

Экспериментальное определение полного электронного содержания в ионосфере над Йошкар-Олой с использованием технологий ГЛОНАСС/GPS

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова, А. А. Кислицын

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, RyabovaMI@volgatech.net

Представлены методики определения полного электронного содержания в ионосфере по данным трансionoсферного зондирования сигналами спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Описана экспериментальная установка для реализации трансionoсферного зондирования в Йошкар-Оле. Представлены результаты натурных экспериментов и их интерпретация.

Techniques of determining the total electron content in the ionosphere according transionoсpheric sensing satellite navigation systems GLONASS / GPS. The experimental setup for the implementation transionoсpheric sensing in Yoshkar-Ola. The results of field experiments and their interpretation.

Введение.

В настоящее время для исследования структуры и динамики ионосферы Земли и решения задач распределения полной электронной концентрации широкое применение получили спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС/GPS.

Распространяясь через земную атмосферу, радионавигационный сигнал подвергается влиянию различных факторов. Однако существенное влияние на распространение радиосигнала оказывает верхняя часть атмосферы Земли – ионосфера. При этом основной характеристикой, определяющей изменение параметров радионавигационного сигнала, является полное электронное содержание (ПЭС) и его составляющие вдоль пути распространения [1].

Для экспериментального определения ПЭС, по данным трансionoсферного зондирования, используются различные методики оценки группового запаздывания и фазового набега в ионосфере навигационных сигналов. Для расчета теоретических значений ПЭС применяют ионосферные модели, такие как NeQuick и международная справочная модель IRI.

Цель работы – разработка методики измерения полного электронного содержания среднеширотной ионосферы в трансionoсферном радиоканале связи спутник – навигационный приемник и оценка ПЭС на основе данных вычислительного и натурного экспериментов для условий ионосферы над Йошкар-Олой.

Методика определения ПЭС по физическим измерениям.

При проведении измерений ПЭС по данным зондирования сигналами навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, учитываются как несущие частоты, так и их коды модуляции (псевдодальномерные измерения). Известно [1,2], что ПЭС можно определить по данным кодовых измерений на двух частотах:

$$ПЭС = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma_P], \quad (1)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты навигационных систем ГЛОНАСС/GPS,

P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере,

σ_P – ошибка измерения дальности по P-коду.

Однако, вследствие наличия аддитивной константы, возникающей из-за частотно-зависимых задержек в аппаратуре, точность вычислений ПЭС по данной методике недостаточна. Поэтому в ионосферных исследованиях наиболее предпочтительным является использование методики определения ПЭС по фазовым измерениям псевдодальности на двух частотах [1, 3, 4]:

$$ПЭС = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma L], \quad (2)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере,

$L_1 = \Delta\varphi/2\pi$ и $L_2 = \Delta\varphi/2\pi$ – фазовые измерения приемника, выполненные на частоте f_1 и f_2 соответственно,

$const_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений,

σL – ошибка измерения фазы.

В ряде случаев при исследовании ионосферных возмущений требуется некоторая нормировка амплитуды вариаций ПЭС. С этой целью используется преобразование «наклонного» ПЭС (I) в эквивалентное «вертикальное» значение I_V , соответствующее $\theta_s = 90^\circ$. В случае плоской ионосферы и плоской Земли:

$$I_V = I \sin \theta_s, \quad (3)$$

с учетом сферичности:

$$I_V = I \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{max}} \cos \theta_s \right) \right], \quad (4)$$

где I – значение наклонного ПЭС,

R_E – радиус Земли,

h_{max} – высота максимума концентрации электронов в слое F_2 ионосферы,

θ_s – угол места навигационного спутника.

Исследования показали, что при углах $\theta_s > 70^\circ$ возможно использование модели плоская Земля – плоская ионосфера, а в случае низких углов места ($\theta_s < 30^\circ$) необходимо использовать формулу (4).

Вычислительный эксперимент по оценке ПЭС над Йошкар - Олой.

Данные вычислительного эксперимента были получены с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2012, признанной URSI [4] в качестве эталона для оценки ионосферных параметров. Ее внешними параметрами являются: уровень солнечной активности, задаваемый числом Вольфа, дата, время и географические координаты исследуемой точки на Земле с учетом высоты подвеса антенны.

На рис.1 представлен пример суточного хода ПЭС для следующих параметров:

- 1) дата расчёта – 16.12.2012;
- 2) время – местное;
- 3) географические координаты широта: $56^\circ 38' 20''$ N (56.6388), долгота: $47^\circ 53' 27''$ E (47.8908) (для г. Йошкар-Олы);
- 4) высота максимума электронной концентрации 386 км.

