

УДК 621.371.3:621.396.96

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИОНОСФЕРЫ НА ПОЛОСУ ПРОПУСКАНИЯ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА

© 2024 г. В. П. Пашинцев^{1, *}, М. В. Песков^{1, **}, Д. А. Михайлов^{1, ***}, Н. В. Киселев^{1, ****}¹ Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ), Ставрополь, Россия

*e-mail: pashintsevp@mail.ru

**e-mail: mvpeskov@hotmail.com

***e-mail: mixayloff.dimaaylov@mail.ru

****e-mail: vkicelev@rambler.ru

Поступила в редакцию 12.07.2023 г.

После доработки 23.09.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Проведено теоретическое обоснование и разработка аппаратно-программного комплекса оценки полосы дисперсионных искажений и полосы когерентности замираний в спутниковом (трансионосферном) радиоканале на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы. Основу решения этой задачи составляет разработка структурно-физической модели радиоканала, позволяющей одновременно учесть фазовую дисперсию волны и дифракцию на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. Получены аналитические зависимости полосы дисперсионных искажений и когерентности частотно-селективных замираний от среднего значения и мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы. Показано, что в условиях возмущений ионосферы полоса когерентности замираний может быть намного меньше полосы дисперсионности. В соответствии с полученными зависимостями разработана структура построения аппаратно-программного комплекса оценки полосы дисперсионности и когерентности спутникового радиоканала на основе усовершенствования метода GPS-мониторинга полного электронного содержания ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями.

DOI: 10.31857/S0016794024020114, EDN: DYGTPK

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно [Колосов и др., 1969; Черенкова и Чернышов, 1984; Калинин и Черенкова, 1971; Тепляков, 1984; Маслов и Пашинцев, 2006], что при использовании в системах спутниковой связи (ССС) несущих частот в диапазоне $f_0 = 1\text{--}10$ ГГц ширина спектра передаваемых сигналов (F_0) ограничена полосой дисперсионных искажений ($F_0 \leq F_d$) трансионосферного радиоканала. Ее величина определяется функциональной зависимостью $F_d = \psi(f_0, \bar{N}(z_m))$ от несущей частоты f_0 волны (сигнала) и среднего значения электронной концентрации ($\bar{N}$) на высоте максимума ионизации (z_m) ионосферы $\bar{N}(z_m)$. На трассе распространения радиоволны (РРВ) с несущей частотой $f_0 = 1$ ГГц через нормальную (невозмущенную) среднеширотную ионосферу с наибольшим значением $\bar{N}(z_m) \approx 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (днем зимой) полоса дисперсионных искажений составляет $F_d = 40\text{--}100$ МГц [Колосов и др., 1969].

Наличие мелкомасштабных неоднородностей (флуктуаций) электронной концентрации (ЭК) на высоте (z_m) слоя F нормальной ионосферы, величина которых обычно составляет $\Delta N(z_m) \approx (10^{-3} - 10^{-2})\bar{N}(z_m)$, обуславливает возможность появления замираний (мерцаний, сцинтилляций) сигнала на входе приемника ССС только на частотах $f_0 < 0.1\text{--}0.5$ ГГц [Альперт, 1972; Колосов и др., 1969; Davies, 1990]. В этих условиях полоса когерентности замираний в трансионосферном радиоканале определяется функциональной зависимостью $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N}(z_m))$ от несущей частоты f_0 волны и среднеквадратического отклонения (СКО) мелкомасштабных флуктуаций ЭК на высоте максимума ионизации слоя F ионосферы $\sigma_{\Delta N}(z_m) = \left(\overline{\Delta N^2(z_m)}\right)^{0.5}$. Ее ширина составляет $F_k > 100$ МГц на частоте $f_0 \approx 0.3$ ГГц и $F_k > 1$ ГГц на частоте $f_0 \approx 1$ ГГц [Гудмен и Ааронс, 1990; Кравцов и др., 1983; Спилкер, 1979].

В условиях естественных возмущений ионосферы в области арктических и экваториальных широт величина $\sigma_{\Delta N}(z_m)$ может возрасти на 1–2 порядка по сравнению с невозмущенным состоянием. В этих условиях замирания сигналов в ССС наблюдаются вплоть до частот $f_0 = 6–7$ ГГц, а на несущей частоте $f_0 \approx 1$ ГГц полоса когерентности замираний $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N}(z_m))$ в трансionoсферном радиоканале может сужаться до значений $F_k < 1$ МГц [Спилкер, 1979; Колосов и др., 1969; Yeh and Liu, 1982; Тепляков, 1984; Маслов и Пашинцев, 2006; Рыжкина и Федорова, 2001; Aarons, 1982]. В условиях искусственных возмущений ионосферы в результате инжекции легкоионизирующихся веществ (бария) полоса когерентности замираний в трансionoсферном радиоканале сужается до значений $F_k \approx 0.25$ МГц [Bogusch et al., 1983]. Поэтому последняя может оказаться значительно меньше (на 1–2 порядка) полосы дисперсионных искажений ($F_k \ll F_d$). Если указанные полосы становятся меньше ширины спектра передаваемых в спутниковых радиосистемах сигналов ($F_0 > F_d$ и/или $F_0 > F_k$), их прием сопровождается возникновением дисперсионных искажений и частотно-селективных замираний (ЧСЗ), которые обуславливают значительное снижение показателей качества функционирования спутниковых радиосистем [Bogusch et al., 1983; Маслов и Пашинцев, 2006].

Для выполнения условий устранения дисперсионных искажений ($F_0 < F_d$) и ЧСЗ ($F_0 < F_k$) принимаемых сигналов выбор ширины их спектра F_0 должен осуществляться на основе данных о текущих значениях ширины полосы дисперсионности $F_d = \psi(f_0, \bar{N}(z_m))$ и когерентности $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N}(z_m))$ трансionoсферного радиоканала по результатам мониторинга среднего значения $\bar{N}(h_m)$ и СКО флуктуаций ЭК $\sigma_{\Delta N}(z_m) = \left(\Delta N^2(z_m) \right)^{0.5}$ на высоте максимума ионизации слоя F ионосферы $z_m = 300–400$ км.

Сложность практического решения задачи измерений статистических характеристик неоднородной ионосферы ($\bar{N}(z_m)$, $\sigma_{\Delta N}(z_m)$) на высотах $z_m = 300–400$ км обуславливает необходимость поиска альтернативных путей определения полосы дисперсионности $F_d = \psi(f_0, \bar{N}(z_m))$ и когерентности $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N}(z_m))$ трансionoсферного радиоканала. Наиболее перспективными представляются методы GPS-мониторинга ионосферы с помощью двухчастотных приемников глобальной навигационной системы (ГНСС) типа GPStation-6 [Shanmugam et al., 2012; GPStation-6, 2012; OEM6, 2014]. Последние позволяют измерить полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы N_T на трассе РРВ в ГНСС. Это позволяет определить среднее значение полного электронного ПЭС $\bar{N}_T \sim \bar{N}(z_m)$,

которое прямо пропорционально зависит от среднего значения ЭК на высоте максимума ионизации слоя F ионосферы $\bar{N}(z_m)$, а также СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_T} \sim \sigma_{\Delta N}(z_m)$ на трассе РРВ, которое прямо пропорционально зависит от СКО ЭК на высоте максимума ионизации слоя F ионосферы $\sigma_{\Delta N}(z_m)$ [Pashintsev et al., 2017].

Однако возможности встроенного программного обеспечения аппаратно-программного комплекса приемника GPStation-6 ограничены измерением ПЭС ионосферы (N_T) на трассе РРВ и не позволяют в автоматическом режиме оценивать статистические характеристики мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\bar{N}_T$, $\sigma_{\Delta N_T}$) и зависящие от них полосы когерентности ($F_k = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$) и дисперсионности ($F_d = \psi(\bar{N}_T, f_0)$) спутникового радиоканала.

Целью статьи является обоснование и разработка аппаратно-программного комплекса оценки полосы дисперсионных искажений и полосы когерентности замираний в спутниковом (трансionoсферном) радиоканале на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Разработки комплексной модели изменения ПЭС в ионосфере с мелкомасштабными неоднородностями. Целевой функцией ее решения являются аналитические зависимости $\bar{N}_T = \psi(\bar{N}(z_m))$ и $\sigma_{\Delta N_T} = \psi(\sigma_{\Delta N}(z_m))$ среднего значения и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы от среднего значения и СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК ионосферы ЭК на высоте максимума (z_m) ионизации слоя F ионосферы.

2. Разработки структурно-физической модели трансionoсферного радиоканала с дисперсионными искажениями и частотно-селективными замираниями. Целевой функцией ее решения являются аналитические зависимости $F_k = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ и $F_d = \psi(\bar{N}_T, f_0)$ полосы когерентности и дисперсионности радиоканала от статистических характеристик ПЭС ионосферы ($\bar{N}_T$, $\sigma_{\Delta N_T}$) и выбора несущей частоты.

3. Сравнительной оценка полос дисперсионных искажений и когерентности замираний в трансionoсферном радиоканале при различных состояниях ионосферы. Целевой функцией ее решения является сравнение частотных зависимостей $F_d = \psi(f_0)$ и $F_k = \psi(f_0)$ при различных значениях $\bar{N}_T$ и $\sigma_{\Delta N_T}$ в условиях нормальной ионосферы и ее возмущений.

4. Разработка структуры построения аппаратно-программного комплекса оценки полосы когерентности $F_k = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ и дисперсионности $F_d = \psi(\bar{N}_T, f_0)$ спутникового радиоканала на основе усовершенствования метода GPS-мониторинга ПЭС (N_T) ионосферы.

2. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Известно [Yeh and Liu, 1982; Bogusch et al., 1983; Пашинцев и др., 1999; Блаунштейн и др. 2013; Безлер, 2019; Маслов и Пашинцев, 2006], что воздействие на ионосферу возмущающих факторов естественного происхождения (солнечная активность, землетрясения, извержения вулканов и другие стихийные бедствия) или искусственного (радионагрев, инжекция легкоионизирующихся веществ и т.п.) обуславливает изменение ее электронной концентрации (ЭК) $N(z, \rho)$ не только по высоте (z), но и по горизонтальным координатам ($\rho = x, y$). В этих условиях ЭК описывается совокупностью изменения по высоте z ее среднего значения $\bar{N}(z)$ и пространственных (z, ρ) флуктуаций в неоднородностях ионосферы $\Delta N(\rho, z)$ [Долуханов, 1971]:

$$N(\rho, z) = \bar{N}(z) + \Delta N(\rho, z). \quad (1)$$

Усреднение в (1) идет по горизонтальным координатам ($\rho = x, y$). Поэтому согласно [Долуханов, 1971] и рис. 1а изменение по пространственным координатам (z, ρ) электронной концентрации в ионосфере с мелкомасштабными неоднородностями $N(\rho, z)$ можно представить в традиционном виде плавной кривой без учета неоднородностей в слоях D , E и F ионосферы (когда $\Delta N(\rho, z) = 0$ и $N(\rho, z) = \bar{N}(z)$) с наложенными на нее мелкими “зубчиками”, отражающими флуктуации ЭК

в неоднородностях ионосферы $\Delta N(\rho, z)$, среднее значение которых равно нулю $\overline{\Delta N(\rho, z)} = 0$.

Пространственные неоднородности (флуктуации) ЭК ионосферы $\Delta N(\rho, z)$ достигают наибольшей величины (рис. 1а) на высотах максимально ионизированного слоя F ($z_m \approx 250\text{—}350$ км), где $\Delta N(\rho, z_m) > \Delta N(\rho, z)$. Они могут иметь размеры от единиц метров до сотен километров [Афраймович и Перевалова, 2006; Романова и др., 2022]. Однако в дальнейшем будут рассматриваться только мелкомасштабные флуктуации ЭК $\Delta N(\rho, z) \equiv \Delta N(l)$ с характерным (средним) размером $l_s \approx 10^2 \dots 10^3$ м [Афраймович и Перевалова, 2006; Черенкова и Чернышов, 1984; Калинин и Черенкова, 1971; Колосов и др., 1969] относительно их среднего (фонового) значения $\bar{N}(z)$.

Данные параметры ЭК ионосферы (1) определяют ПЭС ионосферы (или интегральное значение ЭК) на трассе от космического аппарата (КА) ССС до приемника:

$$N_T(\rho) = \int_0^{z_u} N(\rho, z) dz = \quad (2)$$

$$= \int_0^{z_u} (\bar{N}(z) + \Delta N(\rho, z)) dz = \bar{N}_T + \Delta N_T(\rho).$$

Здесь среднее значение ПЭС ($\bar{N}_T$) ионосферы с толщиной z_u можно записать в виде [Тепляков, 1984; Пашинцев и др., 1999]

$$\bar{N}_T = \int_0^{z_u} \bar{N}(z) dz = z_3 \bar{N}(z_m) = z_3 \bar{N}_m; \quad (3)$$

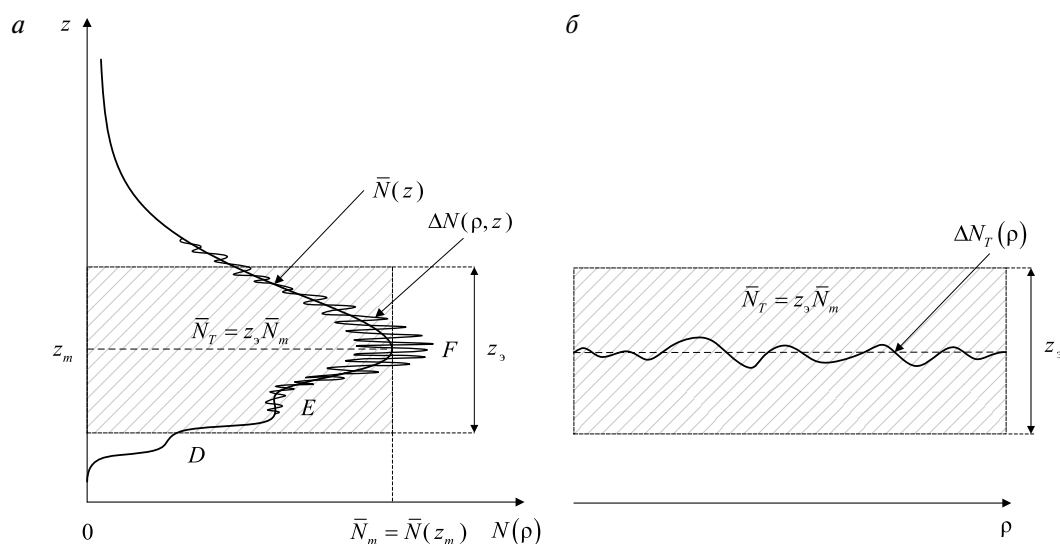


Рис. 1. Распределение по высоте электронной концентрации ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями (а) и комплексная модель изменения ПЭС ионосферы в виде совокупности толстого однородного слоя и тонкого слоя неоднородностей (б).

где $z_3 < z_{и}$ — эквивалентная толщина ионосферы на высоте $z = z_m$, где ЭК в слое F достигает максимального значения $\bar{N}(z_m) \equiv \bar{N}_m > \bar{N}(z)$. Обычно считают, что ионосфера занимает область от 50—60 км до 1000—1500 км [Гершман и др., 1984; Колосов и др., 1969; Кравцов и др., 1983; Долуханов, 1971]. Поэтому можно считать, что реальная толщина ионосферы составляет $z_{и} \approx 1000$ км, тогда как эквивалентная толщина ионосферы составляет $z_3 = 100—200$ км [Рыжжина и Федорова, 2001].

Мелкомасштабные флуктуации ПЭС ионосферы на трассе от КА ССС до приемника определяются флуктуациями ЭК в неоднородностях на высоте максимума ионизации $\Delta N(\rho, z_m)$ ионосферы [Пашинцев и др., 1999]

$$\Delta N_T(\rho) = \int_0^{z_{и}} \Delta N(\rho, z) dz \sim z_3 \Delta N(\rho, z_m). \quad (4)$$

В соответствии с выражением (1) на рис. 1а представлено распределение по высоте ЭК ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями в виде совокупности изменения по высоте z ее среднего значения $\bar{N}(z)$ и пространственных флуктуаций $\Delta N(\rho, z)$ относительно $\bar{N}(z)$. Здесь же показана заштрихованная область, соответствующая выражению (3) для среднего значения ПЭС ионосферы в виде площади прямоугольника $\bar{N}_T = \bar{N}(z_m) z_3 = \bar{N}_m z_3$, у которого одна сторона равна максимальному значению ЭК на высоте z_m максимума ионизации в слое F ионосферы $\bar{N}(z_m) = \bar{N}_m$. Другая сторона прямоугольника соответствует эквивалентной толщине ионосферы z_3 , при которой площадь прямоугольника $\bar{N}_T = \bar{N}_m z_3$ эквивалентна площади под кривой $\bar{N}(z)$, т. е. $\bar{N}_T = \int_0^{z_{и}} \bar{N}(z) dz$.

Пространственные флуктуации ЭК ионосферы $\Delta N(\rho, z)$ характеризуются нулевым математическим ожиданием $\overline{\Delta N(\rho, z)} = 0$ и СКО $\sigma_{\Delta N}(z) = \left(\overline{\Delta N^2(\rho, z)} \right)^{0.5}$, зависящим от высоты z ионосферы. Отношение СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК ионосферы $\sigma_{\Delta N}(z) = \left(\overline{\Delta N^2(\rho, z)} \right)^{0.5}$ к среднему значению $\bar{N}(z)$ характеризует интенсивность мелкомасштабных неоднородностей [Калинин и Черенкова, 1971; Гершман и др., 1984; Yeh and Liu, 1982]

$$\begin{aligned} \beta_{\Delta N} &= \left(\overline{\Delta N^2(\rho, z)} \right)^{0.5} / \bar{N}(z) = \sigma_{\Delta N}(z) / \bar{N}(z) = \\ &= \sigma_{\Delta N}(z_m) / \bar{N}(z_m) \approx \text{const}, \end{aligned} \quad (5)$$

которая практически одинакова на любой высоте z (включая высоту максимума ионизации z_m).

В соответствии с (5) СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\Delta N(\rho, z)$ возрастает с высотой z , достигая максимального значения $\sigma_{\Delta N}$ на высоте максимума ионизации $z = z_m$:

$$\sigma_{\Delta N} = \sigma_{\Delta N}(z_m) = \beta \bar{N}(z_m) > \sigma_{\Delta N}(z) = \beta \bar{N}(z). \quad (6)$$

Пространственные флуктуации ПЭС $\Delta N_T(\rho)$ характеризуются нулевым математическим ожиданием $\overline{\Delta N_T(\rho)} = 0$ и СКО $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2(\rho)} \right)^{0.5}$, которое определяется СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях на высоте максимума ионизации $\sigma_{\Delta N}(z_m) = \left(\overline{\Delta N^2(\rho, z_m)} \right)^{0.5}$.

При гауссовской корреляционной функции флуктуаций ЭК в ионосфере с характерным (средним) масштабом неоднородностей l_s [Liu et al., 1974] СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС описывается выражением вида [Маслов и Пашинцев, 2006]

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta N_T} &= \left(\overline{\Delta N_T^2(\rho)} \right)^{0.5} = \left(\sqrt{\pi} l_s z_3 \right)^{0.5} \times \\ &\times \sigma_{\Delta N}(z_m) = \left(\sqrt{\pi} l_s z_3 \right)^{0.5} \beta_{\Delta N} \bar{N}(z_m), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma_{\Delta N}(z_m)$ — СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы на высоте максимума ионизации определяется согласно (6).

В соответствии с (3) и (7) комплексную модель изменения ПЭС в ионосфере можно представить в виде совокупности толстого однородного слоя и тонкого слоя неоднородностей, как показано на рис. 1б.

Однородный слой характеризуется эквивалентной толщиной z_3 и средней ЭК $\bar{N}(z_m) = \bar{N}_m$ и описывает среднее значение ПЭС ионосферы (3) $\bar{N}_T = \bar{N}(z_m) z_3 = \bar{N}_m z_3$.

Тонкий слой неоднородностей расположен на высоте максимума ионизации $z = z_m$ и характеризуется нулевым математическим ожиданием $\overline{\Delta N_T(\rho)} = 0$ и СКО (7) $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\sqrt{\pi} l_s z_3 \right)^{0.5} \sigma_{\Delta N}(z_m)$.

3. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА С ДИСПЕРСИОННЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ И ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫМИ ЗАМИРАНИЯМИ

Известен [Маслов и Пашинцев, 2006; Пашинцев и др., 2018] подход к построению структурно-физической модели трансионосферного канала связи (КС). Он базируется на комплексном применении методов, разработанных в статистической теории связи (построения многолучевых моделей

КС с замираниями) и статистической радиофизике (методы фазового экрана, параболического уравнения и т.д.) для описания одного и того же процесса распространения радиоволн (РРВ) через неоднородную ионосферу в радиолинии “КА СССР — Земля”. Отождествление полученных данными методами результатов позволило найти зависимости статистических характеристик передаточных функций трансионосферного КС с замираниями от статистических характеристик флуктуаций ЭК (ΔN) в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы и несущей частоты (f_0) передаваемого сигнала. В частности, установлена зависимость $F_K = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N}(z_m))$ полосы когерентности замираний в трансионосферном КС от несущей частоты и СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК на высоте максимума ионизации $\sigma_{\Delta N}(z_m)$.

Ранее установлена взаимосвязь $\sigma_{\Delta N}(z_m)$ с СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы (7) $\sigma_{\Delta N_T} = (\sqrt{\pi} l_s z_3)^{0.5} \sigma_{\Delta N}(z_m)$. В этой связи есть основания предполагать, что на основе комплексной модели ионосферы (рис. 1б) и структурно-физического подхода можно получить искомую аналитическую зависимость $F_K = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ полосы когерентности замираний в трансионосферном КС от несущей частоты и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T} = (\Delta N_T^2(\rho))^{0.5}$

на трассе РРВ. Кроме того, учет в комплексной модели ионосферы (рис. 1б) среднего значения ПЭС ионосферы (3) $\bar{N}_T = z_3 \bar{N}(z_m)$ позволит оценить его влияние на полосу дисперсионности ($F_d = \psi(\bar{N}_T, f_0)$) трансионосферного радиоканала.

В рамках структурно-физического подхода и на основе модели ионосферы (рис. 1б) разработаны 2 модели трансионосферного КС (рис. 2) с одновременным учетом ЧСЗ и дисперсионных искажений [Bogusch et al., 1983; Пашинцев и др., 2018; 1999].

Первая модель (рис. 2, левая панель) основана на представлении о множестве лучей, образуемых на поверхности тонкого слоя неоднородностей ПЭС (фазовом экране) $\Delta N_T(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$ и проходящих в точку приема с относительными фазовыми сдвигами $\Delta\phi_i \sim \Delta N_T(\rho_i)/f_0$. Передаваемый с КА СССР комплексный сигнал $\dot{s}_t(t)$ запишем через его комплексную огибающую как [Пашинцев и др., 1999]

$$\begin{aligned} \dot{S}_t(t) &= \sqrt{P_t(t)} \exp[j\Phi_t(t)] = \\ &= \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\Omega) \exp(j\Omega t) \frac{d\Omega}{2\pi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $S(t) = \sqrt{P_t(t)}$, $\Phi_t(t)$, $P_t(t)$ и $E_t = \int_{-\infty}^{\infty} P_t(t) dt$ — амплитуда, фаза, мощность и энергия

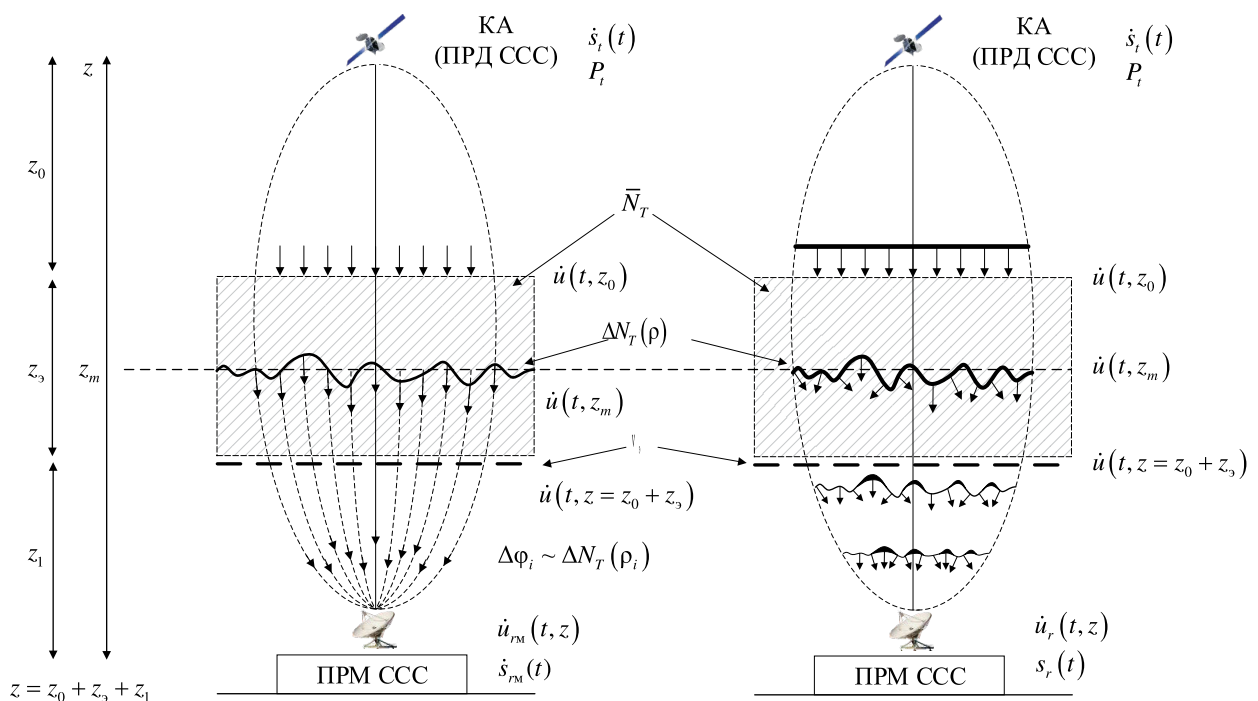


Рис. 2. Модели трансионосферного канала связи на основе представлений многолучевости (левая панель) и дифракции (правая панель) волны на неоднородностях ионосферы.

передаваемого сигнала; $\dot{S}(\Omega)$ — спектр нормированной ($\kappa \sqrt{E_t}$) комплексной огибающей передаваемого сигнала; $\Omega = \omega - \omega_0$ — отклонение частоты спектральных составляющих сигнала относительно несущей $\omega_0 = 2\pi f_0$ в пределах полосы спектра $\Omega_0 = 2\pi F_0 \ll \omega_0 = 2\pi f_0$.

Методика определения принимаемого комплексного сигнала $\dot{s}_r(t)$ включает этапы последовательного расчета комплексного поля волны:

1) на расстоянии z_0 от передатчика (ПРД) КА ССС, т. е. на входе ионосферы $\dot{u}(t, z_0)$;

2) на высоте z_m максимальной ионизации $\dot{u}(t, z_m)$ с учетом тонкого слоя неоднородностей, характеризуемого пространственными флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$;

3) на расстоянии $z = z_0 + z_3$ от передатчика (ПРД) КА ССС, т. е. на выходе ионосферы $\dot{u}(t, z = z_0 + z_3)$ с учетом эффективной частоты соударений электронов ν_3 для оценки поглощения в ионосфере $W_{\Pi}^2 = \psi(\nu_3 \bar{N}_T)$;

4) в точке приема $\dot{u}_{\text{рм}}(t, z \in z_0 \dots z_3 \dots z_1)$ множества лучей с относительными фазовыми сдвигами $\Delta\varphi(\rho_i) \equiv \Delta\varphi_i \sim \Delta N_T(\rho_i)$.

Центральными этапами методики определения принимаемого комплексного сигнала $\dot{s}_r(t)$ являются этапы определения комплексного поля волны $\dot{u}(t, z_m)$ на высоте z_m максимальной ионизации с учетом тонкого слоя неоднородностей с пространственными флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$ и комплексного поля волны на выходе ионосферы $\dot{u}(t, z = z_0 + z_3)$.

Поскольку расстояние от КА ССС до верхней границы ионосферы $z_0 > 10^3$ км, то фронт падающие на нее волны будет плоским. На выходе ионосферы с пространственными флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$ фазовый фронт волны на произвольной спектральной составляющей $\omega = \omega_0 + \Omega = 2\pi(f_0 + F)$ будет искаженным и описывается выражением общего вида [Yeh and Liu, 1982; Пашинцев и др., 1999; Маслов и Пашинцев 2006]:

$$\begin{aligned} \varphi(\rho, z_{03}, \omega) &= \varphi(\rho, z_{03}, \omega_0) + \varphi'(\rho, z_{03}, \omega_0) \times \\ &\times (\omega - \omega_0) + 0.5\varphi''(\rho, z_{03}, \omega_0)(\omega - \omega_0)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь первое слагаемое характеризует фазовый фронт волны на несущей частоте $\omega_0 = 2\pi f_0$ на выходе ионосферы:

$$\begin{aligned} \varphi(\rho, z_{03}, \omega_0) &= k_0 z_{03} + \bar{\varphi}(\omega_0) + \Delta\varphi(\rho, \omega_0) = \\ &= \omega_0 [z_{03} / c + \bar{\tau}_\Phi + \Delta\tau_\Phi(\rho)]. \end{aligned} \quad (10)$$

В (10) первое слагаемое $k_0 z_{03} = \omega_0 z_{03} / c$ характеризует набег фазы в свободном пространстве на расстоянии $z_{03} = z_0 + z_3$ от КА ССС до

ионосферы (z_0) и внутри ионосферы с эквивалентной толщиной z_3 ; $k_0 = 2\pi / \lambda_0 = 2\pi f_0 / c = \omega_0 / c$ — волновое число; c — скорость света в вакууме.

Второе слагаемое в (10) характеризует поправку на среднее значение фазового запаздывания волны, обусловленное средним значением ПЭС ионосферы (3) $\bar{N}_T$:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\omega_0) &= -\frac{2\pi^2 g}{c \omega_0} \int_0^{z_{\text{и}}} \bar{N}(z) dz = \\ &= -\frac{g\pi}{c f_0} \bar{N}_T = -\frac{80.8\pi}{c f_0} \bar{N}_T = \omega_0 \bar{\tau}_\Phi, \end{aligned} \quad (11)$$

где g — размерный коэффициент, зависящий от заряда (e) и массы (m_e) электрона, диэлектрической проницаемости вакуума (ϵ_0). Обычно [Черенкова и Чернышов, 1984; Маслов и Пашинцев, 2006] принимают, что в системе СИ он имеет значение $g = e^2 / 4\pi^2 m_e \epsilon_0 = 80.8 \text{ [м}^3/\text{с}^2]$;

$$\bar{\tau}_\Phi = -\frac{g}{2c f_0^2} \int_0^{z_{\text{и}}} \bar{N}(z) dz = -\frac{40.4}{c f_0^2} \bar{N}_T = -\bar{\tau}_\Gamma, \quad (12)$$

— поправка на среднее значение фазового времени запаздывания волны в ионосфере, равная по величине и противоположна по знаку поправке на среднее значение группового времени запаздывания волны в ионосфере $\bar{\tau}_\Gamma = -\bar{\tau}_\Phi$.

Третье слагаемое в (10) характеризует флуктуации (искажения) фазового запаздывания во фронте выходной волны относительно $\varphi(\omega_0)$, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями ПЭС $\Delta N_T(\rho)$ ионосферы:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(\rho, \omega_0) &= -\frac{2\pi^2 g}{c \omega_0} \int_0^{z_{\text{и}}} \Delta N((\rho, z)) dz = \\ &= -\frac{g\pi}{c f_0} \Delta N_T(\rho) = -\frac{80.8\pi}{c f_0} \Delta N_T(\rho) = \omega_0 \Delta\tau_\Phi(\rho), \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\tau_\Phi(\rho) &= -\frac{g}{2c f_0^2} \int_0^{z_{\text{и}}} \Delta N((\rho, z)) dz = \\ &= -\frac{40.4}{c f_0^2} \Delta N_T(\rho) = -\Delta\tau_\Gamma(\rho), \end{aligned} \quad (14)$$

— флуктуации фазового запаздывания волны на выходе неоднородного ионосферного слоя относительно среднего значения (12) $\bar{\tau}_\Phi$, которые равны по величине и противоположны по знаку флуктуациям группового времени запаздывания волны $\Delta\tau_\Phi(\rho) = -\Delta\tau_\Gamma(\rho)$.

В соответствии с (10—14) выражение (9) для фазового фронта волны на выходе ионосферы

преобразуется к виду [Маслов и Пашинцев, 2006; Пашинцев и др., 1999]

$$\varphi(\rho, z_{03}, \omega) = \omega_0 [z_{03} / c + \bar{\tau}_\Phi + \Delta\tau_\Phi(\rho)] + \Omega [z_{03} / c + \bar{\tau}_\Gamma + \Delta\tau_\Gamma(\rho)] + \Delta\Phi_d(\Omega), \quad (15)$$

где $\Omega = 2\pi F = 2\pi(f - f_0)$, а поправки на среднее значение и флуктуации группового времени запаздывания волны в ионосфере определяются согласно выражениям (12) $\bar{\tau}_\Gamma = -\bar{\tau}_\Phi$ и (14) $\Delta\tau_\Gamma(\rho) = -\Delta\tau_\Phi(\rho)$.

Последнее слагаемое в (9) и (15) определяется как

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_d(\Omega) &= 0.5\varphi''(\rho, z_{03}, \omega_0)\Omega^2 = \\ &= -0.5g(2\pi\Omega)^2 N_T(\rho) / c\omega_0^3 = \\ &= -\pi g N_T(\rho)(f - f_0)^2 / cf_0^3 \end{aligned} \quad (16)$$

и характеризует нелинейный (по частоте) фазовый сдвиг выходной волны по частоте $\omega = \omega_0 + \Omega$ по сравнению с ω_0 вследствие дисперсионных свойств ионосферы.

