

## Метод оценки характеристик мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на основе результатов GPS-мониторинга

В. П. Пашинцев<sup>1</sup>, Д. В. Мишин<sup>2</sup>, М. В. Песков<sup>1</sup>, С. А. Коваль<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Россия  
E-mail: pashintsev@mail.ru

<sup>2</sup> Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
Самара, 443010, Россия

<sup>3</sup> Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного  
Санкт-Петербург, 194064, Россия

Разработан метод обработки результатов измерений полного электронного содержания ионосферы с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Он позволяет оценить среднеквадратическое отклонение мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания и средний (характерный) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Предложенный метод базируется на модификации двухчастотного приёмника GPStation-6, позволяющей значительно увеличить частоту дискретизации измерений полного электронного содержания и снизить уровень инструментальных шумов, и на использовании дискретного цифрового фильтра Баттерворта для выделения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания. В результате проведённого анализа процесса измерения полного электронного содержания неоднородной ионосферы с использованием сигналов систем GPS/ГЛОНАСС и модифицированного двухчастотного приёмника GPStation-6 обоснованы частоты среза используемого полосового фильтра: 1 и 10 Гц. При условии, что такой фильтр должен одновременно обладать максимально гладкой амплитудно-частотной характеристикой на частотах пропускания и не вносить большой групповой задержки в результаты измерений, обосновано использование фильтра Баттерворта 6-го порядка. Показано, что анализ автокорреляционной функции мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания позволяет оценить средний размер обуславливающих такие флуктуации мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на высотах максимальной ионизации ионосферы.

**Ключевые слова:** полное электронное содержание, мелкомасштабные флуктуации, среднеквадратическое отклонение, средний размер, цифровой фильтр, автокорреляционная функция

Одобрена к печати: 22.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-308-324

### Введение

Известно (Дэвис, 1973; Кравцов и др., 1983; Маслов, Пашинцев, 2006; Рекомендация..., 2019; Черенкова, Чернышов, 1984; Aarons, 1982; Crane, 1977; Pashintsev et al., 2020b; Yeh, Liu, 1982), что распространение радиоволн в спутниковых системах связи и навигации в условиях возмущений ионосферы, связанных с образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей, сопровождается возникновением ионосферных мерцаний (замираний, скинтилляций) принимаемых сигналов. Эти эффекты могут приводить к существенному снижению качества функционирования спутниковых систем связи и навигации, поэтому необходимо осуществлять мониторинг мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. В настоящее время для измерения характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы наиболее широкое распространение получили методы GPS-мониторинга (англ. Global Positioning System — система глобального позиционирования), которые базируются на измерении полного электронного содержания (ПЭС) в спутниковой радиолинии с помощью двухчастотного приёмника глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Однако ионосферные мерцания порождаются не крупномасштабными флуктуациями ПЭС ионосферы, а её мелкомасштабными флуктуациями, которые двухчастотным приёмником ГНСС в настоящее время

не измеряются. В этой связи актуальной представляется задача модификации двухчастотного приёмника ГНСС в направлении отделения (фильтрации) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы от флуктуаций более крупных масштабов и последующего определения их статистических характеристик.

Поэтому цель статьи состоит в разработке метода цифровой фильтрации мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы для оценки их среднеквадратического отклонения (СКО) и характерного размера неоднородностей на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы.

### Анализ влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на характеристики замираний сигналов в спутниковых системах связи и навигации

Известно (Афраймович, Перевалова, 2006; Кравцов и др., 1983; Маслов, Пашинцев, 2006; Перевалова, 2011; Рыжкина, Федорова, 2001; Aarons, 1982; Crane, 1977; Pashintsev et al., 2020b; Yeh, Liu, 1982), что ионосфера Земли подвергается постоянному воздействию естественных (солнечная активность, ураганы, землетрясения и др.) и (или) искусственных (радионагрев, инжекция легкоионизирующихся веществ и т. п.) возмущающих факторов, которые обуславливают изменения её электронной концентрации  $N(h, \rho)$  ( $\text{м}^{-3}$ ) по высоте ( $h$ ) и пространству ( $\rho = x, y$ ). Эти изменения проявляются в образовании обширных (до нескольких сотен и тысяч километров) областей (рис. 1), в которых электронная концентрация  $N(\rho, h) = \bar{N}(h) + \Delta N(\rho, h)$  отличается от среднего значения  $\bar{N}(h)$  из-за образования неоднородностей  $\Delta N(\rho, h)$  различных пространственных масштабов (от сотен километров до единиц и десятков метров).

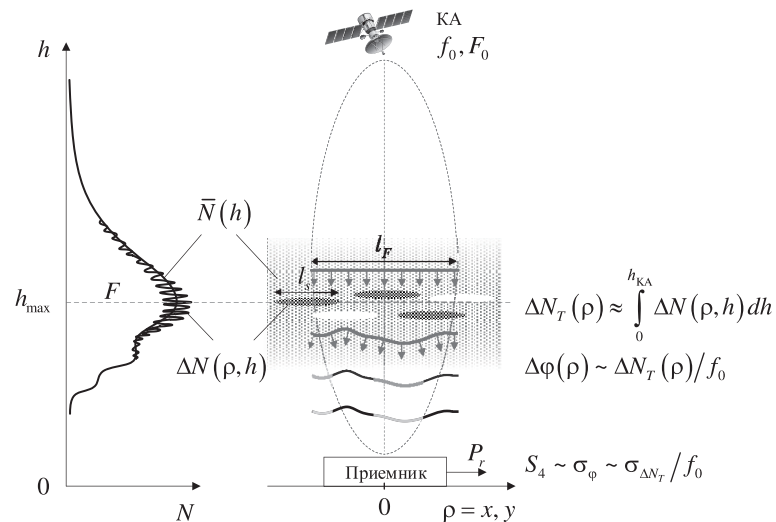


Рис. 1. Модель ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями и трансionoсферного распространения волны

Причиной возникновения ионосферных мерцаний считаются мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации  $\Delta N(\rho, h)$ , которые характеризуются размерами порядка  $l_s \approx 10-1000$  м. Величина относительных флуктуаций  $(\Delta N / \bar{N})$  электронной концентрации (ЭК) мелкомасштабных неоднородностей на любой высоте практически постоянна (Кравцов и др., 1983; Рыжкина, Федорова, 2001; Черенкова, Чернышов, 1984; Yeh, Liu, 1982):  $\Delta N / \bar{N} \approx \Delta N(\rho, h) / \bar{N}(h) \approx 10^{-3}$ . Поэтому наибольшие флуктуации ЭК будут наблюдаться (см. рис. 1) на высотах  $h_{\max} \approx 250-350$  км максимально ионизированного слоя  $F$  ионосферы:  $\Delta N(\rho, h_{\max}) \approx 10^{-3} \bar{N}(h_{\max})$ . При естественных и искусственных возмущениях ионосферы эти

флуктуации могут возрастать на 1–2 порядка (Маслов, Пашинцев, 2006; Рыжкина, Федорова, 2001; Aarons, 1982; Crane, 1977; Yeh, Liu, 1982), т. е. до  $\Delta N(\rho, h_{\max}) \approx (10^{-2} - 10^{-1}) \bar{N}(h_{\max})$ . Это позволяет представить множество мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на пути распространения радиоволн от космического аппарата (КА) до наземного приёмника в виде тонкого слоя (фазового экрана), который описывается пространственными мелкомасштабными флуктуациями полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы (Маслов, Пашинцев, 2006; Yeh, Liu, 1982)

$$\Delta N_T(\rho) = \int_0^{\infty} \Delta N(\rho, h) dh \approx \int_0^{h_{\text{КА}}} \Delta N(\rho, h) dh \quad (1)$$

относительно его среднего значения  $\bar{N}_T = \int_0^{\infty} \bar{N}(h) dh$ , ( $\text{м}^{-2}$ ). Согласно уравнению (1) при возмущениях ионосферы мелкомасштабные флуктуации ПЭС могут возрастать на 1–2 порядка.

Согласно работам (Дэвис, 1973; Маслов, Пашинцев, 2006; Yeh, Liu, 1982) процесс распространения радиоволны (см. *рис. 1*) с несущей частотой  $f_0$  от КА до приёмника через ионосферный слой с мелкомасштабными неоднородностями (фазовый экран) сопровождается искажениями (флуктуациями) её фазового фронта в пределах области пространства  $\rho$ , ограниченной диаметром первой зоны Френеля ( $l_F \approx 2\sqrt{ch_{\max}/f_0} \geq l_s$ ):

$$\Delta\varphi(\rho) = -80,8\pi\Delta N_T(\rho)/cf_0 \text{ рад}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света ( $\text{м/с}$ );  $80,8$  — коэффициент, имеющий размерность ( $\text{м}^3/\text{с}^2$ ).

