

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТ ПОЛОС КОГЕРЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ЗНАЧЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

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

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия  
KislitsinAA@volgatech.net

## SIMULATING MAPS OF COHERENCE BANDS, USING EXPERIMENTAL ESTIMATES OF THE IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT

D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, M.I. Ryabova, A.A. Kislitsin, N.A. Konkin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia  
KislitsinAA@volgatech.net

**Аннотация.** Решается задача учета пространственно-временной изменчивости суточных вариаций полос когерентности для трансионосферного радиоканала спутниковой связи. Применен аналитический подход к созданию математической модели для вычисления полосы когерентности в трансионосферном радиоканале. Создан алгоритм и аппаратно-программный комплекс построения региональных электронных карт полос когерентности по экспериментальным данным полного электронного содержания. Приведены экспериментальные результаты суточных вариаций полос когерентности для Республик Марий Эл и Татарстан.

**Ключевые слова:** полоса когерентности, трансионосферный радиоканал, полное электронное содержание; электронная карта; дисперсионные искажения.

**Abstract.** The problem of taking into account the space-time variability of daily variations in coherence bands for the transionospheric radio channel of satellite communications is being solved. An analytical approach to the creation of a mathematical model was applied to calculate the coherence band in the trans-ionospheric radio channel. An algorithm and a hardware-software complex for constructing regional electronic maps of coherence bands based on experimental data of the total electronic content have been created. The experimental results of diurnal variations of coherence bands for the Republic of Mari El and Tatarstan are given.

**Keywords:** coherence band; transionospheric radio channel; total electronic content; electronic maps; dispersion distortion.

### ВВЕДЕНИЕ

На работоспособность широкого круга радиотехнических средств, в том числе радиоэлектронных систем, функционирующих с использованием каналов распространения радиоволн «Земля–Космос» (случай трансионосферного распространения) большое влияние оказывает ионосфера. При этом актуальной для широкополосных сигналов является исследование проблемы дисперсионных искажений. При оценке дисперсионных искажений, как правило, исследуются частотная и импульсная характеристика эквивалентной линейной системы (ЭЛС).

В работах [Ivanov, Ivanov, Ryabova, et al., 2017a, б] показано, что степень искажения системных характеристик ЭЛС можно оценить, сравнивая параметр, называемый полосой когерентности (ПК) канала, с полосой пропускания канала связи. ПК характеризует предельно возможную полосу частот, для которой дисперсионными искажениями можно пренебречь. ПК определяется полным электронным содержанием ионосферы — ТЕС, значение которого варьируется в зависимости от различных факторов: время суток, сезон, геомагнитная обстановка, солнечная активность. Кроме этого, ионосфера Земли, а, следовательно, и параметры дисперсии являются функциями координат точки приема и времени и для пользования требуют картографирования. В этой связи необходимо разработать алгоритм и программное обеспечение для построения электронных карт полос когерентности на основе данных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Это позволит осуществлять мониторинг степени

искажений широкополосных и сверхширокополосных трансионосферных каналов или выбирать полосу неискаженной передачи. Цель работы — разработка комплексного подхода для мониторинга ионосферы Земли на основе натуральных экспериментов наклонного и трансионосферного зондирования.

Цель работы: создание аппаратно-программного комплекса построения электронных карт полос когерентности для трансионосферного радиоканала связи, полученных по данным глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS.

Аналитический подход и алгоритм для создания комплекса. В работах [Ivanov, Ivanov, Ryabova, et al., 2017б; Ivanov, Ivanov, Ryabova, et al., 2016] показано, что при рассмотрении нелинейных искажений в трансионосферном радиоканале с учетом дисперсии второго порядка для определения грубой оценки дисперсионных искажений используется подход на основе корреляционной связи полосы канала с полосой когерентности. Стоит отметить, что оптимальной для работы радиотехнических систем, использующих трансионосферный радиоканал, является полоса частот, для которой справедливо условие  $B_{ch} < B_c$ , где  $B_{ch}$  — полоса канала,  $B_c$  — полоса когерентности, в пределах которой пренебрегают дисперсионными искажениями.

