

Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов

В.О. Скрипачев¹, В.О. Большаков², А.В. Тертышников¹

¹ НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы»,
117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: skripatchevv@inbox.ru

² ОАО «Российские космические системы»,
111250 г. Москва, ул. Авиамоторная д.53
E-mail: bagumka@yandex.ru

Представлены результаты по зондирования ионосферы сигналами навигационных КА ГЛОНАСС/GPS. Обсуждается проявление предполагаемых границ трубки магнитного силового поля Земли, опирающейся на зону ионосферы, возмущенной КВ радиоизлучением стэнда «Сура».

Ключевые слова: навигационные космические аппараты, стэнд, возмущения ионосферы, псевдодалность, фазовые измерения, ионосфера, полное электронное содержание, навигационные приемники, преобразование Фурье, скользящее окно.

В исследованиях возмущений ионосферы активно используются сигналы навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС/GPS [1]. По задержкам принятых сигналов НКА на разных частотах диагностируется состояние ионосферы вдоль трассы распространения сигнала, что позволяет исследовать морфологию возмущений полного электронного содержания (ПЭС или ТЕС – total electron contents – в английской транскрипции) ионосферы. Сигналы НКА активно используются при диагностике возмущений ионосферы.

В марте 2009 г. проводились натурные эксперименты по зондированию возмущения ионосферы над нагревным стэндом «Сура», апробации технологии зондирования ионосферы сигналами НКА и оценке надежности навигационных приемников. При проведении эксперимента использовалось несколько навигационных приемников производства фирм «Topcon» (GB-1000) и «Javad» (Prego, Lexon, Махог и приемник, построенный на базе инженерного образца платы Quattro-G3D). Приемники располагались на удалении до 500 м от стэнда «Сура».

За основу измерений использовался приемник «Lexon». С него на ноутбук записывались измерения с частотой 10Гц посредством интерфейсов USB и Ethernet. При первичной обработке навигационных сигналов выяснилось, что прием сигнала осуществляется стабильно и результаты обработки измерений с приемников совпадали с высокой точностью. Измерения выполнялись при низком уровне геомагнитной активности, погода за весь период экспериментов была малооблачная, что характерно для периода весеннего равноденствия.

На основе полученной информации рассчитывалось ТЕС по методике [2]:

$$TEC(t, \varphi, \lambda) = \frac{f_{L1}^2 \cdot f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot \frac{1}{40.3} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[(PR_{L2}^i - PR_{L1}^i) \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{R_3}{R_3 + H_{ион}} \right]^2} \cdot \sin \alpha_i \right],$$

где, $PR_{L_1}^i, PR_{L_2}^i$ – измерения псевдодальности от i -го НКА на частотах f_{L_1} и f_{L_2} , соответственно;

n – количество одновременно видимых НКА;

α_i – зенитный угол направления на i -й НКА;

$H_{ион}$ – высота ионосферного слоя;

R_3 – радиус Земли.

Спутниками *GPS* сигналы излучаются на частотах L_1 и L_2 равных 1575,42 и 1227,6 МГц, соответственно. В соответствии с интерфейсным контрольным документом (http://rniikp.ru/ru/pages/about/publ/ICD_GLONASS_rus.pdf) частоты L_1 и L_2 сигналов спутников ГЛОНАСС определяются соотношениями: $f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1$ и $f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2$, где K – номера несущих частот навигационных радиосигналов, излучаемых НКА в частотных поддиапазонах L_1 и L_2 , соответственно; $f_{01} = 1602$ МГц; $\Delta f_1 = 562,5$ кГц в поддиапазоне L_1 ; $f_{02} = 1246$ МГц; $\Delta f_2 = 437,5$ кГц в поддиапазоне L_2 .

Различие результатов расчета *TEC* посредством ГЛОНАСС и *GPS* будет состоять в том, что множитель $\frac{f_{L_1}^2 \cdot f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}$ в выражениях, полученных на основе сигналов НКА *GPS* будет общим, а применительно к каждому спутнику ГЛОНАСС должен рассчитываться индивидуально.

