

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВ В ОЦЕНКАХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

<sup>1,2</sup>В.Е. Куницын, <sup>1</sup>Г.А. Курбатов, <sup>1,2</sup>А.М. Падохин, <sup>2</sup>Ю.В. Ясюкевич

## COMPARISON OF NOISE PATTERNS IN IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT ESTIMATIONS FROM DATA OF RECEIVING SIGNALS OF GEOSTATIONARY NAVIGATIONAL SATELLITES

<sup>1,2</sup>V.E. Kunitsyn, <sup>1</sup>G.A. Kurbatov, <sup>1,2</sup>A.M. Padokhin, <sup>2</sup>Yu.V. Yasyukevich

С развитием приемной аппаратуры и появлением в орбитальных группировках навигационных систем геостационарных спутников, передающих сигналы на двух когерентных частотах L диапазона, появилась возможность использовать эти спутники для исследований полного электронного содержания (ТЕС) ионосферы. При этом интерес представляет качество получаемых данных, в первую очередь уровень шума в оценках ТЕС. В данной работе приводятся результаты сравнительного анализа уровня шума в оценках ТЕС по данным приема сигналов геостационарных спутников систем дифференциальной коррекции – индийской GAGAN, европейской EGNOS, американской WAAS, а также китайской навигационной системы COMPASS/Beidou. Используются данные двух приемных пунктов (в европейской части России и в США), оснащенных геодезическими приемниками JAVAD Delta3. Показано, что оценки ТЕС по данным геостационарных спутников навигационной системы COMPASS/Beidou обладают в разы меньшим уровнем шума, чем аналогичные оценки ТЕС по данным систем дифференциальной коррекции, и соответствуют уровню шума в данных GPS/ГЛОНАСС.

With the development of receiving equipment and GNSS constellation the dual frequency L band transmissions are now available from a number of geostationary satellites. These signals can be used for ionospheric total electron content (TEC) estimations. In this connection, the quality of these data, first of all the level of noise in such TEC estimations is of great interest and importance. In this work we present the results of the comparison of the noise patterns in TEC estimations using signals of geostationary satellites of augmentation systems – indian GAGAN, european EGNOS and american WAAS, as well as the signals of chinese COMPASS/Beidou navigational system. We used data from two receiving sites (in european part of Russia and in USA) equipped with JAVAD Delta3 receivers. We show that noise level in TEC estimations based on geostationary satellites of COMPASS/Beidou system is times smaller than for SBAS and corresponds to those of GPS/GLONASS.

### Введение

В последнее время наряду с широко используемыми для определения ТЕС системами GPS/ГЛОНАСС появилась возможность использовать для этих задач геостационарные спутники, входящие в созвездия китайской навигационной системы COMPASS/Beidou и систем дифференциальной коррекции, таких как индийская GAGAN, американская WAAS, европейская EGNOS [Куницын и др. 2014; Kunitsyn, et al. 2015; Jin, et al. 2014]. В данном случае, аналогично GPS/ГЛОНАСС, линейная комбинация фазовых измерений на двух рабочих частотах (L1/L5 – 1575.4 МГц/1176.45 МГц в случае GAGAN, EGNOS и WAAS; любой пары из L1/L2/L6/L7 – 1561.098 МГц/1589.742 МГц/1268.52 МГц/1207.14 МГц в случае COMPASS/Beidou) позволяет определить ТЕС вдоль луча спутник-приемник с точностью до аддитивной постоанной. К преимуществам геостационарных наблюдений ТЕС следует отнести практически неподвижные подионосферные точки спутников (в отличие от GPS/ГЛОНАСС наблюдений), тем не менее, низкие углы возвышения геостационарных спутников уже в средних широтах требуют учета пространственных градиентов электронной концентрации при анализе полученных данных. В настоящее время на орбите находятся одиннадцать геостационарных спутников передающих сигналы на двух когерентных частотах L диапазона, которые можно использовать для оценки ТЕС: Intelsat Galaxy 15, TeleSat Anik F1R, Inmarsat 4-F3 системы WAAS; SES-5 системы EGNOS; GSAT-8 и GSAT-10 системы GAGAN; Compass-G1, Compass-G3, Compass-G4, Compass-G5, Compass-G6 системы

COMPASS/Beidou, причем сигналы пяти из этих спутников возможно принимать на европейской территории России. Целью данной работы является сравнительный анализ уровня шума в оценках ТЕС по данным приема сигналов геостационарных спутников рассмотренных выше систем.

Экспериментальные результаты. На рис. 1 представлена геометрия регистрации сигналов спутников SES-5 (prn136), GSAT-8 (prn127), GSAT-10 (prn128), Compass-G6 (BDS2) и Compass-G5 (BDS5) на приемном пункте в МГУ (MSU 55.75 N, 37.62 E), а также спутников Intelsat Galaxy 15 (prn135), TeleSat Anik F1R (prn138), Inmarsat 4-F3 (prn133) на приемном пункте STFU (37.43 N, 122.17 W). На рис. 2 слева приведены оценки ТЕС за 132-й день 2015 г. по данным спутников BDS5 и GSAT-8 (верхняя панель) и BDS2 и GSAT-10 (нижняя панель) на приемном пункте МГУ. Отметим, что направления на эти пары спутников (см. рис. 1) очень близки, следовательно, близки и подионосферные точки. В результате вариации ТЕС по данным этих спутников в значительной степени повторяют друг друга. На рис. 2 справа приведены оценки шумов (100 сек. СКО) в записях ТЕС по данным приема сигналов этих спутников. Хорошо видно, что шумы для спутников GAGAN в среднем составляют 0.7 TECU, достигая значений 1.5 TECU, в то время, как шумы для спутников COMPASS/Beidou для тех же углов возвышения существенно меньше, достигая в максимуме значений ~0.2 TECU, что немногим больше характерного уровня шумов для спутников GPS на сравнимых углах возвышения.

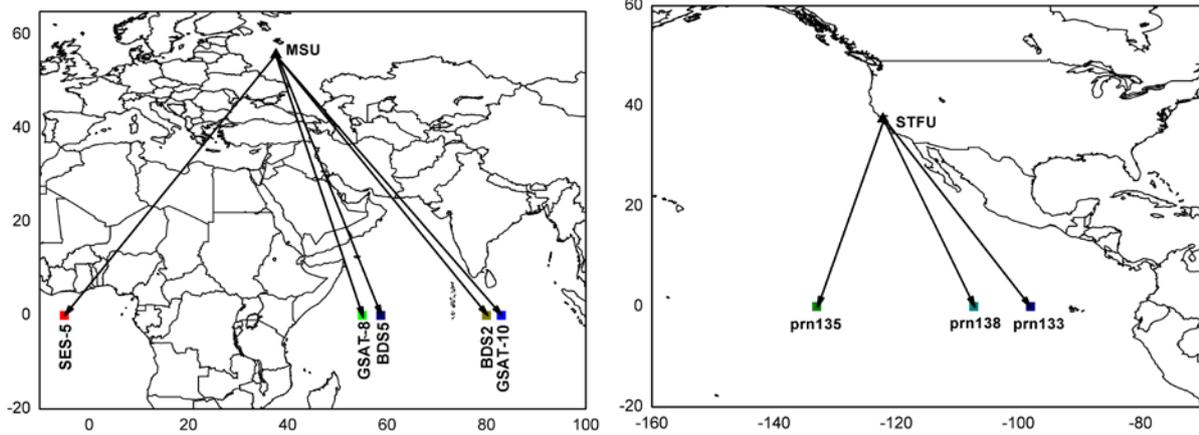


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

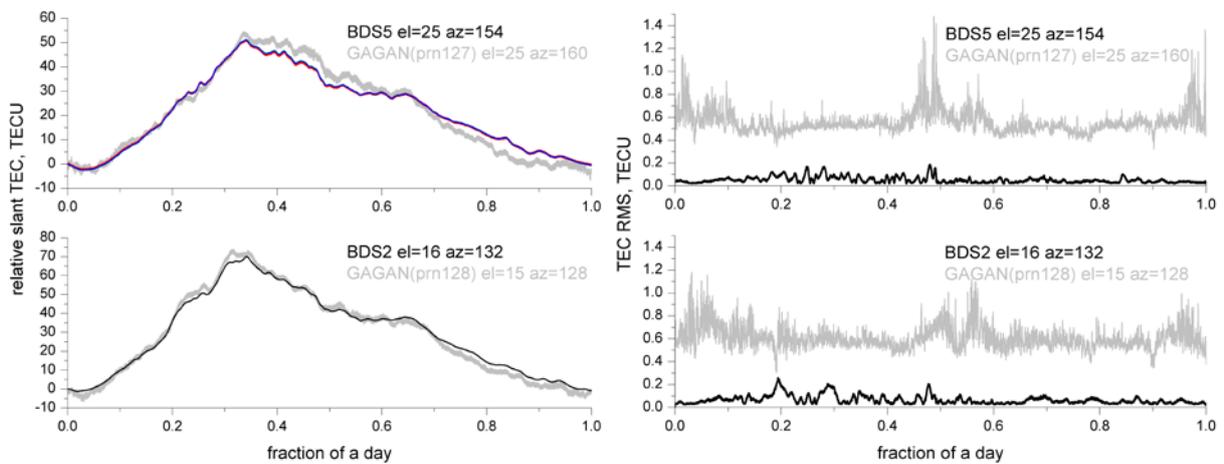


Рис. 2. Вариации TEC и СКО TEC для приемного пункта МГУ и спутников GAGAN и COMPASS/Beidou.