Воспользуемся результатом работы [Ivanov, Ivanov, Ryabova, et al., 2017б], где получена формула для полосы когерентности в виде:

$$B_c = \sqrt{\frac{4cf^3}{\pi k N_t}} = \mu \bar{N}_t^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $\bar{N}_t = \int_s N_e(z) dz$  — полное электронное содержание (истинное TEC);  $k = 80.5 [m^3/c^2]$ ;  $c$  — скорость света;  $\mu = \sqrt{4cf^3 / \pi k}$

При измерении TEC на основе данных навигационных спутников [Ясюкевич, Мильникова, Демьянов и др., 2013] имеют место стохастические погрешности. В результате измеренное значение TEC можно записать в следующем виде:

$$N_t = \bar{N}_t \pm \Delta N_t \Rightarrow \bar{N}_t = N_t \mp \Delta N_t, \quad (2)$$

где  $\Delta N_t$  — стохастическая погрешность TEC

Случайная составляющая согласно (1) и (2) можно представить в виде:

$$b_c = \mu \Delta N_t^{-1/2}. \quad (2)$$

Откуда:

$$b_c / \bar{B}_c = \sqrt{\bar{N}_t / \Delta N_t}. \quad (3)$$

Таким образом, если полоса когерентности составляла  $\bar{B}_c$ , а при коррекции в оценке  $\bar{N}_t$  была допущена ошибка  $\Delta N_t$ , то в результате полоса когерентности увеличилась и стала равной:

$$b_c \approx \sqrt{\frac{\bar{N}_t}{\Delta N_t}} \bar{B}_c = \frac{\bar{B}_c}{\sqrt{\delta N_t}}, \quad (4)$$

где  $\delta N_t = \Delta N_t / \bar{N}_t$  — относительная погрешность определения TEC.

Для исследования пространственно-временной изменчивости полос когерентности был разработан алгоритм их картографирования для трансiono-сферных каналов спутниковой связи. Для реализации алгоритма использован комплекс программ, который включал в себя пять модулей основного программного обеспечения (ПО), созданных на языке AutoIt, и вспомогательные ПО, такие как [Wget, 2007; PostgreSQL, 2016], Mapretive [http://mapertive.net/docs/default.html], ffmpeg. Обобщенная схема использования данного ПО представлена на рис. 1.

Исходными данными для построения карт являются RINEX файлы полученных с референчных станций сети приемников, предоставляемые фирмой HEXAGON. После конвертации и преобразования RINEX-файлов рассчитываются значения ПЭС [Mylnikova, Yasyukevich, Kunitsyn, et al., 2015; Yasyukevich, Mylnikova, Polyakova, 2015]. Далее сгенерированные значения TEC пересчитываются в полосу когерентности, аккумулируются и используются для создания карт полос когерентности ионосферы Земли (программа iMapCreate). Программная реализация учитывает возможность выбора интересующей географической зоны для построения и временной отрезок как по дате, так и по времени суток.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для летнего и зимнего солнцестояния 2016 г. над территорией республик Марий-Эл и Татарстана были проведены исследования пространственно-времен-

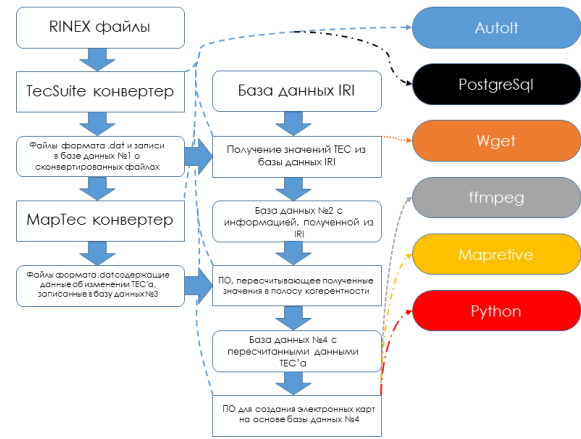


Рис. 1. Алгоритм построение электронных карт ионосферы Земли и используемое программное обеспечение

ной изменчивости полос когерентности. При это варьирующие значения TEC были получены по результатам трансionoсферного зондирования. В качестве рабочей частоты системы космической связи диагностировалась частота 1 ГГц. В выбранный период ионосфера была магнитоспокойной. Электронно-диагностические карты для заданных регионов представлены на рис. 2. Цветом выделена интенсивность изменения значений полос когерентности относительно фактора сезонности.

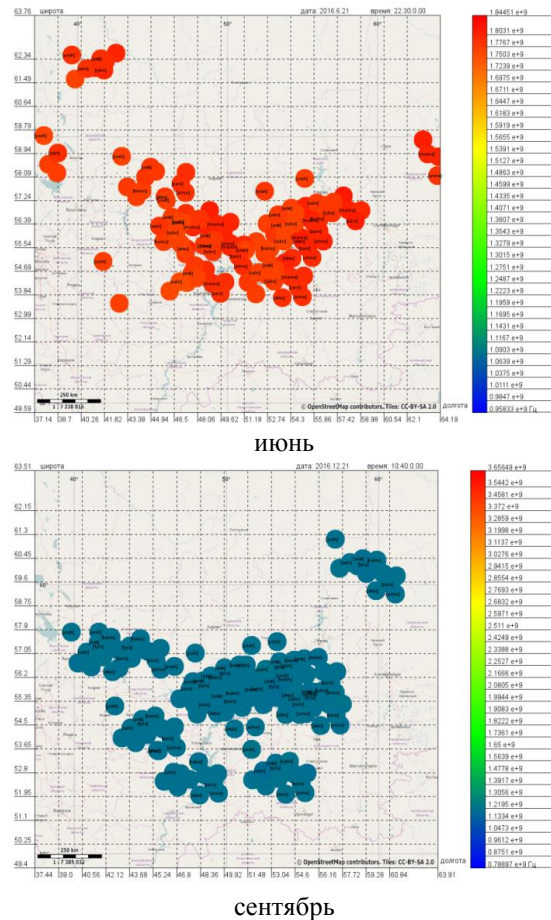


Рис. 2. Электронные карты полос когерентности трансionoсферных радиоканалов над территорией республик Марий-Эл и Татарстан в 2016 г.

Анализируя полученные данные, можно сделать выводы, что в дневное время суток полосы когерентности имеют минимальные значения. В периоды переходного времени (утренние и вечерние часы) наблюдаются резкое изменение полос когерентности, которые в ночное время достигают максимальных значений. Из этого следует, что в дневное время необходимо либо ограничивать полосу частот для оптимальной работы систем космической связи, либо решать задачу коррекции дисперсионных искажений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен аппаратно-программный комплекс для построения диагностических электронных карт полос когерентности трансionoсферных радиоканалов. Установлено, что минимальные значения полосы когерентности имеют место в дневное время суток, максимальные — в ночное. Значительные вариации наблюдаются при переходе от дня к ночи (или наоборот). Диагностические карты в условиях частотной дисперсии позволяют над исследуемым регионом оценивать интенсивность суточных изменений полос когерентности для выявления предельной полосы частот для работы систем космической связи при постоянно меняющихся параметрах среды. Это будет способствовать достижению новых возможностей для работы широкополосных трансionoсферных радиотехнических систем, обеспечивая их повышенную помехоустойчивость и скрытность.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ: № 3.4074.2017/ПЧ и грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 18-37-00079, № 17-07-00799, 19-07-00629.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А., Демьянов В.В. и др. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2013. № 3(19). С. 18–29.

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., et al. Dispersive Distortions of System Characteristics of Broadband Transionospheric Radio Channels // J. Applied Engineering Science. 2017a. V. 15, N 4. P. 500–555. DOI: [10.5937/jaes15-11784](https://doi.org/10.5937/jaes15-11784).

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., et al. The plotting algorithm of coherence band maps of transionospheric radio channels // in Proc. SPIE 10466, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2017b. V. 10466. P. 1–4. DOI: [10.1117/12.2285658](https://doi.org/10.1117/12.2285658).

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., et al. Determination of frequency dispersion's parameters of transionospheric radio channel // Russian Physics Journal, Proceeding of Higher Educational Institutions. Physics. 2016. V. 59, N 12-2. P. 105–108.

Ryan Corrigal, The Essential wGet — GUIde, 2007.

The PostgreSQL Global Development Group, PostgreSQL 9.5.4 Documentation. – 2016.

Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Kunitsyn V.E., et al. Variability of GPS/GLONASS differential code biases // Res. Phys. 2015. V. 5, P. 9–10. DOI: [10.1016/j.rinp.2014.11.002](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002).

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Res. Phys. 2015. V. 5, P. 32–33. DOI: [10.1016/j.rinp.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006).

URL: <http://maperitive.net/docs/default.html>.