

## О ПРОБЛЕМЕ УЧЕТА ИОНОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ ТОЧНОГО ГНСС-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Жалило А.А., Бессонов Е.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, НУЦ каф. ОПТ, тел. (057) 700-22-84

e-mail: [gpsgroup@kture.kharkov.ua](mailto:gpsgroup@kture.kharkov.ua)

The results of researches of the spatial-temporal properties of the differential ionospheric linear combinations in order to achieve centimeter accuracy of positioning using single-frequency GNSS equipment on the baselines over 50 km are presented.

**Введение.** Ионосферная составляющая погрешностей кодовых и фазовых ГНСС-наблюдений в настоящее время является наиболее значимой по отношению к другим источникам погрешностей. Практически полностью учесть влияние ионосферной задержки на задержку сигнала позволяет использование двухчастотного оборудования. В случае же использования одночастотных ГНСС-приемников, стоимость которых в 3-5 раз меньше, чем двухчастотных, возможно несколько путей учета (компенсации) ионосферной задержки: а) путем формирования и использования дифференциальных поправок (однобазовых или сетевых) [1-4]; б) путем применения коррекций с использованием ионосферных моделей [1, 4, 5] и в) путем совместного оценивания (в случаях, когда это возможно и целесообразно) параметров моделей ионосферной задержки (например, см. [6]) в число оцениваемых параметров наряду с информационными параметрами местоположения. Для компенсации медленноменяющейся (трендовой) составляющей ионосферных задержек широкое применение получили ионосферные модели: Klobuchar [1] и GIM IONEX [4, 5]. Указанные глобальные модели описывают с определенной степенью точности только регулярную (трендовую) составляющую ионосферной задержки и не учитывают вариационную составляющую процессов, происходящих в реальной ионосфере. Многочисленные зарубежные исследования в этой области, см. например, [3, 6], показали, что ионосферная задержка, как функция изменения угловых параметров навигационного спутника во времени, может быть представлена несколькими составляющими – 1) долговременным медленноменяющимся трендом, 2) крупномасштабными сильно коррелированными во времени и пространстве медленноменяющимися вариациями, получившими название LSTIDs (Large-Scale Travelling Ionospheric Disturbances) и 3) среднемасштабными быстро перемещающимися вариациями MSTIDs (Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances). Последняя составляющая (MSTIDs) является наиболее изменчивой, наиболее подвижной и практически не поддающейся моделированию. Достаточно детальное описание составляющих ионосферной задержки LSTIDs и MSTIDs представлено, в частности, в работе [6], а также в многих других работах, где на основе многолетних исследований приводятся оценки основных характеристик указанных составляющих. Выполненные в 2010-2011 г.г. авторами настоящей работы исследования ставили перед собой цель определить степень воздействия и вклад составляющих ионосферной задержки на надежность и точность дифференциального одночастотного (L1) ГНСС-позиционирования сантиметровой точности при работе с наблюдениями ГНСС-сетей перманентных референцных станций различного размера - с межбазовыми расстояниями от 50 до 250 км.

**1. Исходные данные и использованный инструментарий.** Для достижения поставленной цели с использованием многочисленных серий двухчастотных ГНСС-наблюдений был проведен анализ пространственно-временных свойств и характеристик трендовых и вариационных составляющих одинарных и двойных разностей ионосферных задержек на различных межбазовых расстояниях. Особое внимание в ходе исследований было уделено исследованию свойств составляющих MSTIDs, которые характеризуются, как выявили результаты исследований, периодами вариаций 5-20 мин и уровнями вариаций от 5-30 см до нескольких метров (в зависимости от уровня геомагнитных возмущений и солнечной

активности), что и является главным препятствием для надежного и точного L1-позиционирования.

Для проведения исследований были использованы результаты GPS-наблюдений перманентных референчных станций на малых (до 50 км) и средних (от 100 км до 250 км) базовых расстояниях. В частности, были использованы данные двухчастотных станций двух сетей: 1) английской сети на базе оборудования фирмы Leica AG с малыми и средними базовыми расстояниями (станции “AMER”, “BARK”, “BREC”, “WEIR”, “STEV”) за летний период (182..183-е GPS сутки 2007 г.) и 2) украинской сети ГАО НАН Украины (“GLSV”, “PRYL”, “SMLA”, “CHIV” на базе оборудования фирм NovAtel и Trimble) за зимний период (345..346-е GPS сутки 2008 г.). Для предварительной обработки наблюдений использовался совместно разработанный ГАО НАНУ и ХНУРЭ программный комплекс OSTAВА\_PPA [7]. В ходе предварительной обработки двухчастотных наблюдений были исключены аномальные наблюдения, устранены циклические фазовые скачки, данные приведены к целым GPS секундам, осуществлены необходимые коррекции. Также были устранены и начальные фазовые неоднозначности двойных разностей фазовых наблюдений. Это позволило сформировать и исследовать т.н. «безгеометрические» [1] линейные комбинации («нулевые», одинарные и двойные разности) для различных базовых расстояний. Для выделения указанных выше составляющих ионосферных задержек (трендовая, LSTID и MSTID составляющие), отличающихся спектральными характеристиками (периодами вариаций) было использовано специально разработанное программное обеспечение [8].