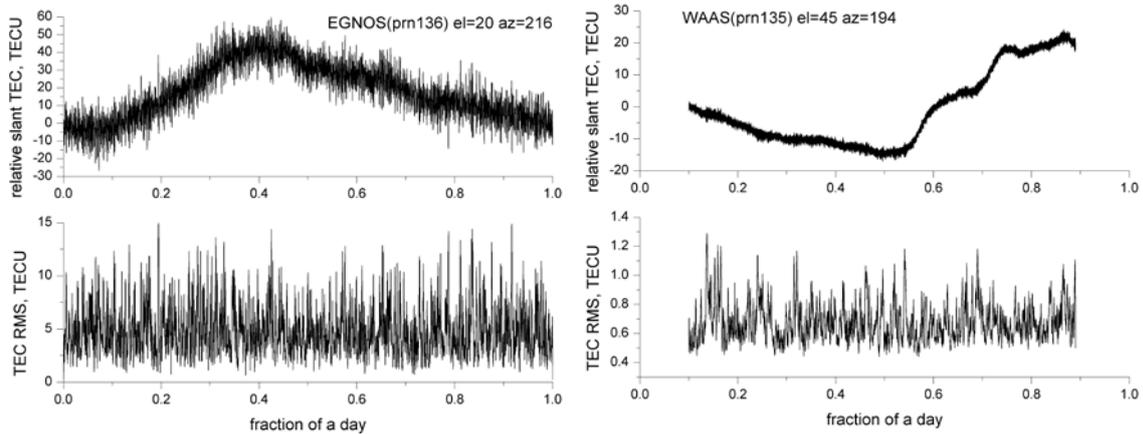


Рис. 3. Вариации TEC и СКО TEC для приемного пункта МГУ и спутника SES-5 (слева) и приемного пункта STFU и спутника Intelsat Galaxy 15 (справа).

На рис. 3 приведены вариации TEC и оценки шумов (100 сек. СКО) для станции МГУ и спутника SES-5 системы EGNOS (справа), а также станции STFU и спутника Intelsat Galaxy 15 системы WAAS (слева). Хорошо видно, что уровень шумов в записях TEC для спутника SES-5 достигает 15 TECU, в то время как уровень шума в записях спутника Intelsat Galaxy 15 составляет ~1.2 TECU, что примерно соответствует уровню шумов для спутников системы

GAGAN. Таким образом видно, что наблюдения TEC по данным геостационарных спутников системы COMPASS/Beidou обладают наилучшими шумовыми характеристиками из всех геостационарных систем. Шумы в записях TEC по данным спутников систем WAAS и GAGAN сопоставимы, однако для использования этих данных необходимо использовать процедуры сглаживания полученных записей геостационарного TEC. Использование спутников

системы EGNOS для оценки TEC в настоящее время не представляется целесообразным из-за высокого уровня шума в данных.

### **Заключение**

Приведенные результаты показывают возможность использования двухчастотных когерентных сигналов геостационарных спутников для непрерывного мониторинга TEC в ионосфере, при этом предпочтительно использовать спутники системы COMPASS/Beidou. Основным преимуществом геостационарных измерений является практически неподвижная подионосферная точка спутников, что позволяет анализировать длительные записи TEC в отличие от коротких 2–6 часовых записей, как в случае с GPS/ГЛОНАСС. Вместе с тем при анализе геостационарных измерений TEC необходимо учитывать больший по сравнению с GPS/ГЛОНАСС уровень шума в данных. Растущее число приемников сигналов, а также двухчастотных геостационарных спутников в созвездиях навигационных систем дает возможность в будущем включить данный тип данных в процедуры ионосферной радиотомографии и интерферометрии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-31445) и гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-2670.2014.5).

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Куницын В.Е., Курбатов Г.А., Падохин А.М. Использование двухчастотных когерентных сигналов L1/L5 геостационарных спутников систем SBAS для исследования полного электронного содержания ионосферы // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2014. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/3/text.pdf>

Kunitsyn V.E., Kurbatov G.A., Yasyukevich Yu.V., Padokhin A.M. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. V. 12, n 3. P. 547–551.

Jin R., Jin S., Tao X. Ionospheric Anomalies During the March 2013 Geomagnetic Storm from BeiDou Navigation Satellite System (BDS) Observations, in China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Vol. I, Lecture Notes in Electrical Engineering 303, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия