

УДК 621.391

КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПО ДАННЫМ GPS-МОНИТОРИНГА

© 2016 В.П. Пашинцев¹, А.Ф. Чипига¹, В.А. Цимбал², М.В. Песков¹¹ Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь² Институт инженерной физики, г. Москва

Статья поступила в редакцию 01.11.2016

Разработана структура комплекса определения географических координат областей ионосферы с интенсивными мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации на основе анализа временных рядов полного электронного содержания ионосферы, полученных методом GPS-мониторинга.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, ионосфера, мелкомасштабные неоднородности, временной ряд, полное электронное содержание, двухчастотный приемник

Известно [1 – 4], что в трансionoсферном радиоканале могут возникать интенсивные флуктуации фазы и амплитуды принимаемых сигналов (т.е. мерцания, замирания), которые обуславливают существенное снижение показателей качества систем спутниковой связи (ССС) и спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Одной из причин этого является образование в ионосфере областей с мелкомасштабными неоднородностями (ММН) электронной концентрации естественного (в районах экваториальных и полярных широт) или искусственного происхождения. Поэтому актуальной задачей является мониторинг их пространственного положения для последующего прогнозирования показателей качества систем спутниковой связи и радионавигации.

Цель работы: обоснование структуры построения комплекса определения координат области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации на базе двухчастотного приемника GPStation-6.

Известен [5] способ пеленгации областей ионосферы, содержащих ММН искусственного происхождения, на основе расчета интенсивности $\beta_{И}$ этих неоднородностей по результатам измерений полного электронного содержания

(ПЭС) N_T ионосферы двухчастотным приемником СРНС типа NovAtel GPStation-6. Интенсивность ММН определяется вариациями ПЭС, обусловленными ММН ΔN_{TM} , и связана функциональной зависимостью $\beta_{И} = \psi(\sigma_{\Delta N_{TM}}, \langle N_T \rangle, h_E, l_S)$ со среднеквадратическим отклонением (СКО) мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{TM}}$, средним значением ПЭС $\langle N_T \rangle$, эквивалентной толщиной ионосферы h_E и характерным (средним) размером мелкомасштабных ионосферных неоднородностей l_S . Недостатком данного способа пеленгации области с ММН является низкая точность расчетов $\beta_{И}$ из-за использования приближенных постоянных значений эквивалентной толщины ионосферы h_E и характерного размера ионосферных неоднородностей l_S . Это обусловлено тем, что не известен способ измерения величины l_S (которая может изменяться во времени) с помощью двухчастотного приемника СРНС. Кроме того, в [5] не описаны способы измерения с помощью двухчастотного приемника СРНС значений $\sigma_{\Delta N_{TM}}$, $\langle N_T \rangle$ и h_E .

Однако в качестве основного параметра, позволяющего пеленговать область с ММН, можно использовать не интенсивность неоднородностей $\beta_{И} = \psi(\sigma_{\Delta N_{TM}}, \langle N_T \rangle, h_E, l_S)$, а СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}$, полученных по результатам измерений двухчастотным приемником ПЭС ионосферы N_T и выделения из него мелкомасштабных вариаций ΔN_{TM} . Таким образом, для решения поставленной задачи комплекс определения координат области ионосферы с ММН должен содержать блок определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС

Пашинцев Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем. E-Mail: rashintsevp@mail.ru

Чипига Александр Федорович, кандидат технических наук, профессор, директор института информационных технологий и телекоммуникаций. E-mail: iitt.ncfu@gmail.com

Цимбал Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. E-mail: asu_iif@mail.ru

Песков Марк Владимирович, аспирант. E-Mail: mvpeskov@hotmail.com

ионосферы и блок определения координат данной области.

Принцип работы комплекса. Известен [1] метод мониторинга параметров ионосферы с использованием сигналов СРНС типа GPS или ГЛОНАСС. Суть метода заключается в том, что при прохождении через ионосферу радиосигнала, излучаемого с космического аппарата (КА) СРНС на двух несущих частотах f_1 и f_2 , возникают различные задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а также изменения фаз $\Delta\varphi_1 \sim \Delta\tau_1$ и $\Delta\varphi_2 \sim \Delta\tau_2$. Они позволяют непрерывно определять по навигационным измерениям двухчастотного приемника СРНС значения ПЭС ионосферы $N_T \sim (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1)$ вдоль радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС» в любой момент времени t . Поэтому на выходе двухчастотного приемника СРНС формируются временные ряды значений ПЭС ионосферы $N_T(t)$. Разработана методика [6], которая позволяет выделять из рядов ПЭС ионосферы $N_T(t)$ мелкомасштабные вариации ПЭС ионосферы $\Delta N_{TM}(t)$ и в дальнейшем с помощью стандартной процедуры получать временные ряды СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$. Кроме того, известны [1] формулы для расчета

географических координат подионосферной точки (ПИТ) для радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС» на основе данных об угле возвышения θ_c и азимуте α_c , получаемых с двухчастотного приемника СРНС.

На рис. 1 иллюстрируется принцип работы предлагаемого комплекса определения координат области ионосферы с ММН, состоящего из двухчастотного приемника СРНС, блока определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы и блока определения координат области ионосферы с ММН. На рис. 1 также отмечено положение двух ПИТ, соответствующих моментам пересечения радиотрассой «КА СРНС – приемник СРНС» границ области с повышенным значением СКО ПЭС. Подионосферной точкой (ПИТ) называется проекция на поверхность Земли точки пересечения радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС» с областью максимальной ионизации ионосферы на высоте h_{max} , формирующей основной вклад в вариации ПЭС [1]. Моменты времени t_n и t_k обозначают соответственно начальный и конечный момент пересечения радиотрассой «КА СРНС – приемник СРНС» области ионосферы с ММН электронной концентрации.

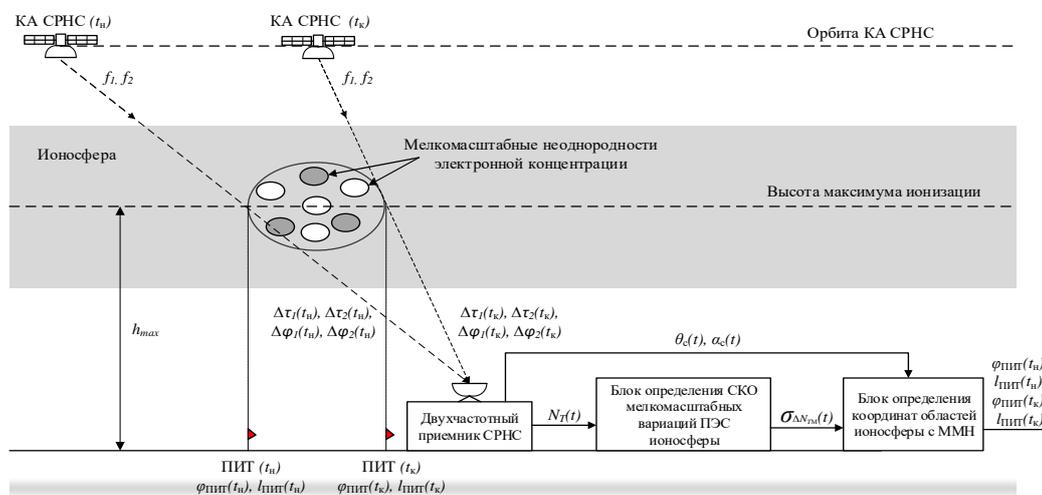


Рис. 1. Принцип работы комплекса определения координат областей ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями

Исходными данными для определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ является временной ряд ПЭС ионосферы $N_T(t)$ вдоль радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС», формируемый на выходе двухчастотного приемника СРНС (рис. 1). В общем случае ряд $N_T(t)$ представляет собой аддитивную смесь нескольких составляющих [1, 6]:

$$N_T(t) = N_{T0}(t) + \Delta N_T(t) + \Delta N_{TM}(t), \quad (1)$$

где $N_{T0}(t)$ – ПЭС однородной ионосферы (фона); $\Delta N_T(t)$ – вариации ПЭС, обусловленные ионосферными неоднородностями; $\Delta N_{TM}(t)$ – вариации ПЭС, обусловленные шумовой погрешностью измерений двухчастотного приемника.

В формуле (1) слагаемое $\Delta N_T(t)$ также представляют собой сумму трёх составляющих:

$$\Delta N_T(t) = \Delta N_{TKP}(t) + \Delta N_{TSP}(t) + \Delta N_{TM}(t), \quad (2)$$

где $\Delta N_{\text{ТКР}}(t)$, $\Delta N_{\text{ТСР}}(t)$, $\Delta N_{\text{ТМ}}(t)$ – вариации ПЭС крупного ($\sim 10^3$ км), среднего ($\sim 10^2$ км) и мелкого ($\sim 10^2 \dots 10^3$ м) масштабов соответственно.

Для определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ($\Delta N_{\text{ТМ}}(t)$) ионосферы $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}$ разработана методика [6], включающая три этапа обработки временного ряда ПЭС $N_T(t)$, формируемого на выходе двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6. На первом этапе обработки производится сглаживание временного ряда $N_T(t)$ методом простой скользящей средней с шириной окна $t_{\text{сгл1}} = 60$ с. В результате формируется тренд $\langle N_T(t) \rangle = N_{T0}(t) + \Delta N_{\text{ТКР}}(t) + \Delta N_{\text{ТСР}}(t)$, учитывающий изменения во времени фонового ПЭС ионосферы и вариации ПЭС, обусловленные неоднородностями крупного и среднего масштабов. На втором этапе обработки полученный тренд $\langle N_T(t) \rangle = N_{T0}(t) + \Delta N_{\text{ТКР}}(t) + \Delta N_{\text{ТСР}}(t)$ вычитается из исходного ряда (1). В результате ряд ПЭС принимает

вид комбинации мелкомасштабных возмущений и шумов $N_T(t) = \Delta N_{\text{ТМ}}(t) + \Delta N_{\text{ТШ}}(t)$. Затем этот ряд вариаций сглаживается методом простой скользящей средней с окном $t_{\text{сгл2}} = 0,1$ с, что обеспечивает удаление шумовой составляющей $\Delta N_{\text{ТШ}}(t)$. В результате получается ряд вариаций ПЭС $N_T(t) = \Delta N_{\text{ТМ}}(t)$, обусловленных ММН электронной концентрации. На третьем этапе обработки вычисляется СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t)$ на интервале $\Delta t_{\text{ско}} = n \Delta t_{\text{д}} = 60$ с (что соответствует $n = 3000$ измерений при интервале дискретизации $\Delta t_{\text{д}} = 0,02$ с).

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t)$, полученных с помощью двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6, размещенного в Северо-Кавказском федеральном университете (г. Ставрополь).

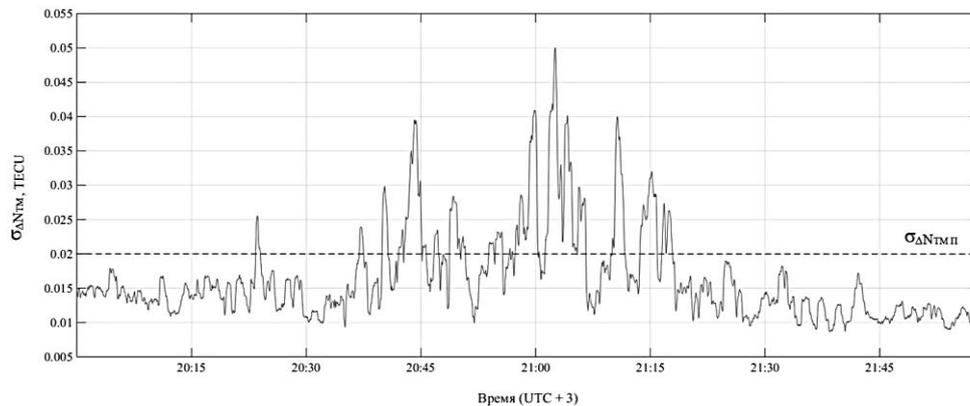


Рис. 2. Изменение во времени среднеквадратичного отклонения мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы

Из рис. 2 видно, что в период с 20.37 по 21.18 величина СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t)$ в среднем возрастает почти в 2 раза (с 0,0125 до 0,025 ТЕСУ) и достигает максимального значения 0,05 ТЕСУ. Это указывает на то, что радиотрасса «КА СРНС – приемник СРНС» пересекает область ионосферы с ММН электронной концентрации (рис. 1).

