

УДК 550.388.2

## О ДИАГНОСТИКЕ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ GPS II

О.А. Горбачев, В.Б. Иванов, П.В. Рябков

## ON THE IONOSPHERE DIAGNOSTICS USING GPS II FIXED-FREQUENCY RECEIVERS

O.A. Gorbachev, V.B. Ivanov, P.V. Rjabkov

Статья освещает результаты предварительного анализа диагностики параметров ионосферы с использованием первичных данных, полученных с помощью одночастотных приемников GPS.

The article demonstrates the results of preliminary analysis of ionosphere parameter research with use of primary data provided by GPS single-frequency receivers.

### Обоснование предлагаемой методики диагностики ионосферы

В предыдущей работе авторов [1] были сформулированы цели исследований по диагностике ионосферы одночастотными навигационными приемниками GPS и описаны проблемы, которые возникли на первом этапе реализации такой диагностики. В первую очередь было установлено, что измеряемые псевдодальности испытывают быстрые и сильные флуктуации, которые не могут быть связаны с вариациями полного электронного содержания вдоль траектории распространения радиоволн от спутника до приемника. Вследствие этого непосредственно псевдодальномерные данные для каждого из видимых спутников GPS не могут быть использованы для получения информации о реальных и достаточно хорошо оцененных по порядку величины флуктуаций полного электронного содержания. Более оптимистичными представлялись возможности использования для указанных целей данных по временным эволюциям фазы несущей, поскольку, как было установлено, вариации фазы не имеют столь грубых и явно аппаратного происхождения флуктуаций, как псевдодальности. При этом для получения необходимых данных из фазы несущей необходимо вычистить реальную геометрическую дальность до спутника, а также удалить тренд, связанный с уходом часов приемника от системного времени. Первая часть задачи не представляет принципиальных трудностей – имеются как прогнозируемые эфемероидные данные, так и данные по точным координатам спутников, измеренным экспериментально. По второй же части были выявлены новые проблемы. Оказалось, что подстройка часов приемника выполняется с большой частотой и по неизвестному потребителю алгоритму так, что сам ход часов содержит быстрые и интенсивные флуктуации. В этой связи после удаления тренда часов из фазы несущей временной ход последней приобретает аппаратный шум, превышающий возможные ионосферные флуктуации.

Следующим этапом преодоления описанных трудностей стала попытка анализа не отдельных псевдодальностей до заданных спутников, а данных, усредненных по наблюдаемому «созвездию» спутников. Для этого по всем возможным комбинациям четырех спутников, необходимых для определения

трех координат приемника, решалась навигационная задача с последующим усреднением координат. Однако такой подход не приблизил нас к цели, так как аппаратный шум в псевдодальностях отобразился в крайне большой разброс восстанавливаемых координат приемника, показанных на рис. 1.

В заданный момент времени наблюдалось «созвездие» из 11 спутников. При этом имеет место  $C_{11}^4 = 330$  неповторяющихся комбинаций из 4 спутников, для которых и решались навигационные задачи. На рисунке изображены точки рассчитанных координат приемника в каждой реализации четверки, представленные в трех плоскостях прямоугольной системы координат относительно средних значений. Очевидно, что на фоне среднеквадратичных отклонений порядка сотен метров ожидаемые ионосферные поправки порядка метров и дециметров будут скрыты. Таким образом, усреднение по «созвездию» спутников положения не спасает. Безотносительно к теме настоящей работы интересно отметить явную структурированность облака точек координат, имеющую место во всех плоскостях. Происхождение такой структурированности может стать предметом специальных исследований.

Необходимо заметить, что проблема аппаратного шума псевдодальности разработчиками навигационных приемников решена, по крайней мере частично. Действительно, в типичных условиях реальная ошибка определения координат лежит в пределах объявленных паспортных данных приемника и составляет несколько метров [2]. Нами это многократно проверено с помощью простой схемы: были определены геодезические координаты антенны приемника с точностью 0.1 м по широте и долготе и 0.3 м по высоте [3] и измеряемые системой GPS координаты сопоставлялись с геодезическими.

Следующим шагом наших исследований была реализация идеи получения ионосферной поправки как расстояния между точкой с истинными (геодезическими) координатами и точкой с координатами, определенными приемником GPS. Рассматривая, например, временной ход высоты приемника, определяемой системой GPS, можно было видеть, что быстрые (с характерным временем порядка нескольких

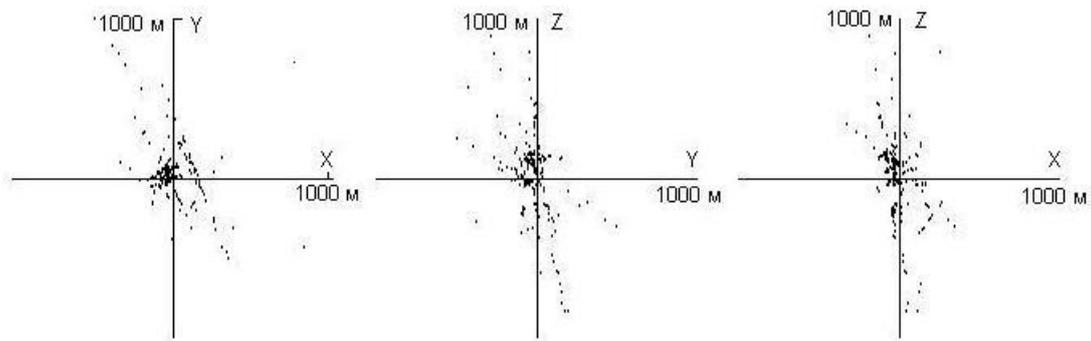


Рис. 1. Координаты GPS-приемника по результатам измерения псевдодальностей, усредненные по наблюдаемому «созвездию» спутников (относительно средних значений).

секунд) флуктуации и здесь имеют место, но их амплитуда уже составляет дециметры и метры. Можно ли связывать эти вариации с реальными ионосферными флуктуациями? Ответ на этот вопрос дает двухпозиционный эксперимент, реализованный по следующей схеме: проводились синхронизированные по времени измерения высоты на однотипных приемниках GPS в двух пунктах с известными геодезическими координатами [3], разнесенных на несколько километров друг от друга. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

На рисунке визуально наблюдается некая тенденция к подобию графиков, что подтверждается рассчитанной величиной коэффициента корреляции (~0.13), однако ни о какой идентичности представленных кривых не может быть и речи. Возможно, для анализа вариаций с большим характерным временем, например суточного хода, такой подход имеет некоторые перспективы, особенно при применении различного типа сглаживаний и фильтров, однако для объявленной ранее цели – диагностики слабых и короткопериодических вариаций ионосферы данная методика непригодна.

Итак, результаты экспериментов, представленные на рис. 1, 2, позволяют окончательно констатировать тот факт, что псевдодальномерные данные для поставленной нами задачи неинформативны. Приходится возвращаться, но уже с новых позиций, к фазовым измерениям. И здесь нам удалось достичь неожиданно хороших результатов.

Напомним, что главной проблемой, возникающей при использовании данных о временных вариациях фазы несущей, является проблема устранения аппаратных флуктуаций сдвига часов. Для фазы несущей

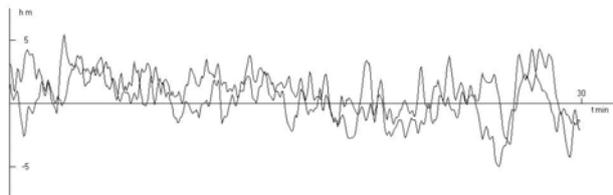


Рис. 2. Временные зависимости вариаций высот, определяемых системой GPS, относительно истинных (геодезических) высот для двух пунктов с координатами:

1.  $\varphi = 52^{\circ}16'32.8''$ ,  $\lambda = 104^{\circ}17'22.2''$ ,  $h = 460.603$  м ;
2.  $\varphi = 52^{\circ}15'25.8''$ ,  $\lambda = 104^{\circ}21'22.1''$ ,  $h = 503.182$  м .