**2. Пространственно-временные свойства ионосферных задержек. Основные результаты исследований.** Эффективность использования дифференциального режима в части компенсации ионосферной задержки существенно зависит от базового расстояния между приемником потребителя и базовой (референчной) станции, т.е. от степени пространственной корреляции ионосферных задержек на разнесенных трассах прохождения навигационных сигналов.

Для определения вклада составляющих ионосферной задержки при дифференциальном одночастотном (L1) ГНСС-позиционировании с использованием были проведены соответствующие расчеты и анализ. Проведенные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

- пространственная корреляция трендовой и LSTID составляющих ионосферных задержек для рассмотренных базовых расстояний (100 - 250 км) близка к единице, что приводит к значительной компенсации этих составляющих в одинарных разностях ГНСС наблюдений; остаточные медленноменяющиеся составляющие невелики (как правило, не более дециметра) и могут быть уменьшены с использованием моделей Klobuchar или GIM IONEX;

- вариационная MSTID-составляющая сильно изменчива, не поддается моделированию и не может компенсироваться с использованием «трендовых» моделей Klobuchar или GIM IONEX; однако, на малых базовых расстояниях 15-50 км наблюдается сильная корреляция вариаций MSTID, поэтому эта составляющая погрешностей может быть эффективно скомпенсирована с использованием одинарных и двойных разностей (дифференциальный режим); с увеличением же базовых расстояний (свыше 30-50 км) наблюдается существенная декорреляция вариационной составляющей, что принципиально ограничивает точностные возможности L1-позиционирования;

- исследования временной корреляции (на смежных сутках) составляющих ионосферной задержки показали, что прогнозировать суточные изменения ионосферных составляющих (особенно вариации LSTID и MSTID) с достаточной точностью невозможно и для достижения необходимой точности требуется реализация иных способов уменьшения ионосферных погрешностей, в частности, путем использования измерительной информации сети двухчастотных станций, окаймляющих зону работы потребителей и построения точных локальных моделей, учитывающих как остатки медленноменяющихся крупномасштабных ионосферных неоднородностей (трендовая и LSTID составляющие), так и вариационную MSTID-составляющую;

- в ходе анализа полученных результатов было отмечено достаточно сильная корреляция больших ионосферных MSTID- вариаций в фазовых наблюдениях каждой из станций выбранной сети при условии, если учесть временные сдвиги между вариациями на разных станциях; это явление получило объяснение в ряде работ, в частности, в [6], что позволило авторам этой работы предложить и метод уменьшения MSTID- вариаций, который представляет значительный интерес с точки зрения его развития и дальнейшего использования в задачах L1-позиционирования;

- при исследовании свойств ионосферных задержек были отмечены заметные различия уровня вариаций ионосферы для разных времен года (зима, лето), в частности, отмечен высокий уровень MSTID-вариаций (амплитуда вариаций до 30-50 см) при наблюдениях зимой (дневные наблюдения) и существенно меньший уровень этих вариаций (до 5-7 см) летом;

- оценка точности модельной компенсации (использовалась модель GIM IONEX [3, 5]) регулярной составляющей ионосферной задержки (трендовая и LSTID составляющие) показала, что данный подход не позволяет получить сантиметровый уровень остаточной погрешности компенсации и необходимо использовать измерительную информацию сети двухчастотных станций, окаймляющих зону работы потребителей для построения точных локальных моделей (например, VRS/ФКР-типа [3, 6]);

- применение линейной интерполяции медленноменяющихся сильно коррелированных в пространстве ионосферных составляющих, оцененных по данным референционных станций, на текущее местоположение роверного приемника потребителя позволяет практически полностью скомпенсировать эти компоненты ионосферных погрешностей - остаточные погрешности компенсации на базовых расстояниях ~100 км не превышают 5 мм; в то же время, MSTID- вариации не поддаются интерполяции.

На рисунках 1 и 2 приведены примеры оценок ионосферных задержек для разных базовых расстояний и времен года (зима и лето). Регулярная составляющая ионосферной задержки была устранена с использованием полиномов низкой степени.

