

7. Дымов О. В. Технологические аспекты использования микропартикулятов сывороточных белков при производстве молочных продуктов // Молочная промышленность. 2014. № 6. С. 18–21.
8. Muditha Dissanayake, Alan L. Kelly and Todor Vasiljevic Gelling Properties of Microparticulated Whey Proteins // J. Agric. Food Chem. 2010. 58 (11). P. 6825–6832.
9. Храмов А. Г. Белковые продукты из молочной сыворотки // Переработка молока. 2011. № 1. С. 18–21.
10. Выживаемость молочнокислых микроорганизмов в низкожирном пробиотическом мороженом / И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, М. Н. Асланова, Д. Н. Володин, М. С. Золоторева // Молочная промышленность. 2014. № 10. 72 с.

УДК 550.388.2

**Пашинцев Владимир Петрович, Султанов Александр Сергеевич,
Песков Марк Владимирович, Топорков Кирилл Игоревич**

МЕТОДИКА СЕЛЕКЦИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В РЯДАХ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

В статье рассматривается методика селекции мелкомасштабных ионосферных неоднородностей по накопленным данным о вариации полного электронного содержания, полученным методом трансionoсферного зондирования с использованием двухчастотного приемника GPS / ГЛОНАСС. Базируется на использовании метода скользящих окон для переменных временных интервалов в рядах значений полного электронного содержания ионосферы.

Ключевые слова: мелкомасштабные ионосферные возмущения, системы спутниковой связи, ионосфера, методика селекции, зона Френеля, фазовая неоднозначность.

**Vladimir Pashintsev, Alexander Sultanov, Mark Peskov, Kirill Toporkov
METHOD OF SMALL-SCALE IONOSPHERIC IRREGULARITIES
SELECTION ON TOTAL ELECTRONIC CONTENT DATA VARIATIONS**

In article provides methodic of small-scale ionosphere irregularities selection based on accumulated data about total electronic content, given via transionospheric monitoring with multi-phased GNSS receiver. Based on the method of sliding windows for variable time intervals in the ranks of the values of total electron content of the ionosphere.

Key words: small-scale ionosphere irregularities, systems of satellite communication, ionosphere, methodic of selection, Fresnel zone, phase undetermined.

Известно [1–4], что наиболее существенное влияние на снижение точности позиционирования в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) оказывают флуктуации фазы и амплитуды принимаемых сигналов (т. н. замирания, или мерцания), вызванные рассеянием (дифракцией) радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. В связи с этим возникает задача организации мониторинга текущего состояния ионосферы с учетом мелкомасштабных неоднородностей, который позволит оперативно адаптировать параметры используемых сигналов и навигационной аппаратуры пользователей СРНС к постоянно изменяющимся условиям трансionoсферного распространения радиоволн.

В настоящее время для мониторинга состояния ионосферы и исследования ионосферных возмущений широко используется метод трансionoсферного зондирования, основанный на просвечивании ионосферы радиосигналами, излучаемыми на двух несущих частотах (f_1 , f_2) с космических аппаратов (КА) СРНС (GPS и ГЛОНАСС).

Возможность использования СРНС для диагностики ионосферной плазмы основана на том, что при прохождении через ионосферу радиосигналы на частотах f_1 и f_2 испытывают различные задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а также изменения фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$, которые позволяют непрерывно определять по навигационным измерениям двухчастотного приемника GPS/ГЛОНАСС полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы $N_T \sim (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)$ [3, 5].

Применение известных [3, 6, 7] методик позволяет выделять из результатов измерения ПЭС составляющие, описывающие характеристики крупномасштабных и среднемасштабных ионосферных неоднородностей. Методика селекции возмущений, обусловленных воздействием мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, отсутствует.

Целью статьи является описание разработки методики селекции возмущений, обусловленных воздействием мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, по результатам измерения ПЭС.