одного спутника это сделать не удастся, но разность фаз для двух спутников уже не содержит сдвига часов приемника. Для спутника с номером  $k$  фазовый путь  $F_k$  (т. е. фаза, умноженная на длину волны) определяется соотношением

$$F_k = R_k - I_k + \delta_k + C_k. \quad (1)$$

Здесь  $R_k$  – геометрическое расстояние до спутника,  $I_k$  – ионосферная поправка, представляющая собой наклонное полное электронное содержание вдоль радиолуча, приведенное к единицам длины,  $\delta_k$  – малая добавка, включающая тропосферную поправку, задержку в антенно-фидерных трактах и т.д., которую в дальнейшем не будем рассматривать,  $C_k$  – постоянная для данного сеанса измерений величина, значение которой неизвестно.

Измеряя разность фазовых путей для двух спутников  $p$  и  $q$  и зная истинные расстояния до них, можно найти величину

$$I_{pq} = R_p - R_q - F_p + F_q + C. \quad (2)$$

Можно выбрать константу  $C$  таким образом, чтобы в начальный момент времени величина  $I_{pq}$  была нулевой. Тогда в дальнейшем эта величина как функция времени будет представлять собой изменение ионосферной поправки для спутника  $p$  относительно ионосферной поправки для спутника  $q$ . Очевидно, что главные вклады в эти поправки дают области высот в районе максимума электронной концентрации в ионосфере. Для типичных гелиогеомагнитных условий эту высоту можно считать равной 300 км [4]. Определим подыоносферную точку как проекцию на поверхность Земли точки пересечения траекторией распространения радиолуча “приемник – спутник” высоты  $h=300$  км. Так как траектория распространения радиолуча практически никогда не бывает вертикальной, то приходится пересчитывать реальную наклонную поправку в вертикальную, при этом для различных траекторий распространения радиолуча разница в поправках не превышает 30 %. Очевидно, что величину  $I_k$  следует привязывать к подыоносферной точке. Поскольку в реальных условиях пара подыоносферных точек для видимых спутников может быть разнесена на дальность до 1000 км, то они могут находиться в существенно разных условиях относительно величины полного вертикального электронного содержания.

Особенно ярко это должно проявляться в условиях прохождения солнечного терминатора – на восходе и на заходе Солнца. Например, возможна такая ситуация, когда одна точка еще находится в освещенной (ионизованной) зоне, а вторая – уже в ночных условиях.

Величина вертикальной ионосферной поправки оценивалась в разных исследованиях. В дневных условиях она достигает нескольких десятков метров, а ночью уменьшается до нескольких метров [5, 6]. Следовательно, мы вправе рассчитывать наблюдать величины  $I_{pq}$  в десятки метров на восходе и заходе и существенно меньшие значения в околополуденные и околополуночные часы. Таким образом, можно ожидать увидеть во временном ходе разностной поправки некий регулярный тренд и на его фоне более короткопериодические и более слабые флуктуации, если таковые присутствуют. Поскольку именно последние и являются объектом внимания, то возникает вопрос: если таковые будут наблюдаться, то к какой из пары подионосферных точек их следует привязывать? Однако, во-первых, на начальном этапе это не столь важно, поскольку нас могут, например, интересовать спектры таких вариаций безотносительно того, в какой точке они имеют место быть. Во-вторых, этот вопрос существенно проясняется из анализа реальных данных, к которому мы и переходим.