В качестве полосы дисперсионных искажений F_d целесообразно [Bedrosian, 1970] выбрать значение $|f - f_0| = F$, при котором

$$|\Delta\Phi_d(\Omega)| = \pi g N_T(\rho)(f - f_0)^2 / cf_0^3 = 1 \text{ рад.} \quad (17)$$

При использовании критерия (17) полоса дисперсионных искажений ионосферы определяется как

$$F_d = (cf_0^3 / g\pi N_T(\rho))^{0.5} = (cf_0^3 / 80.8\pi N_T(\rho))^{0.5}. \quad (18)$$

Это выражение соответствует по виду известным [Иванов и др., 2015] в частном случае отсутствия флуктуаций ПЭС $\Delta N_T(\rho) = 0$ (когда $N_T(\rho) = N_T$).

Следует учесть [Альперт, 1972; Колосов и др., 1969], что в нормальной ионосфере пространственные флуктуации ЭК в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы намного меньше ее среднего значения ($\Delta N(\rho, z) / \bar{N}(z) = 10^{-3} - 10^{-2}$). В силу прямо пропорциональной зависимости $\bar{N}_T \approx \bar{N}(z)$ и $\Delta N_T(\rho) \sim \Delta N(\rho, z)$ можно считать, что $\Delta N_T(\rho) / N_T = 10^{-3} - 10^{-2}$ и поскольку $\bar{N}_T \gg \Delta N_T(\rho)$ выражение (18) с учетом (3) сводится к виду

$$\begin{aligned} F_d &= (cf_0^3 / 80.8\pi(\bar{N}_T + \Delta N_T(\rho)))^{0.5} \approx \\ &\approx (cf_0^3 / 80.8\pi\bar{N}_T)^{0.5} = \\ &= f_0^{1.5} (c / 80.8\pi)^{0.5} / (\bar{N}_T)^{0.5} = \\ &= f_0^{1.5} (c / 80.8\pi)^{0.5} / (\bar{N}_m z_3)^{0.5}. \end{aligned} \quad (19)$$

Анализ выражения (19) показывает, что полоса дисперсионных искажений F_d в трансionoсферном радиоканале связана прямо пропорциональной зависимостью с несущей частотой волны $f_0^{1.5}$ и обратно пропорциональной — со средним значением ПЭС ионосферы (3) $N_T^{0.5} = (z_3 \bar{N}_m)^{0.5}$.

Полосу когерентности замираний F_k в трансionoсферном канале связи можно определить на качественном уровне, если проанализировать второе слагаемое в выражении (15) для фазового фронта модулированной волны на выходе ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями и записать его в виде детерминированной и случайной составляющих:

$$\begin{aligned} \varphi(\rho, z_{03}, \Omega) &= \Omega [z_{03} / c + \bar{\tau}_\Gamma + \Delta\tau_\Gamma(\rho)] = \\ &= \Omega (z_{03} / c + \bar{\tau}_\Gamma) + \Omega \Delta\tau_\Gamma(\rho). \end{aligned}$$

Случайную составляющую с учетом (14) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Omega \Delta\tau_\Gamma(\rho) &= (\omega - \omega_0) \Delta\tau_\Gamma(\rho) = \\ &= 2\pi(f - f_0) 40.4 \Delta N_T(\rho) / cf_0^2 = \\ &= 80.8\pi(f - f_0) \Delta N_T(\rho) / cf_0^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Анализ (20) показывает, что флуктуации фазы во фронте выходной волны на частоте $\omega = \omega_0 + \Omega = 2\pi(f_0 + F)$ будут отличаться от флуктуаций фазового фронта на несущей частоте ω_0 :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(\rho, \omega_0) &= \omega_0 \Delta\tau_\Gamma(\rho) = -\omega_0 \Delta\tau_\Phi(\rho) = \\ &= 80.8\pi \Delta N_T(\rho) / cf_0 \sim 80.8\pi z_3 \Delta N(\rho, z_m) / cf_0. \end{aligned} \quad (21)$$

Если в качестве полосы когерентности по аналогии с (17) выбрать значение $|f - f_0| = F_k$, при котором

$$\begin{aligned} 80.8\pi(f - f_0) \Delta N_T(\rho) / cf_0^2 &= \\ &= 80.8\pi F_k \Delta N_T(\rho) / cf_0^2 = 1 \text{ рад,} \end{aligned} \quad (22)$$

то получим

$$\begin{aligned} F_k &= cf_0^2 / 80.8\pi \Delta N_T(\rho) = \\ &= f_0 / \Delta\varphi(\rho, \omega_0) \sim cf_0^2 / 80.8\pi z_3 \Delta N(\rho, z_m). \end{aligned} \quad (23)$$

Анализ полученного качественного выражения (23) показывает, что полоса когерентности замираний F_k в трансionoсферном радиоканале связана обратно пропорциональной зависимостью с флуктуациями фазового фронта выходной волны на несущей частоте (21) $\Delta\varphi(\rho, \omega_0) \sim \Delta N_T(\rho) / cf_0$, которые определяются мелкомасштабными флуктуациями ПЭС ионосферы на трассе от КА ССС до приемника (4) $\Delta N_T(\rho) \sim z_3 \Delta N(\rho, z_m)$.

Амплитудный фронт модулированной волны на выходе ионосферы ($z_{03} = z_0 + z_3$) можно считать неискаженным по сравнению с падающим [Yeh and Liu, 1982; Маслов и Пашинцев, 2006]:

$$A(\rho, z_{03}, \omega) \approx A_0(z_{03}) = \sqrt{P_t(t) K_{oc}(z_{03})}. \quad (24)$$

Это обусловлено тем, что коэффициент ослабления $K_{oc}(z_{03}) \sim W_{03}^2 W_{\pi}^2$ мощности излучаемой волны в свободном пространстве $W_0^2 = (\lambda_0 / 4\pi z_{03})^2 = (c / 4\pi(z_0 + z_3)f_0)^2$ и вследствие поглощения в ионосфере $W_{\pi}^2 = \psi(v_3 \bar{N}_T / f_0^2)$ мало изменяется на различных частотах $\omega = \omega_0 + \Omega = 2\pi f = 2\pi(f_0 + F)$ при использовании узкополосных в радиотехническом смысле сигналов (у которых $f_0 \gg F = F_0$).

В соответствии с выражениями (24) и (15) для амплитудного и фазового фронта волны на выходе ионосферы комплексное поле волны на выходе ионосферы описывается выражением

$$\begin{aligned} \dot{u}(\rho, z_{03}, \omega) &= A_0(z_{03}) \exp(-j\varphi(\rho, z_{03}, \omega = \omega_0 + \Omega)) = \\ &= \sqrt{P_t(t) K_{oc}(z_{03})} \times \\ &\times \exp \left\{ -j \left[\omega_0(z_{03} / c + \bar{\tau}_\Phi + \Delta\tau_\Phi(\rho)) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \Omega(z_{03} / c + \bar{\tau}_T + \Delta\tau_T(\rho)) + \Delta\Phi_D \right] \right\}, \quad (25) \end{aligned}$$

где поправки на флуктуации фазового и группового времени запаздывания волны в неоднородной ионосфере определяются согласно (14) $\Delta\tau_T(\rho) = -\Delta\tau_\Phi(\rho) \sim \Delta N_T(\rho) / f_0^2$.

Процесс дальнейшего распространения волны (25) за ионосферным слоем в свободном пространстве на расстояние z_1 до точки приема (см. рис. 2, левая панель) можно представить как результат суммирования множества лучей $i = 1 \div M$ (где i — целое число от 1 до M), образуемых элементарными участками (ρ_i) на поверхности амплитудно-фазового фронта выходной волны $\dot{u}(\rho_i, z_{03}, \omega = \omega_0 + \Omega)$ с одинаковыми амплитудами $A_0(z_{03})$ и различными начальными фазами $\varphi(\rho_i, z_{03}, \omega = \omega_0 + \Omega)$ и фазовыми сдвигами (21) $\Delta\varphi(\rho_i, \omega_0) = \omega_0 \Delta\tau_T(\rho_i) \sim \Delta N_T(\rho_i) / f_0$. Это позволяет определить комплексное поле волны при многолучевом распространении на входе приемной антенны $\dot{u}_{rm}(t, z)$, комплексный сигнал на входе приемника (ПРМ) ССС (т. е. выходе приемной антенны) $\dot{s}_r(t) \sim \dot{u}_{rm}(t, z)$ и его среднюю мощность $\bar{P}_r(t)$. Комплексная огибающая принимаемого сигнала $\dot{s}_r(t)$ получена в виде [Маслов и Пашинцев, 2006; Пашинцев и др., 1999]

$$\begin{aligned} \dot{s}_r(t) &= \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\Omega) \dot{K}_d(\Omega) \dot{K}(\omega) \times \\ &\times \exp(j\Omega t') \frac{d\Omega}{2\pi} = \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_d(\Omega) \dot{K}(\omega) \times \\ &\times \exp(j\Omega t') \frac{d\Omega}{2\pi}. \quad (26) \end{aligned}$$

Здесь $\dot{K}_d(\Omega)$ — комплексная передаточная функция трансionoсферного КС, обусловленная нелинейными фазовыми сдвигами спектральных составляющих волны $\Omega = \omega - \omega_0 = 2\pi(f - f_0) = 2\pi F$ из-за дисперсионности ионосферы. Она определяется в соответствии с выражениями (16–19) как

$$\begin{aligned} \dot{K}_d(\Omega) &= \exp[-j\Delta\Phi_d(\Omega)] = \\ &= \exp \left[j \left(\Omega / \Omega_d \right)^2 \right] = \exp \left[j \left(F / F_d \right)^2 \right], \quad (27) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Omega_d &= 2\pi F_d = \left(\frac{c\omega_0^3}{2 \cdot 80.8 \pi^2 \bar{N}_T} \right)^{0.5} = \\ &= 2\pi \left(\frac{c f_0^3}{80.8 \pi \bar{N}_T} \right)^{0.5}. \end{aligned}$$

— полоса когерентности трансionoсферного КС, обусловленная дисперсионными свойствами ионосферы ($\Omega_d = 2\pi F_d$); $\dot{S}_d(\Omega) = \dot{S}(\Omega) \dot{K}_d(\Omega)$ — спектр нормированной комплексной огибающей передаваемого сигнала с учетом его дисперсионных искажений в ионосфере. С учетом взаимосвязи $\Omega_d = 2\pi F_d$ выражение для оценки полосы дисперсионных искажений трансionoсферного КС, выраженной в [Гц], можно записать в виде

$$\begin{aligned} F_d &= \left(c f_0^3 / 80.8 \pi \bar{N}_T \right)^{0.5} = \\ &= f_0^{1.5} (c / 80.8 \pi)^{0.5} / \bar{N}_T^{0.5}, \quad (28) \end{aligned}$$

где f_0 выражена в [Гц], c — [м/с], 80.8 — [м³/с²], $\bar{N}_T$ — [м⁻²].

Отметим, что (28) соответствует полученному ранее качественному выражению (19).

Входящая в (26) комплексная передаточная функция трансionoсферного КС на частоте $\omega = \omega_0 + \Omega = 2\pi(f_0 + F)$, обусловленная флуктуациями группового времени запаздывания различных участков фронта выходной волны $\Delta\tau_T(\rho_i)$ относительно их среднего значения $\tau_{cp} = z / c + \bar{\tau}_T$, описывается выражением

$$\begin{aligned}\dot{K}(\omega) &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp[-j(\omega_0 + \Omega)\Delta\tau_T(\rho_i)] = \\ &= \sqrt{K_{oc}} \dot{K}_H(\omega) = \\ &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp[-j80.8\pi(f_0 + F)\Delta N_T(\rho_i) / cf_0^2],\end{aligned}\quad (29)$$

где $K_{oc} = K_{oc}(z)G_r$ — коэффициент ослабления мощности волны на входе приемника с учетом ее ослабления $K_{oc}(z) \sim W_0^2 W_{\Pi}^2$ в свободном пространстве $W_0^2 = (c / 4\pi z f_0)^2$ на расстоянии $z = z_0 + z_3 + z_1$ и поглощения в ионосфере $W_{\Pi}^2 \sim N_T v_3 / f_0^2$ и коэффициента усиления приемной антенны G_r ; $\Delta\tau_T(\rho_i)$ — относительные флуктуации группового времени запаздывания различных участков (ρ_i) фронта волны на выходе неоднородной ионосферы, определяемые согласно (14) $\Delta\tau_T(\rho_i) = -\Delta\tau_{\Phi}(\rho_i) \sim \Delta N_T(\rho_i) / f_0^2$;

$$\begin{aligned}\dot{K}_H(\omega) &= \dot{K}(\omega) / \sqrt{K_{oc}} = \\ &= \sum_{i=1}^M \exp[-j80.8\pi(f_0 + F)\Delta N_T(\rho_i) / cf_0^2]\end{aligned}\quad (30)$$

— нормированная комплексная передаточная функция трансionoсферного КС.

Из (26) следует выражение для средней мощности принимаемого сигнала с ЧСЗ и дисперсионными искажениями в момент времени t :

$$\begin{aligned}\bar{P}_r(t) &= \dot{S}_r(t) \dot{S}_r^*(t) = \\ &= E_t K_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_d(\Omega_1) \dot{S}_d^*(\Omega_2) K_H(\Omega) \exp(j\Delta\Omega t') \frac{d\Omega_1}{2\pi} \frac{d\Omega_2}{2\pi},\end{aligned}\quad (31)$$

где

$$K_H(\Delta\Omega) = \overline{\dot{K}_H(\omega_1) \dot{K}_H(\omega_2)} \quad (32)$$

— нормированная двухчастотная корреляционная функция КС; $\dot{K}(\omega_i)$ определяется согласно (29); $\Delta\Omega = \omega_1 - \omega_2 = \Omega_1 - \Omega_2$; $t' = t - z / c - \bar{\tau}_T = t - \tau_{cp}$.

Анализ (30—32) показывает, что нормированная двухчастотная корреляционная функция трансionoсферного КС $K_H(\Delta\Omega) = \overline{\dot{K}_H(\omega_1) \dot{K}_H(\omega_2)}$ зависит от несущей частоты f_0 и мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho_i)$, которые определяют флуктуации фазового фронта выходной волны на несущей частоте (21) $\Delta\phi(\rho, \omega_0) \sim \Delta N_T(\rho) / cf_0$ и полосы когерентности замираний в трансionoсферном радиоканале (23) $F_k = f_0 / \Delta\phi(\rho, \omega_0) = cf_0^2 / 80.8\pi \Delta N_T(\rho)$. Однако в рамках многолучевых моделей трансionoсферного КС получить из выражений (30—32) искомую

аналитическую зависимость $F_k = \Psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ невозможно.

Для решения этой задачи необходимо использовать методы статистической радиофизики, описывающие явление дифракции волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы в приложении к трансionoсферному РРВ (рис. 2, правая панель).

Наиболее простым из них является метод фазового экрана, позволяющий определить комплексное поле волны на выходе тонкого слоя неоднородностей (фазового экрана) $\dot{u}(t, z_m)$ ионосферы и на входе приемной антенны $\dot{u}_r(t, z)$. Это позволяет получить выражение для средней интенсивности ($\bar{I}_r$) поля принимаемой волны в следующем виде [Yeh and Liu, 1982; Liu et al., 1974]:

$$\begin{aligned}\bar{I}_r(t) &= \overline{\dot{u}_r(t) \dot{u}_r^*(t)} = E_t K_{oc}(z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_d(\Omega_1) \dot{S}_d^*(\Omega_2) \times \\ &\times \exp(-\Delta\Omega^2 \sigma_{\Phi}^2 (2 + d_1^2) / 4\omega_0^2) \exp(j\Delta\Omega t') \frac{d\Omega_1}{2\pi} \frac{d\Omega_2}{2\pi},\end{aligned}\quad (33)$$

где $K_{oc}(z) \sim W_0^2 W_{\Pi}^2$ — коэффициент ослабления поля волны на входе приемной антенны $\dot{u}_r(t, z)$; σ_{Φ} — СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы (фазового экрана); $d_1^2 \geq 1$ — параметр, характеризующий нарастание дифракционных эффектов за фазовым экраном.

Сравнительный анализ выражения (33) для средней интенсивности поля принимаемой волны $\bar{I}_r(t)$ при ее трансionoсферном распространении, полученного радиофизическим методом фазового экрана, и выражения (31) для средней мощности принимаемого сигнала $\bar{P}_r(t)$, полученного методами построения многолучевых моделей трансionoсферных КС, указывает на их тождественность. Это позволяет установить следующие взаимосвязи:

$$\begin{aligned}K_H(\Delta\Omega) &= \exp\left[-\left(\frac{\Omega \sigma_{\Phi} (2 + d_1^2)^{0.5}}{4\omega_0}\right)^2\right] = \\ &= \exp\left[-\left(\frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega_k}\right)^2\right],\end{aligned}\quad (34)$$

где $\Delta\Omega_k = 2\Omega_k$ — полное (удвоенное) значение полосы когерентности $\Omega_k = 2\pi F_k$ трансionoсферного КС, обусловленное проявлением дифракционных свойств неоднородной ионосферы [Liu et al., 1974]:

$$\Delta\Omega_k = 2\Omega_k = 2\omega_0 / \sigma_{\Phi} (2 + d_1^2)^{0.5}. \quad (35)$$

В соответствии выражением (7) при гауссовской корреляционной функции флуктуаций ЭК

в ионосфере СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы (фазового экрана) можно описать выражением [Маслов и Пашинцев, 2006; Пашинцев и др., 2018; Pashintsev et al., 2018; Yeh and Liu, 1982]

$$\sigma_\varphi = \left(\Delta\varphi^2(\rho, \omega_0) \right)^{0.5} = 80.8\pi\sigma_{\Delta N_T} / c f_0, \text{ рад}, \quad (36)$$

а параметр, характеризующий нарастание дифракционных эффектов за фазовым экраном (размещенном на высоте z_m), можно записать в виде [Коваль и др., 2022]

$$d_1^2 = 4(z_m)^2 c^2 / \pi^2 f_0^2 l_s^4, \quad (37)$$

где l_s — характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей (100—1000 м).

Заметим, что выражение (36) соответствует выражению для флуктуаций фазового фронта волны (21) $\Delta\varphi(\rho, \omega_0) = 80.8\pi \Delta N_T(\rho) / c f_0$ на несущей частоте $\omega_0 = 2\pi f_0$ на выходе ионосферы, которое на качественном уровне описывает полосу когерентности замираний в трансionoносферном КС (23) $F_k = f_0 / \Delta\varphi(\rho, \omega_0) = c f_0^2 / 80.8\pi \Delta N_T(\rho)$.

С учетом (35—37) и взаимосвязи $\Omega_k = 2\pi F_k$ выражение для оценки полосы когерентности трансionoносферного КС, выраженной в Гц, можно записать в виде, аналогичном (23):

$$F_k = f_0 / \sigma_\varphi \sqrt{2 + d_1^2} = c f_0^2 / 80.8\pi\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{2 + d_1^2}, \text{ Гц}, \quad (38)$$

где f_0 выражена в [Гц], $\sigma_{\Delta N_T}$ — [м⁻²], 80.8 — [м³/с²].

Согласно (36) и (38) уменьшение несущей частоты f_0 и увеличение СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере ($\sigma_{\Delta N_T}$) приводит к увеличению СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе фазового экрана $\sigma_\varphi \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$ и уменьшению полосы когерентности $F_k \sim f_0 / \sigma_\varphi \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N_T}$ замираний в трансionoносферном канале связи.

Таким образом, на основе структурно-физического подхода (комплексного применения методов построения многолучевых КС и радиофизического метода фазового экрана) получено искомое выражение (38) для оценки зависимости $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ невозможно.

Заметим, что аналитические выражения (28) и (38) для оценки зависимостей $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T)$ и $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ получены для случая вертикального ($\alpha = 90^\circ$) трансionoносферного РРВ (рис. 2). При наклонном РРВ через ионосферу под углом $\alpha < 90^\circ$ эквивалентная толщина ионосферы z_3 и расстояние до ФЭ (z_m) возрастают до значений $z_3(\alpha) = z_3 \operatorname{cosec} \alpha$ и $z_m(\alpha) = z_m \operatorname{cosec} \alpha$. Поэтому при $\alpha < 90^\circ$ выражение (28) для полосы дисперсионных искажений остается справедливым при замене $\bar{N}_T = \bar{N}_m z_3$ на $\bar{N}_T(\alpha) = \bar{N}_T \operatorname{cosec} \alpha$:

$$F_d(\alpha) = \left(c f_0^3 / 80.8\pi \bar{N}_T \operatorname{cosec} \alpha \right)^{0.5} = f_0^{1.5} (c / 80.8\pi)^{0.5} / \bar{N}_T(\alpha)^{0.5}. \quad (39)$$

Полоса когерентности замираний в трансionoносферном канале связи при $\alpha < 90^\circ$ описывается выражением общего вида, аналогичного (38):

$$F_k(\alpha) = f_0 / \sigma_\varphi(\alpha) \sqrt{2 + d_1^2(\alpha)}, \quad (40)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi(\alpha) &= 80.8\pi\sigma_{\Delta N_T}(\alpha) / c f_0 = \\ &= 80.8\pi\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\operatorname{cosec} \alpha} / c f_0 = \sigma_\varphi \sqrt{\operatorname{cosec} \alpha}; \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} d_1^2(\alpha) &= 4(z_m(\alpha))^2 c^2 / \pi^2 f_0^2 l_s^4 = \\ &= 4(z_m \operatorname{cosec} \alpha)^2 c^2 / \pi^2 f_0^2 l_s^4. \end{aligned} \quad (42)$$

В частном случае вертикального трансionoносферного РРВ через ионосферу мелкомасштабными неоднородностями выражения (39) и (40—42) сводятся к найденным аналитическим зависимостям (28) и (38) оценки полосы дисперсионных искажений $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T)$ и полоса когерентности замираний $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ в трансionoносферном канале связи.

4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЛОСЫ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ И КОГЕРЕНТНОСТИ ЗАМИРАНИЙ В ТРАНСИОНОСФЕРНОМ РАДИОКАНАЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ ИОНОСФЕРЫ

Установленные аналитические зависимости (38, 40—42) $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ и (28, 39) $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T)$ позволяют произвести сравнительную оценку зависимости полос когерентности замираний и дисперсионных искажений трансionoносферного радиоканала от выбора несущей частоты (f_0) при различных состояниях ионосферы, характеризующихся средним значением $\bar{N}_T$ и СКО мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T}$ ПЭС ионосферы на трассе РРВ в СССР.

Поскольку обычно проводится долговременный мониторинг ПЭС ионосферы, то его результаты фактически отражают среднее значение: $\bar{N}_T = \bar{N}_T$. Известно [Recommendation ITU-R P. 531—11, 2012; Рыжкина и Федорова, 2001], что в среднеширотной ионосфере суточные и сезонные вариации ПЭС могут достигать 1—2 порядка. Существенное влияние на изменение ПЭС оказывают естественные возмущения ионосферы (ВИ), к числу которых относятся солнечная и геомагнитная активность,

особенно с области экваториальных и приполярных широт [Спилкер, 1979; Гудмен и Ааронс, 1990; Афраймович и Перевалова, 2006; Перевалова, 2011; Афраймович и др., 2008; Блаунштейн и др., 2013; Пулинец и др., 2023], солнечный терминатор [Афраймович и др., 2010; Сомсиков, 2011], землетрясения [Ясюкевич и др., 2015; Титова и др., 2022], падение метеоритов [Воейков и др., 2016] и т.д. Существенное влияние на изменение ПЭС оказывают искусственные ВИ [Филипп и др., 1986; Bogusch et al., 1983; Кнепп, 1983; Маслов и Пашинцев, 2006], создаваемые в результате инъекции легкоионизирующих веществ (например, бария).

Однако статистических данных по этим исследованиям накоплено мало. Наибольшее число сведений о статистических характеристиках ПЭС в нормальной и возмущенной ионосфере приведено в [Блаунштейн и др., 2013] и [Рыжкина и Федорова, 2001]. Они относятся к среднему значению ПЭС ионосферы ($\bar{N}_T$) и интенсивности неоднородностей (5) $\beta_{\Delta N} = \sigma_{\Delta N}(z_m)/\bar{N}(z_m)$.

Согласно [Гудмен и Ааронс, 1990; Колосов и др., 1969] суточные и сезонные изменения среднего значения ПЭС ионосферы в средних широтах находятся в диапазоне $\bar{N}_T \approx 4 \cdot 10^{16} - 4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (или 4–40 TECU). Согласно [Ionospheric propagation data, 2012; Рыжкина и Федорова, 2001] при изменении геофизических условий ПЭС среднеширотной ионосферы (при вертикальном РРВ) может колебаться в диапазоне $\bar{N}_T \approx 10^{16} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ (или 1–100 TECU), т. е. на 2 порядка. Согласно [Рыжкина и Федорова, 2001] усредненные по всем сезонам значения ПЭС для дня и ночи при максимуме и минимуме солнечной активности показывают, что при ночью при минимальной солнечной активности величина $\bar{N}_T \approx 1.2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (т. е. 12 TECU), а днем при максимальной солнечной активности она достигает $\bar{N}_T \approx 7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (т. е. 70 TECU). Отсюда следует, что в условиях нормальной ионосферы (НИ) среднее значение ПЭС ионосферы при вертикальном РРВ может достигать величины $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ (т. е. 10–100 TECU).

В условиях естественных возмущений ионосферы (ВИ) в области экваториальных и приполярных широт величина ПЭС считается такой же, как и в дневной среднеширотной ионосфере [Рыжкина и Федорова, 2001], т. е. $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$.

Известно [Колосов и др., 1969; Черенкова и Чернышов, 1971; Калинин и Черенкова, 1971; Альперт, 1972; Рыжкина и Федорова, 2001; Блаунштейн и др., 2013] что интенсивность неоднородностей при нормальной (невозмущенной) ионосфере в средних широтах обычно составляет $\beta_{\Delta N} = 0.003$ ночью и $\beta_{\Delta N} = 0.01$ днем. В условиях естественных возмущений интенсивность неоднородностей может возрастать до $\beta_{\Delta N} = 0.1$ в приполярных широтах

до $\beta_{\Delta N} = 0.2$ — в экваториальных [Рыжкина и Федорова, 2001; Блаунштейн и др., 2013].

Экспериментальные данные по измерению СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ отсутствуют. Однако на основе результатов измерений среднего значения ПЭС ионосферы $\bar{N}_T$ и интенсивности неоднородностей (5) $\beta_{\Delta N} = \sigma_{\Delta N}(z_m)/\bar{N}(z_m)$ можно получить ориентировочные значения $\sigma_{\Delta N_T}$ с использованием выражений (7) и (3) по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta N_T} &= (\sqrt{\pi} l_s z_3)^{0.5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_m = \\ &= (\sqrt{\pi} l_s)^{0.5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_T / z_3^{0.5}. \end{aligned} \quad (43)$$

Характерный размер мелкомасштабных неоднородностей в слое F ионосферы составляет $l_s = 200 - 400 \text{ м}$, а эквивалентная толщина ионосферы $z_3 = 100 - 200 \text{ км}$ [Колосов и др., 1969; Черенкова и Чернышов, 1971; Калинин и Черенкова, 1971; Альперт, 1972; Рыжкина и Федорова, 2001; Блаунштейн и др., 2013].

В условиях среднеширотной нормальной ионосферы (НИ), характеризующейся средним значением ПЭС $\bar{N}_T \approx 10^{17} \text{ м}^{-2}$ и интенсивностью неоднородностей $\beta_{\Delta N} = 0.01$, при типовых ее параметрах $l_s = 400 \text{ м}$ и $z_3 = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$, величина СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы в соответствии с выражением (43) составляет $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} \text{ м}^{-2}$, а при $\bar{N}_T \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$ она возрастает до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{15} \text{ м}^{-2}$.

В условиях естественных ВИ, характеризующихся средним значением ПЭС $\bar{N}_T \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$ и интенсивностью неоднородностей $\beta_{\Delta N} = 0.1$, величина СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы возрастет до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Следует отметить, что, согласно [Рыжкина и Федорова, 2001], вариации $\beta_{\Delta N}$ и $\bar{N}_T$ в зависимости от геофизических условий находятся как бы в противофазе. Это должно приводить к некоторому сглаживанию суточных вариаций фазовых флуктуаций. Последнее подтверждается тем, что согласно выражениям (36) и (43) СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы можно записать в виде

$$\sigma_\phi = 80.8\pi (\sqrt{\pi} l_s)^{0.5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_T / c f_0 z_3^{0.5} \quad (44)$$

прямо пропорциональной зависимости $\sigma_\phi \sim \beta_{\Delta N} \bar{N}_T / f_0$. Поэтому в дальнейшем будем считать, что наибольшее среднее значение ПЭС при ВИ в результате инъекции бария составляет $\bar{N}_T \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$.

В условиях искусственных ВИ в результате инъекции бария величина СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы может достигать

величины $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Этот вывод основан на следующих соображениях. Согласно экспериментальным данным [Кперр, 1983] при ВИ путем инъекции бария и транзионосферном РРВ с несущей частотой $f_0 = 1.38 \text{ ГГц}$ наблюдались сильные флуктуации фазового фронта волны $\Delta\varphi(\rho, \omega_0)$, характеризующиеся СКО $\sigma_\varphi = \left(\overline{\Delta\varphi^2(\rho, \omega_0)} \right)^{0.5} = 100 \text{ рад}$. Поскольку σ_φ связано с $\sigma_{\Delta N_T}$ зависимостью вида (36) $\sigma_\varphi = 80.8\pi\sigma_{\Delta N_T}/cf_0$, то величина СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы составляет $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1.7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$.

Таким образом, среднее значение и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в нормальной среднеширотной ионосфере находятся в диапазоне значений $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ и $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-2}$, а в условиях естественных и искусственных возмущений ионосферы наибольшее среднее значение ПЭС не изменяется: $\bar{N}_T \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$, а диапазон СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС может расширяться до значений $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$.

На рис. 3 приведены графики зависимости полосы когерентности замираний (F_K) и дисперсионных искажений (F_d) транзионосферного КС от выбора несущей частоты ($f_0 = 0.1 - 10 \text{ ГГц}$), рассчитанные при вертикальном РРВ ($\alpha = 90^\circ$) в соответствии с выражениями (36–38) и (28) при типовых значениях эквивалентной толщины ионосферы $z_s = 100 \text{ км}$, характерного размера мелкомасштабных неоднородностей $l_s = 400 \text{ м}$ и высоты

максимума ионизации $z_m = 300 \text{ км}$ и различных состояниях ионосферы ($\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$).

Анализ рис. 3 показывает, что на несущей частоте ССС $f_0 = 1 \text{ ГГц}$ в условиях среднеширотной нормальной ионосферы (НИ), характеризующейся значениями $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ и $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-2}$ (на рис. 3 обведены верхним овалом), полоса дисперсионных искажений транзионосферного канала составляет $F_d = 3 \cdot 10^7 - 10^8 \text{ Гц}$, что примерно на порядок меньше полосы его когерентности $F_K = 2 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$. Заметим, что при наклонном РРВ под углом $\alpha = 5^\circ - 7^\circ$ эти значения уменьшаются примерно в 3 раза. Поэтому при нормальном состоянии ионосферы выбор ширины спектра сигналов в ССС ограничивается учетом только ее дисперсионных свойств [Черенкова и Чернышов, 1984].

На той же несущей частоте $f_0 = 1 \text{ ГГц}$ в условиях естественных и искусственных возмущений ионосферы (ВИ), которые согласно [Маслов и Пашинцев, 2006; Рыжкина и Федорова, 2001] сопровождаются увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (на рис. 3 обведены нижним овалом), при неизменном среднем значении $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ полоса когерентности замираний транзионосферного канала сужается до $F_K = 2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 2 - 20 \text{ МГц}$ (т. е. становится меньше полосы дисперсионности $F_d = 3 \cdot 10^7 - 10^8 \text{ Гц}$ в 1.5–50 раз). Следует заметить, что, согласно экспериментальным данным

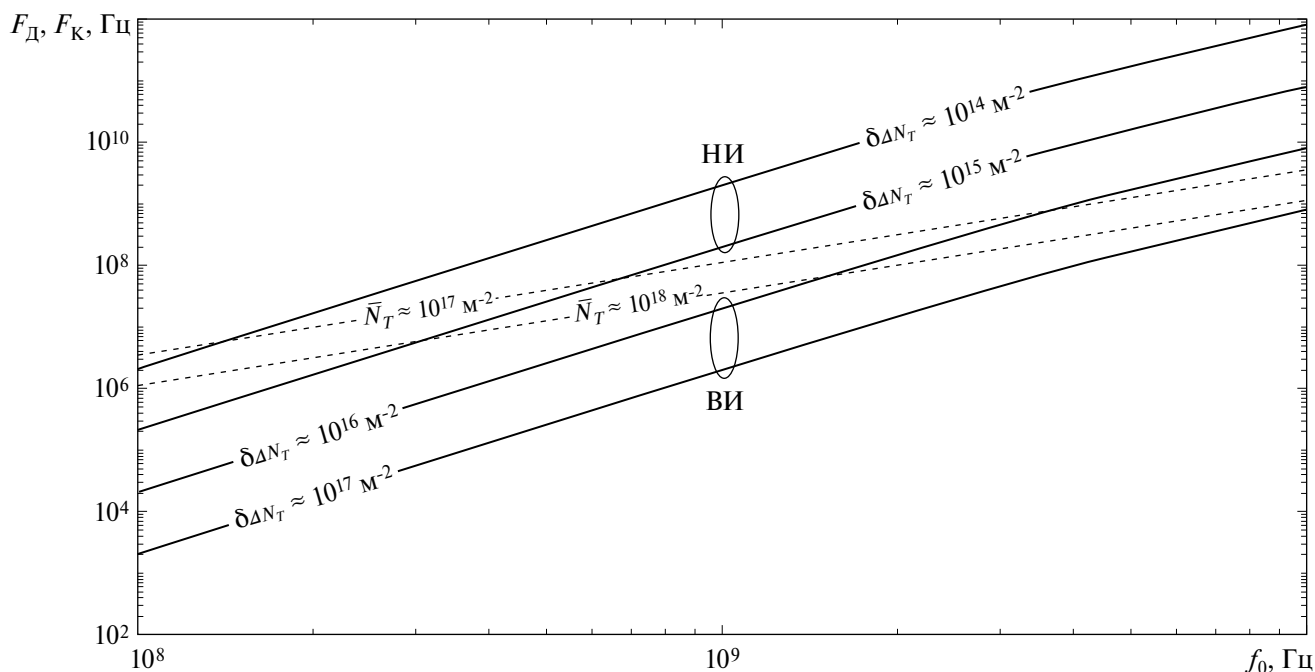


Рис. 3. Зависимости полосы когерентности (F_K) и дисперсионности (F_d) транзионосферного канала связи от несущей частоты (f_0) и состояния ионосферы ($N_T, \sigma_{\Delta N_T}$).

[Bogusch et al., 1983], при возмущении ионосферы путем инъекции бария полоса когерентности спутникового радиоканала может сужаться до $F_k = 0.25$ МГц. Поэтому в условиях естественных и искусственных возмущений ионосферы выбор ширины спектра сигналов с несущей частотой $f_0 \approx 1$ ГГц в ССС будет ограничиваться проявлением ее дифракционных (рассеивающих) свойств.

На несущей частоте $f_0 = 10$ ГГц при $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ полоса дисперсионности трансionoсферного канала составляет $F_d = 1-3$ ГГц, а в условиях ВИ, при которых достигаются значения $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$, полоса когерентности составляет $F_k = 8 \cdot 10^8 - 8 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 0.8-8$ ГГц. Поэтому в условиях ВИ выбор ширины спектра сигналов с несущей частотой $f_0 \approx 10$ ГГц в ССС будет ограничиваться одновременным проявлением ее дисперсионных и дифракционных свойств.

При использовании в ССС пониженной несущей частоты $f_0 \approx 300$ МГц в условиях ВИ, при которых достигаются значения $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$, полоса когерентности трансionoсферного канала сужается до $F_k = 5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5 \text{ Гц} = 50-500$ кГц и становится существенно меньше полосы дисперсионности $F_d = 6-20$ МГц при обычных значениях $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$. Поэтому в условиях возмущений ионосферы выбор ширины спектра сигналов с несущей частотой $f_0 \approx 300$ МГц в ССС будет ограничиваться проявлением ее дифракционных свойств.

5. СТРУКТУРА ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ ПОЛОСЫ КОГЕРЕНТНОСТИ И ДИСПЕРСИОННОСТИ СПУТНИКОВОГО РАДИОКАНАЛА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ GPS-МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

В настоящее время для оценки ПЭС ионосферы (N_T) широко применяются специализированные приемники глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS класса GISTM (GNSS Ionospheric and TEC Monitor) [Shanmugam et al., 2012]. До недавнего времени возможности приемников класса GISTM были ограничены измерением (оценкой) только среднего значения ПЭС ($\bar{N}_T$). Однако в [Pashintsev et al., 2020] предложен способ модификации GISTM-приемника GPStation-6, позволяющий дополнительно оценивать СКО ($\sigma_{\Delta N_T} = \sqrt{\langle \Delta N_T^2 \rangle}$) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС, связанных с образованием в ионосфере неоднородностей ЭК с размерами $l_s \approx 10 - 10^3 \text{ м}$.

В составе обычного приемника GPStation-6 можно условно выделить две части [Pashintsev et al., 2023]:

1) аппаратная часть включает блок приема сигналов, осуществляющий аналого-цифровое преобразование, декодирование сигналов ГНСС и измерение их основных параметров: псевдодальностей (R'_1, R'_2) до КА ГНСС и псевдофаз (ϕ'_1, ϕ'_2) на двух несущих частотах (f_1, f_2);

2) программное обеспечение (ПО), реализующее обработку принятых навигационных сообщений ГНСС, вычисление радионавигационных параметров, координат приемника, ПЭС ионосферы и др., а также формирование сообщений, содержащих результаты измерений.

Поскольку внесение изменений во встроенное ПО приемника невозможно, предложенная в [Pashintsev et al., 2020; 2023] его модификация состоит в разработке дополнительного ПО (программных блоков), которое на основе двухчастотных ($f_1 \approx 1.6$ ГГц, $f_2 \approx 1.2$ ГГц) результатов измерения основных радионавигационных параметров ($R'_1, R'_2, \phi'_1, \phi'_2$) последовательно реализует расчет ПЭС ионосферы (N_T), его цифровую фильтрацию для выделения среднего значения ПЭС ($\bar{N}_T$) и его мелкомасштабных флуктуаций (ΔN_T) и расчет СКО ($\sigma_{\Delta N_T}$) последних. Описанный подход позволяет:

1) задействовать расширенные возможности приемника GPStation-6, позволяющие получить исходные результаты кодовых (R'_1, R'_2) и фазовых (ϕ'_1, ϕ'_2) измерений и на основе их комбинации самостоятельно вычислять ПЭС ионосферы (N_T) с увеличенной частотой дискретизации ($f_d = 50$ Гц) и уменьшенной инструментальной шумовой погрешностью;

2) неограниченно расширять функциональность приемника путем разработки дополнительных программных модулей, функционирующих на отдельных вычислительных мощностях и потому не оказывающих влияния на работу его встроенного ПО, непосредственная модификация которого недоступна.

С учетом известного [Pashintsev et al., 2020] способа модификации GISTM-приемника GPStation-6 осуществить с его помощью оценку полосы пропускания трансionoсферного канала связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы возможно путем разработки дополнительных блоков (программных модулей), позволяющих рассчитывать полосы дисперсионных искажений и когерентности замираний трансionoсферного радиоканала в соответствии с установленными аналитическими зависимостями (39) — $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T(\alpha))$ и (40–42) — $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\alpha))$.

С учетом выражений (39) и (40–42) состав исходных данных ($f_1, f_2, R'_1, R'_2, \phi'_1, \phi'_2$), получаемых из приемника GPStation-6, следует расширить результатами расчета его встроенным ПО угла места

КА ГНСС относительно горизонтали, который соответствует углу α .

Структурная схема комплекса оценки полосы пропускания трансionoсферного радиоканала ГНСС на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы приведена на рис. 4.

Для модификации GISTM-приемника GPStation-6 в состав его ПО введены (рис. 4) следующие дополнительные блоки (программные модули) [Pashintsev et al., 2020]:

1) расчета ПЭС ионосферы ($N_T(\alpha)$) с уменьшенной шумовой погрешностью за счет комбинации кодовых (R'_1, R'_2) и фазовых (ϕ'_1, ϕ'_2) измерений;

2) цифровой фильтрации с частотой дискретизации 50 Гц для выделения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\Delta N_T(\alpha)$) и его среднего значения ($\bar{N}_T(\alpha)$);

3) расчета СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}(\alpha)$) ионосферы;

4) расчета полосы дисперсионных искажений трансionoсферного радиоканала ($F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T(\alpha))$) в соответствии с выражением (39) на несущей частоте $f_0 = f_1 \approx 1.6$ ГГц;

5) расчета полосы когерентности замираний трансionoсферного радиоканала ($F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\alpha))$) в соответствии с выражениями (40–42) на несущей частоте $f_0 = f_1 \approx 1.6$ ГГц.

Следует отметить, что по результатам определения среднего значения $\bar{N}_T(\alpha)$ и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}(\alpha)$) ионосферы при наклонном (α) РРВ в радиолинии ГНСС с несущей частотой $f_0 = f_1 \approx 1.6$ ГГц (рис. 4) согласно [Пашинцев и Ахмадеев, 2015] можно осуществить перерасчет для радиолинии ССС с произвольным углом (α_c) РРВ и несущей частотой ($f_0 = 1–10$ ГГц) указанных статистических параметров ПЭС ионосферы ($\bar{N}_T(\alpha_c)$ и $\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_c)$) и определить полосу дисперсионных искажений $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T(\alpha_c))$ и когерентности замираний ($F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\alpha_c))$) трансionoсферного канала связи в соответствии с выражениями (39) и (40–42).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана комплексная модель изменения полного электронного содержания в ионосфере с мелкомасштабными неоднородностями в виде

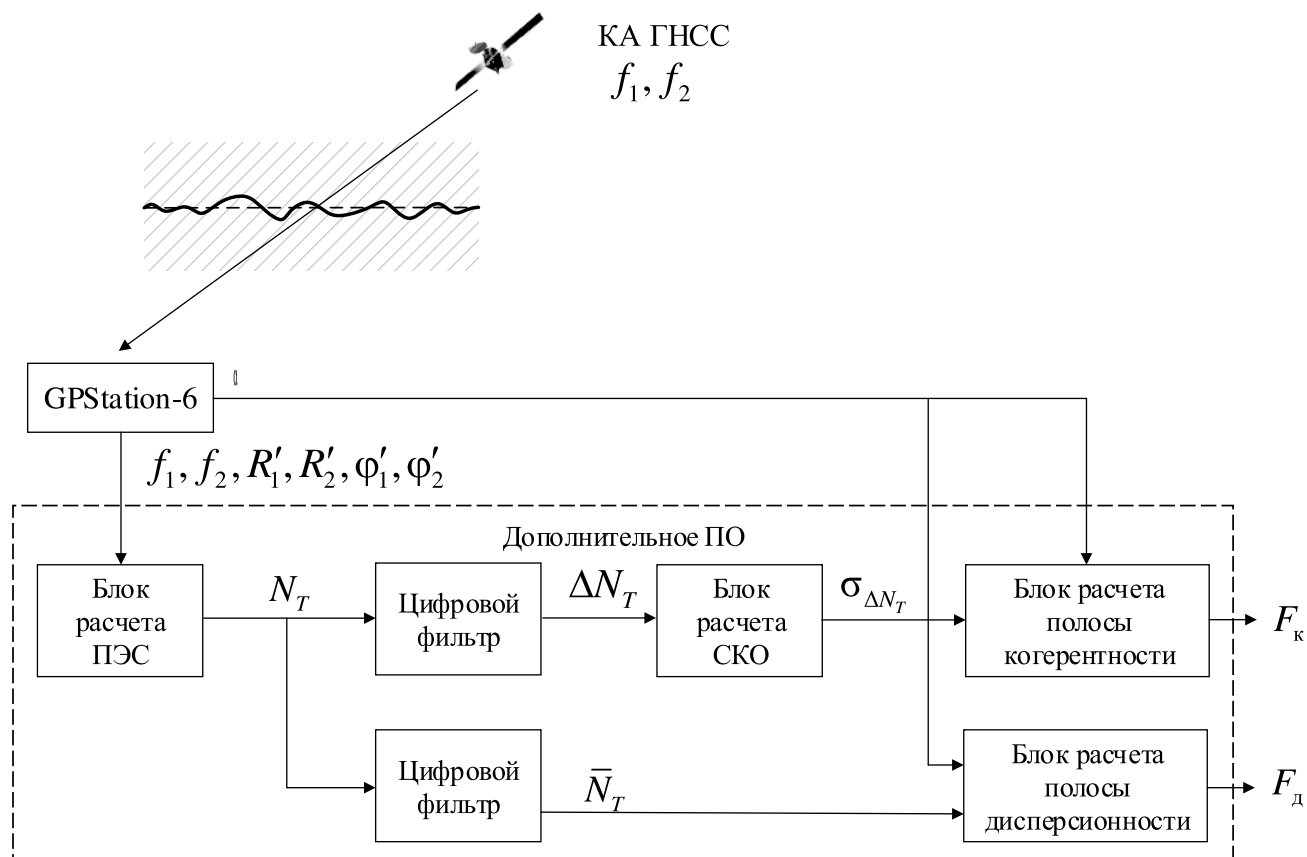


Рис. 4. Структурная схема аппаратно-программного комплекса оценки полосы пропускания трансionoсферного канала на основе GPS-мониторинга ионосферы.

(рис. 1б) совокупности толстого однородного слоя, характеризуемого средним значением полного электронного содержания (3) $\bar{N}_T = z_3 \bar{N}(z_m)$, и тонкого слоя неоднородностей, характеризующихся СКО мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания (7) $\sigma_{\Delta N_T} = \psi(z_3, \sigma_{\Delta N}(z_m))$.

2. Разработана структурно-физическая модель трансionoсферного канала связи с дисперсионными искажениями и частотно-селективными замираниями на основе методов описания многолучевости и дифракции волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы (рис. 2). Она позволяет получить искомые зависимости полосы дисперсионных искажений от среднего значения полного электронного содержания в виде выражения (28) $F_d = \psi(f_0, \bar{N}_T)$ и полосы когерентности замираний от СКО мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания в виде выражения (38) $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T})$.

3. Произведена сравнительная оценка полосы дисперсионности и когерентности трансionoсферного радиоканала (рис. 3) в диапазоне возможных изменений среднего значения полного электронного содержания $\bar{N}_T \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ м}^{-2}$ и СКО его мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Обосновано, что в традиционном диапазоне частот ССС $f_0 = 1 - 10 \text{ ГГц}$ в условиях нормальной среднеширотной ионосферы полоса дисперсионных искажений трансionoсферного радиоканала на порядок меньше полосы когерентности замираний. В условиях естественных и искусственных возмущений ионосферы на несущей частоте $f_0 = 1 \text{ ГГц}$ полоса когерентности трансionoсферного канала становится меньше полосы дисперсионных искажений в 1.5—50 раз.

4. Разработана структура построения аппаратно-программного комплекса оценки полосы когерентности замираний и дисперсионных искажений трансionoсферного радиоканала (рис. 4) на основе результатов GPS-мониторинга ионосферы с помощью двухчастотного приемника GPStation-6 и модификации его программного обеспечения в направлении применения кодово-фазовых измерений и цифровой фильтрации результатов измерений с частотой дискретизации 50 Гц для выделения среднего значения ($\bar{N}_T$) и СКО мелкомасштабных флуктуаций ($\sigma_{\Delta N_T}$) полного электронного содержания ионосферы.

5. Полученные результаты GPS-мониторинга ионосферы при ее мелкомасштабных возмущениях являются основой для оценки полос когерентности замираний (F_k) и дисперсионных искажений (F_d) трансionoсферного радиоканала в интересах выбора ширины спектра передаваемых сигналов (F_0) в современных и перспективных системах спутниковой связи и навигации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 563 с.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В., Ойнац А.В., Ясюкевич Ю.В. Отклик глобального и регионального электронного содержания на изменения солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 195—208.
- Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. МГД природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 1. С. 82—99.
- Безлер И.В., Ишин А.Б., Конецкая Е.В., Тинин М.В. Эффект анизотропии ионосферных неоднородностей при регистрации сбоев фазовых измерений ГНСС // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 3. С. 364—373.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019030040>
- Блаунштейн Н., Пулинец С.А., Коэн Я. Расчет основных параметров радиосигналов в канале спутник — Земля при распространении через возмущенную ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 2. С. 215—227.
<https://doi.org/10.7868/S0016794013020041>
- Воейков С.В., Бернгардт О.И., Шестаков Н.В. Использование индекса возмущенности вертикальных вариаций ПЭС при исследовании ионосферных эффектов Челябинского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 2. С. 234—243.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016020127>
- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
- Гудмен Дж.М., Ааронс Ж. Влияние ионосферных эффектов на современные электронные системы // ТИ-ИЭР. 1990. Т. 78. № 3. С. 59—76.
- Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь, 1971. 183 с.
- Иванов В.А., Иванов Д.В., Михеева Н.Н., Рябова М.И. Дисперсионные искажения системных характеристик широкополосных ионосферных радиоканалов.

- Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 156 с.
- *Калинин А.И., Черенкова Л.Е.* Распространение радиоволн и работа радиолоний. М.: Связь, 1971. 439 с.
- *Коваль С.А., Пашинцев В.П., Копытов В.В., Манаенко С.С., Белоконь Д.А.* Метод определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой дециметровый радиолоний // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 67—103. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-1-67-103>
- *Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И.* Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.
- *Кравцов Ю.А., Фейзуллин З.И., Виноградов А.Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
- *Маслов О.Н., Пашинцев В.П.* Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Приложение к журналу “Инфокоммуникационные технологии”. Вып. 4. Самара: ПГАТИ, 2006. 357 с.
- *Пашинцев В.П., Колосов Л.В., Тишкин С.А., Смирнов А.А.* Влияние ионосферы на обнаружение сигналов в системах космической связи // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 2. С. 143—150.
- *Пашинцев В.П., Ахмадеев Р.Р.* Прогнозирование помехоустойчивости систем спутниковой связи и навигации по данным GPS-мониторинга ионосферы // Электросвязь. 2015. № 11. С. 58—65.
- *Пашинцев В.П., Песков М.В., Шевченко В.А., Полежаев А.В.* Структурно-физическая модель спутникового радиоканала с учетом поглощения и сцинтилляций волны в ионосфере // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 4. С. 366—379. <https://doi.org/10.18469/ikt.2018.16.4.02>
- *Перевалова Н.П.* Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения // Солнечно-земная физика. Вып. 19. 2011. С. 124—133.
- *Пулинец М.С., Будников П.А., Пулинец С.А.* Глобальный отклик ионосферы на интенсивные вариации солнечной и геомагнитной активности по данным глобальной сети навигационных приемников GNSS // Геомагнетизм и аэрномия. 2023. Т. 63. № 2. С. 202—215. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600703>
- *Романова Н.Ю., Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А.* Взаимосвязь дрейфа среднemasштабных неоднородностей и ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 2022. Т. 62. № 2. С. 211—226. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020134>
- *Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В.* Исследование статических и спектральных трансатмосферных радиосигналов УКВ-СВЧ диапазона // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 2. <http://jre.cplire.ru/win/feb01/3/text.html>
- *Сомсиков В.М.* Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 6. С. 723—735.
- *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь. М.: Связь, 1979. 592 с.
- *Тепляков И.М.* Ионосферные искажения цифровых сигналов с широкополосной модуляцией // Радиотехника. 1984. № 4. С. 8—13.
- *Титова М.А., Захаров В.И., Пулинец С.А.* Интерпретация ионосферных возмущений в период крупнейшего землетрясения при дифференцированном использовании специальных методов обработки спутниковых радиосигналов // Геомагнетизм и аэрномия. 2022. Т. 62. № 6. С. 797—816. <https://doi.org/10.31857/S0016794022060153>
- *Филипп Н.Д., Ораевский В.Н., Блаунштейн Н.Ш., Ружин Ю.Я.* Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1986. 246 с.
- *Черенкова Л.Е., Чернышов О.В.* Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
- *Ясюкевич Ю.В., Захаров В.И., Куницын В.Е., Воейков С.В.* Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т. 55. № 1. С. 113—122. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060212>
- *Aarons J.* Global morphology of ionospheric scintillations // Proc. IEEE. 1982. V. 70. № 4. P. 360—378. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12314>
- *Bedrosian E.* Transionospheric propagation of FM signals // IEEE T. Commun. Techn. 1970. V. 18. № 2. P. 102—109. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1970.1090338>
- *Bogusch R.L., Gulgliano F.W., Knepp D.L.* Frequency-selective scintillation effects end decision feedback equalization in high data-rate satellite links // P. IEEE. 1983. V. 71. № 6. P. 754—767. <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12662>
- *Davies K.* Ionospheric Radio / IEEE Electromagnetic Waves Series. V. 31. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580 p.
- *GPStation-6. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual.* <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000132/om-20000132.pdf>. 2012.
- *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation ITU-R P. 531-11.* Geneva: Electronic Publication, 2012. 24 p.

- Knepp D.L. Multiple phase — screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves // P. IEEE. 1983. V. 71. № 6. P. 722—737.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12660>
- Liu C.H., Wernik A.W., Yeh K.C. Propagation of pulse trains through a random medium // IEEE T. Antenn. Propag. 1974. V. 22. № 4. P. 624—627.
<https://doi.org/10.1109/TAP.1974.1140830>
- OEM6. Firmware Reference Guide. 2014.
<https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/om-20000129/om-20000129.pdf>
- Pashintsev V., Peskov M., Smirnov V., Smirnova E., Tynyankin S. Procedure for extraction of small-scale variations in the total electron content of the ionosphere with the use of transionospheric sounding data // J. Commun. Technol. El. 2017. V. 62. № 12. P. 1336—1342.
<https://doi.org/10.1134/S1064226917110158>
- Pashintsev V., Peskov M., Kalmykov I., Zhuk A., Toiskin V. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems // AD ALTA — Journal of Interdisciplinary Research. 2020. V. 10. № 1. P. 367—375.
- Pashintsev V., Peskov M., Mikhailov D., Senokosov M., Solomonov D. Method for GPS-monitoring of small-scale fluctuations of the total electron content of the ionosphere for predicting the noise immunity of satellite communications // Ionosphere — New Perspectives. Ed. Y.-H. Chemin. London: IntechOpen, 2023. P. 13—33.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.1001096>
- Pashintsev V.P., Peskov M.V., Kalmykov I.A., Zhuk A.P., Senokosov M.A. Method for the evaluation of ionospheric diffractive and dispersive properties impact on the interference immunity of satellite communication systems // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. V. 9. № 13. P. 44—61.
- Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A.J. Evolution to modernized GNSS ionospheric scintillation and TEC monitoring // Proc. 2012 IEEE Symp. Position Location and Navigation (PLANS). USA, Myrtle Beach, SC. April 23—26, 2012. P. 265—273.
<https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236891>
- Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // P. IEEE. 1982. V. 70. № 4. P. 324—360.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313>

Evaluation of the Influence of the Dispersion and Diffraction Properties of the Ionosphere on the Bandwidth of the Trans-Ionospheric Channel

V. P. Pashintsev^{1, *}, M. V. Peskov^{1, **}, D. A. Mikhailov^{1, ***}, N. V. Kiselyov^{1, ****}

¹ North Caucasus Federal University (NCFU), Stavropol, Russia

*e-mail: pashintsevp@mail.ru

**e-mail: mvpeskov@hotmail.com

***e-mail: mixayloff.dimaaylov@mail.ru

****e-mail: vkicelev@rambler.ru

Theoretical substantiation and development of a hardware and software complex for estimating the band of dispersion distortion and the coherence band of fading in a satellite (trans-ionospheric) radio channel based on the results of GPS monitoring of the ionosphere. The basis for solving this problem is the development of a structural-physical model of the radio channel, which allows simultaneously taking into account the phase dispersion and its diffraction in small-scale inhomogeneities of the ionosphere. Analytical dependences of the band of dispersion distortions and coherence of frequency-selective fading on the average value and small-scale fluctuations of the total electron content of the ionosphere are obtained. It is shown that under conditions of ionospheric disturbances, the coherence band of fading can be much smaller than the dispersion band. In accordance with the obtained dependencies, a structure for constructing a hardware and software complex for estimating the dispersion and coherence bands of a satellite radio channel based on the improvement of the GPS-monitoring method of the total electronic content of the ionosphere with small-scale inhomogeneities has been developed