

УДК 550.388.2

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛОСКИХ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ НА ПЛОТНЫХ СЕТЯХ GPS

А.П. Медведев, С.В. Воейков

METHOD FOR DETECTING QUASI-MONOCHROMATIC PLANE WAVE STRUCTURES WITH THE USE OF TOTAL ELECTRON CONTENT DATA FROM DENSE GPS NETWORKS

A.P. Medvedev, S.V. Voeikov

Данная работа посвящена разработке и тестированию нового метода обнаружения и расчета характеристик плоских квазимонохроматических волновых структур, основанного на анализе пространственных распределений вариаций полного электронного содержания, полученных на плотных сетях приемников GPS. Показано, что метод позволяет в большинстве случаев обнаружить перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) и рассчитать их характеристики в приближении плоской квазимонохроматической волны. Данный метод может быть использован как в качестве независимого метода определения характеристик ПИВ, так и для коррекции уже существующих методов.

The work is devoted to development and testing of a new method of detection of plane quasi-monochromatic wave structures based on analysis of space distributions of total electron content variations obtained from dense networks of GPS receivers. It was shown that the method allows traveling ionospheric disturbances (TID) to be detected and their characteristics to be determined to a plane quasi-monochromatic wave approximation. The method can be used both as independent method of determination of TID characteristics and as tool for correction of the existing methods.

В экспериментальных исследованиях ионосферных волновых возмущений ключевую роль играет проблема обнаружения таких возмущений и определения их пространственно-временных параметров. В настоящей статье мы сосредоточились на простейшем идеальном случае перемещающегося ионосферного возмущения в виде плоской волны, распространяющейся без изменения формы.

Предложенный метод основан на определении направления вытянутости волнового фронта возмущения в приближении плоской волны для рассматриваемого региона. Исходными данными является двумерное распределение вариаций полного электронного содержания (ПЭС) $dI(\Phi, \Lambda)$, отфильтрованных в некотором диапазоне периодов. С выбранным шагом перебираются возможные азимуты перемещения исследуемого возмущения. Для каждого выбранного азимута α производится замена плоской волны на кольцевую, источник которой (обозначим его точкой S) отстоит от начальной точки O (точка O – центр рассматриваемого региона) на $\pi/2$ в направлении, противоположном заданному азимуту α . После такой замены фаза возмущения в любой точке нашего региона (назовем ее точкой P) будет определяться только расстоянием R между источником S и точкой P по дуге большого круга. В результате имеем набор величин – расстояний от точки до источника и соответствующих им значений вариаций ПЭС – ряд $dI(R)$.

Для определения искомого направления вытянутости волновой структуры был введен параметр, зависящий от азимута и характеризующий поведение волновой структуры, аналогичный «контрасту» метода Mercier [Mercier, 1986; Mercier, 1996]. Этот своего рода аналог «контраста» мы назвали Z-параметром.

Алгоритм определения Z-параметра выглядит следующим образом:

1) по ряду $dI(R)$ вычисляется ряд производных от значений вариаций ПЭС dI по расстоянию R – ряд dI/dR ;

2) рассчитывается среднеквадратичное отклонение (СКО) ряда dI/dR

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{dI}{dR} [i] - \overline{\frac{dI}{dR}} \right)^2}}{N},$$

где N – число приемников.

В качестве Z-параметра и было выбрано СКО ряда dI/dR . Действительно, если в исходных данных присутствует единственное волновое возмущение с плоским фазовым фронтом, ряд $dI(R)$, соответствующий верному направлению, будет иметь меньшее количество резких перепадов, а значит, будет иметь минимальный Z-параметр, т. е. Z-параметр характеризует своего рода «зашумленность» картины. Таким образом, с помощью Z-параметра можно определить направление вытянутости волновой структуры.

Первоначально метод был протестирован на смоделированном возмущении в виде плоской монохроматической волны. На рис. 1 и 2 показаны графики рядов $I(R)$, соответствующих верному и ошибочному направлениям перемещения ПИВ соответственно. Видно, что ряд $dI(R)$, соответствующий верному направлению, имеет существенно меньше резких перепадов. И действительно, для ряда, представленного на рис. 1, значение Z составило 0.0005, а для ряда на рис. 2 – около 700.

Также метод был протестирован на примере двух плоских монохроматических волн с заданными параметрами, распространяющихся с разными азимутами. Тестирование показало, что метод позволяет определить направление вытянутости возмущения, если его амплитуда превышает амплитуду дополнительного «шумового» возмущения минимум на 30 %, независимо от разницы направлений основного и дополнительного возмущений.