В общем виде формула расчета *TEC* будет иметь следующий вид:

$$TEC(t, \varphi, \lambda) = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{f_{L_1}^2 \cdot f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2} \cdot (PR_{L_2}^i - PR_{L_1}^i) \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{R_3}{R_3 + H_{ион}} \right]^2 \cdot \sin^2 \alpha_i} \right].$$

Для навигационных сигналов НКА *GPS* частоты L_1 (1575,42МГц) и L_2 (1227,60МГц), а вариация фазы при изменении *TEC* на 10% составляет величины порядка сантиметров. Поэтому для полноценного анализа оценок *TEC* необходимо проводить измерения фазы в пересчете на расстояние не хуже, чем с миллиметровой точностью.

Режим работы стенда планировался с учетом прогноза видимого созвездия НКА и их пролета над зоной стенда. По выбранным НКА проводилась обработка принятых сигналов с учетом пространственно-временной привязки орбит. Предполагалось, что в результате нагрева происходят возмущения ионосферной плазмы в трубке магнитного силового поля Земли, опирающейся на область возмущенной ионосферы, что должно проявиться в прохождении сигналов НКА.

Наиболее удачный пролет НКА *GPS* (G20) над зоной нагрева был зафиксирован 12.03.2009 г. Характеристики видимости НКА G20 приведены на рис. 1.

Ориентировочно с 12:30 до 13:45 (UTC) НКА G20 пересекал силовую трубку магнитного поля, опирающуюся на область возмущенной ионосферы. При этом, нагрев проводился с 11:49 по 13:55 UTC регулярными 3 минутными импульсами с мощностью 80 МВт. То есть, к моменту подлета НКА G20 к стенду были сформированы искусственные возмущения ионосферы.

Анализ возмущений ионосферы проводился по разности двухчастотных фазовых

измерений: из полученных разностей двухчастотных фазовых измерений вычиталась медленно-меняющаяся составляющая, которая аппроксимировалась полиномом 6 порядка, рассчитанным с помощью метода наименьших квадратов (рис. 2).

Отклонения от значений, рассчитанных с помощью полинома, представлены на рис. 3.

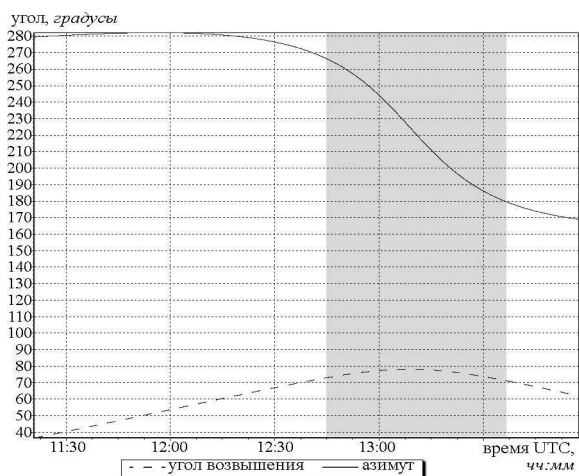


Рис.1. Характеристики видимости НКА G20

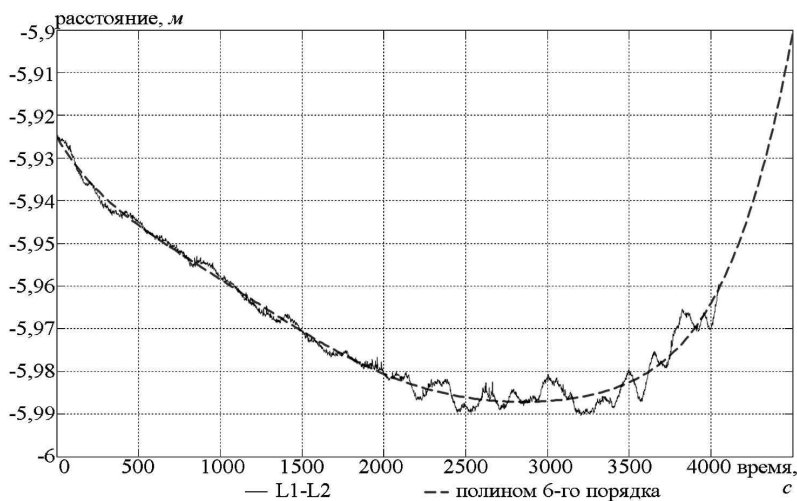


Рис. 2. Разность фазовых измерений на частотах L1 и L2 с аппроксимирующим полиномом 6 порядка. Начало оси абсцисс соответствует 12:30 UTC