#### Описание эксперимента и анализ полученных результатов

Эксперимент проводился 21 декабря 2006 г. в Иркутске с использованием навигационного приемника GARMIN GPS V. Длительность непрерывных наблюдений составляла 150 мин на заходе Солнца, т. е. во время резкого уменьшения интегральной ионизации в ионосфере за линией терминатора. В течение сеанса велось наблюдение за 7 спутниками GPS с номерами 2, 4, 5, 12, 13, 24 и 30. Использовалось специализированное программное обеспечение, позволяющее генерировать RINEX-файлы, из которых и извлекался временной ход фазы несущей [1]. Для расчета геометрического расстояния до спутника  $R_k$  в процессе постобработки использовались данные по лазерному определению истинных координат спутников, выложенные в Internet на сайте Международной службы лазерных дальномерных измерений (International Laser Ranging Service – ILRS) [7]. В настоящее время эти данные широко используются для оценок погрешностей позиционирования орбитальных потребителей СРНС [8]. После обработки данных из них формируются файлы, содержащие 14-часовые ряды прямоугольных геоцентрических координат спутника с интервалом между отсчетами, равным 30 с, которые предоставляются всем заинтересованным пользователям. Так как временное разрешение в используемых нами RINEX-файлах составляет 1 с, то для улучшения временного разрешения лазерных дальномерных измерений использовалась полиномиальная интерполяция данных для шага, равного 1 с.

На рис. 3 представлен временной ход разностной ионосферной поправки, типичный для большей части наблюдений. Виден характерный временной ход в

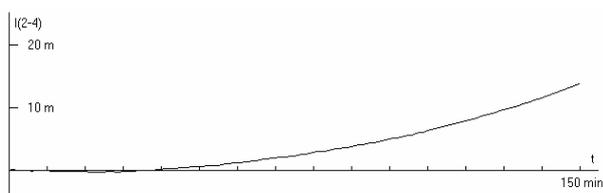


Рис. 3. Временной ход разностной ионосферной поправки для пары спутников № 2–№ 4.



Рис. 4. Временной ход разностной ионосферной поправки № 2–№ 13.

ожидаемых числовых значениях и без явно выраженных флуктуаций.

Подобная картина наблюдается часто, но не всегда. Интересное событие имеет место для пар с участием спутника № 13. На рис. 4 показано поведение разностной поправки для пары № 2 – № 13.

Здесь совершенно четко видно уединенное возмущение длительностью около 5 мин с интенсивностью около 2 м. Мы предполагаем, что данное возмущение связано с развитием какого-либо типа ионосферной неоднородности на пути распространения радиолуча от спутника № 13 до антенны приемника. Важным является то, что аналогичная ситуация проявляется во всех парах с участием спутника № 13 и не проявляется в парах без этого спутника.

Для иллюстрации на рис. 5 приведен временной ход разностной ионосферной поправки для пары № 4 – № 13. Здесь регулярный тренд имеет несколько иной характер, чем на рис. 4, но ионосферное возмущение повторено совершенно аналогично.

В ходе эксперимента обнаружено аномальное поведение разностной поправки и для спутника № 30, которое иллюстрирует рис. 6.

На временном ходе разностной поправки для спутников № 12 – № 30 отчетливо видна «ступенька» в

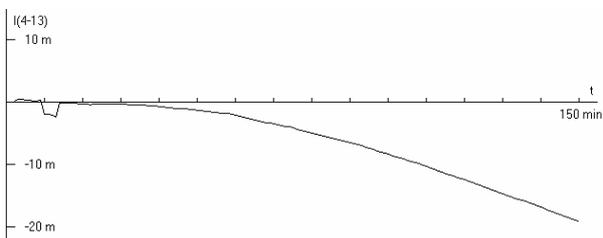


Рис. 5. Временной ход разностной ионосферной поправки для пары спутников № 4–№ 13.

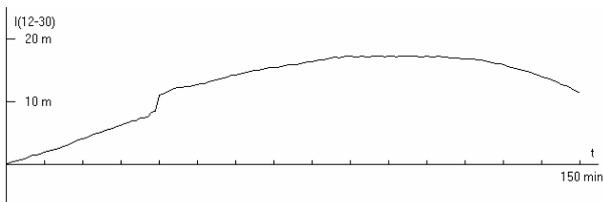


Рис. 6. Временной ход разностной ионосферной поправки для пары спутников № 12–№ 30.

в эволюции поправки, связанная, как мы предполагаем, с развитием какого-либо типа ионосферного возмущения на пути распространения радиолуча от спутника № 30 до антенны приемника. Как и для спутника № 13, все измерения с участием тридцатого спутника содержат указанную особенность. В этой связи интересно проиллюстрировать поведение разностной поправки спутников № 13 – № 30, что сделано на рис. 7.

Как и следовало ожидать, характерные особенности поведения ионосферных поправок для этих двух спутников присутствуют на графике.

В рассматриваемой серии измерений ионосферных поправок присутствуют и более тонкие эффекты проявления нерегулярных процессов в ионосфере. Так для спутника № 24 можно наблюдать присутствие во временном ходе поправки более слабых по амплитуде и мелкомасштабных по времени, но постоянно присутствующих флуктуаций. Этот факт иллюстрирует рис. 8, на котором приведен соответствующий ход разностной поправки от спутников № 2 – № 24.

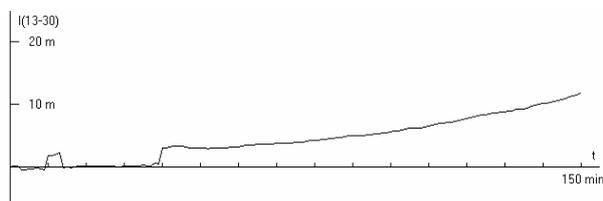


Рис. 7. Временной ход разностной ионосферной поправки для пары спутников № 13–№ 30.

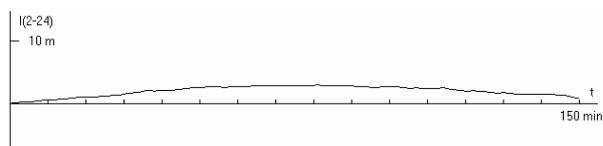


Рис. 8. Временной ход разностной ионосферной поправки для пары спутников № 2–№ 24.

## Выводы

Представленные результаты являются только первым опытом применения предлагаемой методики диагностики ионосферы одночастотными приемниками GPS. Однако уже и этот опыт представил крайне интересные результаты. Область применения методики достаточно широка – от подтверждения механизмов образования различного типа турбулентностей ионосферной плазмы [9, 10] до выработки различий характера рекомендаций по применению GPS-приемников на воздушных судах гражданской авиации. Относительно низкая стоимость оборудования и простота методики измерений могут являться основанием для рекомендаций к ее массовому внедрению. Дальнейшие исследования авторов по совершенствованию предложенной методики будут иметь следующие направления:

1. Использование схемы с тремя приемниками для исследования двумерных (широта – долгота) областей турбулентности ионосферной плазмы.
2. Использование в качестве инструментов исследования приемников ГЛОНАСС.
3. Разработка рекомендаций по оптимальному применению приемников GPS и ГЛОНАСС на ВС гражданской авиации с целью уменьшения погрешностей определения координат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев О.А., Иванов В.Б., Рябков П.В. О возможности применения одночастотных приемников GPS для диагностики ионосферы // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника, 2006. № 107. С. 48.
2. Owner's manual and reference guide GARMIN GPS V // Part Number 190-00204-10 Rev. C. 2003.
3. Технический отчет о выполнении геодезических работ по определению координат GPS антенн. // Иркутск, ООО «Землеустроитель», 2006 г., 26 с.
4. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969. 455 с.
5. Lachapelle G. Navigation Accuracy for Absolute Positioning // AGARD Lecture Series 207, System Implications and Innovative Applications of Satellite Navigation, NATO, 1996.
6. Казанцев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS. // Журнал радиоэлектроники. 2002. № 12.
7. <http://isdg.gfz-potsdam.de/champ/>
8. Афраймович Э.Л., Татаринцев П.В. Погрешность позиционирования орбитальных потребителей спутниковых радионавигационных систем // Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». 2291, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/222.pdf>.
9. Горбачев О.А., Трухан А.А. Ионно-звуковая неустойчивость ионосферной плазмы, сопряженной с кольцевым током Земли // Геомагнетизм и аэронавигация, 1995. Т. 35. № 4. С. 49–56.
10. Трухан А.А., Горбачев О.А. Механизм ионно-звуковой неустойчивости во внешней авроральной ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация, 1997. Т. 37. № 1. С. 121–128.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-02-16357.

Московский государственный университет гражданской авиации, Иркутский филиал, Иркутск