В качестве экспериментальных данных было взято двумерное распределение вариаций ПЭС, полученное на сети станций GPS для выбранного спутника (PRN 19) 13 июня 2008 г. в 14:00:00 UT (рис. 3). Первичный визуальный анализ пространственной кар-

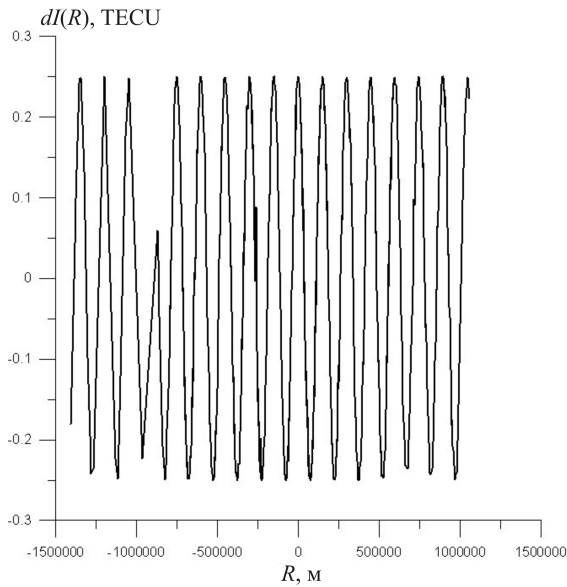


Рис. 1. Ряд $dl(R)$, соответствующий верному направлению распространения ПИВ.

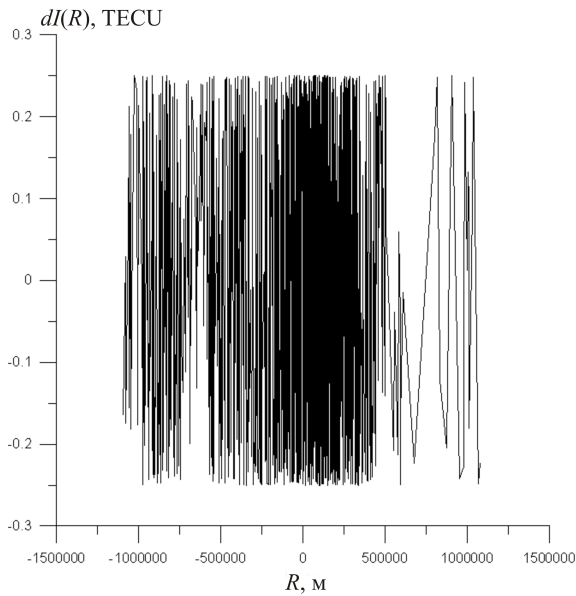


Рис. 2. Ряд $dl(R)$, не соответствующий направлению распространения ПИВ.

тины позволяет выделить как минимум две волновых структуры с различными азимутами вытянутости волнового фронта. В результате обработки данных оказалось, что наблюдаемые волновые структуры имеют следующие характеристики: 1) направление вытянутости $\alpha_1 \approx 40^\circ$, амплитуда $A_1 \approx 0.07$ TECU, длина волны $L_1 \approx 200$ км; 2) направление вытянутости $\alpha_2 \approx 70^\circ$, амплитуда $A_2 \approx 0.06$ TECU, длина волны $L_2 \approx 200$ км.

Таким образом, нами разработан и протестирован метод обнаружения и расчета характеристик плоских квазимонохроматических волновых структур с использованием данных фазовых измерений на двух частотах на плотной сети приемников GPS. Показано, что применение этого метода позволяет в большинстве случаев (а именно в тех случаях, когда амплитуда основного возмущения превышает

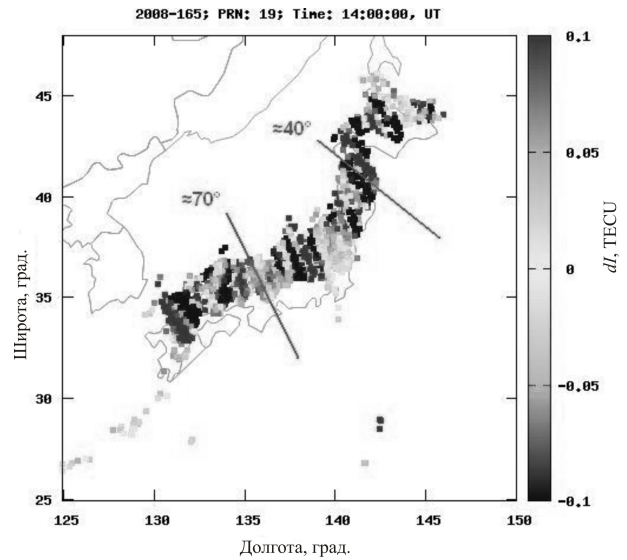


Рис. 3. Наблюдение двух волновых структур.

амплитуду возмущений хотя бы на 30 %) обнаружить ПИВ и рассчитать его характеристики в приближении плоской квазимонохроматической волны. Данный метод может быть использован как в качестве самостоятельного метода обнаружения и определения характеристик ПИВ, так и совместно с уже существующими методами, такими как методы Mercier и SADM-GPS [Afraimovich et al., 1998; Afraimovich et al., 2004].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-05-00113), Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК 14.740.11.0078), а также гранта Президента РФ МК-3094.2010.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmos. Terr. Phys. 1998. V. 60, N 12. P. 1205–1223.
- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Voeikov S.V. Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 47–62.
- Mercier C. Observations of atmospheric gravity waves by radio interferometry // J. Atmos. Terr. Phys. 1986. V. 48. P. 605–624.
- Mercier C. Some characteristics of atmospheric gravity waves observed by radio interferometry // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 42–58.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск