

УДК 550.388.2

Шапкин А. С., Потапов К. О.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕЁ СВЯЗЬ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В данной работе был синтезирован алгоритм оценки абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) на основании результатов двухчастотных фазовых и дальностных измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), сущность которого состоит в комбинировании расчётов ПЭС по фазовым и дальностным измерениям, а также в оценке и учёте ионосферных задержек, вносимых дифференциальными кодовыми задержками (ДКЗ) приёмной станции и спутника. С помощью коэффициента корреляции Пирсона исследована взаимосвязь абсолютного ПЭС и полного вектора индукции (ПВИ) геомагнитного поля. Полученные результаты показывают взаимосвязь между величинами ПЭС и ПВИ. При этом рост ПЭС предшествует на несколько часов росту ПВИ, что может позволить предсказывать изменения магнитного поля по данным ПЭС и представляет интерес для мониторинга ситуации вокруг критически важных объектов, таких как АЭС, ЛЭП и т.д.

Основной характеристикой при изучении ионосферы является ПЭС, определяемое как интеграл от электронной плотности по пути распространения волны с поперечным сечением 1 м^2 между спутником и наземной станцией:

$$TEC = \int_{L_0}^L n_e(l) dl, \quad (3)$$

где L_0 и L – нижняя и верхняя точки прохождения ионосферы; $n_e(l)$ – электронная концентрация на трассе l . Проводя измерения сигналов ГНСС на двух различных частотах, можно получить оценки ПЭС по дальностным и фазовым измерениям [1]. ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, но является относительным, а рассчитанное по дальностным измерениям позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и с частотнозависимой ДКЗ аппаратуры спутника и приёмника [1]. В связи с вышеизложенным был синтезирован алгоритм оценки ПЭС на основании результатов двухчастотных фазовых и дальностных измерений.

Пусть в каждый момент времени известны фазовые (фаза несущей) O_1 и O_2 и дальностные (псевдодальность) D_1 и D_2 измерения на двух частотах f_1 и f_2 , угол места спутника ε , ДКЗ спутника DCB_s .

Алгоритм оценки абсолютного ПЭС состоит из пяти основных шагов.

Шаг 1. Подсчёт относительного ПЭС по фазовым измерениям.

$$TEC_\psi = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (O_1 \lambda_1 - O_2 \lambda_2), \quad (4)$$

где $\chi = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m_e} \approx 40,308 \text{ м}^3 \text{ Гц}^2$; O_1 и O_2 – фазы несущих (в оборотах) на частотах f_1 и f_2 .

Шаг 2. Корректировка данных относительного ПЭС.

Отметим, что полученное по формуле (2) относительное ПЭС требуется «очистить» за счёт корректировки *разрывов* и *скачков* в значениях [2]. *Скачки (cycle slips)* и *разрывы (gaps)* представляют собой кратковременный срыв в фазовой синхронизации приёмника на спутниковый сигнал. Исправление разрывов и скачков проиллюстрировано на рисунке 1.

Шаг 3. Подсчёт ПЭС по дальностным измерениям.

$$TEC_D = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (D_2 - D_1 + cDCB_s). \quad (5)$$

Шаг 4. Оценка абсолютного ПЭС с помощью комбинирования оценок ПЭС, полученных по фазовым и дальностным измерениям.

$$TEC_{abs} = TEC_{\psi} + \langle TEC_D - TEC_{\psi} \rangle. \quad (6)$$

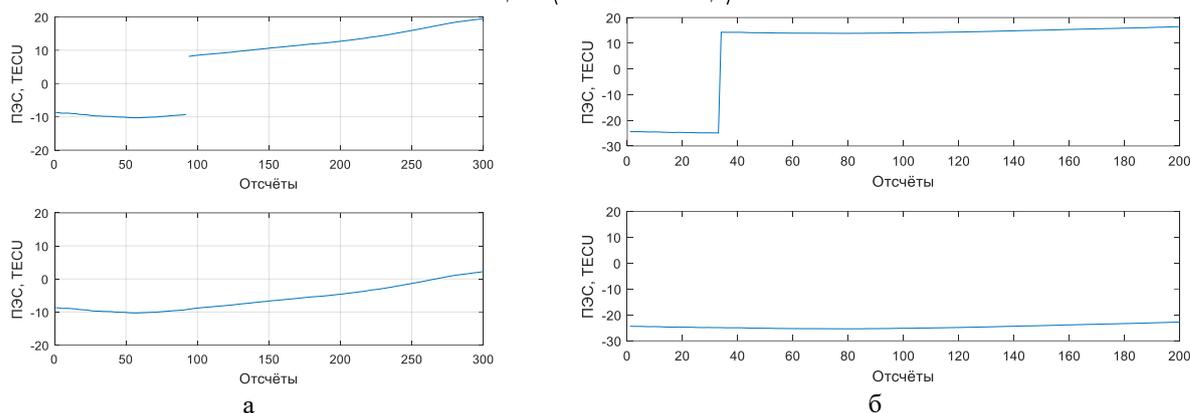


Рисунок 1. Корректировка данных относительного ПЭС: а) исправление разрыва; б) исправление скачка

Шаг 5. Уточнение оценки абсолютного ПЭС за счёт оценки ДКЗ приёмной станции.

Шаг 5.1. Для k -ой реализации (пролета спутника) принимается предположительное значение DCB_r :

$$c'DCB_r^{k,i} = \overline{-75,75}, \quad (7)$$

где $c' = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} c$, c – скорость света.

Шаг 5.2. Вычисляется предположительное абсолютное вертикальное ПЭС:

$$TEC_V^{k,i} = (TEC_{abs}^k - c'DCB_r^{k,i}) M(\varepsilon, h), \quad (8)$$

где $M(\varepsilon, h)$ – множитель для отображения наклонного ПЭС в вертикальное [3]:

$$M(\varepsilon, h) = \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + h_{\max}} \cos(\varepsilon) \right) \right), \quad (9)$$

где h_{\max} – высота точки максимума электронной концентрации ионосферы; R_e – радиус Земли.

Шаг 5.3. Вычисляется среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$S_0^{k,i} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (TEC_V^{k,i} - \overline{TEC_V^{k,i}})^2}. \quad (10)$$

Шаг 5.4. Для k -ой реализации выбирается ДКЗ с минимальным СКО:

$$c'DCB_r^k = c'DCB_r^{k,i}, i = \min(S_0^{k,i}), \quad (11)$$

Шаг 5.5. В качестве ДКЗ приёмной станции выбирается среднее ДКЗ по всем реализациям:

$$c'DCB_r = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c'DCB_r^k, \quad (12)$$

где K – количество реализаций.

Шаг 5.6. Получаем окончательное значение абсолютного ПЭС:

$$TEC'_{abs} = TEC_{abs} - c'DCB_r. \quad (13)$$

Упрощённо алгоритм оценки абсолютного ПЭС можно представить в графическом виде, как показано на рисунке 2.

С другой стороны, Национальной системой мониторинга окружающей среды Республики Беларусь регистрируются изменения во времени вектора внешнего геомагнитного поля на горизонтальных и вертикальной составляющих. Величина ПВИ магнитного поля есть корень квадратный из суммы квадратов трех составляющих магнитного поля Земли:

$$B = |\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (14)$$

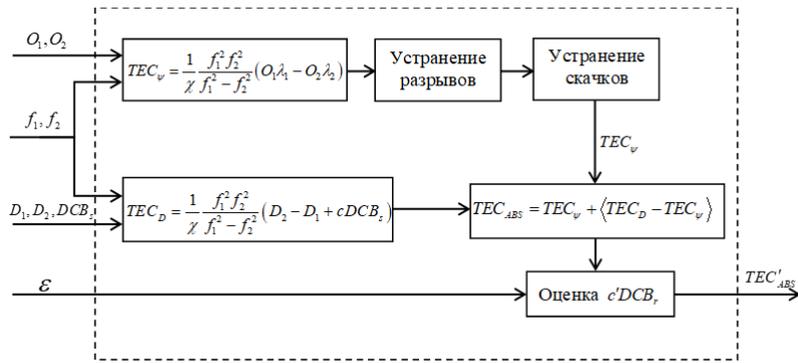


Рисунок 2. Упрощенная блок-схема алгоритма оценки абсолютного ПЭС

Исследовать взаимосвязь полученных оценок абсолютного ПЭС и ПВИ магнитного поля предлагается с помощью коэффициента корреляции Пирсона:

$$R = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)(h_n - m_h)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2 \sum_{n=0}^{N-1} (h_n - m_h)^2}}, \quad (15)$$

где m_x, m_h – средние значения ПВИ магнитного поля $\{x_n\}$ и абсолютного ПЭС $\{h_n\}$ соответственно. Для исходных ПВИ магнитного поля и абсолютного ПЭС в день с магнитной бурей 17.03.2015 года получен коэффициент Пирсона равный $R = 0.15$, что является низким уровнем линейной зависимости. Такой результат может быть связан с тем, что активная фаза магнитной бури отражается на результатах вычисления абсолютного ПЭС раньше, чем на данных измерения ПВИ магнитного поля. Если сместить ПЭС на 5,5 часов в сторону запаздывания, то коэффициент корреляции становится равным $R = 0.72$, что является достаточно высоким уровнем. Временные зависимости значений абсолютного ПЭС и ПВИ магнитного поля за март 2015 года в целом и за 17 марта отдельно представлены на рисунке 3.

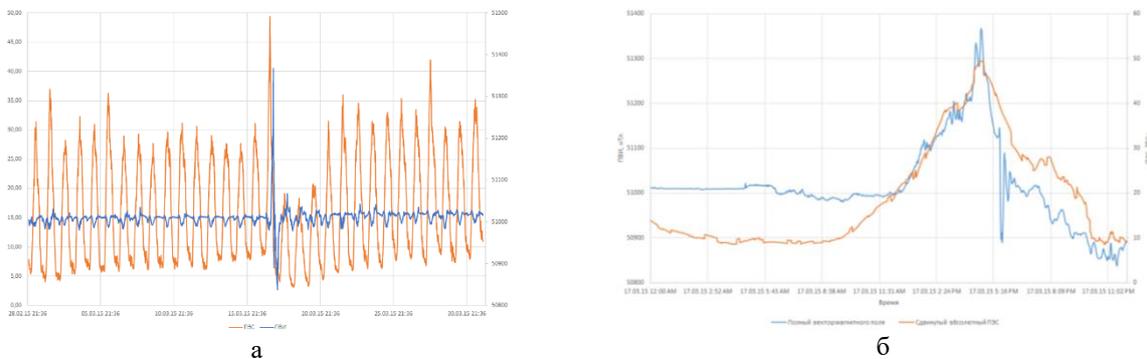


Рисунок 3 – Взаимосвязь ПВИ магнитного поля: а) исходные ПВИ и ПЭС; б) исходный ПВИ и смещенная копия ПЭС за 17 марта 2015 г.

Полученные результаты показывают взаимосвязь между величинами ПЭС и ПВИ. При этом рост ПЭС предшествуют на несколько часов росту ПВИ, что может позволить предсказывать изменения магнитного поля по данным ПЭС и представляет интерес для мониторинга ситуации вокруг критически важных объектов, таких как АЭС, ЛЭП и т.д.

Список литературы

1. Куницын В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
2. Hofmann-Wellenhof В. Global Positioning System: Theory and Practice / В. Hofmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger, J. Collins. – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
3. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. – Иркутск: ГУ НИЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.