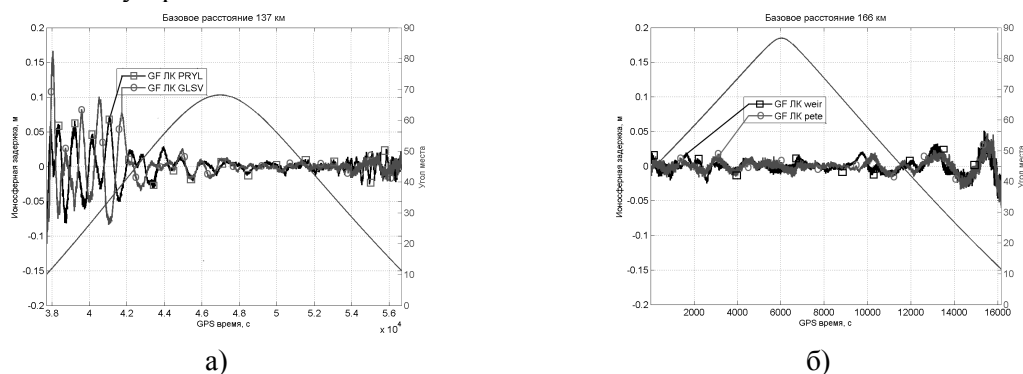


Рисунок 1 – Пример оценок ионосферной задержки для разных базовых расстояний и времен года, а) базовое расстояние 137 км, станции «PRYL»-«GLSV», наблюдения получены в зимний период (346-е GPS сутки); б) базовое расстояние 166 км, станции английской сети «WEIR»-«PETE», наблюдения получены в летний период (182-е GPS сутки)

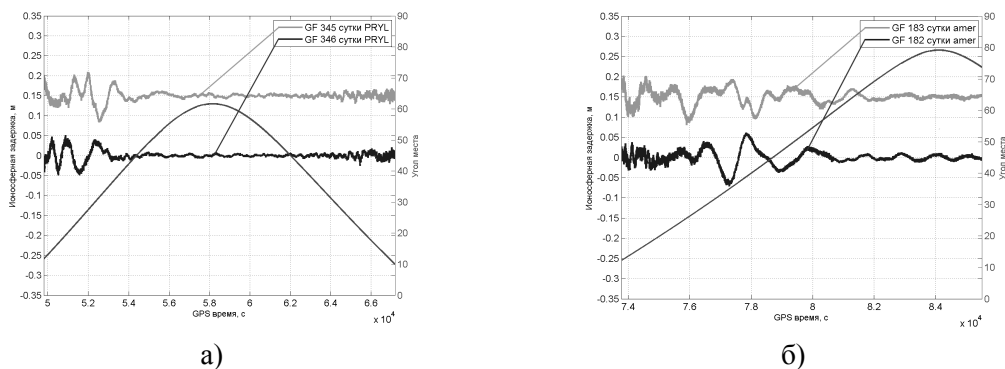


Рисунок 2 – Пример оценок ионосферной задержки для разных времен года на смежных

сутках, а) станция «PRYL», 345-е и 346-е GPS сутки, б) станция «AMER», 182-е и 183-е GPS сутки

### **Выводы.**

Исследованы основные свойства и характеристики ионосферной задержки для базовых расстояний 50-250 км. Показано, что ионосферная задержка содержит трендовую, медленноменяющуюся (LSTID) и быстроменяющуюся вариационную (MSTID) составляющие. LSTID-составляющая для исследуемых базовых расстояний (до 250 км) является сильно коррелированной и эффективно компенсируется в дифференциальном режиме. Компенсация MSTID-составляющей возможна только на относительно небольших базовых расстояниях (до 30 - 50 км). Существенный интерес представляет собой свойство MSTID-составляющей, заключающееся в близости (по форме) больших ионосферных MSTID- вариаций в фазовых наблюдениях разнесенных станций сети при учете временных сдвижек между временными рядами вариаций на разных станциях. Это свойство может быть использовано для формирования коррекций наблюдений одночастотных потребителей. Использование общепринятых глобальных моделей не позволяет устранить медленноменяющиеся ионосферные составляющие с сантиметровой точностью. Эффективной альтернативой является применение метода линейной интерполяции (VRS/FKP-типа) данных сети двухчастотных станций, окаймляющих зону работы потребителей.

### **Литература.**

1. Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз «Глобальна система визначення місцеположення (GPS)» теорія і практика переклад з англійської мови третього видання за ред. академ. НАН України Я. С. Яцківа, Київ, 1996.
2. An overview of GPS inter-frequency carrier phase combinations. J. Paul Collins, October 1999, UNB/GSD. <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/L1L2combinations.collins.pdf>.
3. Eva and Torben Schüler - Active GNSS Networks and the Benefits of Combined GPS+Galileo Positioning // InsideGNSS, November/December 2007, p.p. 46-55.
4. «IONEX: The IONosphere maps EXchange format Version 1» Stefan Schaer, Werner Gurtner <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/ionex1.pdf>
5. «Use of Global Ionospheric Maps for Precise Point Positioning» R.J. Wienia <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:dec284ff-7f52-4ad3-bfc0-28b4b1851bcd/>
6. M. Hernandez-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz - Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis // ION GNSS, 19-th ITM of the Satellite Division, 26-29 September 2006, Fort Worth, TX, p.p. 1358-1368.
7. Zhalilo A., Shelkovenkov D. - Features and service performance of multifunctional software toolkit "OCTAVA" for processing and analysis of GPS/GNSS observations // GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1st – 2nd March 2007, pp. 102-110.
8. Бессонов Е.А. - Аппроксимация гладкими функциями расчетных ионосферных коррекций // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник "Радиотехника" – 2011, № 165. – с. 69-74.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН ГНСС

Занимонский Е.М., \*Стемпняк К., \*\*Цисак Я., \*Вельгош П., \*Капча Я.

Радиоастрономический институт НАН Украины

61002 Харьков, ул. Краснознаменная, 4, тел. (057) 720-35-89. [zanimonskiy@rian.kharkov.ua](mailto:zanimonskiy@rian.kharkov.ua)

\*Университет Варминьско-Мазурский, Ольштын, Польша,

\*\*Институт Геодезии и Картографии, Варшава, Польша,

The results of static and kinematic tests of GNSS antennae are presented. Possibilities and restrictions of individual calibration are pointed for the simple antennae. Perspective utility of the limited movement of antennae is mentioned for geodetic measurements.

Аттестация высокоточной приемной аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в настоящее время становится актуальной задачей в связи со значительным увеличением объемов геодезических работ, выполняемых спутниковыми методами. Одним из основных этапов этой аттестации являются метрологические исследования приемных антенн на пунктах-спутниках перманентных станций ГНСС.

При выборе места установки антенн ГНСС обычно рассматриваются устойчивость и стабильность основания, отсутствие объектов поглощающих сигнал на пути его распространения (здания и сооружения, деревья и другие естественные преграды) и предметов, отражающих радиоволны от спутников в направлении приемной антенны. В случае невозможности выбора места без отражений и (или) устранения отражающих предметов приходится оценивать уровень погрешности геодезических или навигационных измерений из-за многолучевости – явления, при котором сигнал от спутника приходит к приемной антенне не только по основному, прямому лучу, но по дополнительным лучам, отраженным от местных предметов. Интерференция приводит к сдвигу фазы регистрируемого информационного сигнала и, как следствие, к появлению погрешностей в фазовых и кодовых измерениях.

На рынке геодезической аппаратуры ГНСС имеется большое разнообразие типов приемных антенн, отличающихся степенью подавления паразитных сигналов. Для оценки качества широко распространенных антенн по этому параметру, а также по стабильности положения фазового центра были проведены сравнительные исследования на калибрационной базе обсерватории «Ламкувко» Варминьско-Мазурского университета в Ольштыне.

24 антенны восьми различных типов устанавливались поочередно на столбе (фундаменте) калибрационной базы. Накопление данных проводилось в трехсуточных сериях для каждой антенны с одним и тем же приемником. Эксперимент продолжался в течение ста дней осенью 2010 года. Координаты фазовых центров антенн рассчитывались относительно перманентной станции LAMA (на расстоянии 25 м) с помощью программных пакетов, научного - Bernese GPS Software v.5.0 и прикладного - Topcon Tools v.7.5. Использовались как одночастотные измерения на L1 и на L2, так и двухчастотная комбинация “iono-free”, с подавлением влияния ионосферы. Обычно двухчастотные измерения не используются на расстояниях между пунктами менее десяти километров, но, в данном случае, при малом расстоянии выполнялось тестирование для соблюдения метрологического правила «аттестация в том же режиме, в котором проводятся измерения».

Статические тесты в июле 2011 года были дополнены кинематическими. Три однотипные антенны располагались в одну линию на пластиковой балке, которая поворачивалась вокруг вертикальной оси с амплитудой 45° и периодом 30 секунд (рисунок). Средняя антенна располагалась над осью поворота, а крайние – симметрично на расстоянии 25 см от оси. Темп регистрации данных составлял одну секунду. Периодическое изменение положения антенны позволило модулировать фазы прямого и отраженного сигналов контролируемым, но различным образом, для каждой из трех антенн.