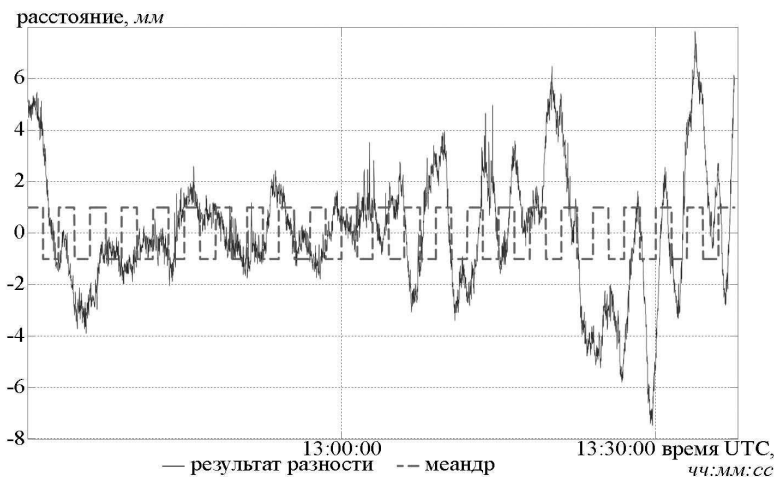


Рис. 3. Разности кривых рис. 2 с наложенным меандром ± 3 мин

На результаты рис. 3 наложен режим работы стенда, в соответствии с которым наблюдается некоторое соответствие быстроменяющейся составляющей разностей полученных псевдодальностей по фазовым измерениям на частотах $L1$ и $L2$. До 13:20-13:25 в противофазе, после чего происходит «провал» и фаза меандра начинает совпадать с фазой измерений. В указанный период $G20$ пролетал над районом стенда.

При измерении фазы приемник измеряет её в циклах, в зависимости от частоты излучаемого спутником сигнала, начальной фазы излучаемого сигнала, погрешностей измерения и неизвестной постоянной величины, обусловленной неоднозначностью фазовых измерений. В случае с сильными ионосферными возмущениями (видно, что амплитуда изменения нарастает) разрешение неоднозначности может приводить к нефизическим результатам по псевдодальности, определенной по фазе. Обычно явления подобного рода дают более резкий скачок по фазовым измерениям.

Эффект запаздывания по фазе излучаемого стендом сигнала обусловлен инерционностью ионосферы. К сожалению, в целях выявления отмеченного эффекта заданный эффект на данной мощности и с заданным периодом меандра необходимо использование более одного спутника над зоной нагрева и НКАс траекторией южнее стенда.

По результатам измерений уменьшения характеристик сигналов НКА на величину $\sim (0.2 - 0.4)$ ед. TEC можно оценить уменьшение плотности плазмы в трубки магнитного силового поля Земли, опирающейся на зону нагрева – области обеднения, считая, что ее размер вдоль магнитного меридиана составляет ~ 50 км. Результаты расчетов показывают, что в этом случае относительное изменение плотности плазмы составляет 15–20 %, что согласуется с данными томографических измерений пятна нагрева ионосферы над «Сурой» в [3].

Кроме того, выделяются достаточно сильные выбросы ΔTEC в моменты 3000-3500 с. Можно предположить, что это проявление границ трубки магнитного силового поля Земли, опирающейся на зону ионосферы, возмущенной КВ радиоизлучением стенда «Сура».

