

Исследование зависимости интенсивности вариаций ПЭС от геометрии радиозондирования с помощью ГНСС

Воейков С.В.¹, Осипчук В.Н.², Крупович Е.С.²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

serg3108@iszf.irk.ru

Решение задачи поиска откликов полного электронного содержания (ПЭС) на различные события требует знания типичного поведения колебаний ПЭС в отсутствие данного события. Лучи "приемник-спутник GPS направленные в зенит и наклоненные к горизонту, находятся в принципиально разных условиях. Зенитный луч пересекает ионосферу по более короткому пути, а наклоненный – по более длинному. Можно ожидать, что и интенсивность колебаний ПЭС будет зависеть от угла места луча "приемник-спутник".

Задача данной работы – исследовать зависимость интенсивности 2-10 минутных колебаний ПЭС от угла места соответствующих лучей "приемник-спутник" для иркутской станции GPS IRKM за 2006 год. Диапазон 2-10 минут был выбран как наиболее часто используемый для поиска откликов ПЭС на различные события (землетрясения, запуски космических аппаратов и т.д.) [1]. В работе используется стандартная единица измерения ПЭС - TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электрон/м}^2$).

Исходными данными являлись ряды вариаций "наклонного" ПЭС $I(t)$, рассчитанного по данным фазовых измерений вдоль луча "приемник-спутник GPS а также ряды значений угла места $\theta_S(t)$ спутника GPS. Измерения фазы в системе GPS производятся в высокой точностью, так что ошибка в определении вариаций ПЭС не превышает 0,01 TECU, хотя абсолютное значение ПЭС по фазовым данным определить невозможно [2].

Для получения отфильтрованных рядов $dI(t)$, ряды $I(t)$ подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин (для удаления высокочастотных колебаний) и удалению тренда с временным окном 10 мин. Интенсивность вариаций ПЭС $S(t)$ определялась как огибающая полученных рядов 2-10 минутных вариаций ПЭС $dI(t)$.

Такие ряды $S(t)$ были рассчитаны для всех непрерывных рядов ПЭС длительностью не менее 20 минут за весь 2006 год для станции GPS IRKM, расположенной в Иркутске. Далее для решения задачи определения зависимости интенсивности вариаций ПЭС от угла места на спутники GPS нами был рассчитан двумерный массив $M(i,j)$, где строки i соответствовали значениям интенсивности $S(t)$ от 0,01 до 0,4 TECU с шагом 0,01 TECU, а столбцы j – значениям угла места $\theta_S(t)$ от 1° до 90° с шагом 1° . Каждому временному отсчету ряда интенсивности $S(t)$ соответствуют определенное значение угла места на спутник $\theta_S(t)$. То есть каждому временному отсчету в каждом непрерывном ряду ПЭС можно поставить в соответствие одну единственную ячейку массива $M(i,j)$. Перебирая все временные отсчеты для всех полученных рядов $S(t)$ и $\theta_S(t)$ мы определяли соответствующие значения индексов i и j , согласно которым значение соответствующей ячейки массива увеличивалось на 1. В итоге массив $M(i,j)$ представлял собой двумерное распределение числа временных отсчетов в зависимости от угла места и интенсивности вариаций ПЭС.

Различные значения интенсивности встречаются по-разному. В среднем вариации с меньшей интенсивностью встречаются чаще, чем вариации с большей интенсивностью. Чтобы увидеть полную картину зависимости интенсивности от угла места на всем диапазоне рассмотренных значений интенсивности (от 0,01 до 0,4 TECU) была произведена

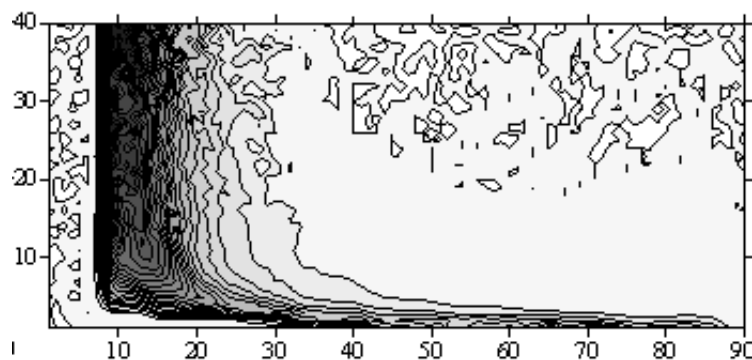


Рис. 1. Двумерное распределение плотности отсчетов в зависимости от угла места и интенсивности вариаций ПЭС.

нормировка. Каждое значение в массиве $M(i,j)$ делилось на полное число отсчетов с соответствующим значением интенсивности. Чтобы избежать слишком маленьких значений в массиве, результат деления умножался на 100.

Полученное после нормировки массива $M(i,j)$ двумерное распределение $N(S, \theta_S)$ плотности отсчетов в зависимости от интенсивности вариаций ПЭС и угла места на спутники GPS представлено на рис. 1.

Максимальные значения плотности отсчетов соответствуют черному цвету, а минимальные – белому. Как видно из рис. 1 наблюдается некая обратная пропорциональность интенсивности вариаций ПЭС от угла места. С другой стороны, известно, что на высоких углах места для среднеширотной ионосферы применима простая плоскостная модель, в которой значение абсолютного ПЭС на наклонном луче может быть определено из соотношения [1]:

$$I_S = \frac{I_V}{\sin(\theta_S)}, \quad (1)$$

где I_S – значение абсолютного ПЭС на наклонном луче; I_V – значение абсолютного ПЭС на вертикальном луче. Иными словами, согласно формуле (1) на высоких углах места абсолютная величина ПЭС на наклонном луче "приемник-спутник" прямо пропорциональна $1/\sin(\theta_S)$. Было сделано предположение, что интенсивность вариаций ПЭС тоже будет пропорциональна $1/\sin(\theta_S)$. Мы ввели преобразование углов места θ_S в $1/\sin(\theta_S)$. Получившееся распределение дано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что действительно наблюдается практически линейная зависимость интенсивности вариаций ПЭС от $1/\sin(\theta_S)$ при значениях $1/\sin(\theta_S)$ от 1 до 3, что соответствует углам места от 90° до 20° . Данный факт указывает на то, что для углов места выше 20° интенсивность вариаций ПЭС, как и сама величина ПЭС, зависит от толщины ионосферы через которую проходит радиолуч между спутником и приемником.

С дальнейшим ростом значений $1/\sin(\theta_S)$ (соответственно, с уменьшением угла места) наблюдается резкий рост значений интенсивности вариаций ПЭС. Начиная со значения $1/\sin(\theta_S) \approx 4$ (примерно 14°) зависимость разделяется на две почти вертикальные ветви со значениями $1/\sin(\theta_S)$ около 4,5 ($\sim 13^\circ$) и 6,5 ($\sim 9^\circ$). Можно видеть, что вариации с интенсивностью более 0,1 TECU группируются вблизи этих двух значений угла места (9° и 13°). Выяснение природы этой особенности в поведении зависимости интенсивности вариаций ПЭС от угла места требует дальнейших исследований.

Таким образом, по крайней мере для иркутской станции GPS, на основании анализа данных за 2006 год, можно сделать следующие выводы:

1) Установлено, что для углов места больше 20° интенсивность 2-10 минутных вариаций ПЭС, также как и величина абсолютного ПЭС на высоких углах места, обратно

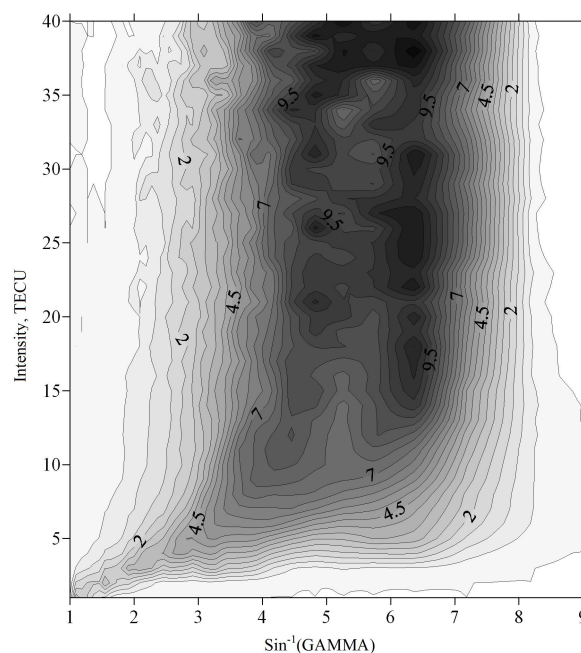


Рис. 2. Двумерное нормированное распределения числа отсчетов в зависимости от $1/\sin(\theta_S)$ и интенсивности вариаций ПЭС.

пропорциональна синусу угла места. Это означает, что интенсивность вариаций ПЭС, как и абсолютная величина ПЭС, зависит от толщины ионосферы через которую проходит радиолуч между спутником и приемником.

2) На низких углах места (менее 14°) наблюдается резкий, почти экспоненциальный, рост значений интенсивности вариаций ПЭС. Кроме того, значения интенсивности вариаций ПЭС более 0,1-0,15 TECU с наибольшей вероятностью можно зарегистрировать на углах места 9° и 13° .

Надеемся, что наша работа будет полезна исследователям откликов ПЭС на различные события по данным глобальных спутниковых навигационных систем (в первую очередь GPS и ГЛОНАСС).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (12-05-33032_мол_а_вед), Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 8388, 8699 и ГК 14.518.11.7065).

Литература

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НС РВХ ВШЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. - New York: Springer-Verlag Wein, 1992. 327 p.

Study of the dependence of TEC variation intensity on radiosounding geometry by GNSS

Voeykov S.V.¹, Osipchuk V.N.²

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Russia

² Irkutsk State University, Russia

The paper presents the investigation of 2-10 minute variations in total electron content (TEC), obtained by the Global Navigation Satellite Systems (GNSS), on the angles to satellites. Dependence of TEC absolute value on the angles to satellites is well known and is due to the difference in ionosphere thickness intersected by radio beams at various angles. However, TEC variations are not so clear. Meanwhile, knowledge of this relationship could help to search and to study TEC responses to different disturbances. During our study, we investigated TEC variation intensity in the period range of 2-10 minutes, depending on elevation and azimuth to GPS satellites for IRKT Irkutsk station for 2006. The period range was chosen as the most frequently used to search for responses to such disturbances as earthquakes, spacecraft launches, etc.