На рис. 1 представлены 3 модели трансionoсферного радиоканала

КА СРНС – Приемник СРНС: а) без учета неоднородностей электронной концентрации, б) с учетом крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации $\Delta N(h)$, в) с учетом неоднородностей крупного, среднего и мелкого масштабов.

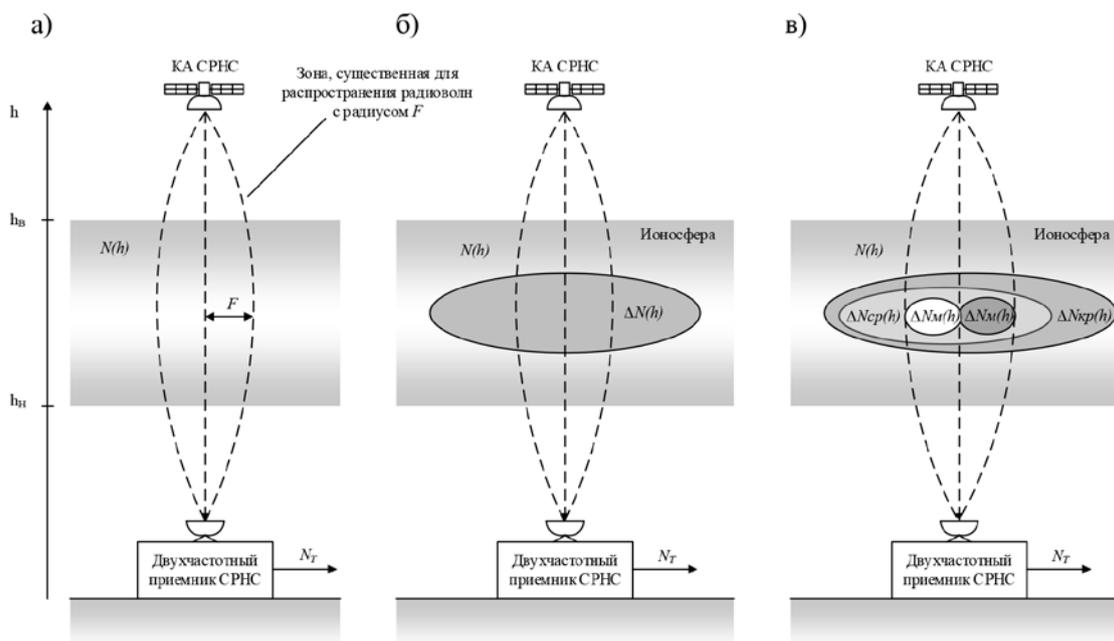


Рис. 1. Модели трансionoсферного радиоканала

Величина ПЭС (N_T), называемая также интегральной электронной концентрацией ионосферы, представляет собой полное количество электронов в столбе сечением 1 м² вдоль вертикального пути распространения радиоволн в пределах зоны Френеля $2F$ (рис. 1а) [8]

$$N_T = \int_{h_u}^{h_e} N(h) dh = \int_0^{\infty} N(h) dh, \quad (1)$$

где $N(h)$ – распределение электронной концентрации по высоте, h_u – высота нижней границы ионосферы, h_e – высота верхней границы ионосферы. Поскольку вне интервала высот от h_u до h_e значение $N(h)$ быстро падает с изменением h , то пределы интегрирования по высоте в (1) можно расширить от 0 до ∞ [8].

Согласно [1, 3, 7, 8] ионосферная задержка Δt и изменение фазы $\Delta\varphi$ зависят от несущей частоты f и ПЭС N_T . По разнице $\Delta\varphi_1(f_1, N_T)$ и $\Delta\varphi_2(f_2, N_T)$, измеренных приемником СРНС в момент времени t на двух известных частотах f_1 и f_2 для решения навигационной задачи, можно с высокой точностью вычислить мгновенное значение $N_T(t)$ [3, 7]:

$$N_T(t) = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,308(f_1^2 - f_2^2)} \left(\left(\frac{\Delta\varphi_1(t)}{2\pi} \lambda_1 - \frac{\Delta\varphi_2(t)}{2\pi} \lambda_2 \right) + K + \sigma_L \right), \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн для частот f_1 и f_2 соответственно; K – константа, связанная с неоднозначностью фазовых измерений; σ_L – погрешность измерения фазы приемником.

Так как начальное значение ПЭС, измеренное по разности фаз, остается неизвестным в силу фазовой неоднозначности, для эффективного ее устранения используют комбинацию измерений задержки Δt и изменения фазы $\Delta\varphi$ на непрерывном интервале без срывов сопровождения фазы навигационного сигнала [3, 7]:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} \lambda_1 - \frac{\Delta\varphi_2}{2\pi} \lambda_2 \right) - (c\Delta\tau_2 - c\Delta\tau_1) \right)_i, \quad (3)$$

где N – число измерений, c – скорость света.

Таким образом, на выходе двухчастотного приемника СРНС получают временной ряд вариаций ПЭС $N_T(t)$. Пример такого ряда, полученный по измерениям двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6, представлен на рис. 2. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit – Единица измерения полного электронного содержания), равная 10^{16} эл/м².

В том случае когда на пути распространения в ионосфере встречаются локальные неоднородности электронной концентрации (ЭК) $\Delta N(h)$ крупного ($L=10^2 \dots 10^3$ км) и среднего ($L=10 \dots 10^2$ км) масштаба (рис. 1б), выражение (1) принимает вид

$$N_T = \int_0^{\infty} (N(h) + \Delta N(h)) dh = \int_0^{\infty} N(h) dh + \int_0^{\infty} \Delta N(h) dh = N_{T0} + \Delta N_T, \quad (4)$$

где N_{T0} – ПЭС однородной ионосферы, ΔN_T – отклонения ПЭС, обусловленные крупно- или средне-масштабными неоднородностями (превышающими зону Френеля $2F$) ЭК в ионосфере.

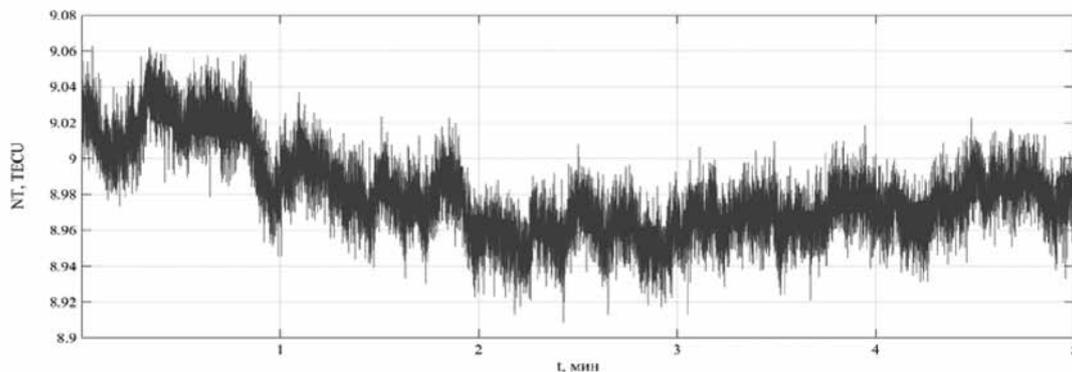


Рис. 2. Ряд вариаций полного электронного содержания

Так как возникновение неоднородностей ЭК обусловлено явлениями естественного (солнечная активность, землетрясения, ураганы и т. п.) и техногенного (взрывы, запуски ракет и т. п.) происхождения с различными периодами и интенсивностью, их пространственные характеристики также

различны. Традиционно выделяют неоднородности крупного, среднего и мелкого масштабов, одновременно существующих в ионосфере [2–7]. Следовательно, отклонения $\Delta N(h)$ (рис. 1в) в общем случае представляют собой сумму отклонений различных масштабов

$$\Delta N(h) = \Delta N_{кр}(h) + \Delta N_{ср}(h) + \Delta N_{м}(h), \quad (5)$$

где $\Delta N_{кр}(h)$ – крупномасштабные неоднородности ЭК, $\Delta N_{ср}(h)$ – среднемасштабные неоднородности ЭК, $\Delta N_{м}(h)$ – мелкомасштабные неоднородности ЭК (равные и меньше зоны Френеля).

С учетом (5) и шумов $\Delta N_{Тш}$, обусловленных погрешностями измерений двухчастотного приёмника СРНС, выражение (4) принимает вид

$$N_T = N_{T0} + \Delta N_{Ткр} + \Delta N_{Тср} + \Delta N_{Тм} + \Delta N_{Тш}.$$

Непрерывные измерения Δt и $\Delta \phi$ с помощью двухчастотного приемника СРНС позволяют получить временной ряд вариаций ПЭС

$$N_T(t) = N_{T0}(t) + \Delta N_{Ткр}(t) + \Delta N_{Тср}(t) + \Delta N_{Тм}(t) + \Delta N_{Тш}(t). \quad (6)$$

Применение известных [3, 6, 7] методик селекции возмущений в рядах вариаций ПЭС позволяет выделять из исходного ряда (4) $N_T(t)$ составляющие, описывающие характеристики крупномасштабных $\Delta N_{Ткр}(t)$ и среднемасштабных $\Delta N_{Тср}(t)$ ионосферных неоднородностей.

Существующий подход к исследованию крупномасштабных и среднемасштабных ионосферных неоднородностей, описанный в [3, 6, 7] и ряде других работ, предполагает обработку данных измерений ПЭС, которая заключается в следующем. Для выделения отдельных составляющих ряда (4) к нему применяется процедура сглаживания скользящими временными окнами [2, 3, 7]. При этом ширина интервала (окна) сглаживания $t_{сгл}$ зависит от периода возмущений t_0 в ряду ПЭС, которые требуется выделить. Эта зависимость объясняется тем, что процедура сглаживания приводит к устранению возмущений во временном ряду, когда ширина интервала сглаживания берется равной или кратной периоду возмущений $t_{сгл} = nt_0$, при $n = 1, 2, 3 \dots$ [9].

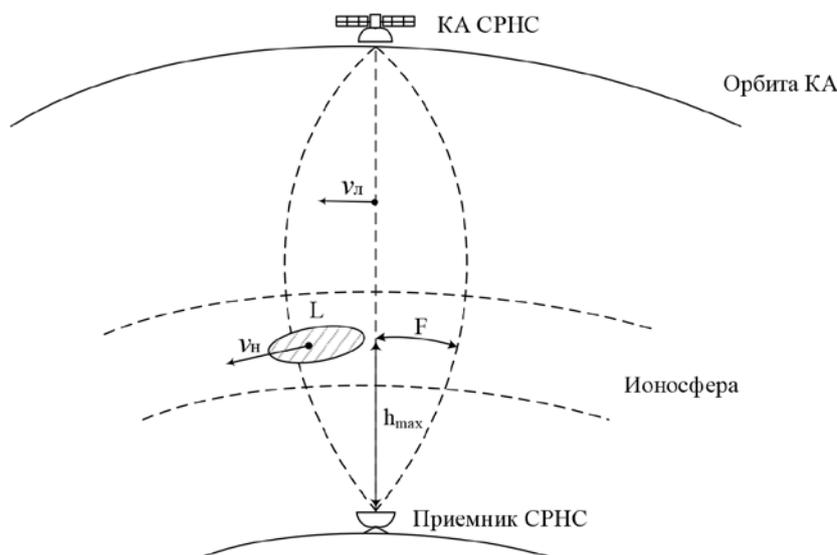


Рис. 3. Пересечение дрейфующей мелкомасштабной ионосферной неоднородностью зоны Френеля

Для определения периода мелкомасштабных возмущений следует рассмотреть механизм влияния ионосферных неоднородностей на возникновение колебаний в рядах ПЭС. В соответствии с

[2, 4], мерцания в месте приема наиболее интенсивны в том случае, когда средний размер дрейфующих мелкомасштабных ионосферных неоднородностей R сравним с радиусом области, существенной для распространения радиоволн (первой зоны Френеля

$$F = \sqrt{\lambda h_{max}},$$

где $h_{max} \approx 300 \dots 400$ км – высота максимума ионосферы), изображенной на рис. 3. Следовательно, период возмущений зависит от соотношения размеров первой зоны Френеля $2F$, размеров ионосферных неоднородностей L и относительной скорости их движения $v_{отн}$.

На высоте h_{max} радиус первой зоны Френеля составляет $F \approx 240 \dots 310$ м. Характерный пространственный масштаб мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в соответствии с [3] составляет $L = 100 \dots 1000$ м.

Относительная скорость движения мелкомасштабной ионосферной неоднородности $v_{отн}$ складывается из средней скорости перемещения мелкомасштабных ионосферных неоднородностей $v_n = 100 \dots 300$ м/с и скорости перемещения луча КА – Приемник (первой зоны Френеля) v_l на высоте h_{max} . При этом: 1) относительная скорость $v_{отн max} = v_n + v_l$ максимальна, когда ионосферная неоднородность и луч КА – Приемник движутся навстречу друг другу; 2) относительная скорость $v_{отн min} = v_n - v_l$ минимальна, когда ионосферная неоднородность и луч КА – Приемник движутся сонаправленно.

Скорость движения луча КА – Приемник на высоте h_{max} рассчитывается по формуле

$$v_l = 2\pi h_{max} / T \approx 45 \dots 60 \text{ м / с},$$

где T – период обращения КА СРНС.

Можно показать (рис. 3), что период возмущения t_v определяется временем пересечения дрейфующей неоднородностью размером L области, существенной для распространения радиоволн, с диаметром $2F$: $t_v = (2F + L) / v_{отн}$.

Очевидно, что период возмущения t_v будет: 1) минимальным, когда ионосферная неоднородность минимального размера пересекает первую зону Френеля с максимальной относительной скоростью: $t_{v min} = (2F + L_{min}) / v_{отн max}$; 2) максимальным, когда ионосферная неоднородность максимального размера пересекает первую зону Френеля с минимальной относительной скоростью: $t_{v max} = (2F + L_{max}) / v_{отн min}$.

Таким образом, на основе выражений $t_{v min}$ и $t_{v max}$ возмущения во временных рядах вариаций ПЭС, соответствующие дрейфу мелкомасштабных неоднородностей через первую зону Френеля, имеют период $t_{v,м} \approx 1 \dots 10$ с (при $F = 240 \dots 310$ м, $L = 100 \dots 1000$ м, $v_{отн} = 150 \dots 260$ м/с).

Временное окно t_{c2n1} , используемое для удаления составляющих $N_{T0}(t) + \Delta N_{Tкр}(t) + \Delta N_{Tcp}(t)$, соответствующих колебаниям ПЭС с периодами $t_v > t_{v,м}$, может быть выбрано равным 1 мин. Такой выбор обосновывается успешным выделением составляющей $\Delta N_{Tcp}(t)$ с применением известных методик, использующих для сглаживания высокочастотных составляющих окно $t_{c2n1} = 1$ мин, и удовлетворяет условию $t_{c2n1} = nt_v$. В результате сглаживания скользящим окном $t_{c2n1} = 1$ мин и последующего вычитания полученного тренда $\langle \Delta N_T \rangle = N_{T0}(t) + \Delta N_{Tкр}(t) + \Delta N_{Tcp}(t)$, исходный ряд (6) принимает вид $N_T(t) = \Delta N_{Tм}(t) + \Delta N_{Tи}(t)$, представленный на рис. 4.

Временное окно сглаживания t_{c2n2} должно быть выбрано таким образом, чтобы удалить из исходного ряда $N_T(t)$ составляющую $N_{Tи}(t)$ без искажения формы мелкомасштабных возмущений $N_{Tм}(t)$.

Возможность регистрации неоднородностей приемником определяется его временным разрешением. Согласно соотношению Найквиста, минимальный период возмущения, которое может быть зарегистрировано при периоде дискретизации данных Δ , равен $t_{v min} = 2\Delta$. При этом на каждый период приходится два временных отсчета, кроме того, предполагается, что возмущение имеет синусоидальный (волновой) характер. На практике для уверенного выделения возмущения двух отсчетов на период оказывается недостаточно. Это связано с тем, что в чистом виде гармонические возмущения в ионосфере не реализуются в силу дисперсионных свойств среды [5]. Опыт ионосферных измере-

ний показал, что для эффективной селекции возмущения в ряду вариаций ПЭС требуется от пяти до десяти временных отсчетов Δ на период, то есть минимальный период возмущения, которое может быть зарегистрировано, составляет $t_{e\ min} \approx 5\Delta \dots 10\Delta$ [5]. Использование современного двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6 позволяет производить измерения ПЭС с минимальным периодом дискретизации $\Delta = 0,02$ с.

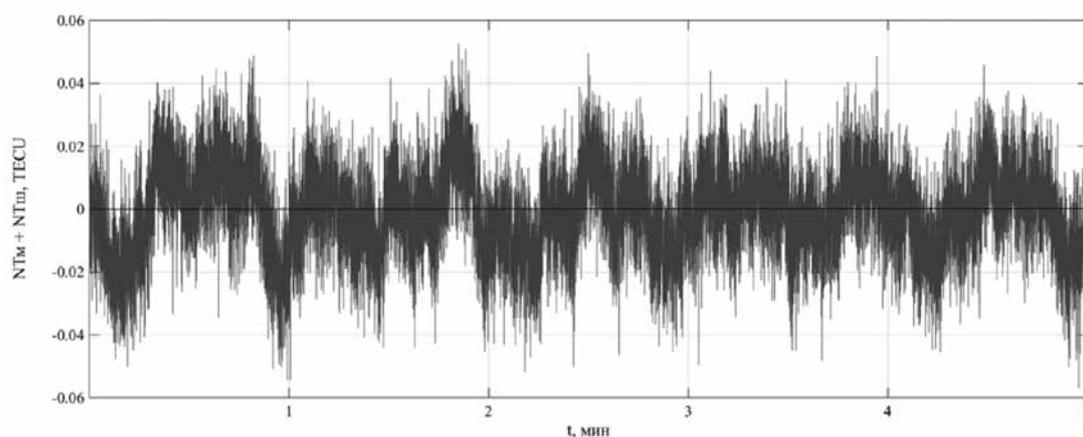


Рис. 4. Ряд вариаций полного электронного содержания, полученный в результате сглаживания скользящим окном $t_{cgl1} = 1$ мин и последующего вычитания тренда

Сглаживание временного ряда (4) с окном $t_{cgl2} = 5\Delta = 0,1$ с обеспечит удаление шумовой составляющей $N_{Tu}(t)$ без искажения формы мелкомасштабных возмущений $N_{Tm}(t)$. В этом случае ряд $N_T(t) = \Delta N_{Tm}(t) + \Delta N_{Tu}(t)$ (рис. 4) примет вид $N_T(t) = \Delta N_{Tm}(t)$. Полученный ряд ПЭС представлен на рис. 5.

Таким образом, на основе существующих методик селекции возмущений в рядах вариаций ПЭС, обусловленных влиянием крупномасштабных и среднемасштабных ионосферных неоднородностей, разработана методика селекции возмущений, обусловленных воздействием мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в рядах вариаций наклонного ПЭС.

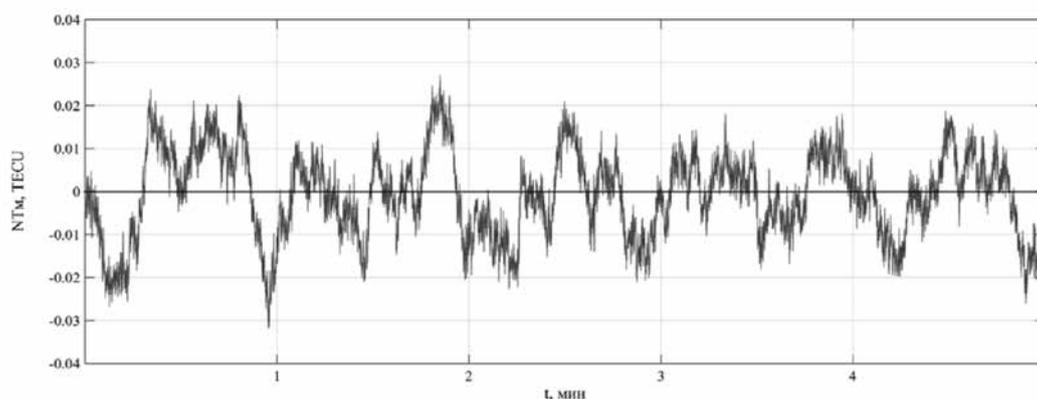


Рис. 5. Ряд вариаций полного электронного содержания, соответствующих мелкомасштабным ионосферным возмущениям

Суть методики заключается в следующем:

- 1) исходный ряд (рис. 2) вариаций ПЭС (6) $N_T(t) = N_{T0}(t) + \Delta N_{Tkp}(t) + \Delta N_{Tcp}(t) + \Delta N_{Tm}(t) + \Delta N_{Tu}(t)$ сглаживается скользящей средней с окном $t_{cgl1} = 1$ мин;

- 2) полученный в результате сглаживания тренд невозмущенной ионосферы, крупно- и средне-масштабных возмущений $N_T(t) = N_{T0}(t) + \Delta N_{Tкр}(t) + \Delta N_{Tср}(t)$ вычитается из исходного ряда (6), который в результате принимает вид комбинации мелкомасштабных возмущений и шумов $N_T(t) = \Delta N_{Tм}(t) + \Delta N_{Tш}(t)$ (рис. 4);
- 3) ряд вариаций ПЭС $N_T(t) = \Delta N_{Tм}(t) + \Delta N_{Tш}(t)$ сглаживается простой скользящей средней с окном $t_{сг2} = 0,1$ с, что обеспечивает удаление шумовой составляющей $\Delta N_{Tш}(t)$. В результате получается ряд (рис. 5) вариаций ПЭС $N_T(t) = \Delta N_{Tм}(t)$, описывающих мелкомасштабные ионосферные возмущения.

Литература

1. Пашинцев В. П., Солцатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации: монография. М.: Физматлит, 2006. 184 с.
2. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В., Дзин Ш. Контроль текущих условий распространения сигналов навигационных спутников // Солнечно-земная физика. 2013. № 22. С. 35–40.
3. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
5. Перевалова Н. П. Оценка характеристик наземной сети приемников GPS / ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения // Солнечно-земная физика. 2011. № 19. С. 124–133.
6. Афраймович Э. Л., Кирюшкин В. В. Пространственно-многоканальный прием при ионосферном GPS-мониторинге запусков ракет // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2002. № 11. С. 46–53.
7. Ясюкевич Ю. В. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография / Ю. В. Ясюкевич, Н. П. Перевалова, И. К. Едемский, А. С. Полякова. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 259 с.
8. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Выпуск 4. Самара: ПГАТИ, 2006. 357 с.
9. Дуброва Т. А. Статистические методы прогнозирования: учеб. пособие для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.