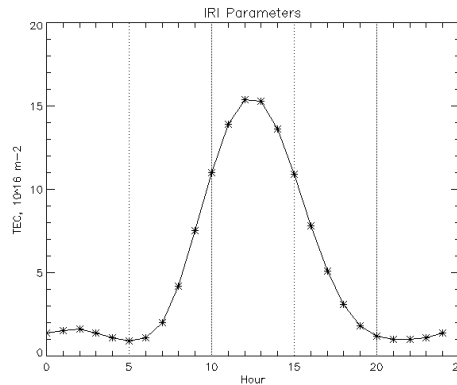


Рис. 1. Суточный ход ПЭС по модели IRI-2007.

В результате вычислений установлено, что максимум ПЭС соответствует промежутку времени с 11:00 до 14:00 часов по местному времени (LT). Резкий подъем кривой наблюдается с 05:00 до 11:00 часов, а с 14:00 до 21:00 часов кривая спадает. В период с 20:00 до 05:00 часов ПЭС имеет минимальные значения амплитуды.

Техника и результаты натурального эксперимента.

Блок-схема разработанного в Поволжском государственном технологическом университете аппаратно-программного комплекса представлена на рис. 2. Комплекс включает специализированный навигационный приемник NovAtelFlexPak-V2 с антенной NovAtelGPS-702 GG и персональный компьютер. Описание и основные характеристики навигационного приемника приводятся в работах [5,6]. Приемник позволяет с достаточно высокой точностью производить фазовые и временные измерения параметров сигнала с частотами L_1 , L_2 систем ГЛОНАСС/GPS, что дает возможность применения полученных результатов для определения ПЭС. Частота вывода данных составляет 20 Гц, что позволяет анализировать данные с высоким временным разрешением. Прием сигналов от спутников осуществляется с достаточно полным обзором неба. Антенна GPS-702 GG, обладающая технологией Pinwheel, позволяет снизить негативное влияние на результаты измерений многолучевости.

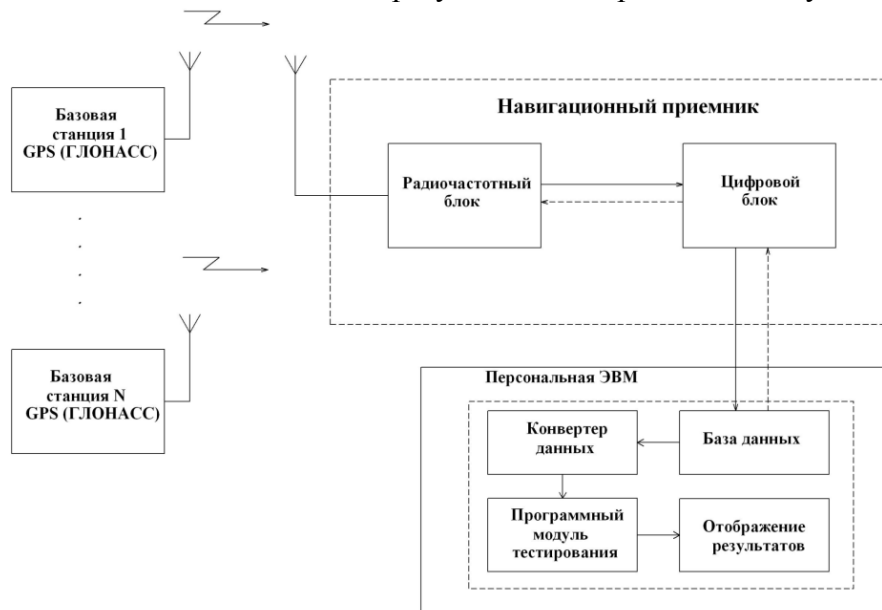


Рис. 2. Аппаратно-программный комплекс.

Сигнал от спутника, принимаемый антенной, поступает на вход приемника. Далее он трансформируется по частоте, фильтруется. Сигнал промежуточной частоты преобразуется в цифровой вид и обрабатывается персональным компьютером. Основной программой для работы с навигационным приемником служит NovAtelCDU. Она осуществляет настройку приемной станции, управление и сбор навигационных данных.

Далее производится автоматическая обработка данных, которая заключается в следующем: первичная информация, полученная приемником от ИЗС, отображается на компьютере в виде log-файла (расширение *.gps); с помощью специального разработанного программного продукта Converter данные извлекаются, обрабатываются и результаты конвертируются в файл с расширением *.xls; в MSExcel производится выборка необходимых данных, в частности измерений фаз и псевдодальностей на частотах L_1 , L_2 , угла места, координат приемника; данные сортируются по спутникам и для нахождения значений вертикального ПЭС, отбираются данные тех спутников, которые находятся в пределах заданного сектора углов возвышения; полученная выборка сохраняется для каждого спутника в отдельном файле с расширением *.txt.

В программном модуле тестирования осуществляется программная реализация расчёта ПЭС с учетом различных факторов трансионосферного эксперимента.

Натурные исследования проводились в декабре 2012 года. Период непрерывных наблюдений составлял около 20 суток. На рис. 3а и рис. 3б представлены ходы изменения ПЭС 16 декабря 2012 года (в промежуток времени с 10:30 до 13:30 часов LT) для спутника № 21, измеренные по данным кодовых и фазовых измерений на двух частотах соответственно.

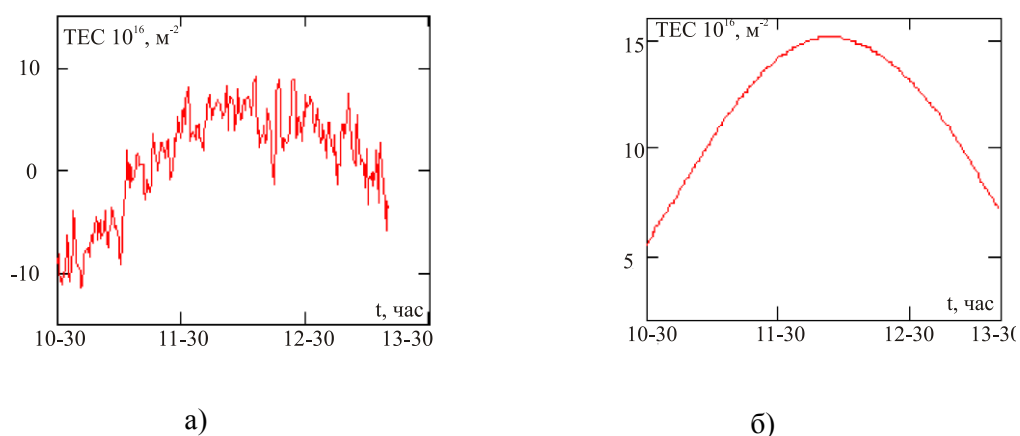


Рис. 3. Ход ПЭС а) по кодовым измерениям на двух частотах б) по фазовым измерениям на двух частотах.

Видно, что результаты фазовых измерений в большей степени соответствуют данным, полученным расчетным путем по данным модели IRI-2012.. Кроме того, результаты кодовых измерений, более «зашумлены» чем результаты фазовых измерений. При этом уровень шума составляет несколько TECU, что соответствует 35%-60% . Это затрудняет выделение вариаций ПЭС, обусловленных ионосферными процессами. Этот результат свидетельствует о том, что при изучении динамических процессов в ионосфере предпочтение следует отдавать фазовым измерениям.

Анализ результатов суточных данных измерений показал, что максимум ПЭС соответствует промежутку времени с 11 до 13 часов и составляет примерно $15 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Выводы:

Представлены методики определения полного электронного содержания в ионосфере по данным трансионосферного зондирования сигналами спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Описана созданная в ПГТУ экспериментальная установка трансионосферного зондирования ионосферы, реализованная на базе навигационного приемника NovAtelFlexPak-V2. Представлены результаты вычислительного и натурального экспериментов. Показано, что для исследования динамических процессов предпочтительнее использовать данные фазовых измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») ГК 10508p/16915 от 08.06.2012 г; РФФИ: проекты № 11-07-00420-а; 12-02-31734 мол_а; ФЦП: ГК №14.132.21.1418; АВЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011; 8.2346.2011.

Литература

1. *Афраймович, Э.Л.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. *Афраймович, Э. Л.* Восстановление полного электронного содержания по данным двухчастотного GPS-приемника, установленного на борту низкоорбитального искусственного спутника земли / Э. Л. Афраймович, П. В. Татаринев // Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». – 2005. – С. 474-481.
3. *Смирнов, В. М.* Исследование возможности применения спутниковых навигационных систем для мониторинга сейсмических явлений / В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова. – Вопросы электромеханики. – 2008. – Т. 105. – 2008. – С. 94-104.
4. *Bilitza, D.* International Reference Ionosphere 2000 / D. Bilitza // Radio Sci. – 2001. – V.36, – №2. – P. 264-275.
5. *Иванов, В. А.* Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы / В.А. Иванов, А.Ю. Желонкин, Н.В. Рябова, А.В. Зуев // Вестник МарГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – №1. – С. 24-30.
6. *Иванов, В. А.* Исследование влияния на помехоустойчивость радионавигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS метеоусловий и космической погоды / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Кислицын // Вестник МарГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – №3. – С. 25-35.