNO) не превышает 1 мкс. Функциональная зависимость между измеряемыми псевдодальностями и координатами определяется выражением

$$r_i(k) = \sqrt{(x_{\alpha}(k) - x(k))^2 + (y_{\alpha}(k) - y(k))^2 + (z_{\alpha}(k) - z(k))^2} + c\tau(k), \quad (2.1)$$

где  $x_{\alpha}(k)$ ,  $y_{\alpha}(k)$ ,  $z_{\alpha}(k)$  - координаты НКА;  $x(k)$ ,  $y(k)$ ,  $z(k)$  - координаты НАЛ.

Традиционный метод анализа погрешностей координат и времени с помощью геометрического фактора, который используется в настоящее время при анализе погрешностей систем ГЛОНАСС и GPS, не позволяет определить ионосферные составляющие погрешностей определенных координат и времени. Это вызвано тем, что с помощью геометрического фактора можно описать лишь влияние центрированных и равноточных погрешностей измерений псевдодальностей на погрешность определения координат и времени, что не соответствует свойствам задержки сигнала в ионосфере.

Взаимосвязь погрешностей координат и времени, вызванная влиянием ионосферы и задержкой сигнала в ионосфере определяется следующим выражением, полученным путем линеаризации уравнения (2.1)

$$-\cos\gamma, \cos\alpha, \Delta x - \sin\gamma, \Delta y - \cos\gamma, \sin\alpha, \Delta z + c^2 \Delta\tau = I_i = Ob(\gamma_i)I_i(k), \quad (2.2)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  - ионосферные составляющие погрешностей определения широты, высоты и долготы, выраженные в единицах длины;  $\Delta\tau$  - ионосферная составляющая погрешности определения расхождения шкалы времени НАЛ относительно шкалы времени систем ГЛОНАСС или GPS (ионосферная составляющая погрешности определения времени);  $\alpha_i$  - азимут НКА;  $\gamma_i$  - угол места НКА;  $I_i$  - задержка сигнала в ионосфере, выраженная единицах длины. Поиск зависимости каждой составляющей погрешности координат и времени от ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальностей затруднен сложностью аналитического решения системы уравнений (2.2) при  $n \geq 4$ . Поэтому исследование искомой зависимости осуществлялось с помощью вычислительного моделирования, которое было сделано на интервале времени 24 часа, при условии работы НАЛ по сигналам двух систем ГЛОНАСС и GPS.

Вычислительное моделирование было максимально приближено к реальным условиям функционирования НАЛ ГЛОНАСС и GPS. В качестве истинных координат, использовались координаты известной точки, расположенной в г. Красноярске. По данным альманахов и навигационного сообщения НКА систем ГЛОНАСС и GPS, которые были ранее записаны с помощью НАЛ МРК-23 с 25 по 26 апреля 2001 г., вычислены углы мест и азимуты НКА. Задержка сиг-

нала в ионосфере вычислялась с помощью стандартной модели ионосферы GPS, при этом использовались параметры модели ионосферы GPS, переданные в навигационном сообщении НКА GPS на 25-26 апреля 2001 г.

На рис. 2 приведены значения погрешностей определения координат и расхождения шкалы времени НАЛ вызванные ионосферой, а также вертикальная задержка сигнала в ионосфере. Время отсчитывается от 0 часов 25.04.2001г.

Хорошо наблюдаемые «всплески» ионосферных погрешностей определения координат и времени вызваны большими значениями геометрического фактора  $GDOP > 3$ . Плохая геометрия расположения НКА относительно НАП становится преобладающей в погрешностях определения координат и времени.

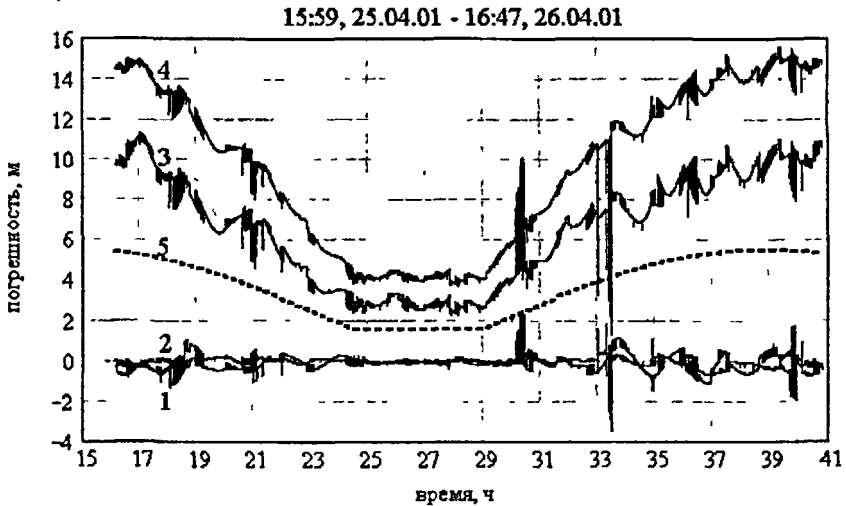


Рис. 2. Результаты моделирования: 1-  $\Delta x$ ; 2-  $\Delta z$ ; 3-  $\Delta y$ ; 4-  $c\Delta\tau$ ; 5-  $I$ ,

В ходе вычислительного моделирования получены следующие статистические характеристики погрешностей, приведенные в таблице 1.

Таблица 1.

Погрешность	Среднеквадратическая погрешность, м	Коэффициент корреляции с вертикальной задержкой сигнала в ионосфере
широты $\Delta x$	0.39	-0.21
долготы $\Delta z$	0.19	0.29
высоты $\Delta y$	7.08	0.97
времени $c\Delta\tau$	10.45 (34.83 нс)	0.99

Полученные коэффициенты корреляции показывают, что вертикальная задержка сигнала в ионосфере и погрешность высоты, связаны детерминированной линейной зависимостью. Такая же зависимость наблюдается между расхождением шкалы времени НАЛ и вертикальной задержкой сигнала в ионо-

сфере. На рис. 3 представлены графики отношений  $R_y = \Delta y / I_v$ ,  $R_r = c\Delta\tau / I_v$ , где хорошо видно, что их величина близка к константе. Получены оценки математических ожиданий  $M\{R_y\} = 1.85$ ,  $M\{R_r\} = 2.73$ .

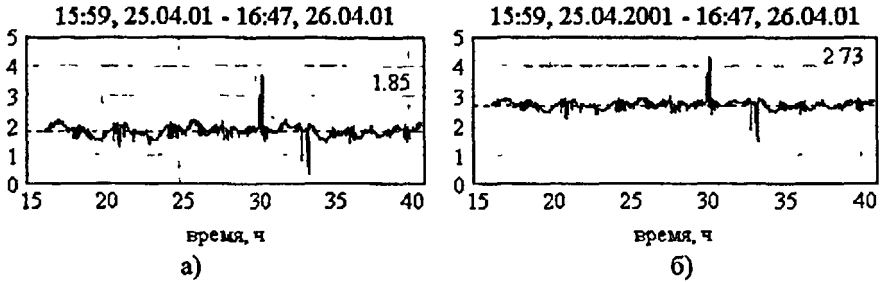


Рис. 3. а)  $R_y = \Delta y / I_v$ ; б)  $R_r = c\Delta\tau / I_v$ ,

На основании результатов вычислительного моделирования можно сделать вывод, что ионосфера влияет главным образом на погрешность определения высоты и времени, эта зависимость является линейной и ее можно представить в виде следующих выражений

$$\Delta y = 1.85 \cdot I_v, \quad (2.3)$$

$$c\Delta\tau = 2.73 \cdot I_v. \quad (2.4)$$

Как показало вычислительное моделирование, полученные соотношения (2.3) и (2.4) остаются справедливыми при  $n > 4$ , вне зависимости от точки расположения НАЛ, геометрии расположения НКА относительно НАЛ и вертикальной задержки сигнала в ионосфере.

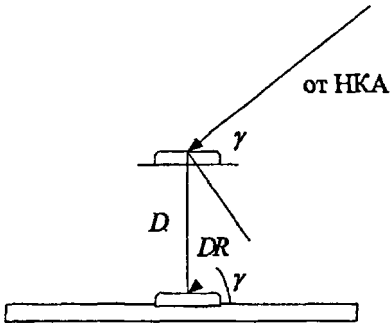


Рис. 4. Влияние ионосферы на погрешность определения высоты

Теоретически обосновать полученные результаты можно следующим образом. Пусть в точке с известными координатами измеряется псевдодалность до НКА. Аналогичные измерения производятся в другой точке, расположенной выше первой на величину  $\Delta y$  (рис. 4). Разность псевдодалностей измеренных в двух точках, в предположении, что сигналы НКА приходят из бесконечно удаленной точки равна  $\Delta R = \Delta y \cdot \sin \gamma$ .

Разность измеренных псевдодалностей равна погрешности измерения псевдодалности, которая приводит к смещению оценки высоты на величину  $\Delta y$ . Для смещения оценки расхождения шкалы времени НАП  $\Delta\tau$  достаточно к псевдодалности добавить величину  $c\Delta\tau$ . Тогда, результирующая ионосферная погрешность измерения псевдодалности равна

$$I^* = c\Delta\tau - \Delta y \cdot \sin\gamma. \quad (2.5)$$

Согласно ОМИ, погрешность измерения псевдодальностей, вызванная влиянием ионосферы, определяется выражением

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_\oplus}{R_\oplus + h} \cos\gamma\right)^2}}. \quad (2.6)$$

Необходимо найти зависимость погрешностей определения высоты и времени  $\Delta y$  и  $\Delta\tau$  от вертикальной задержки сигнала в ионосфере и угла места НКА. Для НАП, которая расположена на поверхности Земли углы мест наблюдаемых НКА изменяются в пределах от 0 до 90°. Выражения (2.5) и (2.6) описывают одну и ту же величину, при этом значение  $I - I^*$  должно стремиться к нулю для каждого угла места НКА. Необходимо найти параметры  $\Delta y$  и  $\Delta\tau$  так, чтобы величина  $(I - I^*)^2$  была минимальна для каждого возможного угла места НКА

$$J = \int_0^{\pi/2} (I - I^*)^2 dy \rightarrow \min_{\Delta\tau, \Delta y}. \quad (2.7)$$

Вычислив, частные производные  $J$  по  $\Delta y$  и  $\Delta\tau$ , затем приравняв их к нулю и решив полученную систему уравнений, можно получить уравнения связывающие погрешности высоты и времени в зависимости от вертикальной задержки сигнала в ионосфере

$$c\Delta\tau = I_0 \frac{\frac{1}{a} \cdot \arcsin(a) - \frac{\pi}{4} F\left(\frac{\pi}{2}, a\right)}{1 - \pi^2/8}, \quad (2.8)$$

$$\Delta y = I_0 \frac{\frac{\pi}{2a} \arcsin(a) - F\left(\frac{\pi}{2}, a\right)}{1 - \pi^2/8}. \quad (2.9)$$

где  $a = \frac{R_\oplus}{R_\oplus + h}$ ,  $F\left(\frac{\pi}{2}, a\right)$  - полный эллиптический интеграл 1-го рода.

Если принять радиус Земли  $R_\oplus = 6371$  км и высоту слоя ионосферы  $h = 432.5$  км, то  $a = 0.94$ , по таблицам значений полных эллиптических интегралов можно найти, что  $F\left(\frac{\pi}{2}, 0.94\right) = 2.48$ , тогда погрешности определения высоты и времени, вызванные влиянием ионосферы, будут определяться выражениями

$$\Delta y = 1.91 \cdot I_0, \quad (2.10)$$

$$c\Delta\tau = 2.80 \cdot I_0. \quad (2.11)$$

Если сравнить полученные выражения (2.10), (2.11) и выражения (2.3), (2.4), то можно сделать вывод, что результаты теоретического исследования подтверждают результаты вычислительного моделирования, это можно проил-

люстрировать и с помощью приведенных на рис. 5 графиков погрешностей, полученных с помощью вычислительного моделирования и теоретического исследования.

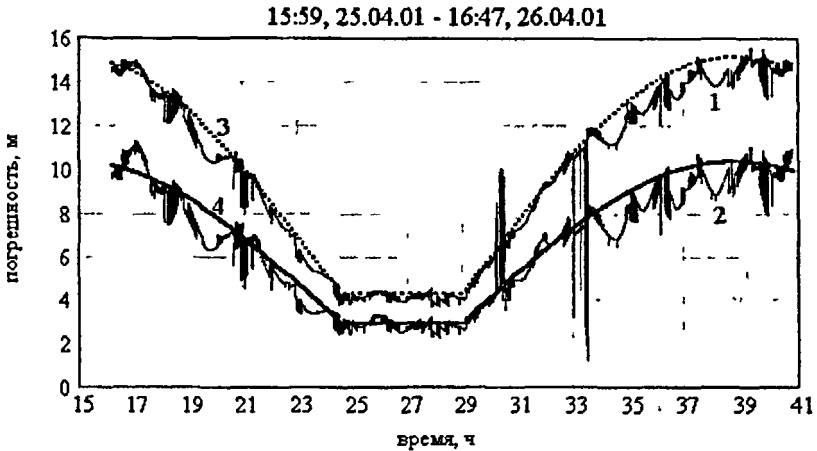


Рис. 5. 1 -  $c\Delta\tau$ , полученная в ходе вычислительного моделирования; 2 -  $\Delta y$ , полученная в ходе вычислительного моделирования; 3 -  $c\Delta\tau = 2.80 \cdot I_v$ ; 4 -  $\Delta y = 1.91 \cdot I_v$ ,

Исследования показали, что наибольшая часть (90%) ионосферной составляющей погрешности определения высоты и времени зависит только от вертикальной задержки сигнала в ионосфере (ИЭК в вертикальном столбе ионосферы), согласно уравнениям (2.10) и (2.11). Остальная часть (10%) ионосферной составляющей погрешности определения высоты и времени зависит в равной степени от задержки сигнала в ионосфере и от геометрии расположения наблюдаемого созвездия НКА относительно НАЛ.

Полученные зависимости позволяют пользователям одночастотной ПАП ГЛОНАСС и GPS уменьшить погрешность определения высоты и времени при решении навигационной задачи в постобработке. Зная величину вертикальной задержки сигнала в ионосфере, можно вычислить ионосферные составляющие погрешности высоты и времени по формулам (2.10) и (2.11), а затем скорректировать значения высоты и времени. Полученные формулы (2.10) и (2.11) позволяют определить погрешности высоты и отстройки шкалы времени НАП, вызванные влиянием ионосферы со СКП не превышающей 10%. Таким способом можно уменьшить погрешность определения высоты и времени по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS.

В *третьей главе* рассматривается проблема определения задержки сигнала в ионосфере в одночастотной НАЛ ГЛОНАСС и GPS.

Анализ существующих методов определения задержки сигнала в ионосфере для одночастотной НАП показал, что наиболее перспективным является

подход на основе использования свойств принимаемого сигнала - равенства по величине и противоположности по знаку фазового и группового запаздывания в ионосфере сигналов систем ГЛОНАСС и GPS.

С учетом свойств ОМИ (1.4), а также используя разность приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала НКА, получена следующая разностная система уравнений

$$2 \cdot (Ob(\gamma_j(k)) - Ob(\gamma_j(k-1))) \cdot I_v(k) = \Delta r_j(k) - \Delta \varphi_j(k), \quad (3.1)$$

где  $\Delta r_j(k)$  - приращение псевдодальности, измеренной по дальномерному коду НКА;  $\Delta \varphi_j(k)$  - приращение псевдодальности, измеренной по фазе несущей частоты сигнала НКА;  $j = \overline{1, \tilde{n}(k)}$ ,  $\tilde{n}(k)$  - число НКА, которые наблюдались в моменты времени  $k$  и  $k-1$ . Из системы уравнений (3.1) можно найти значение вертикальной задержки сигнала в ионосфере для  $j$ -го НКА, что позволяет определять задержку сигнала в ионосфере для каждого НКА отдельно, с помощью выражения

$$I_v(k) = \frac{\Delta r_j(k) - \Delta \varphi_j(k)}{2 \cdot (Ob(\gamma_j(k)) - Ob(\gamma_j(k-1)))}. \quad (3.2)$$

Задача оценки задержки сигнала в ионосфере в реальном масштабе времени решается как задача фильтрации, с помощью многоканального фильтра Калмана, который ориентирован на задачи с изменяющимся во времени вектором измерений. Вектор измерений будет меняться при изменении числа наблюдаемых НКА. Оценка, в этом случае, получается путем одновременного весового суммирования обновляющих процессов всех каналов с использованием общего экстраполятора. Весовые коэффициенты обратно пропорциональны дисперсиям шумов измерения каждого из каналов. Исследования многоканального фильтра Калмана показали эффективность его применения для обработки измерений по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS.

Изменение вертикальной задержки сигнала в ионосфере на коротком промежутке времени (менее часа) описывается с помощью уравнения

$$I_v(k+1) = I_v(k) + w(k),$$

где  $w(k)$  - случайная величина, описывающая возмущение процесса, распределенная по нормальному закону с мат. ожиданием  $M\{w(k)\} = 0$  и дисперсией  $D\{w(k)\} = \sigma_w^2$ . Уравнение наблюдения можно записать в виде

$$g_j(k) = h_j(k) I_v(k) + v_j(k),$$

где  $g_j(k) = \Delta r_j(k) - \Delta \varphi_j(k)$ ;  $h_j(k) = 2 \cdot (Ob(\gamma_j(k)) - Ob(\gamma_j(k-1)))$ ;  $v_j(k)$  - погрешность измерения разности приращений псевдодальностей, распределенная по нормальному закону с мат. ожиданием  $M\{v_j(k)\} = 0$  и дисперсией  $D\{v_j(k)\} = \sigma_v^2$ .

Оценка вертикальной задержки сигнала в ионосфере с помощью многоканального фильтра Калмана определяется следующими выражениями

$$\hat{I}_v(k) = \hat{I}_v(k-1) + \sum_{j=1}^{\tilde{n}(k)} a_j(k) [g_j(k) - h_j(k) \hat{I}_v(k-1)],$$

$$a_j(k) = p^*(k)h_j(k)\sigma_v^{-2},$$

$$p^*(k) = \frac{\hat{p}(k)}{1 + \hat{p}(k)\sigma_v^{-2} \sum_{j=1}^{\hat{n}(k)} h_j^2(k)},$$

$$\hat{p}(k) = p^*(k-1) + \sigma_v^2.$$

где  $\hat{I}_v(k)$  - оценка вертикальной задержки сигнала НКА в ионосфере;  $a_j(k)$  коэффициент усиления фильтра Калмана;  $p^*(k)$  - дисперсия ошибок фильтрации;  $\hat{p}(k)$  - дисперсия ошибок экстраполяции. В качестве начального значения вертикальной задержки сигнала в ионосфере  $I_v(0)$  используется оценка, полученная с помощью стандартной модели ионосферы, применяемая в системе GPS.

Алгоритм, реализующий разработанный метод, разбивается на два этапа (рис. 6). Сначала, с помощью фильтра Калмана, оценивается вертикальная задержка сигнала, а затем с помощью выражения (1.4) вычисляется задержка сигнала для каждого НКА, с учетом его угла места.

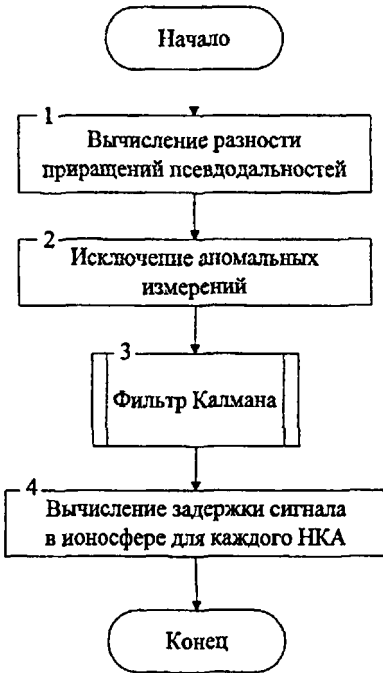


Рис. 6. Блок-схема алгоритма

В данном алгоритме предполагается, что вертикальная задержка сигнала в ионосфере будет одинакова во всей зоне видимости НКА. Результатом вычислений являются задержки сигналов в ионосфере всех наблюдаемых НКА на  $k$ -й момент времени. Полученные задержки сигналов НКА в ионосфере применяются для коррекции измеренных псевдодальностей.

Работа по приращениям псевдодальностей позволяет исключать аномальные измерения, а также позволяет фиксировать пропуски периодов приращения фазы, неизбежно возникающие в реальных измерениях. Если разность приращений псевдодальностей будет превышать заранее определенное пороговое значение, то измерения по этому НКА исключаются из расчета.

Разработанный метод не требует разрешения или оценки фазовой неоднозначности. С точки зрения вычислительной сложности, предлагаемый метод значительно проще по сравнению с существующими методами, поскольку исключена необходимость в определении начальных фазовых неоднозначностей. При этом уменьшается число неизвестных переменных. Размерность вектора

оцениваемых параметров не меняется при изменении числа НКА в рабочем созвездии. Данный метод может быть реализован в одночастотной НАП, где производятся измерения по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала НКА. Такому требованию отвечает большинство современной одночастотной НАП, работающей по сигналам ГЛОНАСС и GPS.

Полученные результаты можно обобщить и для двухчастотных измерений по фазе несущей частоты сигнала НКА

$$\left( \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1 \right) \cdot (Ob(\gamma_j(k)) - Ob(\gamma_j(k-1))) \cdot I_r(k) = \Delta\varphi_{1j}(k) - \Delta\varphi_{2j}(k),$$

где  $f_1, f_2$  - несущие частоты сигнала на **L1** и **L2**;  $\Delta\varphi_{1j}(k), \Delta\varphi_{2j}(k)$  - приращенные псевдодальностей, измеренных по фазе несущей частоты сигнала НКА, соответственно, на **L1** и **L2**. В этом методе используются двухчастотные измерения по фазе несущей частоты сигнала, погрешность которых на порядок меньше погрешностей измерений по дальномерному коду. В отличие от известных двухчастотных фазовых методов, здесь не требуется раскрывать начальные фазовые неоднозначности измерений, кроме того, разности задержек сигналов в радиотрактах НАЛ для **L1** и **L2** не будут влиять на оценку задержки сигнала в ионосфере.

В *четвертой главе* представлены результаты экспериментальных исследований разработанного одночастотного метода определения задержки сигнала в ионосфере, а также экспериментальных исследований влияния ионосферы на погрешность координат и времени.

Экспериментальные исследования проводились с помощью НАЛ разработанной в НИИРТ КГТУ совместно с ФГУП НПП «Радиосвязь». В экспериментальных исследованиях использовалась НАП серии МРК различных модификаций, работающая по сигналам ГЛОНАСС и GPS на частоте диапазона L1. НАП МРК способна производить одновременио прием и обработку сигналов до 18 НКА ГЛОНАСС и GPS.

Для проверки точности разработанного метода привлекалась информация об ИЭК, полученная на основе двухчастотных измерений, обработанных в аналитических центрах международной службы International GPS Service (IGS). На протяжении ряда лет IGS проводит постоянный мониторинг состояния ионосферы. IGS представляет собой сеть станций наблюдения, оснащенных двухчастотной НАП, работающей по сигналам GPS. По данным IGS составляются карты пространственно-временного изменения интегральной электронной концентрации в вертикальном столбе ионосферы. Эту информацию в формате IONEX можно получить по электронному адресу <ftp://cddisa.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>. Соответствие информации о состоянии ионосферы для г. Красноярск определяется тем, что в КГТУ расположена одна из станций IGS, оснащенная двухчастотной НАП GPS, что позволяет принять данные IGS в качестве эталонных измерений.

В течение 2001 г. была проведена серия экспериментов при различных геомагнитных условиях (возмущенная и спокойная ионосфера). В таблице 2

приведены дата проведения эксперимента, его продолжительность, геомагнитные условия, выраженные через Ар-индекс, СКП разработанного одночастотного метода  $\sigma_1$  и стандартной модели ионосферы, применяемой в GPS  $\sigma_2$ , а также их соотношение.

Таблица 2.

Дата	Время, ч	Ар-индекс, нТ	СКП одночастотного метода $\sigma_1$ , м	СКП модели ионосферы GPS $\sigma_2$ , м	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$
25.04.01	26	6	0.50	1.84	3.71
26.04.01		6			
28.04.01	29	40	0.81	1.73	2.13
29.04.01		13			
16.05.01	46	7	0.39	1.23	3.18
17.05.01		6			
18.05.01		8			
08.10.01	24	16	1.09	2.25	2.06
09.10.01		18			
Усредненное значение по всем экспериментам			0.70	1.76	2.77

На графиках (рис. 7-8) приведены оценки вертикальной задержки сигналов в ионосфере, выраженные в единицах длины, полученные с помощью:

- разработанного одночастотного метода;
- стандартной модели ионосферы, применяемой в системе GPS;
- информации аналитических центров IGS, расположенных в Европейском центре орбитографии (CODE, Швейцария) и в Газодинамической лаборатории (JPL, США);
- модели ионосферы International Reference Ionosphere (IRI-95).

На графиках (рис. 7-8) по оси абсцисс приводится число часов, прошедших от начала первых суток эксперимента.

С 27 октября по 1 ноября 2003 г. были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых определялась вертикальная задержка сигнала в ионосфере до начала и во время больших геомагнитных возмущений (рис. 9). Во время геомагнитных возмущений (с 29.10.03) Ар-индекс превышал 200 нТ. При этом расхождение разработанного одночастотного метода относительно данных IGS составило 5.32 м (СКП), расхождение модели ионосферы GPS относительно данных IGS составило 20 38 м (СКП). Разработанный одночастотный метод позволил в 3.83 раза точнее определить задержку сигнала в ионосфере, по сравнению с моделью ионосферы GPS. Данные экспериментальные исследования продемонстрировали устойчивость работы разработанного метода в период сильнейших геомагнитных возмущений, в отличие от модели ионосферы GPS, погрешность которой, в таких условиях, существенно возросла.

15:59, 25.04.2001 - 16:47, 26.04.2001

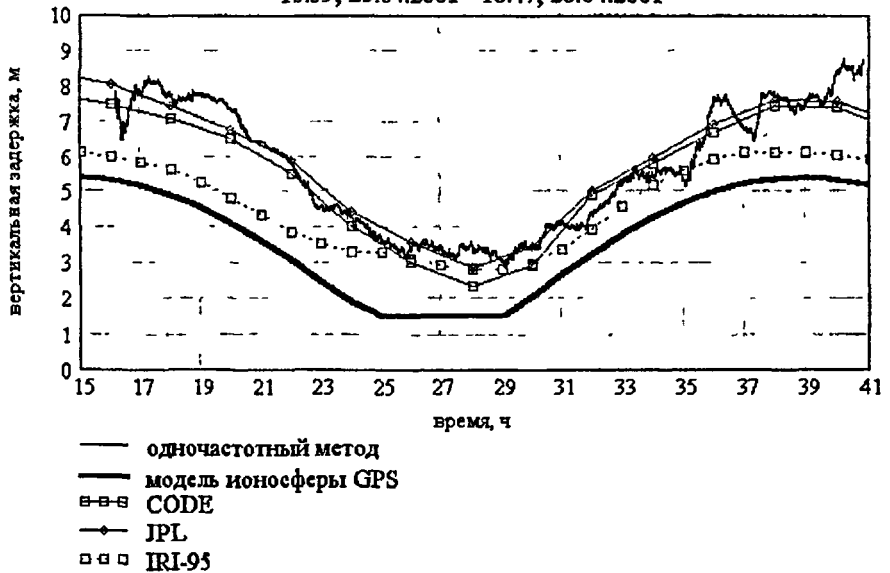


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований, проведенных при низкой геомагнитной активности ( $A_p=6$  nT)

11:14, 28.04.2001 - 15:27, 29.04.2001

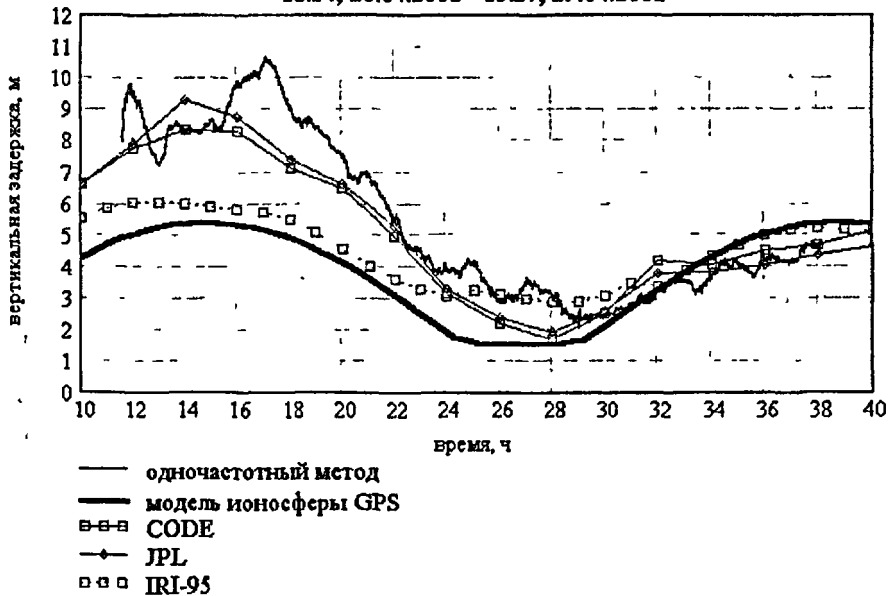


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований, проведенных при повышенной геомагнитной активности ( $A_p=40$  nT)

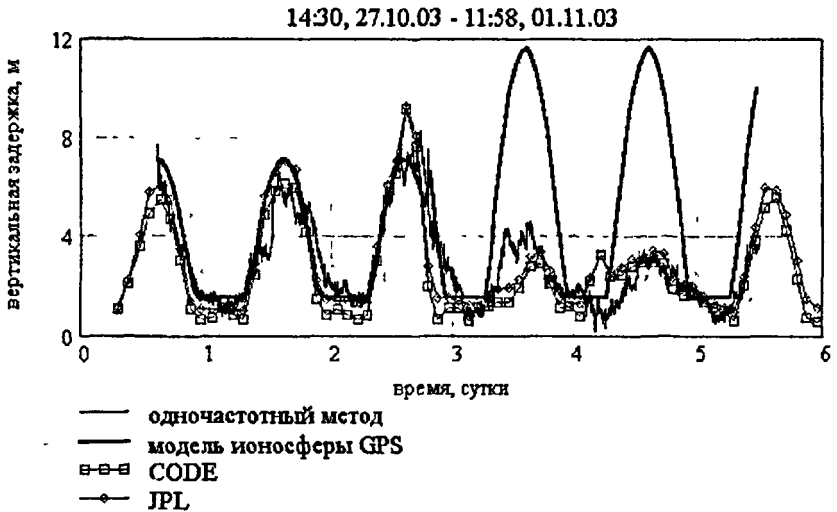


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований до начала и во время сильнейших геомагнитных возмущений (с 29.10.03  $A_p > 200$  nT)

В 2002 г. были проведены экспериментальные исследования разработанного одночастотного метода на подвижном объекте - самолете, в ходе высокоширотной экспедиции СО РАН. Измерения проводились в процессе перелета по маршруту «Хатанга - арх. Северная Земля - Ледовый аэродром ВШЭ» при помощи одночастотной НАЛ МРК-18А. Полученные данные позволили составить меридиональный срез ионосферы при переходе от средних широт к высоким (рис. 10).

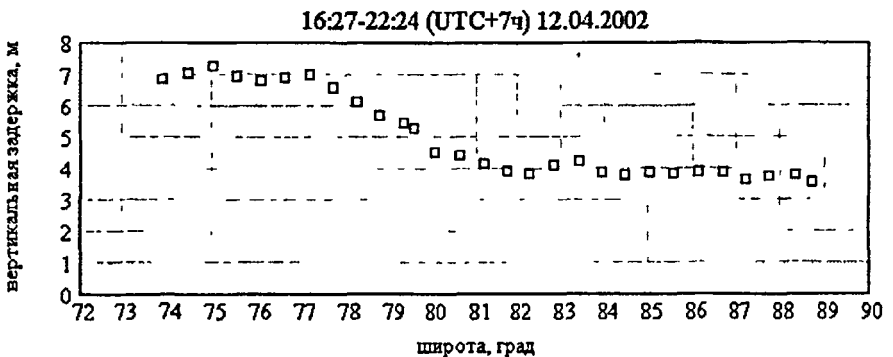


Рис. 10. Вертикальная задержка сигнала в ионосфере, полученная во время перелета по маршруту «Хатанга - арх. Северная Земля - Ледовый аэродром ВШЭ»

Целью дальнейших экспериментальных исследований было применение разработанного одночастотного метода для коррекции измеренных псевдодалейностей, а также подтверждение адекватности и корректности полученных во Второй главе выводов о влиянии ионосферы на погрешность определения координат. В ходе экспериментальных исследований навигационная задача решалась тремя способами:

- 1) без применения ионосферной коррекции;
- 2) с использованием стандартной модели ионосферы GPS для определения задержки сигнала в ионосфере;
- 3) с использованием разработанного одночастотного метода для определения задержки сигнала в ионосфере.

На рис. 11-12 приведены значения погрешности определения координат с ионосферной коррекцией (одночастотный метод) и без ионосферной коррекции. Мат. ожидание погрешности высоты без ионосферной коррекции  $\hat{M}\{\Delta y_1\} = 17.84 \text{ м}$ , с помощью стандартной модели ионосферы GPS  $\hat{M}\{\Delta y_2\} = 11.75 \text{ м}$  и с ионосферной коррекцией на основе разработанного одночастотного метода  $\hat{M}\{\Delta y_3\} = 7.94 \text{ м}$ . Применение разработанного одночастотного метода позволило уменьшить мат. ожидание погрешности определения высоты в 2.2 раза по сравнению со случаем, когда при решении навигационной задачи не использовалась ионосферная коррекция, и в 1.5 раза уменьшить мат. ожидание погрешности определения высоты по сравнению со случаем, когда при решении навигационной задачи использовалась ионосферная коррекция с помощью стандартной модели ионосферы, применяемой в системе GPS.

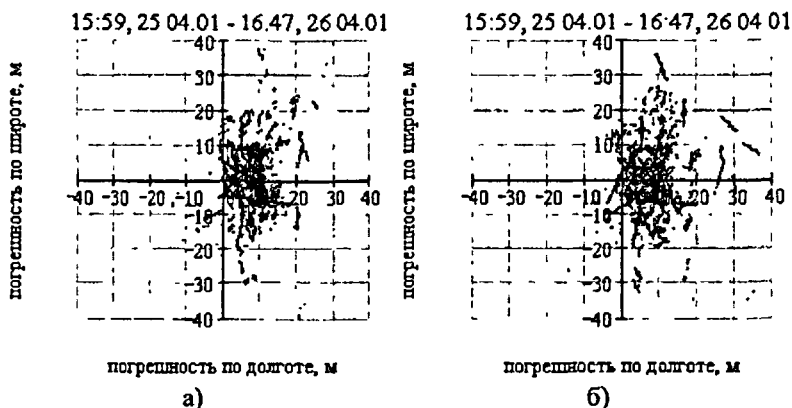


Рис. 11. Погрешность определения координат в горизонтальной плоскости без ионосферной коррекции (а), с ионосферной коррекцией (б)

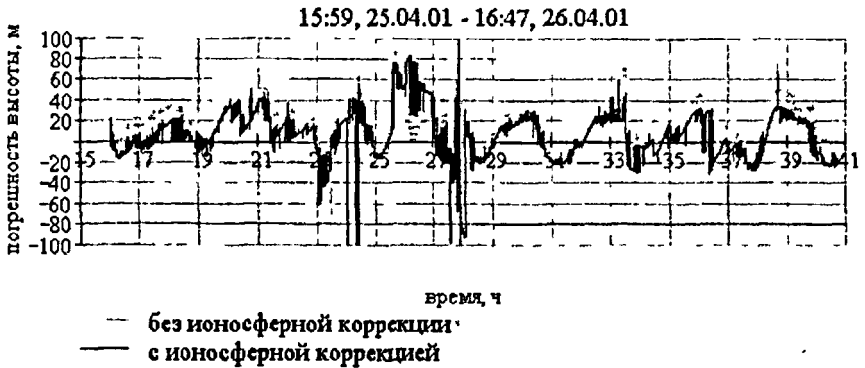


Рис. 12. Погрешность определения высоты

Результаты экспериментов подтвердили выводы о влиянии ионосферы на погрешность определения координат, полученные в ходе вычислительного моделирования и теоретических исследований. На рис. 13 приведена сглаженная погрешность определения высоты за счет влияния ионосферы, которая получена путем вычитания погрешности определения высоты с ионосферной коррекцией из погрешности высоты без ионосферной коррекции. На этом же графике приведено значение погрешности высоты за счет влияния ионосферы, полученной с помощью формулы (2.9) в ходе теоретического исследования.

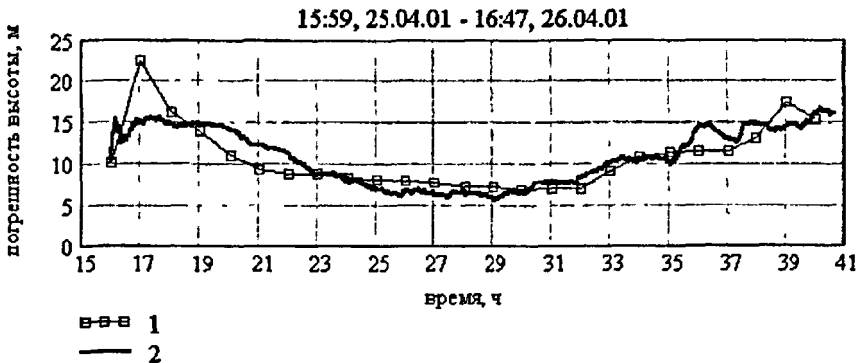


Рис. 13. Погрешность определения высоты, вызванная влиянием ионосферы: 1 - полученная в ходе эксперимента; 2 - полученная с помощью формулы  $\Delta y = 1.91 \cdot I$ ,

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. С помощью методов теории чувствительности исследованы погрешности ОМИ, обозначены границы ее применимости на практике. Опираясь на принятую ОМИ, проведено исследование влияния задержки сигнала в ионосфере на погрешность определения координат и времени по сигналам систем ГЛОНАСС

и GPS, разработан и исследован метод определения задержки сигнала в ионосфере.

2. В ходе исследований получено, что задержка сигнала в ионосфере, в наибольшей степени, оказывает влияние на погрешности определения высоты и расхождения шкалы времени НАП относительно шкал времени систем ГЛОНАСС и GPS. Причем погрешности определения высоты и времени, главным образом, зависят только от ИЭК в вертикальном столбе ионосферы и слабо зависят от числа и геометрии расположения наблюдаемых НКА относительно НАП. Исследования, проведенные с помощью вычислительного моделирования, теоретических расчетов, а так же экспериментов, полностью подтвердили полученные выводы. Получены уравнения, которые дают возможность оценить аналитически, не прибегая к экспериментам или вычислительному моделированию, вклад ионосферы в погрешность определения высоты и времени.

3. Результаты полученные в диссертации открывают возможности для исследования свойств погрешностей псевдодальностей, зависящих от угла места НКА, например, задержки сигнала в тропосфере, что позволит более эффективно проектировать и использовать глобальные навигационные спутниковые системы следующих поколений.

4. Практическим результатом диссертационной работы является разработка одночастотного метода определения задержки сигналов в ионосфере, основанного на применении разности приращений псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и по фазе несущей частоты сигнала НКА. Применение разности приращений псевдодальностей для определения задержки сигнала в ионосфере позволяет исключить из вектора оцениваемых параметров начальные неоднозначности фазовых измерений по каждому НКА.

5. В ходе исследований показано, что разработанный одночастотный метод определения задержки сигнала в ионосфере можно обобщить и для двухчастотных фазовых измерений, что создает предпосылки для создания метода определения задержки сигнала в ионосфере приближающегося к потенциальной точности оценки данной погрешности.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кавтарашвили Ш.Ш., Казанцев М.Ю., Чмых М.К. Построение региональной модели ионосферы с помощью приемоиндикаторов ГЛОНАСС/GPS для проведения локального геодинамического мониторинга // Спутниковые системы связи и навигации: Труды Международной научно-технической конференции в 3-х томах. Красноярск: Изд-во КГТУ, 1997. - Т.3. - С. 92-99.
2. Казанцев М.Ю., Чмых М.К. Алгоритм определения ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 103-й годовщине Дня Радио «Современные проблемы радиоэлектроники». - Красноярск: КГТУ, 1998. - С. 93-94.

3. Казанцев М.Ю., Чмых М.К. Исследование работы навигационного фильтра построенного на основе методов многоканальной калмановской фильтрации // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 104-й годовщине Дня Радио «Современные проблемы радиоэлектроники». - Красноярск: КГТУ, 1999. - С. 74-75.
4. Казанцев М.Ю. Применение адаптивной фильтрации для решения навигационной задачи по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых специалистов «Решетневские чтения». - Красноярск: САА, 2000. - С. 29-30.
5. On The Problem Of Ionosphere Model Construction With Aid Of DORIS, GPS And GLONASS Satellite System / Sh. Kavtarashvily, M. Kazantsev, V. Kokorin, V. Osipov, S.A. Podlesny // Proceedings of DORIS Days 2000. - Toulouse, May, 2000.
6. Казанцев М.Ю. Экспериментальное исследование алгоритмов решения навигационной задачи построенных на основе метода многоальтернативной фильтрации // Вестник НИИ СУВПТ, Сборник научных трудов. - Красноярск: НИИ СУВПТ, 2000. - Вып. 5. - С. 149-154.
7. Казанцев М.Ю., Марарескул Д.И., Кокорин В.И. Обобщенный алгоритм обработки навигационной информации в приемной аппаратуре ГЛОНАСС и GPS // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 106-й годовщине Дня Радио «Современные проблемы радиоэлектроники». - Красноярск: КГТУ, 2001. - Ч.1. - С. 81.
8. Казагшев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Определение ионосферной задержки радиосигналов в систем ГЛОНАСС И GPS // Материалы Международной научно-практической конференции «САКС-2001». Красноярск: САА, 2001. - Ч.1. — С. 28-29.
9. Казанцев М.Ю. Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем // Труды региональной научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов, молодых ученых «Современные проблемы радиотехники (СПР-2001)». - Новосибирск: НГТУ, 2001. - С. 108-111.
10. Grebennikov A.V., Kazantsev M.Yu., Fateev Yu.L. Estimating ionospheric GLONASS and GPS signal delay by single frequency measurements // Proceedings of 9<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (May 27-29, 2002). - P. 37-45.
11. Казанцев М. Ю., Кашкин В.Б., Кокорин В.И. Определение интегральной электронной концентрации в ионосфере с помощью одночастотной аппаратуры спутниковых навигационных систем /// Труды Всероссийской научной конференции «Физика радиоволн». - Томск: Издательство Томского университета, 2002. - С. IV28-31.
12. Казанцев М.Ю., Польш В.Г., Фатеев Ю.Л., Ионосферная составляющая погрешности измерения координат на основе спутниковых радионавигацион-

- ных систем // Сборник научных трудов НПО им. С.А. Лавочкина. Выпуск 4. - М.: БЛОК-Информ-Экспресс, 2002. - С . 193-199.
13. Казанцев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодалностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS // Журнал радиоэлектроники №12, 2002. <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/6/text.html>
  14. Исследование влияния ионосферы на работу спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS в полярных районах / В.А. Борсоев, В.М. Владимиров, В.А. Гребенников, М.Ю. Казанцев, А.М. Филлипов, В.С. Новиков, В.Ф. Смирнов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции посвященной 80-летию гражданской авиации России «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». - М.: МГТУ ГА, 2003. - С. 15.
  15. Казанцев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Влияние ионосферы на погрешность определения координат по сигналам ГЛОНАСС и GPS // Труды X Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - С. 136-142.
  16. Пат. 2208809 РФ, МКИ<sup>7</sup> Н04В 7/185. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере / М.Ю. Казанцев, В.И. Кокорин, Ю.Л. Фатеев; Заявлено 21.02.02; Оpubл. 20.07.03. Бюл. №20.



Подписано в печать 28.04.04

Формат бумага 60x84 1/16

Усл. печ. л. 2,0

Тираж 100 экз. Заказ 400/2

Отпечатано на ризографе КГТУ  
660074, Красноярск, Киренского, 26



# - 9061