Учитывая небольшую амплитуду вариаций TEC над зоной нагрева, при апробации технологии мониторинга возмущений ионосферы на основе приема сигналов НКА ГЛОНАСС/GPS, проводились исследования мощности вариаций исследуемых характеристик рис. 3 с помощью быстрого преобразования Фурье. Для этого использовалось «скользящее окно» шириной в 16 отсчетов, в котором рассчитывались массивы периодограмм мощности вариаций анализируемых временных рядов. Из практических соображений они присваивались правой границе окна.

На рис. 4 приведены результаты расчета периодограмм для минутных значений рис. 3. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – значения относительной мощности периодов вариаций. Ограничение диапазона анализируемых периодов обусловлено особенностями метода быстрого преобразования Фурье.

На рис. 4 проявился эффект аномального изменения спектра над предполагаемыми границами зоны возмущенной области ионосферы и небольшое увеличение мощности на периоде 3 минуты над стендом. Общее снижение мощности вариаций анализируемых сигналов может быть обусловлено обеднением ионосферной плазмы над зоной нагрева.

Обращают на себя внимание периодические вариации сигнала перед предполагаемой границей трубки магнитного силового поля Земли над зоной нагрева. Они могут быть обусловлены условиями распространения сигнала по трассе НКА — приемник на полигоне стенда «Сура» или морфологией стенок трубки магнитного силового поля Земли.

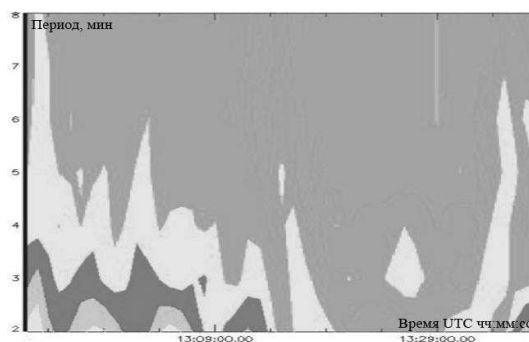


Рис. 4. Характеристики спектрально-временной диаграммы мощности вариаций кривой рис. 3

По секундным данным в спектрограммах также был обнаружен всплеск мощности вариаций над зоной станда в 13:15 и центрированные относительно этого момента изменения спектра мощности в 13:03 и в 13:27, которые могут соответствовать предполагаемым границам возмущенной области ионосферы.

Таким образом, в ходе экспериментов по апробации технологии мониторинга возмущений ионосферы с помощью сигналов НКА ГЛОНАСС/GPS установлено:

- для зондирования необходимо применение приемников геодезического класса, обеспечивающих миллиметровую точность измерения псевдодальности по фазе сигнала;
- выявлены аномальные изменения ΔTEC , которые соответствуют предполагаемым границам трубки магнитного силового поля Земли, опирающейся на зону ионосферы, возмущенной КВ радиоизлучением станда «Сура»;

Литература

1. *Афраймович Э.Л. Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. *Аким Э.Л., Тучин Д.А.* Ионосферная составляющая измерений псевдодальности околоземных космических аппаратов. - Препринт ИПМ № 20, Москва, 2004.
3. *Тертышников А.В.* Основы технологий мониторинга гидрометеорологической безопасности. – М.: Издательство АГЗ МЧС РФ, 2006. 256 с.

Plasma disturbance diagnostics in Earth magnetic field lines experiment using navigation satellites signals

V.O. Skripachev, V.O. Bolshakov, A.V. Tertyshnikov

S&T center «Cosmonit» JSC «RSS»,

Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.

E-mail: skripatchevv@inbox.ru

² *JSC «RSS»,*

111250 Moscow, 53 Aviamotornaya str.

E-mail: bagumka@yandex.ru

Results of sounding boundaries magnetic field line by signals of global navigation satellite system GLONASS/GPS are given. Discussed the boundaries of magnetic field line of Earth which lean on disturbance region of ionosphere by heating facility «Surа».

Keywords: navigation satellite, stand, disturbances of ionosphere, pseudorange, phase measurements, ionosphere, total electron content, navigation receivers, Fourier transform, moving window.