Интерференция отдельных участков ( $\rho$ ) фазового фронта волны (2) за фазовым экраном обуславливает перераспределение амплитуды  $A(\rho, h)$  вдоль волнового фронта (иллюстрируется на *рис. 1* в виде изменения его яркости). В конечном итоге эти дифракционные процессы определяют мгновенное значение мощности сигнала  $P_r = A^2$  на входе приёмника. Поэтому изменение пространственных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\Delta N_T(\rho)$  вдоль трассы распространения волны вследствие дрейфа мелкомасштабных неоднородностей и движения КА приводит к случайному изменению мощности принимаемого сигнала ( $P_r$ ), т. е. к его мерцаниям (или замираниям, сцинтилляциям).

Для оценки степени проявления ионосферных мерцаний принимаемых сигналов традиционно используется величина индекса мерцаний (Рекомендация..., 2019; Рытов и др., 1978; Aarons, 1982; Crane, 1977; Pashintsev et al., 2020b; Yeh, Liu, 1982):

$$S_4 = \sqrt{\left(\langle P_r^2 \rangle - \langle P_r \rangle^2\right) / \langle P_r \rangle^2} = \sigma_{P_r} / \langle P_r \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle x \rangle$  — статистическое усреднение случайных значений  $x$ . Величина  $S_4$  характеризует отношение среднеквадратического отклонения флуктуаций мгновенной мощности принимаемого сигнала  $\sigma_{P_r} = \left(\langle P_r^2 \rangle - \langle P_r \rangle^2\right)^{1/2}$  к его среднему значению  $\langle P_r \rangle$ .

Очевидно, что при отсутствии мелкомасштабных флуктуаций ЭК и ПЭС ионосферы ( $\Delta N_T(\rho) \sim \Delta N(\rho, h) \rightarrow 0$ ) флуктуации фазы во фронте волны на выходе ионосферы (2) будут отсутствовать  $\Delta\varphi(\rho) \sim \Delta N_T(\rho) \rightarrow 0$ , что обуславливает отсутствие дифракционных эффектов и мерцаний принимаемых сигналов ( $S_4 \rightarrow 0$ ). По мере возрастания мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\Delta N_T(\rho)$  флуктуации фазы во фронте волны на выходе ионосферы (2) будут пропорционально нарастать  $\Delta\varphi(\rho) \sim \Delta N_T(\rho)$ , что обусловит рост индекса ионосферных мерцаний принимаемых сигналов  $S_4$ . Отсюда следует, что интенсивность мерцаний будет возрастать по мере увеличения СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы (фазовом экране)  $\sigma_\varphi = \langle \Delta\varphi^2(\rho) \rangle^{1/2}$ , которое с учётом выражения (2) определяется СКО

мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\sigma_{\Delta N_T} = \langle \Delta N_T^2(\rho) \rangle^{1/2}$  и выбором несущей частоты  $f_0$ :  $S_4 \sim \sigma_\varphi \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$ .

Зависимость  $\sigma_\varphi = \psi(\sigma_{\Delta N_T})$  СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы в соответствии с формулой (2) описывается выражением вида (Маслов, Пашинцев, 2006; Yeh, Liu, 1982):

$$\sigma_\varphi = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0. \quad (4)$$

Для случая, когда флуктуации фазового фронта волны (2)  $\Delta\varphi(\rho)$  на выходе фазового экрана описываются гауссовым распределением вероятностей с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_\varphi^2$ , зависимости  $S_4 = \psi(\sigma_\varphi)$  и  $S_4 = \psi(\sigma_{\Delta N_T})$  имеют вид (Рытов и др., 1978; Pashintsev et al., 2020):

$$S_4 = \sqrt{1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)} = \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0\right)^2\right]}. \quad (5)$$

В частном случае слабых мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\sigma_{\Delta N_T}$  и флуктуаций фазового фронта выходной волны выражение (5) сводится к прямо пропорциональным зависимостям  $\left[S_4 = \sigma_\varphi \sqrt{2} \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0\right]$ . При отсутствии флуктуаций ПЭС ионосферы  $\left(\sigma_{\Delta N_T} = 0\right)$  и фазового фронта волны  $\left(\sigma_\varphi = 0\right)$  мерцания отсутствуют  $\left(S_4 = 0\right)$ . При сильных флуктуациях ПЭС ионосферы и фазового фронта выходной волны  $\left(\sigma_\varphi \gg 1\right)$  величина индекса мерцаний стремится к единице  $\left(S_4 \rightarrow 1\right)$ .

Согласно работам (Маслов, Пашинцев, 2006; Рекомендация..., 2019; Aarons, 1982; Crane, 1977; Pashintsev et al., 2020b; Yeh, Liu, 1982) мерцания сигналов с традиционными для систем спутниковой связи и навигации несущими частотами  $f_0 \geq 1$  ГГц в области средних широт малы:  $S_4 = 0,01-0,15$ , в полярных широтах они могут достигать значений  $0,45-0,7$ , а в области экваториальных широт возрастать до  $0,9-1,0$ . При искусственных возмущениях ионосферы наблюдаются области с индексом ионосферных мерцаний  $S_4 \rightarrow 1$  (Маслов, Пашинцев, 2006).

По мере увеличения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\left(\sigma_{\Delta N_T}\right)$  ионосферы и фазового фронта выходной волны  $\left(\sigma_\varphi \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0\right)$  замирания принимаемых сигналов могут приобретать частотно-селективный характер. В этих условиях случайным флуктуациям подвержена не только амплитуда (мощность) принимаемых сигналов, но и форма их огибающей (Маслов, Пашинцев, 2006). Степень проявления указанного эффекта зависит от соотношения  $F_0 / F_k \geq 1$  ширины спектра передаваемых сигналов ( $F_0$ ) к ширине полосы когерентности трансиионосферного канала связи (интервала частотной корреляции замираний), которая связана с величиной (4)  $\sigma_\varphi$  выражением вида (Маслов, Пашинцев, 2006):

$$F_k = \frac{\sqrt{2}f_0}{\sigma_\varphi \sqrt{1 + d_1^2/2}} = \frac{\sqrt{2}f_0}{\left(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0\right) \sqrt{1 + \left(2z^2c^2 / \pi^2 f_0^2 l_s^4\right)}}, \quad (6)$$

где параметр  $d_1^2 = 4z^2c^2 / \pi^2 f_0^2 l_s^4 \geq 1$  характеризует нарастание дифракционных эффектов за фазовым экраном;  $z = h_{\max}$  — расстояние от ионосферного фазового экрана до приёмника;  $l_s$  — характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей ионосферы.

Анализ выражения (6) указывает на наличие зависимости

$$F_k \sim f_0 / \sigma_\varphi d_1 \sim f_0^2 l_s^2 / \sigma_\varphi \sim f_0^3 l_s^2 / \sigma_{\Delta N_T}$$

полосы когерентности замираний принимаемых сигналов от несущей частоты ( $f_0$ ) и статистических характеристик мелкомасштабных неоднородностей  $\left(\sigma_{\Delta N_T}, l_s\right)$ . Поэтому ширина полосы когерентности замираний может существенно (на несколько порядков) сужаться при возмущениях ионосферы, сопровождаемых возрастанием СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\left(\sigma_{\Delta N_T}\right)$  и уменьшением среднего размера неоднородностей ( $l_s$ ).

Согласно публикациям (Демьянов, Ясюкевич, 2021; Маслов, Пашинцев, 2006; Pashintsev et al., 2020b) увеличение глубины общих замираний  $S_4 \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0 \rightarrow 1$  и степени частотно-селективных замираний ( $F_0 / F_k \geq 1$ ) при мелкомасштабных возмущениях ионосферы обуславливает возрастание на несколько порядков вероятности ошибочного приёма сигналов  $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, S_4, F_0 / F_k)$  при неизменном среднем значении отношения сигнал/шум на входе приёмника ( $h^2$ ). По этой причине необходимо осуществлять прогноз изменения статистических характеристик замираний ( $S_4$  и  $F_k$ ) принимаемых сигналов при возмущениях ионосферы, зависящих от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) и среднего размера неоднородностей ( $l_s$ ).

Проведённый анализ влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на характеристики замираний сигналов в спутниковых системах показал, что в соответствии с выражениями (3)–(5) по мере увеличения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) ионосферы и фазового фронта выходной волны ( $\sigma_\phi \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$ ) возрастают флуктуации мощности принимаемого сигнала ( $\sigma_r$ ) и индекс ионосферных мерцаний:  $S_4 = \sigma_r / \langle P_r \rangle \sim \sigma_\phi \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$ . Поэтому прогноз возрастания индекса мерцаний  $S_4$  при возмущениях ионосферы можно осуществить двумя способами:

- 1) на основе выражения (3) измерением статистических характеристик мощности принимаемого сигнала ( $P_r$ );
- 2) на основе выражения (5) измерением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) ионосферы.

Для оценки индекса ионосферных мерцаний ( $S_4$ ) в спутниковых радиолиниях в настоящее время используются методы GPS-мониторинга ионосферы (Афраймович, Перевалова, 2006; Демьянов, Ясюкевич, 2021; Shanmugam et al., 2012) на основе применения двухчастотных приёмников ГНСС класса GISTM (англ. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor). Одним из наиболее функциональных приёмников такого класса выступает NovAtel GPStation-6, который позволяет с высокой точностью измерять параметры принятых сигналов ГНСС типа GPS и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) на двух частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ) и на этой основе вычислять индекс мерцаний ( $S_4$ ) и ПЭС ионосферы ( $N_T$ ) на всех трассах от «видимых» навигационных КА до приёмника (GPStation-6™..., 2012). Однако использовать такие приёмники (в том числе и NovAtel GPStation-6) для оценки индекса ионосферных мерцаний ( $S_4$ ) в интересах прогноза показателей качества систем спутниковой связи и навигации в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы нецелесообразно. Это обусловлено тем, что расчёт индекса ионосферных мерцаний в данных приёмниках осуществляется по формуле (3)  $S_4 = \sigma_r / \langle P_r \rangle$  на основе измерения статистических характеристик флуктуаций мощности принимаемого сигнала ( $P_r$ ). Однако при низких углах КА ( $\alpha < 5-15^\circ$ ) относительно горизонта случайные изменения  $P_r$  могут вызываться не только мелкомасштабными неоднородностями ионосферы, но и многократным отражением радиоволн от множества окружающих приёмную антенну объектов. Поэтому достоверность расчёта индекса ионосферных мерцаний по результатам измерения флуктуаций мощности принимаемого сигнала (3)  $S_4 = \sigma_r / \langle P_r \rangle$  будет ниже, чем на основе оценки СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы (5)  $S_4 \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$ .

Осуществить оценку СКО мелкомасштабных флуктуаций  $\left\{ \sigma_{\Delta N_T} = \langle \Delta N_T^2(\rho) \rangle^{1/2} \right\}$  на основе результатов измерения ПЭС ионосферы ( $N_T$ ) методом GPS-мониторинга с использованием двухчастотного приёмника GPStation-6 не представляется возможным по ряду причин, связанных со сложностью отделения (фильтрации) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ( $\Delta N_T$ ) с размерами  $\rho \approx l_s = 10-1000$  м от крупно- и среднемасштабных флуктуаций ПЭС, обусловленных неоднородностями с размерами  $l_s = 1000$  м.

Поэтому цель статьи была сформулирована выше как разработка метода цифровой фильтрации мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ( $\Delta N_T$ ) для оценки их СКО  $\left\{ \sigma_{\Delta N_T} \right\}$

и характерного размера неоднородностей ( $l_s$ ) на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы.

### Анализ расширения возможностей метода GPS-мониторинга ионосферы для оценки характеристик мелкомасштабных флуктуаций ПЭС

Известно (Афраймович, Перевалова, 2006), что метод GPS-мониторинга ионосферы на основе передачи с КА ГНСС сигналов на двух несущих частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ) и применения двухчастотных приёмников (ПРМ) ГНСС позволяет с высокой точностью измерять параметры принятых сигналов и на их основе вычислять ПЭС ионосферы ( $N_T$ ) на всех трассах распространения радиоволн.

На рис. 2 показана упрощённая структура построения двухчастотного приёмника GPStation-6 для кодовых измерений ПЭС ионосферы ( $N'_{T(k)}$ ) и его модификация для оценки СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) и характерного размера неоднородностей ( $l_s$ ). Приёмник GPStation-6 состоит из двух основных частей (GPStation-6<sup>TM</sup> ..., 2012; Shanmugam et al., 2012):

- 1) аппаратной части с блоком приёма сигналов, осуществляющим аналого-цифровое преобразование, декодирование сигналов ГНСС и измерение их основных параметров — псевдодалностей ( $R'_1, R'_2$ ) до КА и псевдофаз ( $\phi'_1, \phi'_2$ );
- 2) программного обеспечения (ПО), реализующего блок цифровой обработки, в котором осуществляется вычисление радионавигационных параметров, координат приёмника, индекса мерцаний ( $S_4$ ), ПЭС ионосферы ( $N'_{T(k)}$ ) и т. д.

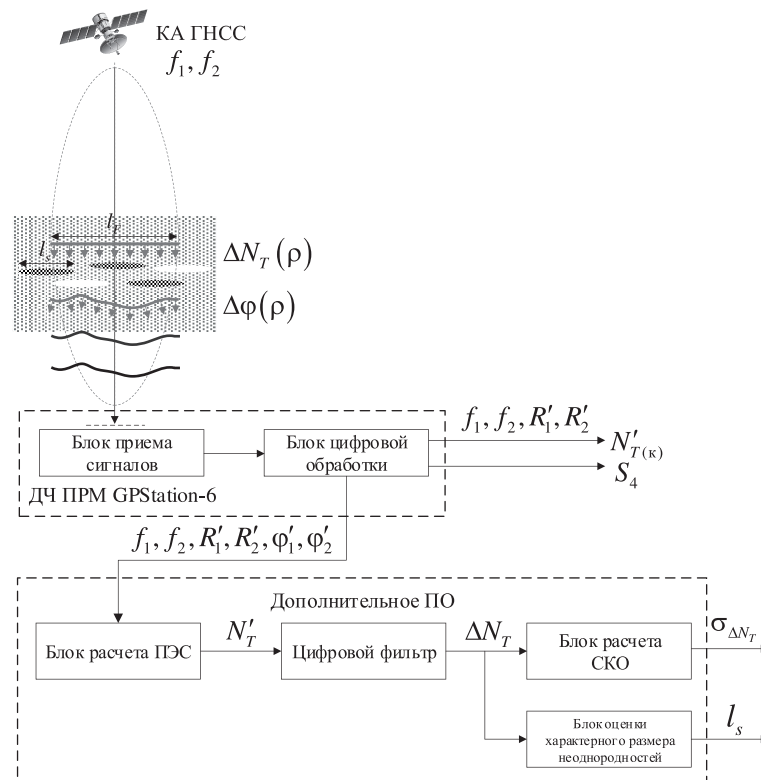


Рис. 2. Структура построения двухчастотного приёмника GPStation-6 для кодовых измерений ПЭС ионосферы ( $N'_{T(k)}$ ) и его модификация для оценки СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) и характерного размера неоднородностей ( $l_s$ )

Чтобы оценить СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\left\{\sigma_{\Delta N_T}\right\}$  на основе результатов измерения ПЭС ионосферы ( $N_T$ ) с использованием двухчастотного приёмника GPStation-6, требуется модифицировать его ПО (см. рис. 2).

Необходимость такой модификации ПО приёмника GPStation-6 обусловлена следующими причинами. Принцип работы приёмника GPStation-6 (см. рис. 2) основан на результатах измерений им псевдодальности  $R'_i \sim R + 40,4N_T/f_i^2$  до каждого из навигационных КА (иначе — кодовых измерений). Помимо истинной дальности  $R$  они содержат ионосферную составляющую  $R_i \sim N_T/f_i^2$ , зависящую от ПЭС ионосферы  $N_T$  на трассе от КА до приёмника и несущей частоты  $f_i$  (Афраймович, Перевалова, 2006; Демьянов, Ясюкевич, 2021; Shanmugam et al., 2012). Поскольку передача навигационных сигналов в рассматриваемых ГНСС осуществляется одновременно на двух несущих частотах ( $f_1 \approx 1,6$  ГГц и  $f_2 \approx 1,2$  ГГц), вычислить ПЭС ионосферы в каждый момент времени возможно на основе линейной комбинации (разности) измеренных псевдодальностей  $R'_1 \sim R + N_T/f_1^2$  и  $R'_2 \sim R + N_T/f_2^2$  (Афраймович, Перевалова, 2006; Carrano, Groves, 2006):

$$N'_{T(k)} = \frac{1}{40,4} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot (R'_2 - R'_1) = \frac{1}{40,4} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot (R_2 - R_1) + \delta_d + \delta_{ш} = N_T + \delta_d + \delta_{ш}. \quad (7)$$

Согласно уравнению (7) результаты кодовых измерений ПЭС ионосферы  $\left\{N'_{T(k)}\right\}$  отличаются от его истинного значения ( $N_T$ ) на величину систематической погрешности  $\delta_d$ , обусловленной дифференциальными задержками сигнала в передающих и приёмных радиотрактах, и случайной погрешности  $\delta_{ш}$ , обусловленной влиянием внутренних шумов приёмника на измерение псевдодальности.

Кодовые измерения ПЭС  $\left\{N'_{T(k)}\right\}$  проводятся в приёмнике GPStation-6 с интервалом дискретизации  $\tau_d = 1$  с. Поэтому по мере накопления дискретных значений  $N'_{T(k)}$  формируется временной ряд:

$$N'_{T(k)}(t) = N_T(t) + \delta_d + \delta_{ш}. \quad (8)$$

В общем случае наклонного распространения радиоволн (под углом  $\alpha$  относительно горизонтали) через ионосферу с неоднородностями ЭК  $N(\rho, h) = \bar{N}(h) + \Delta N(\rho, h)$  измеренное ПЭС с учётом выражения (1) описывается как сумма регулярной (средней) и флуктуационной составляющих:

$$N_T(\rho) = \int_0^\infty N(\rho, h) dz = \int_0^\infty \bar{N}(h) dz + \int_0^\infty \Delta N(\rho, h) dz = \bar{N}_T + \Delta N_T(\rho), \quad (9)$$

где  $dz \approx dh \cdot \text{cosec } \alpha$  — элементарный участок наклонного пути распространения радиоволн.

В этом случае результаты кодовых измерений ПЭС неоднородностей ионосферы (8) двухчастотным приёмником ГНСС с учетом выражения (9) будут описываться:

$$N'_{T(k)}(t) = N_T(t) + \delta_d + \delta_{ш} \approx \bar{N}_T(t) + \Delta N_T(t) + \delta_d + \delta_{ш}. \quad (10)$$

Величина систематической погрешности  $\delta_d = \delta_{\text{SDCB}} + \delta_{\text{RDCEB}}$  складывается из дифференциальных задержек сигнала в передающих ( $\delta_{\text{SDCEB}}$ ) и приёмных ( $\delta_{\text{RDCEB}}$ ) радиотрактах. При этом значение  $\delta_{\text{RDCEB}}$  может быть получено из сообщений формата ISMCALIBRATIONSTATUS на выходе приёмника GPStation-6 в результате выполнения процедуры автоматической калибровки (GPStation-6<sup>TM</sup> ..., 2012). Значения  $\delta_{\text{SDCEB}}$  ежедневно публикуются на веб-портале <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>. Поэтому величину систематической погрешности  $\delta_d = \delta_{\text{SDCEB}} + \delta_{\text{RDCEB}}$  можно заранее рассчитать и исключить из результатов измерений (т. е. считать  $\delta_d = 0$ ).

Поскольку величина относительных флуктуаций ЭК в мелкомасштабных неоднородностях среднеширотной ионосферы  $\Delta N/\bar{N} \approx \Delta N(\rho, h)/\bar{N}(h) \approx 10^{-3}$ , то с учётом выражения (1) относительные мелкомасштабные флуктуации ПЭС имеют такой же порядок:

$\Delta N_T / \bar{N}_T \approx 10^{-3}$ , или  $\Delta N_T \approx 10^{-3} \bar{N}_T$ . Величина случайной (шумовой) погрешности кодовых измерений ПЭС ионосферы может достигать 50 % от среднего значения:  $\delta_{ш} \approx 0,5 \bar{N}_T$  (Афраймович, Перевалова, 2006). Поэтому при использовании таких измерений выполняется соотношение  $\Delta N_T(t) \ll \delta_{ш}$ , которое указывает на «зашумление» результатов оценки мелкомасштабных флуктуаций ПЭС. Тогда выражение (10) с учётом  $\delta_d = 0$  принимает вид:  $N'_{T(к)}(t) \approx \bar{N}_T(t) + \delta_{ш}$ .

Для устранения «зашумления» необходимо модифицировать ПО двухчастотного приёмника GPStation-6 заменой кодовых измерений на комбинацию кодовых и фазовых измерений (Афраймович, Перевалова, 2006; Carrano, Groves, 2006). Для этого в состав ПО вводится (см. рис. 2) блок расчёта ПЭС по кодово-фазовым измерениям. При реализации комбинированных (кодово-фазовых) измерений ПЭС его величина в каждый момент времени вычисляется на основе результатов измерения приёмником GPStation-6 псевдодальностей ( $R'_1, R'_2$ ) и псевдофаз ( $\phi'_1, \phi'_2$ ) согласно выражению (Афраймович, Перевалова, 2006; Carrano, Groves, 2006):

$$N'_T = \frac{1}{40,4} \left[ \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] \cdot (\lambda_2 \phi'_2 - \lambda_1 \phi'_1) - \delta'_H, \quad (11)$$

где  $\lambda_i = c/f_i$  — длина волны на соответствующей частоте ( $f_1, f_2$ );  $\delta'_H = \psi(f_1, f_2, R'_1, R'_2, \phi'_1, \phi'_2, \alpha)$  — поправка для разрешения неоднозначности фазовых измерений (характеризует среднее смещение результатов расчёта ПЭС на основе неоднозначных фазовых измерений  $N_{T(\Phi)}$  относительно его истинного значения:  $\delta'_H = \langle N_T \rangle - \langle N_{T(\Phi)} \rangle$ ).

В этом случае шумовая погрешность измерения ПЭС ионосферы практически устраняется ( $\delta_{ш} \approx 0$ ) и результаты комбинированных измерений ПЭС неоднородной ионосферы на выходе блока расчёта ПЭС по кодово-фазовым измерениям будут описываться суммой  $N'_T(t) \approx \bar{N}_T(t) + \Delta N_T(t)$  среднего значения ПЭС ионосферы и её мелкомасштабных флуктуаций.

Таким образом, модификация ПО приёмника GPStation-6 (см. рис. 2) в направлении замены кодовых измерений ПЭС (10)  $N'_{T(к)}$  на кодово-фазовые измерения (11)  $N'_T$  позволяет устранить их «зашумление», что даёт возможность в последующем отфильтровать из временного ряда ПЭС  $N'_T(t) \approx \bar{N}_T(t) + \Delta N_T(t)$  мелкомасштабные флуктуации  $\Delta N_T(t)$ .

### Обоснование параметров цифрового фильтра для выделения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы

Согласно работе (Pashintsev et al., 2020a) мелкомасштабные отклонения (флуктуации) ПЭС на выходе блока расчёта ПЭС по кодово-фазовым измерениям  $N'_T(t) \approx \bar{N}_T(t) + \Delta N_T(t)$  будут наблюдаться на интервале времени  $\tau_{фл} = \Delta t = t_2 - t_1$ , который соответствует перемещению области пересечения трассы распространения радиоволн на расстояние  $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = l_s$ , равное среднему размеру мелкомасштабных неоднородностей ЭК, с эффективной скоростью сканирования  $v_c$ , т.е. проекции скорости перемещения КА ( $v_{КА} \approx 7,9$  км/с) на высоту слоя  $F$  ( $h_{max} \approx 250 - 350$  км) ионосферы. Поэтому влияние пространственных характеристик (среднего размера  $l_s$ ) мелкомасштабных неоднородностей ЭК ионосферы на временные характеристики измерений мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\Delta N_T(t)$  описывается выражением для оценки периода этих флуктуаций:  $\tau_{фл} = \Delta t = l_s / v_c$ .

Указанную характеристику флуктуаций ПЭС более точно следует назвать средним значением периода флуктуаций ПЭС, поскольку она определяется средним (характерным) размером  $l_s$  неоднородностей ЭК. Однако диапазон изменения мелкомасштабных неоднородностей ЭК, обуславливающих появление замираний (мерцаний) принимаемых сигналов, простирается от наименьших значений ( $l_{s\ min} < l_s$ ) до максимальных, соответствующих диаметру зоны Френеля  $l_{s\ max} = l_F \approx 2\sqrt{ch_{max} \operatorname{cosec} \alpha / f_0} \geq l_s$ . Поэтому период мелкомасштабных флуктуаций



ПЭС с наибольшими размерами  $l_s = l_{s \max} = l_F$  определяется (по аналогии со средним периодом  $\tau_{\text{фл}} = l_s/v_c$ ) как

$$\tau_{\text{фл max}} = l_F/v_c. \quad (12)$$

Наименьшие размеры мелкомасштабных ионосферных неоднородностей ( $l_{s \min} < l_s$ ) могут составлять десятки и даже единицы метров (Yeh, Liu, 1982). Однако наименьшие размеры мелкомасштабных неоднородностей, которые могут быть измерены с использованием приёмника GPStation-6, зависят от периода дискретизации данных ( $\tau_d$ ). Согласно соотношению Найквиста, минимальный период флуктуаций ( $\tau_{\text{фл min}}$ ), которые могут быть зарегистрированы при периоде дискретизации данных  $\tau_d$ , равен  $2\tau_d$ . При этом предполагается, что колебание имеет синусоидальный (волновой) характер. Согласно работе (Перевалова, 2011) на практике для регистрации колебания двух отсчётов на период оказывается недостаточно, поскольку в чистом виде гармонические возмущения в ионосфере не реализуются. Опыт ионосферных измерений показал, что для эффективного измерения флуктуаций ПЭС требуется от 5 до 10 временных отсчётов на период (т. е.  $(5-10)\tau_d$ ). Поэтому период мелкомасштабных флуктуаций ПЭС с наименьшими размерами  $l_s = l_{s \max} = 5\tau_d v_c$  определяется как

$$\tau_{\text{фл min}} = l_{s \min}/v_c = 5\tau_d. \quad (13)$$

Таким образом, для оценки статистических характеристик мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N_T$ ) ионосферы необходимо отфильтровать из временного ряда ПЭС  $N'_T(t) \approx \bar{N}_T(t) + \Delta N_T(t)$  мелкомасштабные флуктуации  $\Delta N_T(t)$  на основе обоснования максимального (12)  $\tau_{\text{фл max}} = l_F/v_c$  и минимального (13)  $\tau_{\text{фл min}} = 5\tau_d$  периодов мелкомасштабных флуктуаций ПЭС. Оценки минимального ( $\tau_{\text{фл min}}$ ) и максимального ( $\tau_{\text{фл max}}$ ) периода мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $\Delta N_T(t)$  позволят определить основные параметры цифрового фильтра (см. рис. 2).

Максимальный размер мелкомасштабных неоднородностей ЭК ионосферы, соответствующий диаметру зоны Френеля  $l_{s \max} = l_F \approx 2\sqrt{ch_{\max} \cos \alpha / f_0}$ , на трассах ГНСС GPS/ГЛОНАСС (при типовых значениях  $h_{\max} \approx 250-350$  км,  $\alpha = 15-90^\circ$  и  $f_0 = 1,2-1,6$  ГГц) составляет  $l_{s \max} = l_F \approx 550-1000$  м. Поэтому при  $l_{s \max} \approx 1000$  м и  $v_c \approx 1000$  м/с будем иметь  $\tau_{\text{фл max}} = l_F/v_c = 1$  с. Это значение определяет минимальную частоту мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы:  $f_{\text{фл min}} = 1/\tau_{\text{фл max}} = 1$  Гц.

В приёмнике GPStation-6 измерение ПЭС ионосферы ( $N'_T(t)$ ) осуществляется с периодом дискретизации  $\tau_d = 1$  с (GPStation-6<sup>TM</sup>..., 2012). Минимальный период флуктуаций ( $\tau_{\text{фл min}}$ ), которые могут быть зарегистрированы при таком периоде дискретизации данных, составляет  $\tau_{\text{фл min}} = 5\tau_d = 5$  с. Отсюда следует, что возможности приёмника GPStation-6 ограничены измерением неоднородностей ПЭС ионосферы с размерами  $l_{s \min} = 5\tau_d v_c \approx 5000$  м и более (т. е. средне- и крупномасштабных неоднородностей, превышающих размер зоны Френеля  $l_F \approx 1000$  м). Однако известно (Перевалова, 2011), что для исследования тонкой мелкомасштабной структуры ионосферы необходимо обеспечить измерение ПЭС с частотой дискретизации не ниже  $f_d = 1/\tau_d = 50$  Гц (т. е. с интервалом  $\tau_d = 0,02$  с).

Анализ документа (ОЕМ6<sup>®</sup>..., 2014) позволяет сделать вывод о том, что приёмник GPStation-6 способен измерять параметры навигационных сигналов ГНСС GPS/ГЛОНАСС (содержатся в сообщениях формата RANGE) с минимальным интервалом дискретизации  $\tau_d = 0,02$  с (частотой  $f_d = 1/\tau_d = 50$  Гц). Полученные данные могут быть использованы для расчёта ПЭС ионосферы по кодово-фазовым измерениям в соответствии с выражением (11). Отсюда следует, что возможности приёмника GPStation-6 позволяют измерить флуктуации ПЭС с минимальным периодом  $\tau_{\text{фл min}} = 5\tau_d = 0,1$  с. Это значение определяет максимальную частоту мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы:  $f_{\text{фл max}} = 1/\tau_{\text{фл min}} = 10$  Гц.

Результаты приведённого выше анализа показали возможности и пути усовершенствования ПО приёмника GPStation-6 в направлении измерения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N_T$ ) ионосферы. Полученное обоснование значений наибольшей реализуемой

частоты дискретизации ( $f_d = 50$  Гц) результатов измерения ПЭС и значений минимальной ( $f_{\text{фл min}} = 1$  Гц) и максимальной ( $f_{\text{фл max}} = 10$  Гц) частоты мелкомасштабных флуктуаций ПЭС даёт возможность осуществить оценку (выделение) последних на базе применения в модифицированном ПО приёмника GPStation-6 (см. рис. 2) дискретного цифрового фильтра. Он должен, с одной стороны, обладать амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), близкой к идеальной (в частности, максимально гладкой на частотах пропускания, соответствующих диапазону от  $f_{\text{фл min}}$  до  $f_{\text{фл max}}$ ), а с другой — не вносить большой задержки ( $\tau_{\text{ф}}$ ) при обработке (фильтрации) результатов измерений.

Первому условию удовлетворяет цифровой фильтр Баттерворта с затуханием 3 дБ на частотах среза, соответствующих  $f_{\text{фл min}} = 1$  Гц и  $f_{\text{фл max}} = 10$  Гц, у которого АЧХ имеет вид, приведённый на рис. 3, и зависит от порядка ( $m$ ) цифрового фильтра (Введение..., 1976). Для выполнения второго условия необходимо проанализировать зависимости (рис. 4) групповой задержки ( $\tau_{\text{ф}}$ ) результатов измерений в указанном фильтре от частоты.

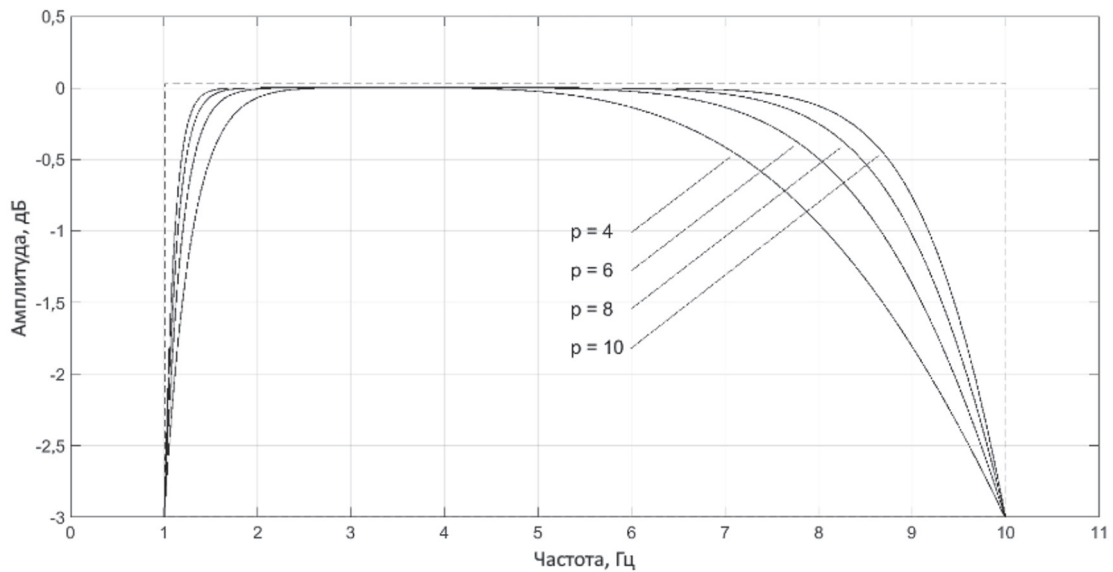


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика цифровых фильтров Баттерворта различных порядков

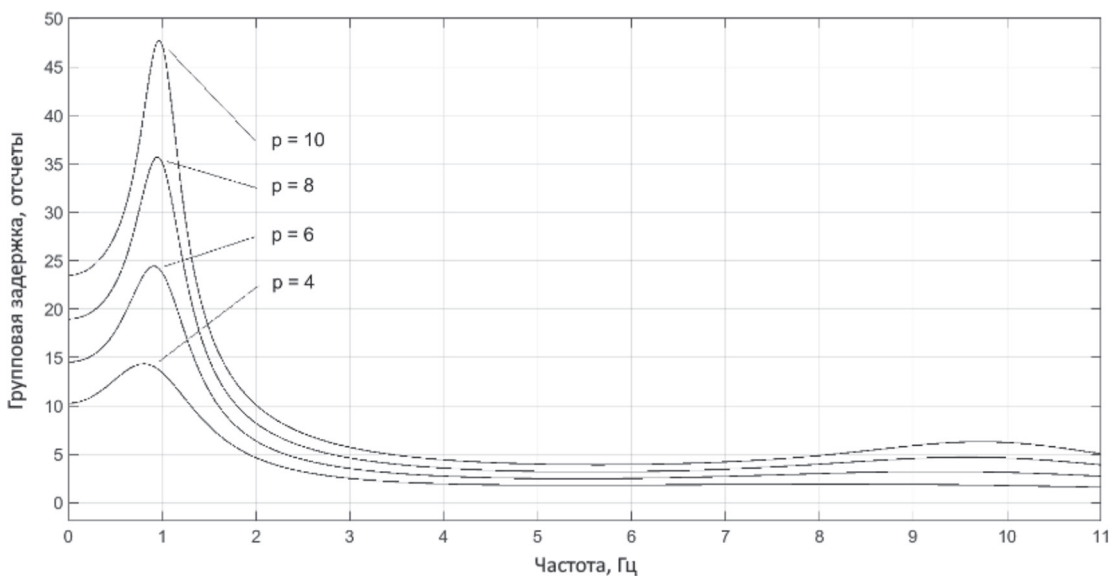


Рис. 4. Зависимость групповой задержки цифровых фильтров Баттерворта различных порядков от частоты

Выходные отсчёты рассматриваемого цифрового фильтра Баттерворта определяются выражением общего вида (Введение..., 1976):

$$y_i = \frac{1}{a_0} \left[ \sum_{k=0}^m b_k x_{i-k} - \sum_{k=1}^m a_k y_{i-k} \right], \quad (14)$$

где количество и значения коэффициентов  $a_k$  и  $b_k$  зависят от частоты дискретизации ( $f_d$ ) входных данных ( $x_i$ ), диапазона частот пропускания фильтра (ограниченного значениями от  $f_{\text{фл min}}$  до  $f_{\text{фл max}}$ ) и его порядка, который задаётся целым чётным числом  $m$ . В случае использования такого фильтра для обработки результатов измерения ПЭС ионосферы ( $N'_T$ ) с целью оценки его мелкомасштабных флуктуаций ( $\Delta N_T$ ) выражение (14) может быть представлено в виде:

$$\Delta N_{T_i} = \frac{1}{a_0} \left[ \sum_{k=0}^m b_k N'_{T_{i-k}} - \sum_{k=1}^m a_k \Delta N_{T_{i-k}} \right]. \quad (15)$$

Чтобы обосновать выбор порядка ( $m$ ) фильтра для измерения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС, следует напомнить, что он должен, с одной стороны, обладать АЧХ, близкой к идеальной, а с другой — не вносить большой задержки ( $\tau_\phi$ ) при обработке результатов измерений. Известно (Введение..., 1976), что по мере увеличения порядка  $m$  цифрового фильтра Баттерворта его АЧХ (см. рис. 3) приближается к идеальной (прямоугольной) одновременно с увеличением вносимой им групповой задержки (см. рис. 4). Проанализируем более детально зависимости последней ( $\tau_\phi$ ) от частоты в диапазоне от 1 до 5 Гц (рис. 5).

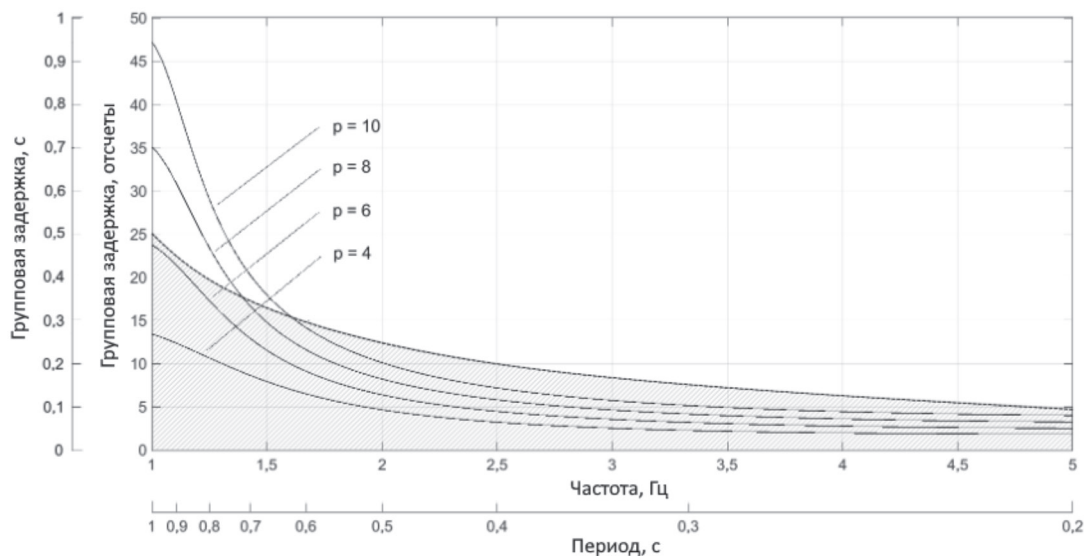


Рис. 5. Зависимость групповой задержки цифровых фильтров Баттерворта различных порядков от частоты в диапазоне от 1 до 5 Гц

По дополнительной вертикальной оси на рис. 5 отложены значения задержки фильтра  $\tau_\phi$  в секундах, по дополнительной горизонтальной оси — период флуктуаций  $\tau_\phi = 1/f_{\text{фл}}$  в секундах. В качестве критерия допустимой задержки, вносимой фильтром при обработке результатов измерений, примем величину, не превышающую половины периода мелкомасштабных флуктуаций ПЭС:  $\tau_\phi \leq 0,5\tau_{\text{фл}} = 1/2f_{\text{фл}}$ . На рис. 5 область допустимых задержек фильтра находится под кривой  $\tau_\phi \leq 0,5\tau_{\text{фл}}$  и заштрихована.

Анализ рис. 5 показывает, что выбранному критерию обеспечения допустимой задержки при обработке результатов измерений ( $\tau_\phi \leq 0,5\tau_{\text{фл}} = 1/2f_{\text{фл}}$ ) соответствует цифровой фильтр Баттерворта с порядком  $m = 4$  и  $m = 6$ . Последний, согласно рис. 3, имеет более близкую к идеальной АЧХ, что обуславливает выбор цифрового фильтра Баттерворта с порядком  $m = 6$

для оценки мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы. Значения его коэффициентов  $(a_k, b_k)$ , рассчитанные с использованием программного средства проектирования и анализа цифровых фильтров Filter Designer (<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/filterdesigner-app.html>), приведены в *таблице*, а описывающее его выражение с учётом (15) может быть записано в виде:

$$\Delta N_{T_i} = \sum_{k=0}^6 b_k N'_{T_{i-k}} - \sum_{k=1}^6 a_k \Delta N_{T_{i-k}}. \quad (16)$$

Коэффициенты цифрового фильтра Баттерворта 6-го порядка с полосой пропускания от 1 до 10 Гц и частотой дискретизации входных данных 50 Гц

$k$	Коэффициент $a_k$	Коэффициент $b_k$
0	1	0,076745906902313671
1	-3,4767608600037727	0
2	5,0801848641096203	-0,23023772070694101
3	-4,2310052826910152	0
4	2,2392861745041328	0,23023772070694101
5	-0,69437337677433475	0
6	0,084273573849621822	-0,076745906902313671

В качестве примера на *рис. 6* приведены результаты оценки мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N_T$ ) ионосферы в соответствии с выражением (16) и данными *таблицы*, выраженные в единицах TECU =  $10^{16} \text{ м}^{-2}$  (*англ.* Total Electron Content Unit). Эти результаты получены в Северо-Кавказском федеральном университете на макете программно-аппаратного комплекса на базе приёмника GPStation-6, реализующего его модификацию для оценки мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ( $\Delta N_T$ ) и их СКО  $\{\sigma_{\Delta N_T}\}$ .

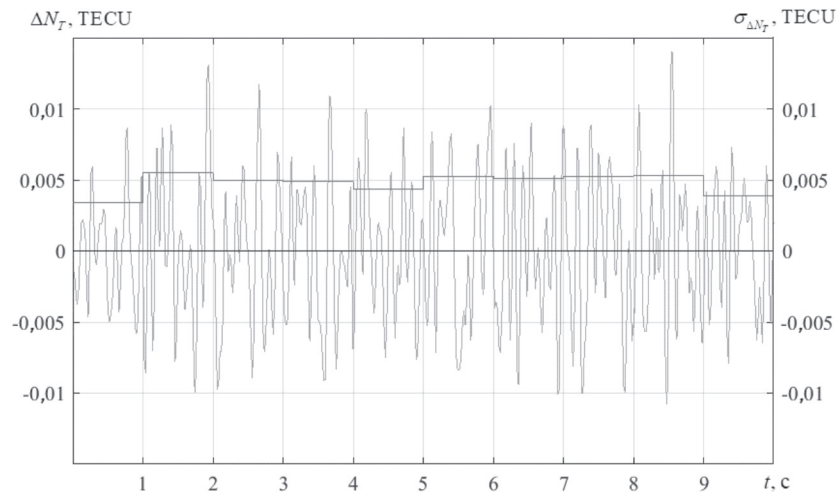


Рис. 6. Мелкомасштабные флуктуации ПЭС ионосферы на выходе цифрового фильтра и их СКО

Мелкомасштабные флуктуации ПЭС ( $\Delta N$ ), которые получены на выходе цифрового фильтра (16), могут быть охарактеризованы величиной СКО

$$\sigma_{\Delta N_T} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_{T_i} - \langle \Delta N_T \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_{T_i}^2} \quad (17)$$

и нулевым математическим ожиданием  $\langle \Delta N_T \rangle = 0$  на интервале измерения  $\tau_{\text{СКО}} = t_n - t_1 = 1$  с, в течение которого среднее (фоновое) значение ПЭС ( $\bar{N}_T$ ) можно считать неизменным. Указанный интервал измерения  $\tau_{\text{СКО}} = \tau_d n = 1$  с соответствует  $n = 50$  отсчётам с частотой дискретизации  $f_d = 1/\tau_d = 50$  Гц.

Результаты расчёта в соответствии с выражением (17) СКО  $\{\sigma_{\Delta N_T}\}$  мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N$ ), полученных на выходе цифрового фильтра, приведены на *рис. 6*. Согласно данному рисунку, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС на рассматриваемом интервале составляет  $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0,005$  TECU, что согласуется с известными (Кравцов и др., 1983; Маслов, Пашинцев, 2006; Рыжкина, Федорова, 2001; Черенкова, Чернышов, 1984) данными о величине относительных флуктуаций ПЭС невозмущённой среднеширотной ионосферы при типовых значениях средней величины её ПЭС  $\bar{N}_T \approx 10$  TECU:  $\sigma_{\Delta N_T} / \bar{N}_T \sim \sigma_{\Delta N} / \bar{N}_m < 10^{-4} - 10^{-3}$ . Это подтверждает достоверность полученных результатов фильтрации мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы.

Таким образом, для оценки (выделения) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ( $\Delta N_T$ ) в составе модифицированного ПО приёмника GPStation-6 (см. *рис. 2*) целесообразно использовать цифровой фильтр Баттерворта 6-го порядка ( $m = 6$ ), выходные отсчёты которого формируются согласно полученному выражению (16). Такой цифровой фильтр при обоснованных значениях минимальной и максимальной частоты пропускания ( $f_{\text{фл min}} = 1$  Гц и  $f_{\text{фл max}} = 10$  Гц) и дискретизации ( $f_d = 50$  Гц) обеспечивает близкую к идеальной АЧХ (см. *рис. 3*) при допустимой величине ( $\tau_{\text{ф}} \leq 0,5\tau_{\text{фл}}$ ) вносимой им задержки (см. *рис. 5*). Для реализации цифрового фильтра Баттерворта с указанными параметрами его коэффициенты ( $a_k$  и  $b_k$ ) рассчитаны с использованием средства проектирования и анализа цифровых фильтров Filter Designer и приведены в *таблице*.

Полученные результаты оценки мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N_T$ ) ионосферы на выходе цифрового фильтра (см. *рис. 6*) позволяют оценить их СКО  $\{\sigma_{\Delta N_T}\}$  в соответствии с выражением (17).

### Оценка характерного размера мелкомасштабных неоднородностей ионосферы

Результаты определения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ( $\Delta N_T$ ) ионосферы на выходе цифрового фильтра позволяют осуществить измерение (оценку) не только их СКО  $\{\sigma_{\Delta N_T}\}$ , но и среднего (характерного) размера мелкомасштабных неоднородностей ( $l_s$ ) ионосферы (см. *рис. 2*) исходя из следующих соображений.

Анализ *рис. 2* и выражения  $\tau_{\text{фл}} = l_s / v_c$  указывает на наличие принципиальной возможности оценки среднего размера мелкомасштабных ионосферных неоднородностей ( $l_s = \tau_{\text{фл}} v_c \equiv \tau_{\text{кор}} v_c$ ) на основе результатов оценки интервала временной корреляции ( $\tau_{\text{кор}} \equiv \tau_{\text{фл}}$ ) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС. Этот интервал соответствует некоторому среднему значению периода мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\tau_{\text{фл min}} < \tau_{\text{фл}} < \tau_{\text{фл max}}$  в диапазоне его изменений от минимального значения  $\tau_{\text{фл min}} = l_{s \text{ min}} / v_c$  до максимального  $\tau_{\text{фл max}} = l_F / v_c$ .

Для оценки интервала временной корреляции ( $\tau_{\text{кор}} \equiv \tau_{\text{фл}}$ ) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\{\Delta N_{T_i}\}$  необходимо найти такое максимальное значение временного сдвига  $\tau_k = k\tau_d$  анализируемой выборки, содержащей  $k$  дискретных отсчётов  $\Delta N_{T_{i+k}}$ , относительно её копии  $\Delta N_{T_i}$ , при котором они остаются коррелированными, т. е. когда нормированное значение автокорреляционной функции (АКФ) составляет  $R_{\Delta N_T}(\tau_k) \geq 1/e \approx 0,37$ . Вычисление нормированной АКФ мелкомасштабных флуктуаций ПЭС на интервале из  $n$  дискретных значений  $\Delta N_{T_i}$  осуществляется в соответствии с выражением:

$$R_{\Delta N_T}(k) = \frac{1}{(n-k)r_{\Delta N_T}(0)} \sum_{i=1}^{n-k} \Delta N_{T_i} \Delta N_{T_{i+k}}, \quad (18)$$

где  $1 \leq n \leq 49$  — текущее значение сдвига на 1-секундном интервале (соответствующем  $n = 50$  отсчётам);  $r_{\Delta N_T}(0) = r_{\Delta N_T}(k=0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_{T_i}^2 = \sigma_{\Delta N_T}^2$  — значение АКФ при отсутствии временного сдвига (при  $k=0$ ), соответствующее дисперсии мелкомасштабных флуктуаций ПЭС (17).

При  $k=0$  нормированная АКФ имеет максимальное значение  $R_{\Delta N_T}(k=0) = 1$ . Оно уменьшается по мере увеличения временного сдвига  $\tau_k = k\tau_d$ , и при его равенстве интервалу временной корреляции ( $\tau_k = k\tau_d = \tau_{\text{кор}} = k_{\text{кор}}\tau_d$ ) АКФ снижается до величины  $R_{\Delta N_T}(k_k = k_{\text{кор}}) = 1/e \approx 0,37$ .

На рис. 7 представлена нормированная АКФ мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы  $R_{\Delta N_T}(\tau_k)$ , построенная в соответствии с выражением (18), где временные сдвиги выражены в секундах  $\tau_k = k\tau_d$ .

Анализ рис. 7 показывает, что флуктуации ПЭС можно считать коррелированными ( $R_{\Delta N_T}(k_k = k_{\text{кор}}) = 1/e \approx 0,37$ ) на интервале  $\tau_k = \tau_{\text{кор}} = k_{\text{кор}}\tau_d \approx 0,2$  с (т. е.  $k_k = k_{\text{кор}} = 10$  при  $\tau_d \approx 0,02$  с). С учётом характерного для ГНСС значения скорости сканирования  $v_c \approx 1000$  м/с средний размер ионосферных неоднородностей в рассматриваемом случае составляет  $l_s = \tau_{\text{кор}} v_c \approx 200$  м. В среднем он составляет  $l_s \approx 200-400$  м на рассматриваемом 10-секундном интервале (см. рис. 6), что согласуется с известными (Черенкова, Чернышов, 1984) экспериментальными данными о размерах мелкомасштабных неоднородностей, возникающих в среднеширотной ионосфере.

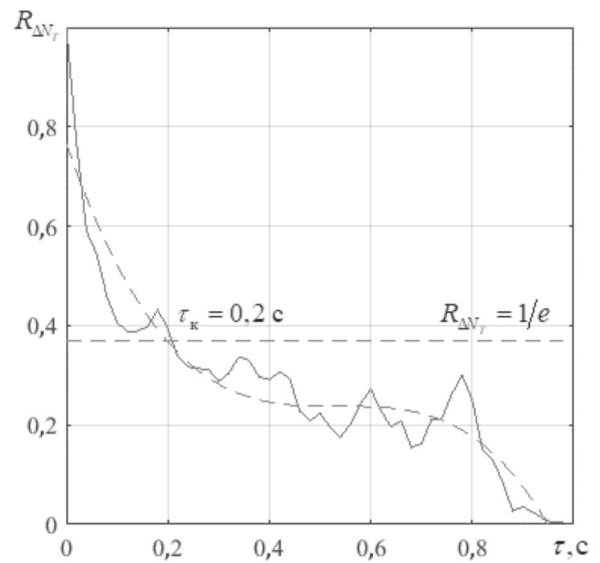


Рис. 7. Нормированная АКФ мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы

## Заключение

Разработан метод цифровой фильтрации мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы для оценки их среднеквадратического отклонения и характерного размера неоднородностей на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы.

Для решения поставленной задачи необходимо в первую очередь модифицировать программное обеспечение двухчастотного приёмника GPStation-6 (см. рис. 2) в направлении замены кодовых измерений полного электронного содержания на комбинированные (кодифазовые) измерения, что позволяет устранить их «зашумление». Во вторую очередь требуется отфильтровать из временного ряда полного электронного содержания ионосферы его мелкомасштабные флуктуации.

Для выделения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы целесообразно использовать цифровой фильтр Баттерворта 6-го порядка, который при обоснованных крайних значениях диапазона частот пропускания (1 и 10 Гц) и дискретизации (50 Гц) обеспечивает близкую к идеальной амплитудно-частотную характеристику (см. рис. 3) и вносит задержку, которая не превышает допустимую (см. рис. 5).

Полученные результаты оценки мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы (16) на выходе цифрового фильтра (см. рис. 6) позволяют получить искомую оценку (17) среднеквадратического отклонения этих флуктуаций и характерного размера мелкомасштабных неоднородностей (см. рис. 7).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>) «Методология построения структурно-физических моделей трансionoсферных радиоканалов и их применения к анализу спутниковых радиосистем при ионосферных сцинтилляциях».

## Литература

1. *Афраймович Э. Л., Первалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. Введение в цифровую фильтрацию / пер. с англ.; под ред. Р. Богнера, А. Константинодиса, Л. И. Филиппова. М.: Мир, 1976. 216 с.
3. *Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В.* Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 2. С. 30–52. DOI: 10.12737/szf-72202104.
4. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере / пер. с англ. И. В. Ковалевского, А. П. Кропоткина; под ред. А. А. Корчака. М.: Мир, 1973. 502 с.
5. *Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
6. *Маслов О. Н., Пашинцев В. П.* Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Самара: ПГАТИ, 2006. Вып. 4. 357 с.
7. *Первалова 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.
8. Рекомендация МСЭ-R P.531-14. Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых сетей и систем. 2019. 25 с. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-14-201908-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-14-201908-I!!PDF-R.pdf).
9. *Рыжкина Т. Е., Федорова Л. В.* Исследование статических и спектральных трансатмосферных радиосигналов УКВ-СВЧ-диапазона // Журн. радиоэлектроники. 2001. № 2. 16 с. <http://jre.cplire.ru/win/feb01/3/text.html>.
10. *Рытов С. М., Кравцов Ю. Н., Татарский В. И.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1978. 464 с.
11. *Черенкова Л. Е., Чернышов О. В.* Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
12. *Aarons J.* Global Morphology of Ionospheric Scintillations // Proc. IEEE. 1982. No. 70(4), pp. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.
13. *Carrano C., Groves K.* The GPS Segment of the AFRL-SCINDA Global Network and the Challenges of Real-Time TEC Estimation in the Equatorial Ionosphere // Proc. ION NTM. 2006. P. 1036–1047.
14. *Crane R. K.* Ionospheric scintillations // Proc. IEEE. 1977. No. 65(2), pp. 180–204. DOI: 10.1109/PROC.1977.10456.
15. GPStation-6<sup>TM</sup>. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver. User Manual. NovAtel Inc., 2012. 89 p. <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000132/om-20000132.pdf>.
16. OEM6<sup>®</sup> Family Firmware Reference Guide. NovAtel Inc., 2014. 737 p. <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000129/om-20000129.pdf>.
17. *Pashintsev V. P., Linets G. I., Slyusarev G. V. et al.* (2020a) GPS monitoring of small-scale fluctuations of total electron content of ionosphere // Intern. J. Advanced Research in Engineering and Technology. 2020. No. 11(5). P. 341–352. DOI: 10.34218/IJARET.11.5.2020.035.
18. *Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A. et al.* (2020b) Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems // AD ALTA: J. Interdisciplinary Research. 2020. V. 10. No. 1. P. 367–375. DOI: 10.33543/1001.
19. *Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A. J.* Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring // Proc. IEEE/ION PLANS. 2012. P. 265–273. DOI: 10.1109/PLANS.2012.6236891.

20. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proc. IEEE. 1982. No. 70(4). P. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.

## A method for assessing the characteristics of small-scale ionospheric inhomogeneities based on GPS monitoring results

V. P. Pashintsev<sup>1</sup>, D. V. Mishin<sup>2</sup>, M. V. Peskov<sup>1</sup>, S. A. Koval<sup>3</sup>

<sup>1</sup> North-Caucasus Federal University, Stavropol 355017, Russia  
E-mail: pashintsevp@mail.ru

<sup>2</sup> Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
Samara 443010, Russia

<sup>3</sup> Military Academy of Communications, Saint Petersburg 194064, Russia

A method has been developed for processing measurement results of the total electronic content of the ionosphere using signals from global navigation satellite systems GPS/GLONASS. It allows to estimate the root mean square of small-scale fluctuations of the total electronic content and the average (characteristic) size of small-scale ionospheric inhomogeneities. The proposed method is based on a modification of the GPStation-6 dual-frequency receiver, which allows to significantly increase the sampling rate of measurements of the total electronic content and reduce the level of instrumental noise, and on the use of a discrete digital Butterworth filter to isolate small-scale fluctuations of the total electronic content. As a result of the analysis of the process of measuring the total electronic content of inhomogeneous ionosphere using GPS/GLONASS signals and a modified dual-frequency receiver GPStation-6, the cutoff frequencies of the bandpass filter used are justified: 1 and 10 Hz. Considering that such a filter should simultaneously have the smoothest possible amplitude-frequency response at transmission frequencies and should not introduce a large group delay into the measurement results, the use of a Butterworth filter of the 6th order is justified. It is shown that the analysis of the autocorrelation function of small-scale fluctuations of total electron content makes it possible to estimate the average size of the small-scale ionospheric inhomogeneities causing such fluctuations at the heights of maximum ionospheric ionization.

**Keywords:** total electronic content, small-scale fluctuations, root mean square deviation, average size, digital filter, autocorrelation function

Accepted: 22.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-308-324

## References

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS-monitoring of upper Earth's atmosphere), Irkutsk: GU NC VSNC SO RAMN, 2006, 480 p. (in Russian).
2. *Vvedenie v tsifrovuyu filtratsiyu* (Introduction to Digital Filtering), Bogner R., Constantinidis A., Filippov L. I. (eds.), Moscow: Mir, 1976, 216 p. (in Russian).
3. Demyanov V. V., Yasukevich Yu. V., Space weather: risk factors for global navigation satellite systems, *Solnechno-zemnaya fizika*, 2021, Vol. 7, No. 2, pp. 30–52 (in Russian), DOI: 10.12737/szf-72202104.
4. Davies K., *Ionospheric Radio Waves*, Waltham: Blaisdell Publ. Co., 1969, 460 p.
5. Kravtsov Yu. A., Feizulin Z. I., Vinogradov A. G., *Prokhozhenie radiovoln cherez atmosferu Zemli* (The passage of radio waves through the Earth's atmosphere), Moscow: Radio i svyaz, 1983, 224 p. (in Russian).
6. Maslov O. N., Pashintsev V. P., *Modeli transionosfernnykh radiokanalov i pomekhoustoichivost' sistem kosmicheskoi svyazi. Prilozhenie k zhurnalu "Infokommunikatsionnye tekhnologii"* (Models of trans-ionospheric radio channels and noise immunity of space communication systems. Supplement to the journal "Infocommunication Technologies"), Samara: PGATI, 2006, Issue 4, 357 p. (in Russian).
7. Perevalova N. P., Evaluation of the characteristics of a ground-based GPS/GLONASS receiver network designed to monitor ionospheric disturbances of natural and man-made origin, *Solnechno-zemnaya fizika*, 2011, No. 19, pp. 124–133 (in Russian).



8. Recommendation ITU-R P.531-14. Data on ionospheric propagation of radio waves and forecasting methods necessary for the design of satellite networks and systems, 2019, 25 p. (in Russian), [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-14-201908-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-14-201908-I!!PDF-R.pdf).
9. Ryzhkina T. E., Fedorova L. V., Investigation of static and spectral transatmospheric VHF-microwave radio signals, *Zhurnal Radioelektroniki*, 2001, No. 2, 16 p. (in Russian), <http://jre.cplire.ru/win/feb01/3/text.html>.
10. Rytov S. M., Kravtsov Yu. N., Tatarskii V. I., *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku* (Introduction to Statistical Radiophysics), Moscow: Nauka, 1978, 464 p. (in Russian).
11. Cherenkova L. E., Chernyshov O. V., *Rasprostraneniye radiovoln* (Radio Waves Propagation), Moscow: Radio i svyaz, 1984, 272 p. (in Russian).
12. Aarons J., Global Morphology of Ionospheric Scintillations, *Proc. IEEE*, 1982, No. 70(4), pp. 360–378, DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.
13. Carrano C., Groves K., The PS Segment of the AFRL-SCINDA Global Network and the Challenges of Real-Time TEC Estimation in the Equatorial Ionosphere, *Proc. ION NTM*, 2006, pp. 1036–1047.
14. Crane R. K., Ionospheric scintillations, *Proc. IEEE*, 1977, No. 65(2), pp. 180–204, DOI: 10.1109/PROC.1977.10456.
15. *GPStation-6<sup>TM</sup>, GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual*, NovAtel Inc., 2012, 89 p., <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000132/om-20000132.pdf>.
16. *OEM6<sup>®</sup> Family Firmware Reference Guide*, NovAtel Inc., 2014, 737 p., <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000129/om-20000129.pdf>.
17. Pashintsev V. P., Linets G. I., Slyusarev G. V. et al. (2020a), GPS monitoring of small-scale fluctuations of total electron content of ionosphere, *Intern. J. Advanced Research in Engineering and Technology*, 2020, No. 11(5), pp. 341–352, DOI: 10.34218/IJARET.11.5.2020.035.
18. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A. et al. (2020b), Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems, *AD ALTA: J. Interdisciplinary Research*, 2020, Vol. 10, No. 1, pp. 367–375, DOI: 10.33543/1001.
19. Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A. J., Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring, *Proc. IEEE/ION PLANS*, 2012, pp. 265–273, DOI: 10.1109/PLANS.2012.6236891.
20. Yeh K. C., Liu C. H., Radio wave scintillations in the ionosphere, *Proc. IEEE*, 1982, No. 70(4), pp. 324–360, DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.