В соответствии с рис. 1 на основе данных о СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t)$ в блоке определения координат областей ионосферы с ММН определяются, прежде всего, начальный $t_{\text{н}}$ и конечный $t_{\text{к}}$ моменты времени пересечения радиотрассой «КА СРНС – приемник СРНС» области ионосферы с ММН. В эти моменты времени ($t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$) СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t)$ превышает

заданное пороговое значение $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМп}}}$. Для найденных моментов времени $t = t_{\text{н}}$ и $t = t_{\text{к}}$ представляется возможным вычислить широту $\varphi_{\text{ПИТ}}(t)$ и долготу $l_{\text{ПИТ}}(t)$ ПИТ для определения положения и линейных размеров области ионосферы с ММН.

На основе известных [1] формул и данных об изменении угла возвышения $\theta_c(t)$ и азимута $\alpha_c(t)$ КА, полученных по результатам обработки принятых навигационных сигналов двухчастотным приемником СРНС, а также заданного значения высоты максимума ионизации h_{max} , определяются географические координаты ПИТ в начальный ($t_{\text{н}}$) и конечный ($t_{\text{к}}$) моменты времени, используя следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ПИТ}}(t_{n,k}) &= \arcsin(x + y); \\ x &= \sin \varphi_{\text{ПРМ}} \cos \psi(t_{n,k}); \\ y &= \cos \varphi_{\text{ПРМ}} \sin \psi(t_{n,k}) \cos \alpha_c(t_{n,k}); \\ l_{\text{ПИТ}}(t_{n,k}) &= l_{\text{ПРМ}} + \arcsin p; \\ p &= \sin \psi(t_{n,k}) \sin \alpha_c(t_{n,k}) \sec \varphi_{\text{ПИТ}}(t_{n,k}); \\ \psi(t_{n,k}) &= \frac{\pi}{2} - \theta_c(t_{n,k}) - \arcsin q; \\ q &= \frac{R_E}{R_E + h_{\text{max}}} \cos \theta_c(t_{n,k}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_{\text{ПИТ}}$ – географическая широта ПИТ, $l_{\text{ПИТ}}$ – долгота ПИТ; $\varphi_{\text{ПРМ}}, l_{\text{ПРМ}}$ – географические координаты точки наблюдения (размещения приемника СРНС); α_c, θ_c – азимут и угол возвышения луча

«КА СРНС – приемник СРНС»; Ψ – центральный угол между точкой наблюдения и ионосферной точкой, R_E – радиус Земли.

На рис. 3 представлены результаты расчета согласно (3) изменения координат ПИТ в период времени с начального t_n до конечного t_k момента (с 20.37 по 21.18), когда СКО вариаций ПЭС (рис. 2) превышало заданное пороговое значение $\sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}}(t) > \sigma_{\Delta N_{\text{ТМ}}} = 0,02$ TECU. Траектория движения ПИТ (жирная линия) представляет с собой отображение на карте области ионосферы, содержащей ММН электронной концентрации.



Рис. 3. Область ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации

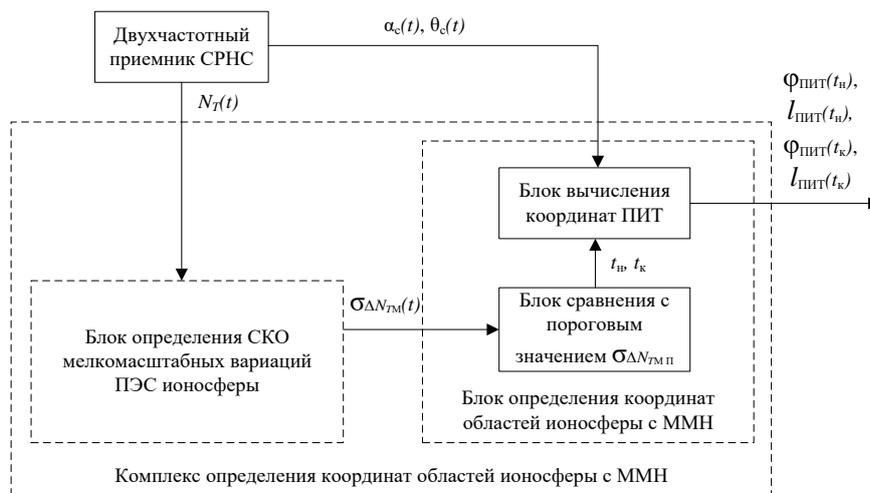


Рис. 4. Структура комплекса определения координат области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями

Таким образом, алгоритм определения координат областей ионосферы с ММН по данным

GPS-мониторинга заключается в последовательности следующих этапов:

1) вычисление СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$;

2) сравнение СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ с пороговым значением $\sigma_{\Delta N_{TM\Pi}}$ для определения начального t_n и конечного t_k моментов пересечения радиотрассой «КА СРНС – приемник СРНС» области ионосферы с ММН;

3) определение в найденные моменты времени t_n и t_k широты $\Phi_{\text{ПИТ}}(t_{n,k})$ и долготы $l_{\text{ПИТ}}(t_{n,k})$ ПИТ.

Указанный алгоритм может быть реализован в структуре построения комплекса определения координат области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями, представленной на рис. 4.

Выводы: описанный комплекс позволяет на основе данных об изменении среднеквадратического отклонения мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ определить географические координаты и оценить линейные размеры области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации на радиотрассе «КА СРНС – Приемник СРНС» по результатам непрерывного определения с помощью двухчастотного приемника СРНС полного электронного

содержания ионосферы $N_T(t)$, угла возвышения $\theta_c(t)$ и азимута $\alpha_c(t)$ КА СРНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Афраймович, Э.Л.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. *Дэвис, К.* Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. 504 с.
3. *Маслов, О.Н.* Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи / О.Н. Маслов, В.П. Пашиинцев // Прилож. к журн. Инфокоммуникационные технологии. Вып. 4. – Самара: ПГАТИ, 2006. 357 с.
4. *Пашиинцев, В.П.* Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации: монография / В.П. Пашиинцев, М.Э. Солчатов, Р.П. Гахов. – М.: Физматлит, 2006. 184 с.
5. *Пашиинцев, В.П.* Обнаружение и пеленгация искусственных ионосферных образований с помощью спутниковых радионавигационных систем / В.П. Пашиинцев, С.А. Коваль, В.И. Стрекозов, А.В. Ляхов // Теория и техника радиосвязи. 2014. №1. С. 88-93.
6. *Пашиинцев, В.П.* Прогнозирование помехоустойчивости систем спутниковой связи и навигации по данным GPS-мониторинга ионосферы / В.П. Пашиинцев, Р.Р. Ахмадеев // Электросвязь. 2015. №11. С. 58-65.

COMPLEX FOR DETECTION THE IONOSPHERE AREAS WITH SMALL-SCALE IRREGULARITIES ACCORDING TO GPS-MONITORING

© 2016 V.P. Pashintsev¹, A.F. Chipiga¹, V.A. Tsimbal², M.V. Peskov¹

¹North Caucasus Federal University, Stavropol

²Engineering Physics Institute, Moscow

The structure of a complex for detection the geographical coordinates of ionosphere areas with intensive small-scale irregularities of electronic concentration on the basis of analysis the temporary ranks of full electronic contents of ionosphere received by GPS monitoring method is developed.

Key words: *satellite radio navigational system, ionosphere, small-scale irregularity, time rank, full electronic contents, two-frequency receiver*

Vladimir Pashintsev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Automated Information Security Systems Department. E-Mail: pashintsevp@mail.ru

Alexander Chipiga, Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of the Information Technologies and Telecommunications Institute. E-mail: iitt.ncfu@gmail.com

Vladimir Tsimbal, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Research Fellow. E-mail: asu_iif@mail.ru

Mark Peskov, Post-graduate Student. E-Mail: mvpeskov@hotmail.com