

Sukhova Ekaterina Alekseevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy str., 23, Samara 443010, Russian Federation; Ph.D Student of the Department of Radio Electronic Systems. Tel.: +78463333204. E-mail: e.suhova@psuti.ru

Kushnir Dmitry Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy str., 23, Samara 443010, Russian Federation; Ph.D Student of the Department of Information Security. Tel.: +79171050005. E-mail: d.kushnir@psuti.ru

References

1. Capolino F., eds. *Metamaterials Handbook: Phenomena and Theory of Metamaterials*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 992 p.
2. Smith D.R., Padilla W., Vier D.S., Nemat-Nasser S.C., Shultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett*, 2000, no. 84, pp. 4184-4187.
3. Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Phys. Rev. Lett*, 2000, no. 85, pp. 3966-3969. doi: 10.1103/PhysRevLett.85.3966.
4. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. *Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media*. London, Artech House, 1994. 291 p.
5. Lakhtakia A., Varadan V.K., Varadan V.V. *Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media. Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg and Boston, Springer-Verlag, 1989. 121 p.
6. Tretyakov, S.A. Electromagnetics of complex media: chiral, bi-isotropic, and certain bianisotropic materials. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1994, vol. 39 no. 14, pp. 32.
7. Lakhtakia A., Varadan V.V., Varadan V.K. Field equations, Huygens's principle, integral equations, and theorems for radiation and scattering of electromagnetic waves in isotropic chiral media. *Journal of the Optical Soc. Of America*, 1988, vol.5, no. 2, pp. 175-184.
8. Neganov V.A., Osipov O.V. *Otrazhajushhie, volnovodushhie i izluchajushhie struktury s kiral'nymi jelementami* [The reflecting, waveguiding and radiating structures with chiral elements]. Moscow, Radio i svjaz', 2006. 280 p.
9. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Sukhorukov A.P. *Teoriya voln* [Wave theory]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 383 p.

Received 30.08.2018

УДК 621.391.6

СТРУКТУРНО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПУТНИКОВОГО РАДИОКАНАЛА С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ И СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ВОЛНЫ В ИОНОСФЕРЕ

Пашинцев В.П.¹, Шевченко В.А.², Песков М.В.¹, Полежаев А.В.³

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ

²Главное управление развития информационных и телекоммуникаций технологий

Министерства обороны РФ, Москва, РФ

³27 Центральный НИИ Министерства обороны РФ, Москва, РФ

E-mail: mvpeskov@hotmail.com

Структурно-физическая модель спутникового радиоканала с учетом поглощения и сцинтилляций волны в ионосфере разработана на базе обоснования комплексной модели изменения электронной концентрации в неоднородной ионосфере. Она представлена в виде совокупности толстого однородного слоя и тонкого слоя неоднородностей, характеризующихся средним значением полного электронного содержания ионосферы и средне-квадратическим отклонением его мелкомасштабных флуктуаций, а также тонкого слоя, в котором происходят соударения электронов с ионами и нейтральными молекулами. Преимуществом разработанной модели по сравнению с известными является возможность определения полного электронного содержания ионосферы и его статистических характеристик методом пассивного мониторинга с использованием двухчастотного приемника спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС. На основе описания процесса распространения радиоволн через неоднородную ионосферу методами построения многолучевых моделей и методами описания дифракции волны на неоднородностях ионосферы установлены аналитические зависимости мощности принимаемого сигнала, а также регулярной и флуктуационной составляющих коэффициента передачи (по мощности) трансionoсферного

канала от несущей частоты передаваемых сигналов, статистических характеристик флуктуаций полного электронного содержания ионосферы и среднего значения эффективной частоты соударения электронов.

Ключевые слова: системы спутниковой связи, мелкомасштабные неоднородности, полное электронное содержание, мощность сигнала, поле волны, сцинтилляции, поглощение, коэффициент передачи

Введение

Известно [1-4], что возмущения ионосферы, сопровождаемые образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей (ММН) электронной концентрации (ЭК), обуславливают возникновение сцинтилляций (то есть амплитудно-фазовых флуктуаций, замираний) волны на входе приемника (ПРМ) систем спутниковой связи (ССС). Это вызывает существенное снижение их помехоустойчивости. Зачастую одновременно с образованием ММН возрастает и среднее (фоновое) значение ЭК ионосферы. Это обуславливает дополнительное поглощения волны в ионосфере и, как следствие, снижение мощности принимаемого сигнала и помехоустойчивости СССР [5-8].

Чтобы спрогнозировать влияние сцинтилляций и поглощения волны в ионосфере на помехоустойчивость СССР, необходимо разработать структурно-физическую модель трансionoсферного канала связи (КС) с целью установления зависимости передаточной функции КС (определяющей мощность принимаемого сигнала) от физических параметров неоднородной ионосферы (среднего значения ЭК и их флуктуаций в ММН).

Также известен [4; 9] общий подход к построению структурно-физической модели трансionoсферного 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) для описания одного и того же процесса распространения радиоволн (РРВ) через неоднородную ионосферу в радиолинии «Искусственный спутник Земли (ИСЗ) – Земля». Отождествление полученных данными методами результатов позволило найти зависимости статистических характеристик (СХ) передаточных функций трансionoсферного КС с замираниями (сцинтилляциями) от флуктуаций ЭК (ΔN) в ММН ионосферы и несущей частоты (f_0) передаваемого сигнала. В частности, установлены зависимости $\{\alpha_p^2, 2\sigma_\epsilon^2\} = \psi(f_0, \bar{N}_m, \beta_{\Delta N})$ регулярной α_p^2 и флуктуационной $2\sigma_\epsilon^2$ составляющих коэффициента передачи трансionoсферного КС по мощности от несущей частоты f_0 передаваемого сигнала, среднего значения ЭК на высоте

$h = h_m$ максимума ионизации $\bar{N}_m \equiv \bar{N}(h_m)$ и интенсивности ММН ионосферы на этой высоте $\beta_{\Delta N} \equiv \beta_{\Delta N}(h_m)$.

Первым недостатком полученных в [4; 9] результатов является то, что функциональная зависимость $\{\alpha_p^2, 2\sigma_\epsilon^2\} = \psi(f_0, \bar{N}_m, \beta_{\Delta N})$ позволяет оценить влияние на коэффициент передачи трансionoсферного КС таких физических параметров ионосферы (\bar{N}_m и $\beta_{\Delta N}$), которые трудно определить с помощью традиционных средств ионосферного мониторинга: например, вертикального зондирования [10]. В настоящее время наиболее совершенными являются средства GPS-мониторинга ионосферы, то есть пассивного мониторинга ионосферы с использованием двухчастотного приемника спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS/ГЛОНАСС [11-12]. Они позволяют определить полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы N_T и его статистические характеристики: среднее значение $\bar{N}_T \sim \bar{N}_m$ и среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\Delta N_T} \sim \bar{N}_m \beta_{\Delta N}$ мелкомасштабных флуктуаций [13]. Однако ранее они не использовались для построения структурно-физической модели трансionoсферного КС.

Вторым недостатком известного подхода [4; 9] является то, что он не учитывает дополнительные потери при распространении радиоволн из-за поглощения (ослабления) в возмущенной ионосфере. Считается, что при использовании в СССР несущих частот $f_0 \geq 1$ ГГц поглощением в ионосфере можно пренебречь [5-6]. Однако при использовании в СССР пониженных несущих частот (до $f_0 = 30...100$ МГц) и частот диапазона $f_0 = 137...400$ МГц, используемых низкоорбитальными СССР (типа ORBCOMM, Гонец-Д1М и др.), увеличение среднего значения ПЭС $\bar{N}_T \sim \bar{N}_m$ ионосферы при ее возмущениях может приводить к существенному уменьшению мощности P_r принимаемого сигнала из-за поглощения волны в ионосфере, характеризуемого множителем $W_n^2 \sim f_0 / \bar{N}_T \bar{v}_s$, где \bar{v}_s – среднее значение эффективной частоты соударений электронов (ЭЧСЭ). Вследствие этого составляющие коэффициента передачи трансionoсферного КС по мощности (α_p^2 и $2\sigma_\epsilon^2$) должны зависеть как от СКО $\sigma_{\Delta N_T} \sim \bar{N}_m \beta_{\Delta N}$ мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы, так и от его среднего

значения $\bar{N}_T \sim \bar{N}_m$ и среднего значения ЭЧСЭ: $\{\alpha_p^2, 2\sigma_\epsilon^2\} = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3)$.

Целью настоящей статьи является разработка методики установления зависимости $\{\alpha_p^2, 2\sigma_\epsilon^2\} = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3)$ регулярной α_p^2 и флуктуационной $2\sigma_\epsilon^2$ составляющих коэффициента передачи трансionoсферного КС по мощности от несущей частоты f_0 передаваемого сигнала ССС, значений СКО мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ (определяющих проявление ее сцинтилляционных свойств), а также средних значений полного электронного содержания \bar{N}_T и эффективной частоты соударений электронов \bar{v}_3 в ионосфере (определяющих проявление ее поглощающих свойств).

Для достижения поставленной цели необходимо сначала разработать модель изменения электронной концентрации в неоднородной ионосфере с учетом указанных параметров ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3$). Затем на основе модели ионосферы разработать математическую модель трансionoсферного канала связи с учетом поглощения и сцинтилляций, которая позволит найти зависимость составляющих коэффициента передачи этого канала связи ($\alpha_p^2, 2\sigma_\epsilon^2$) от несущей частоты сигнала и указанных параметров ионосферы ($f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3$).

Модель пространственного изменения электронной концентрации в неоднородной ионосфере

Согласно [4; 14-15], изменение ЭК в слоях ионосферы (D, E, F) с мелкомасштабными неоднородностями (см. рисунок 1а) описывается совокупностью изменения по высоте z ее среднего значения $\bar{N}(z)$ и пространственных ($\rho = x, y$) флуктуаций $\Delta N(\rho, z)$:

$$\begin{aligned} N(\rho, z) &= \bar{N}(z) + \Delta N(\rho, z) = \\ &= \bar{N}(z) [1 + \Delta N(\rho, z) / \bar{N}(z)]. \end{aligned} \quad (1)$$

На рисунке 1б показано изменение по высоте ЭЧСЭ $v_3(z)$ в слоях (D, E, F) ионосферы. Связь между высотным изменением ЭК ионосферы и ее ПЭС (или интегральной ЭК) при распространении радиоволн через всю ее толщину z_u определяется полным количеством электронов в столбе сечением 1 м^2 вдоль пути распространения [15]:

$$N_T = \int_{z_u} N(z) dz. \quad (2)$$

В соответствии с (1) ПЭС неоднородной ионосферы будет описываться совокупностью среднего значения \bar{N}_T и пространственных флуктуаций $\Delta N_T(\rho)$:

$$\begin{aligned} N_T(\rho) &= \int_{z_u} N(\rho, z) dz = \int_{z_u} [\bar{N}(z) + \Delta N(\rho, z)] dz = \\ &= \int_{z_u} \bar{N}(z) dz + \int_{z_u} \Delta N(\rho, z) dz = \bar{N}_T + \Delta N_T(\rho). \end{aligned} \quad (3)$$

Качественный анализ (3) и рисунка 1а позволяет сделать вывод о том, что среднее значение ПЭС ионосферы \bar{N}_T определяется в основном средней ЭК на высоте $z = z_m$ максимума ионизации в слое F ионосферы: $\bar{N}_F \approx \bar{N}(z_m) \gg \bar{N}_E \gg \bar{N}_D$.

В этом случае выражение для \bar{N}_T в (3) можно представить в виде формулы для площади прямоугольника (см. заштрихованную область на рисунке 1а), эквивалентной площади под кривой $\bar{N}(z)$ [15]:

$$\begin{aligned} \bar{N}_T &= \int_{z_u} \bar{N}(z) dz = \int_0^{z_3} \bar{N}(z_m) dz = \\ &= z_3 \bar{N}(z_m) = z_3 \bar{N}_m, \end{aligned} \quad (4)$$

то есть в виде однородного по высоте слоя с эквивалентной толщиной $z_3 < z_u$ и средней ЭК, равной $\bar{N}(z_m) = \bar{N}_m$.

Проявление сцинтилляционных свойств ионосферы определяется пространственными флуктуациями ПЭС в ММН ионосферы $\Delta N_T(\rho) = \int_{z_u} \Delta N(\rho, z) dz$.

Чтобы установить связь статистических характеристик мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы с флуктуациями ее ЭК $\Delta N(\rho, z)$, необходимо второе слагаемое в (3) записать в следующем виде [9]:

$$\begin{aligned} \Delta N_T(\rho) &= \int_{z_u} \Delta N(\rho, z) dz = \\ &= \int_0^{z_3} \Delta N(\rho, z = z_m) dz, \end{aligned} \quad (5)$$

имеющем физический смысл флуктуаций ПЭС в слое (см. рисунок 2) с эквивалентной толщиной z_3 и ЭК, равной \bar{N}_m , со статистически однородно размещенными внутри него неоднородностями с флуктуациями ЭК, соответствующими высоте максимума ионизации $\Delta N(\rho, z_m) > \Delta N(\rho, z)$.

Связь СКО флуктуаций ЭК на высоте $z = z_m$ максимума ионизации

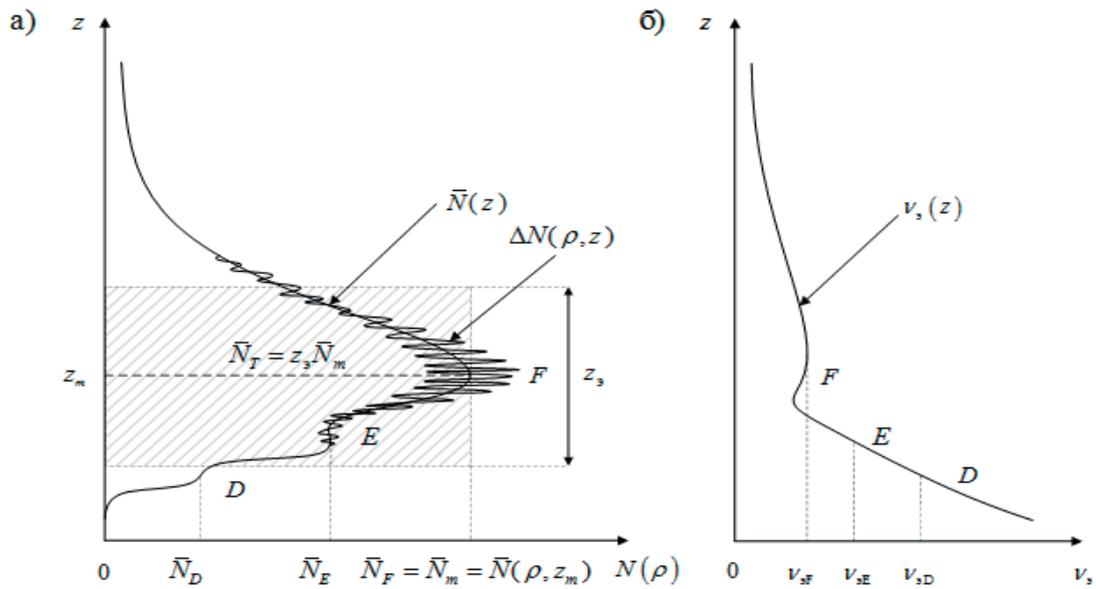


Рисунок 1. Изменение по высоте электронной концентрации ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями и эффективной частоты соударения электронов

$\sigma_{\Delta N}(z_m) = \left[\langle \Delta N(\rho, z = z_m) \rangle^2 \right]^{0,5}$ с величиной СКО ПЭС получена в виде [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta N_T} &= (\sqrt{\pi} l_s z_s)^{1/2} \sigma_{\Delta N}(z_m) = \\ &= (\sqrt{\pi} l_s z_s)^{1/2} \beta_{\Delta N} \bar{N}_m, \end{aligned} \quad (6)$$

где интенсивность мелкомасштабных неоднородностей

$$\begin{aligned} \beta_{\Delta N} &= \frac{\langle \Delta N(\rho, z)^2 \rangle^{1/2}}{\bar{N}(z)} = \frac{\sigma_{\Delta N}(z)}{\bar{N}(z)} = \\ &= \frac{\sigma_{\Delta N}(z_m)}{\bar{N}(z_m)} \approx const, \end{aligned} \quad (7)$$

характеризует отношение СКО флуктуаций ЭК $\sigma_{\Delta N}(z)$ к ее среднему значению $\bar{N}(z)$, которое практически не зависит от высоты z (см. рисунок 1а).

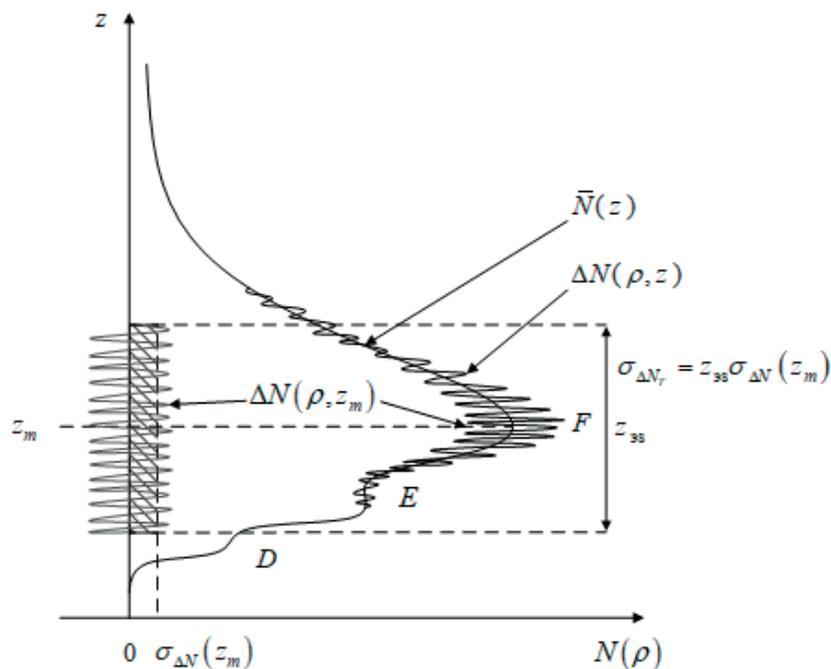


Рисунок 2. Изменение по высоте электронной концентрации ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями и флуктуации ее полного электронного содержания

Анализ выражения (6) показывает, что сомножитель $(\sqrt{\pi}l_s z_3)^{1/2} = z_{3s}$ можно рассматривать как эквивалентную толщину тонкого ($z_{3s} \ll z_3$) ионосферного слоя с расположенными внутри него статистически однородно по пространству (ρ, z) неоднородностями ЭК $\Delta N(\rho, z_m)$, соответствующими высоте $z = z_m$ максимума ионизации слоя F ионосферы. Эти неоднородности характеризуются нулевым математическим ожиданием $\langle \Delta N(\rho, z_m) \rangle = 0$ и постоянным СКО $\sigma_{\Delta N}(z_m) = \beta_{\Delta N} \bar{N}_m$. Данный тонкий слой полностью определяет мелкомасштабные флуктуации ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$, характеризующиеся нулевым средним значением $\langle \Delta N_T(\rho) \rangle = 0$ и постоянным СКО (6) $\sigma_{\Delta N_T} = (\sqrt{\pi}l_s z_3)^{0,5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_m = z_{3s} \sigma_{\Delta N}(z_m)$.

Для учета поглощения энергии волны при распространении в ионосфере необходимо дополнительно учесть результаты, полученные в [7-8]. Согласно [6], коэффициент поглощения мощности волны в ионосфере (W_{II}^2) зависит от интегрального произведения изменений по высоте z среднего значения ЭК ионосферы $\bar{N}(z)$ и ЭЧСЭ $v_3(z)$, показанных на рисунках 1а и 1б:

$$W_{II}^2 = \exp\left(-2,7 \cdot 10^{-3} f_0^{-2} \int_0^{z_{II}} \bar{N}(z) v_3(z) dz\right) \leq 1. \quad (8)$$

Качественный анализ рисунков 1а и 1б показывает, что основной вклад в результирующее значение интегрального произведения $\int_0^{z_{II}} \bar{N}(z) v_3(z) dz$ вносит слой F ионосферы, поскольку ЭК на его высотах намного выше, чем в нижних слоях D и E : $\bar{N}_F \approx \bar{N}(z_m) \gg \bar{N}_E \gg \bar{N}_D$.

Это подтверждается данными, приведенными в [7-8], согласно которым интегральное произве-

дение ЭК и ЭЧСЭ в слое F лишь немного меньше, чем во всей ионосфере. На основании этого, а также предположения о том, что основной вклад в ПЭС ионосферы (4) вносит слой F , выражение (8) можно представить в виде [8]

$$W_{II}^2 = \exp\left(-2,7 \cdot 10^{-3} \bar{v}_3 \bar{N}_T \operatorname{cosec} \alpha_T / f_0^2\right) \leq 1, \quad (9)$$

где α_T – угол РРВ через ионосферу; $\bar{v}_3 = v_{3F} \cdot \delta v_{3F} = 2,78 \cdot 10^3 [c^{-1}]$ – среднее значение ЭЧСЭ в ионосфере, отличающееся от значения $v_{3F} = 2 \cdot 10^3 [c^{-1}]$ ЭЧСЭ в слое F на величину поправочного коэффициента $\delta v_{3F} \approx 1,39$. Это обусловлено тем, что ЭЧСЭ в слое F меньше, чем в нижних слоях ионосферы $v_{3F} < v_{3E} < v_{3D}$ (см. рисунок 1б).

На основании изложенного комплексную модель распределения ЭК неоднородной ионосферы по высоте z и пространству $\rho = (x, y)$ можно представить в виде (см. рисунок 3) совокупности трех слоев:

- однородного слоя с эквивалентной толщиной z_3 , расположенного на высоте $z = z_m$ максимума ионизации и характеризующегося средним значением ПЭС (4) $\bar{N}_T = z_3 \bar{N}_m$;
- расположенного на его нижней границе тонкого слоя, где происходят столкновения электронов с ионами и нейтральными молекулами с эффективной частотой \bar{v}_3 ;
- тонкого слоя неоднородностей, расположенного на высоте $z = z_m$ максимума ионизации, который описывается статистическими характеристиками пространственных флуктуаций ПЭС $\Delta N_T(\rho)$: нулевым математическим ожиданием $\langle \Delta N_T(\rho) \rangle = 0$ и постоянным СКО (6) $\sigma_{\Delta N_T} = (\sqrt{\pi}l_s z_3)^{0,5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_m = z_{3s} \sigma_{\Delta N}(z_m)$.

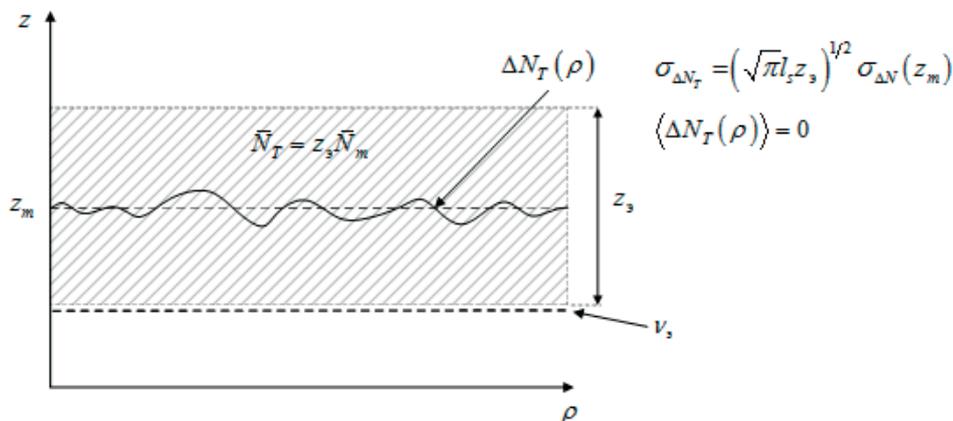


Рисунок 3. Комплексная модель ионосферы в виде совокупности толстого однородного слоя электронной концентрации, тонкого слоя ее неоднородностей и тонкого слоя, в котором происходят соударения электронов

Достоинством данной модели является использование для ее описания параметров неоднородной ионосферы \bar{N}_T и $\sigma_{\Delta N_T}$, которые можно определить методом пассивного мониторинга с помощью двухчастотного приемника СРНС без трудоемких предварительных расчетов эквивалентной толщины ионосферы z_s , среднего значения максимальной ЭК \bar{N}_m , характерного (среднего) размера мелкомасштабных неоднородностей l_s , СКО флуктуаций ЭК ионосферы на высоте максимума ионизации $\sigma_{\Delta N}(z_m)$ и интенсивности неоднородностей $\beta_{\Delta N} = \sigma_{\Delta N}(z_m)/\bar{N}(z_m)$.

Кроме того, она точнее отражает физический смысл известного [1] утверждения, что основной вклад в среднее значение ПЭС ($\bar{N}_T \sim \bar{N}(z_m)$) и его флуктуации ($\sigma_{\Delta N_T} \sim \sigma_{\Delta N}(z_m)$) вносит ЭК ионосферы в слое F на высоте максимума ионизации z_m .

Математическая модель трансionoсферного канала связи с учетом поглощения и сцинтилляций волны

Проанализируем процесс распространения радиоволн при передаче комплексного сигнала

$$\dot{s}_t(t) = \dot{S}_t \exp(j\omega_0 t) = \sqrt{P_t} \exp[j(\omega_0 t + \Phi_t)] \quad (10)$$

с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$, мощностью P_t и начальной фазой Φ_t при вертикальном ($\alpha_T = 90^\circ$) РРВ

(см. рисунок 4) от ИСЗ (то есть передатчика (ПРД) ССС) до ПРМ ССС через неоднородную ионосферу, описываемую комплексной моделью распределения ЭК (см. рисунок 3). Здесь $S_t = \sqrt{P_t}$ и $\dot{S}_t = S_t \exp(j\Phi_t)$ – амплитуда и комплексная амплитуда передаваемого сигнала соответственно. Распространение волны происходит в пределах области пространства (ρ), ограниченной первой зоной Френеля.

В соответствии с рисунком 4 методика разработки математической модели трансionoсферного канала связи с учетом поглощения и многолучевого распространения должна в общем случае включать следующие этапы:

- определение комплексного поля $\dot{u}(t, z_0)$ плоской волны на некотором расстоянии z_0 от ИСЗ, соответствующем верхней границе ионосферы;
- определение поля волны $\dot{u}(t, z_m)$ в плоскости тонкого неоднородного слоя (фазового экрана, расположенного на высоте $z = z_m$, соответствующей расстоянию $z_0 + 0,5z_s$ от ИСЗ);
- определение поля волны $\dot{u}(t, z = z_0 + z_s)$ на нижней границе ионосферы (на расстоянии $z_0 + z_s$ от ИСЗ) с учетом поглощения (W_n^2);
- определение поля волны $\dot{u}(t, z)$ на входе приемной антенны (на расстоянии $z = z_0 + z_s + z_1$ от ИСЗ);
- определение комплексного сигнала $\dot{s}_r(t)$ на входе ПРМ ССС;

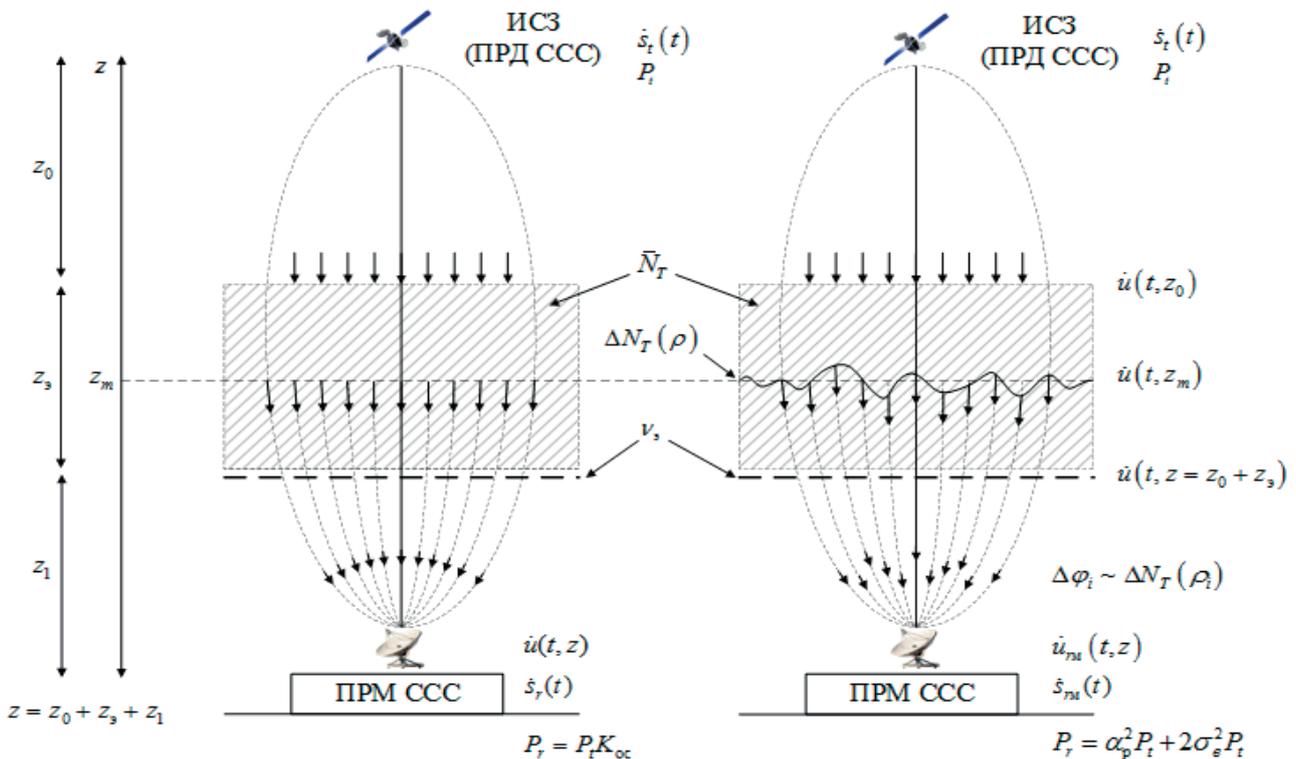


Рисунок 4. Процесс распространения радиоволн через ионосферу

– определение мощности сигнала P_r на входе ПРМ ССС.

В самом простом случае РРВ через однородную ионосферу (см. рисунок 4а), когда флуктуации ПЭС отсутствуют $\Delta N_T(\rho) = 0$, все участки плоского амплитудно-фазового фронта волны в пределах первой зоны Френеля приходят в точку размещения приемной антенны практически синфазно. При этом комплексное поле плоской волны на входе приемной антенны будет описываться выражением [4; 9]:

$$\begin{aligned} \dot{i}(t, z) &= A(z) \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \varphi(z)]\} = \\ &= \sqrt{P_t K_{oc}(z)} \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \varphi(z)]\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $A(z) = \sqrt{P_t K_{oc}(z)}$ – амплитуда во фронте волны; $K_{oc}(z) = 60 G_t \eta_t (4\pi/\lambda_0)^2 W_0^2(z) W_{\Pi}^2$ – коэффициент ослабления мощности (P_t) излучаемой волны длиной $\lambda_0 = c/f_0$ с учетом коэффициента усиления G_t и КПД η_t передающей антенны ИСЗ на расстоянии z в свободном пространстве, $W_0^2(z) = (\lambda_0/4\pi z)^2$ и из-за поглощения в ионосфере, который определяется согласно (9) при $\alpha_T = 0$ как

$$W_{\Pi}^2 = \exp(-2,7 \cdot 10^{-3} \bar{v}_3 \bar{N}_T / f_0^2).$$

Фазовый фронт волны, приходящий на вход приемной антенны, описывается выражением

$$\varphi(z) = \varphi_0(z) + \bar{\varphi}(z) = \omega_0 z / c + 80,8\pi \bar{N}_T / cf_0, \quad (12)$$

где $\varphi_0(z) = \omega_0 z / c$ – набег фазы в свободном пространстве на расстоянии z , причем $\bar{\varphi}(z) = \bar{\varphi} = 80,8\pi \bar{N}_T / cf_0$ – запаздывание фазового фронта волны с частотой f_0 в ионосфере со средним значением ПЭС \bar{N}_T .

В соответствии с выражением (11) комплексный сигнал на выходе приемной антенны (на входе ПРМ ССС) описывается выражением

$$\begin{aligned} \dot{s}_r(t) &= \dot{i}_r(t) I_{r0} = \sqrt{P_t K_{oc}(z)} I_{r0}^2 \times \\ &\times \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \bar{\varphi}]\} = \\ &= \sqrt{P_t K_{oc}} \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \bar{\varphi}]\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $I_{r0} = (\lambda_0/4\pi) \sqrt{G_r \eta_r / 60}$ – постоянный множитель нормированной функции раскрыва приемной антенны с коэффициентом усиления G_r и КПД η_r , а коэффициент ослабления мощности передаваемого сигнала (P_t) на входе ПРМ определяется как

$$K_{oc} = K_{oc}(z) I_{r0}^2 = G_t \eta_t G_r \eta_r W_0^2(z) W_{\Pi}^2 = K_0^2 W_{\Pi}^2, \quad (14)$$

где $K_0^2 = G_t \eta_t G_r \eta_r W_0^2(z) = G_t \eta_t G_r \eta_r (c/4\pi z f_0)^2$ – коэффициент ослабления мощности сигнала при вертикальном РРВ в свободном пространстве.

Тогда мощность принимаемого сигнала P_r в трансionoсферном КС при вертикальным РРВ ($\alpha_T = 90^\circ$) с учетом множителя поглощения волны в ионосфере (9) описывается выражением

$$\begin{aligned} P_r &= |\dot{s}_r(t)|^2 = P_t K_{oc} = P_t K_0^2 W_{\Pi}^2 = P_t G_t \eta_t G_r \eta_r \times \\ &\times (c/4\pi z f_0)^2 \exp(-2,7 \cdot 10^{-3} \bar{v}_3 \bar{N}_T / f_0^2). \end{aligned} \quad (15)$$

Проанализируем случай вертикального распространения передаваемого сигнала (10) через неоднородную ионосферу с учетом проявления не только поглощения, но и сцинтилляций (см. рисунок 4б).

В этом случае необходимо учитывать наличие флуктуаций ПЭС в ионосфере $\Delta N_T(\rho) > 0$, то есть тонкого слоя неоднородностей, расположенного на высоте $z = z_m$ максимума ионизации. Наличие такого слоя (называемого фазовым экраном) обуславливает появление искажений в фазовом фронте волны:

$$\varphi(z_m, \rho) = \varphi_0(z_m) + \bar{\varphi}(z_m) + \Delta\varphi(z_m, \rho). \quad (16)$$

Третье слагаемое в (16) характеризует флуктуации (искажения) фазового фронта волны в горизонтальной плоскости $\rho = (x, y)$ на выходе тонкого неоднородного слоя ионосферы ($z = z_m$) относительно среднего значения $\bar{\varphi}(z_m)$, которые обусловлены флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$ и определяются согласно [4; 9] как

$$\Delta\varphi(z_m, \rho) = 80,8\pi \Delta N_T(\rho) / cf_0. \quad (17)$$

В соответствии с (16) комплексное поле волны на выходе тонкого неоднородного слоя ионосферы ($z = z_m$) описывается выражением

$$\begin{aligned} \dot{i}(t, z_m, \rho) &= \sqrt{P_t K_{oc}(z_m)} \times \\ &\times \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \bar{\varphi}(z_m) - \Delta\varphi(z_m, \rho)]\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение (18) можно записать в виде

$$\dot{i}(t, z_m, \rho) = \dot{i}(t, z_m) \exp[-j\Delta\varphi(z_m, \rho)], \quad (19)$$

где $\dot{i}(t, z_m) = \sqrt{P_t K_{oc}(z_m)} \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \bar{\varphi}(z_m)]\}$ – комплексное поле плоской волны при распространении в однородном ионосферном слое, а множитель $\exp[-j\Delta\varphi(z_m, \rho)]$ характеризует флуктуации (искажения) фазового фронта выходной волны (17), определяемые флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$.

Дальнейшее РРВ за ионосферным слоем до точки размещения приемной антенны ($\rho = 0, z$) можно представить в виде множества ($i=1 \dots M$) элементарных лучей, образуемых элементарными участками $(x_i, y_i) = \rho_i$ на поверхности фронта волны на выходе неоднородного ионосферного слоя ($z = z_m$).

В соответствии с (19), комплексное поле элементарной волны (луча), образованной элементарным участком ρ_i на поверхности фазового экрана, описывается выражением

$$\dot{u}(t, z_m, \rho_i) = \dot{u}(t, z_m) \exp[-j\Delta\varphi(z_m, \rho_i)]. \quad (20)$$

Поскольку РРВ от тонкого неоднородного слоя ионосферы ($z = z_m$) до точки приема ($\rho = 0, z$) происходит (см. рисунок 4б) в однородном ионосферном слое и свободном пространстве на расстоянии $z = 0, 5z_3 + z_1$, то выражение для поля i -го луча в точке приема (точнее, на входе приемной антенны) будет отличаться от (20) только дополнительным ослаблением амплитуды (из-за поглощения волны в однородном ионосферном слое и ее ослабления в свободном пространстве) и набегом фазы на расстоянии $z = z_0 + z_3 + z_1$, при неизменности других параметров луча. Поэтому комплексное поле i -го луча на входе приемной антенны будет описываться выражением вида

$$\dot{u}(t, z, \rho_i) = \dot{u}(t, z) \exp[-j\Delta\varphi(z_m, \rho_i)], \quad (21)$$

где $\dot{u}(t, z) \sim \sqrt{K_{oc}(z)} \sim W_0(z)W_n$ – комплексное поле волны на входе приемной антенны при отсутствии в ионосфере неоднородностей (11).

Очевидно, что относительные отклонения фазы в различных участках фронта волны на выходе ионосферы (17) определяют относительные фазовые сдвиги приходящих лучей $\Delta\varphi(z_m, \rho_i) = \Delta\varphi_i$, поэтому выражение (21) можно записать в виде

$$\dot{u}(t, z, \rho_i) = \dot{u}(t, z) \exp[-j\Delta\varphi_i] = \dot{u}(t, z) \dot{e}_{in}, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{e}_{in} &= \exp[-j\Delta\varphi(z_m, \rho_i)] = \exp[-j\Delta\varphi_i] = \\ &= \exp[-j80,8\pi\Delta N_T(\rho_i)/cf_0] \end{aligned} \quad (23)$$

– комплексный нормированный коэффициент передачи трансionoсферного КС по i -му лучу.

Поскольку на вход приемной антенны приходит не один, а множество ($i=1 \dots M$) элементарных лучей (волн), то поле принимаемой волны в трансionoсферном КС с многолучевостью можно описать суммой элементарных полей:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{rM}(t, z) &= \sum_{i=1}^M \dot{u}(t, z, \rho_i) = \sum_{i=1}^M \dot{u}(t, z) \exp(-j\Delta\varphi_i) = \\ &= \dot{u}(t, z) \sum_{i=1}^M \dot{e}_{in} = \dot{u}(t, z) \dot{e}_n, \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{e}_n &= \sum_{i=1}^M \dot{e}_{in} = \sum_{i=1}^M \exp(-j\Delta\varphi_i) = \\ &= \sum_{i=1}^M \exp(-j80,8\pi\Delta N_T(\rho_i)/cf_0) \end{aligned} \quad (25)$$

– нормированное значение комплексного коэффициента передачи трансionoсферного КС с многолучевостью, обусловленной мелко-масштабными флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho_i)$; $\dot{u}(t, z) \sim W_0(z)W_n$ – комплексное поле принимаемой волны в трансionoсферном КС с учетом поглощения в ионосфере при отсутствии многолучевости, определяемое согласно (11).

Полученное выражение (24) для комплексного поля многолучевой волны на входе приемной антенны $\dot{u}_{rM}(t)$ позволяет определить аналогично (13) комплексный сигнал на выходе приемной антенны (на входе приемника ССС) в виде

$$\begin{aligned} \dot{s}_{rM}(t) &= \dot{u}_{rM}(t, z) \cdot I_{r0} = \sqrt{P_t K_{oc}} \times \\ &\times \exp\{j[(\omega_0 t + \Phi_t) - \bar{\varphi}]\} \sum_{i=1}^M \dot{e}_{in} = \dot{s}_r(t) \dot{e}_n. \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь $\dot{s}_r(t) \sim K_{oc} \sim W_n$ – комплексный сигнал на входе ПРМ с учетом поглощения без многолучевости определяется согласно (13) и (14), а влияние многолучевости учитывается нормированным коэффициентом передачи \dot{e}_n , определяемым согласно (25).

В соответствии с (26) мощность принимаемого сигнала в многолучевом трансionoсферном КС определяется как

$$\begin{aligned} P_{rM} &= |\dot{s}_{rM}(t)|^2 = |\dot{s}_r(t) \dot{e}_n|^2 = P_t K_{oc} |\dot{e}_n|^2 = \\ &= P_r |\dot{e}_n|^2 = P_r W_{cu}^2 = P_t G_t \eta_t G_r \eta_r W_0^2(z) W_n^2 W_{cu}^2, \end{aligned} \quad (27)$$

где $P_r = P_t K_{oc}$ – мощность принимаемого сигнала в трансionoсферном КС с учетом поглощения волны (W_n^2) – определяется согласно (15), а квадрат модуля нормированного коэффициента передачи трансionoсферного многолучевого КС $|\dot{e}_n|^2 = W_{cu}^2$ по своему физическому смыслу соответствует множителю ослабления мощности принимаемого сигнала из-за сцинтилляций (W_{cu}^2) при распространении волны через ионосферу с ММН ЭК.

В соответствии с (25) этот множитель сцинтилляций принимаемого сигнала связан с флуктуациями ПЭС в ММН ионосферы как

$$W_{\text{сц}}^2 = |\dot{\epsilon}_n|^2 = \left| \sum_{i=1}^M \exp(-j\Delta\varphi_i) \right|^2 = \left| \sum_{i=1}^M \exp(-j80,8\pi\Delta N_T(\rho_i)/cf_0) \right|^2. \quad (28)$$

Поскольку множитель сцинтилляций принимаемого сигнала $W_{\text{сц}}^2$ является случайной величиной, то обычно в многолучевых КС определяют среднюю мощность $\bar{P}_{\text{рм}}$ сигнала на входе ПРМ (27), которая в общем случае содержит регулярную $P_{\text{р}}$ и флуктуационную $P_{\text{фл}}$ составляющие [16]:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{рм}} &= P_t K_{\text{ос}} |\dot{\epsilon}_n|^2 = P_t K_{\text{ос}} \overline{W_{\text{сц}}^2} = \\ &= \alpha_p^2 P_t + 2\sigma_\varphi^2 P_t = P_{\text{р}} + P_{\text{фл}}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $\alpha_p^2 = K_{\text{ос}} |\dot{\epsilon}_n|^2$ и $2\sigma_\varphi^2 = K_{\text{ос}} |\dot{\epsilon}_n|^2$ – регулярная и флуктуационная составляющие коэффициента передачи КС.

Обычно эти составляющие определяются экспериментально и вклады в их значения факторов многолучевости и поглощения не разделяются. Кроме того, в рамках методов построения многолучевых моделей транссионосферного КС получить из выражения (28) для $\overline{W_{\text{сц}}^2}$ аналитическую зависимость $\overline{W_{\text{сц}}^2} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}/f_0)$ множителя ионосферных сцинтилляций от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$) и выбора несущей частоты в ССС (f_0) невозможно. Для решения этой задачи необходимо использовать методы статистической радиофизики.

Полученное выражение (24) для комплексного поля волны на входе приемной антенны $\dot{u}_{\text{рм}}(t)$ позволяет также получить выражение для средней интенсивности $\bar{I}_r(z)$ поля принимаемой волны. В общем виде оно определяется как

$$\bar{I}_r(z) = M \left\{ \dot{u}_{\text{рм}}(t) u_{\text{рм}}^*(t) \right\} = M \left\{ |\dot{u}_{\text{рм}}(t)|^2 \right\},$$

где \bar{x} и $M \{x\}$ – обозначения математического ожидания x , а x^* – комплексно-сопряженная функция x . Тогда подстановка в это выражение (24) с учетом (11) дает

$$\begin{aligned} \bar{I}_r(z) &= P_t K_{\text{ос}}(z) M \left\{ \dot{\epsilon}_n \dot{\epsilon}_n^* \right\} = P_t K_{\text{ос}}(z) M \left\{ |\dot{\epsilon}_n|^2 \right\} = \\ &= P_t K_{\text{ос}}(z) \overline{|\dot{\epsilon}_n|^2} = P_t K_{\text{ос}}(z) M \left\{ W_{\text{сц}}^2 \right\}, \end{aligned} \quad (30)$$

где $M \left\{ |\dot{\epsilon}_n|^2 \right\} = \overline{|\dot{\epsilon}_n|^2} = \overline{W_{\text{сц}}^2}$ – дисперсия модуля комплексного нормированного коэффициента передачи транссионосферного КС (25), или средняя мощность ионосферных сцинтилляций $M \left\{ W_{\text{сц}}^2 \right\}$.

В рамках статистической радиофизики регулярная $I_{\text{р}}$ и флуктуационная $I_{\text{фл}}$ составляющие средней интенсивности ($\bar{I}_r = I_{\text{р}} + I_{\text{фл}}$) поля волны в точке приема ($\rho = 0, z$) при транссионосферном РРВ определяются методом фазового экрана согласно выражениям [4; 9; 17]:

$$I_{\text{р}}(z) = A_0^2(z) \exp(-\sigma_\varphi^2); \quad (31)$$

$$I_{\text{фл}}(z) = A_0^2(z) \left[1 - \exp(-\sigma_\varphi^2) \right], \quad (32)$$

где $A_0(z)$ – амплитуда волны при распространении на расстояние z в отсутствие сцинтилляций, а σ_φ – СКО флуктуаций фазы (17) $\Delta\varphi(z_m, \rho_i) = \Delta\varphi_i$ во фронте волны на выходе неоднородного ионосферного слоя (фазового экрана), определяемое СКО $\sigma_{\Delta N_T}$ флуктуаций ПЭС $\Delta N_T(\rho)$ ионосферы как [4]

$$\sigma_\varphi = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T}/cf_0. \quad (33)$$

Выражения (31) и (32) связаны между собой зависимостью

$$\begin{aligned} \bar{I}_r(z) &= I_{\text{р}}(z) + I_{\text{фл}}(z) = A_0^2(z) \exp(-\sigma_\varphi^2) + \\ &+ A_0^2(z) \left[1 - \exp(-\sigma_\varphi^2) \right] = A_0^2(z), \end{aligned} \quad (34)$$

которая наглядно показывает, что возрастание СКО флуктуаций фазы во фронте монохроматической волны на выходе неоднородного ионосферного слоя (33) $\sigma_\varphi \sim \sigma_{\Delta N_T}$ приводит в результате дифракционных эффектов к уменьшению регулярной составляющей интенсивности поля данной волны в точке приема (31) $I_{\text{р}}$ и пропорциональному увеличению интенсивности ее флуктуационной составляющей (32) $I_{\text{фл}}$. Сумма же их, определяющая среднее значение интенсивности поля принимаемой волны (30) и (34) \bar{I}_r , остается величиной постоянной $A_0^2(z)$, не зависящей от σ_φ , что соответствует закону сохранения энергии.

Очевидно, что интенсивность поля принимаемой волны в отсутствие сцинтилляций (когда согласно (33) при $\sigma_{\Delta N_T} = 0$ значение $\sigma_\varphi = 0$) определяется как

$$\bar{I}_r(z) = A_0^2(z) = P_t K_{\text{ос}}(z). \quad (35)$$

Поэтому с учетом (35) выражение (34) для средней интенсивности поля принимаемой волны при транссионферном распространении и наличии сцинтилляций можно записать в виде

$$\begin{aligned} \bar{I}_r(z) = I_p(z) + I_{\text{фл}}(z) = P_t K_{\text{ос}}(z) \exp(-\sigma_\varphi^2) + \\ + P_t K_{\text{ос}}(z) [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)] = P_t K_{\text{ос}}(z). \end{aligned} \quad (36)$$

Сравнительный анализ выражений (36) и (30) позволяет определить среднюю мощность ионосферных сцинтилляций:

$$\overline{W_{\text{сц}}^2} = |\overline{\dot{\epsilon}_n}|^2 = \exp(-\sigma_\varphi^2) + [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)] = 1. \quad (37)$$

Выражение (37) устанавливает аналитическую зависимость регулярной и флуктуационной составляющих мощности ионосферных сцинтилляций $\overline{W_{\text{сц}}^2} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}/f_0)$ от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ через СКО флуктуаций фазы на выходе ионосферного фазового экрана (33) $\sigma_\varphi = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T}/cf_0$.

Согласно (36) и (37) среднюю мощность сигнала на выходе приемной антенны (на входе приемника) при наличии ионосферного поглощения и сцинтилляций можно с учетом (26), (27) и (30) выразить через среднюю интенсивность поля принимаемой волны как

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{рм}} = M\left\{\left|\dot{s}_{\text{рм}}(t)\right|^2\right\} = M\left\{\left|\dot{u}_{\text{рм}}(t)I_{r_0}\right|^2\right\} = \bar{I}_r(z)I_{r_0}^2 = \\ = P_t K_{\text{ос}}(z) \overline{W_{\text{сц}}^2} I_{r_0}^2 = P_t K_{\text{ос}}(z) I_{r_0}^2 \exp(-\sigma_\varphi^2) + \\ + P_t K_{\text{ос}}(z) I_{r_0}^2 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)]. \end{aligned} \quad (38)$$

Это выражение с учетом равенства (14) $K_{\text{ос}}(z)I_{r_0}^2 = K_0^2 W_{\text{п}}^2$ можно записать в более удобном виде

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{рм}} = P_t K_0^2 W_{\text{п}}^2 \exp(-\sigma_\varphi^2) + \\ + P_t K_0^2 W_{\text{п}}^2 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)]. \end{aligned} \quad (39)$$

Сравнительный анализ (39) и (29) позволяет определить регулярную α_p^2 и флуктуационную $2\sigma_b^2$ составляющие коэффициента передачи транссионферного многолучевого КС в следующем виде:

$$\begin{aligned} \alpha_p^2 = K_0^2 W_{\text{п}}^2 \exp(-\sigma_\varphi^2) = \\ = K_0^2 \exp(-2,7 \cdot 10^{-3} \bar{v}_3 \bar{N}_T / f_0^2) \times \\ \times \exp\left[-(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0)^2\right]; \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} 2\sigma_b^2 = K_0^2 W_{\text{п}}^2 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)] = \\ = K_0^2 \exp(-2,7 \cdot 10^{-3} \bar{v}_3 \bar{N}_T / f_0^2) \times \\ \times \left\{1 - \exp\left[-(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0)^2\right]\right\}, \end{aligned} \quad (41)$$

где $K_0^2 = G_t \eta_t G_r \eta_r W_0^2(z) = G_t \eta_t G_r \eta_r (c/4\pi z f_0)^2$.

В более общем случае наклонного ($\alpha_T \leq 90^\circ$) РРВ через ионосферу в выражениях (40) и (41) необходимо дополнительно учесть увеличение пути РРВ в $\text{cosec } \alpha_T$ раз, что приведет к замене $\sigma_{\Delta N_T}$, \bar{N}_T и z соответственно на $\sigma_{\Delta N_T} \text{cosec } \alpha_T$, и $\bar{N}_T \text{cosec } \alpha_T$ и $z \text{cosec } \alpha_T$.

Таким образом, искомая функциональная зависимость $\{\alpha_p^2, 2\sigma_b^2\} = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3)$ регулярной α_p^2 и флуктуационной $2\sigma_b^2$ составляющих коэффициента передачи транссионферного КС по мощности от несущей частоты f_0 передаваемого сигнала ССС и параметров ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$, \bar{N}_T , \bar{v}_3), определяющих проявление ее сцинтилляционных и поглощающих свойств, получена в виде совокупности выражений (40) и (41).

Выводы

Представлена комплексная модель распределения ЭК неоднородной ионосферы по высоте z и пространству $\rho = (x, y)$, которую можно представить в виде (см. рисунок 3) совокупности трех слоев:

- однородного слоя с эквивалентной толщиной z_3 , расположенного на высоте $z = z_m$ максимума ионизации и характеризующегося средним значением ПЭС (4) $\bar{N}_T = z_3 \bar{N}_m$;

- расположенного на его нижней границе тонкого слоя, где происходят только столкновения электронов с ионами и нейтральными молекулами с эффективной частотой \bar{v}_3 ;

- тонкого слоя неоднородностей, расположенного на высоте $z = z_m$ максимума ионизации, который описывается статистическими характеристиками пространственных флуктуаций ПЭС $\Delta N_T(\rho)$: нулевым математическим ожиданием $\langle \Delta N_T(\rho) \rangle = 0$ и постоянным СКО

$$\sigma_{\Delta N_T} = (\sqrt{\pi} l_s z_3)^{0,5} \beta_{\Delta N} \bar{N}_m, \quad \text{– см. (6).}$$

На основе анализа процесса РРВ (см. рисунок 4) от ИСЗ к ПРМ ССС через неоднородную ионосферу, описываемую разработанной комплексной моделью (см. рисунок 3) изменения ее ЭК по высоте и пространству, получены выражения (40) и (41), определяющие зависимости регулярной

α_p^2 и флуктуационной $2\sigma_6^2$ составляющих коэффициента передачи трансионосферного многолучевого КС по мощности от несущей частоты f_0 передаваемого сигнала, среднего значения ПЭС ионосферы \bar{N}_T и СКО его мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T}$.

Комплексная модель распределения ЭК неоднородной ионосферы и полученная зависимость $\{\alpha_p^2, 2\sigma_6^2\} = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \bar{N}_T, \bar{v}_3)$ описывают структурно-физическую модель спутникового радиоканала с учетом поглощения и сцинтилляций волны в ионосфере. Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках выполнения проекта № 18 07 01020.

Литература

1. Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proceedings of the IEEE. – 1982. – Vol. 70. – No 4. – P. 324-360. doi: 10.1109/PROC.1982.12313
2. Bogusch R.L., Gulgliano F. W., Knepp D.L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links // Proceedings of the IEEE. – 1983. – Vol. 71. – No 6. – P. 754-767. doi: 10.1109/PROC.1983.12662.
3. Rino C.L. The theory of scintillation with applications in remote sensing. Wiley-IEEE Press. 2011. – 230 p.
4. 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.
5. Черенкова Л.Е., Чернышов О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
6. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. – 155 с.
7. Сенокосова А. В., Солчатов М. Э., Стрекалов А. В., Чипига А. Ф. Математическая модель ионосферы для оценки поглощения радиоволн в системах космической связи // Инфо-коммуникационные технологии. – 2006. – Т.4. – № 1. – С. 77-82.
8. Чипига А.Ф., Дагаев Э.Х., Сенокосова А.В., Шевченко В.А. Модель ионосферы для расчета поглощения волны в системах спутниковой связи // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 4. – С. 97-101.
9. Маслов О.Н, Пашинцев В.П. Структурно – физическая модель трансионосферного канала связи // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т.5. – № 3. – С. 19-25.
10. Пашинцев В.П., Омельчук А.В., Коваль С.А., Галушко Ю.И. Метод определения величины интенсивности неоднородностей по данным ионосферного зондирования // Двойные технологии. – 2009. – № 1. – С. 38-41.
11. Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A.J. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012. Myrtle Beach, South Carolina, 2012. – P. 265-273.
12. 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 // Proceedings of ION NTM 2006. Monterey, 2006. – P. 1036 – 1047.
13. Pashintsev V.P., Peskov M.V., Smirnov V.M., Smirnova E.V., Tynyankin S.I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Vol. 62. – Issue 12, December 2017. – P. 1336-1342.
14. Pashintsev, V.P., Kolosov, L.V., Tishkin, S.A., Smirnov, A.A. Influence of the Ionosphere on Signal Detection in Space Communications Systems // Journal of Communications Technology and Electronics. – 1999. – №44 (2). – P. 132-139.
15. Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Исследование статических и спектральных трансатмосферных радиосигналов УКВ – СВЧ диапазона // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 2.
16. Кирилов Н.Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Сов. радио, 1971. – 256 с.
17. Рытов С.М. Кравцов Ю.Н., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. – 464 с.

Получено 20.09.2018

Пашинцев Владимир Петрович, д.т.н., профессор Кафедры информационной безопасности автоматизированных систем (ИБАС) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. +7 (8652) 95-65-46. E-mail: pashintsevp@mail.ru

Шевченко Вячеслав Анатольевич, к.т.н., с.н.с., начальник отдела Главного управления развития информационных и телекоммуникационных технологий Министерства обороны РФ. Тел. +7-916-138-87-96. E-mail: shevv67@mail.ru

Песков Марк Владимирович, старший преподаватель Кафедры ИБАС СКФУ. Тел. +7 (8652) 95-65-46. E-mail: mvpeskov@hotmail.com

Полежаев Алексей Викторович, с.н.с. 27 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны РФ. Тел. +7-999-771-44-91. E mail: avp095x@mail.ru

STRUCTURAL-PHYSICAL MODEL OF A SATELLITE RADIO CHANNEL WITH ABSORPTION AND SCINTILLATION OF WAVES IN THE IONOSPHERE

Pashintsev V.P.¹, Shevchenko V.A.², Peskov M.V.1, Polezhaev A.V.³

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

²Main Department of Development of Information and Telecommunication Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

³27 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

E-mail: mvpeskov@hotmail.com

The structural and physical model of the satellite radio channel taking into account the absorption and scintillation of the wave in the ionosphere is developed on the basis of the complex model of changes of the electron concentration in the inhomogeneous ionosphere. It is presented as a combination of a thick homogeneous layer and a thin layer of irregularities characterized by the average value of the total electron content of the ionosphere and the standard deviation of its small-scale fluctuations, as well as a thin layer in which electrons collide with ions and neutral molecules. The advantage of the developed model in comparison with the known model is the ability to determine the total electron content of the ionosphere and its statistical characteristics by passive monitoring using a double-frequency receiver of satellite radio navigation systems GPS/GLONASS. Based on the description of the radio waves propagation through the inhomogeneous ionosphere and using methods of constructing multipath models and methods of describing the wave diffraction on the irregularities of the ionosphere, analytical dependences of the received signal power, as well as regular and fluctuation components of the transmission coefficient of the transionospheric channel on the carrier frequency of the transmitted signals, statistical characteristics of the fluctuations of the total electron content of the ionosphere and the average effective frequency of the collision of electrons are established.

Keywords: *satellite communication systems, small-scale irregularities, total electron content, signal power, wave field, scintillation, absorption, transmission coefficient*

DOI: 10.18469/ikt.2018.16.4.02

Pashintsev Vladimir Petrovich, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Street, Stavropol, 355009, Russian Federation; Professor of the Department of Automatic Systems Information Security, Doctor of Technical Science. Tel. +78652956546. E mail: pashintsevp@mail.ru

Shevchenko Vyacheslav Anatolievich, Main Department of Development of Information and Telecommunication Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; head of department, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher. Tel. +7-916-138-87-96. E-mail: shevv67@mail.ru

Peskov Mark Vladimirovich, North Caucasus Federal University; 1 Pushkin Street, Stavropol, 355009, Russian Federation; Senior Teacher of the Department of Automatic Systems Information Security. Tel. +78652956546. E mail: mvpeskov@hotmail.com

Polezhaev Aleksey Viktorovich, 27 Central Research Institute of The Ministry of Defence of the Russian Federation, 1 Horoshevskiy Street, Moscow, 123007, Russian Federation; Senior Researcher. Tel. +79997714491. E mail: avp095x@mail.ru

References

1. Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no 4. pp. 324-360. doi: 10.1109/PROC.1982.12313
2. Bogusch R.L., Gulgliano F. W., Knepp D.L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links. *Proceedings of the IEEE*, 1983, vol. 71, no 6., pp. 754-767. doi: 10.1109/PROC.1983.12662.
3. Rino C.L. *The theory of scintillation with applications in remote sensing*. Wiley-IEEE Press, 2011. 230 p.
4. Maslov O.N, Pashincev V.P. Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomekhoustojchivost' sistem kosmicheskoy svyazi [Models of transionospheric radio channels and noise immunity of space communication systems]. *Prilozhenie k zhurnalu «Infokommunikacionnye tekhnologii»*, vol. 4. Samara, PSUTI Publ., 2006. 357 p.
5. Cherenkova L.E., Chernyshov O.V. *Rasprostranenie radiovoln* [Radiowave propagation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984. 272 p.
6. Kolosov M.A., Armand N.A., Yakovlev O.I. *Rasprostranenie radiovoln pri kosmicheskoy svyazi* [Radiowaves propagation in space communication]. Moscow, Svyaz Publ., 1969. 155 p.
7. Senokosova A. V., Solchatov M. E., Strekalov A. V., Chipiga A. F. Matematicheskaya model ionosfery dlya ochenki pogloshcheniya radiovoln v sistemah kosmicheskoy svyazi [A mathematical model of the ionosphere for assessment of the absorption of radio waves in space communication systems]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2006, vol 4, no 1, pp. 77-82.
8. Chipiga A.F., Dagaev E.H., Senokosova A.V., Shevchenko V.A. Model ionosfery dlya rascheta pogloshcheniya volny v sistemah sputnikovoy svyazi [Ionosphere model for calculation of wave absorption in satellite communication systems]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2011, no. 4, pp. 97-101.
9. Maslov O.N, Pashincev V.P. Strukturno-fizicheskaya model transionosfernogo kanala svyazi [Structural-physical model of the transionospheric communication channel]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2007, vol. 5, no 3, pp. 19-25.
10. Pashincev V.P., Omelchuk A.V., Koval S.A., Galushko Y.I. Metod opredeleniya velichiny intensivnosti neodnorodnostej po dannym ionosfernogo zondirovaniya [Method for determining the value of intensity irregularities in the ionospheric sounding data]. *Dvojnye tekhnologii*, 2009, no. 1, pp. 38-41.
11. Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A.J. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring. *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012*, Myrtle Beach, South Carolina, 2012, pp. 265-273.
12. 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. *Proceedings of ION NTM 2006*, Monterey, 2006. pp. 1036-1047.
13. Pashintsev V.P., Peskov M.V., Smirnov V.M., Smirnova E.V., Tynyankin S.I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 12, pp. 1336-1342.
14. Pashintsev, V.P., Kolosov, L.V., Tishkin, S.A., Smirnov, A.A. Influence of the Ionosphere on Signal Detection in Space Communications Systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1999, vol. 44, no. 2, pp. 132-139.
15. Ryzhkina T.E., Fedorova L.V. Issledovanie staticheskikh i spektralnykh transatmosfernykh radiosignalov UKV – SVCH diapazona [Investigation of static and spectral transatmospheric radio signals of VHF-microwave range]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2001, no 2.
16. Kirilov N.E. *Pomekhoustojchivaya peredacha soobshchenij po linejnym kanalam so sluchajno izmenyayushchimisya parametrami* [Noise-resistant transmission of messages through linear channels with randomly changing parameters]. Moscow, Sov. radio Publ., 1971. 256 p.
17. Rytov S.M. Kravcov Y.N., Tatarskij V.I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast 2.* [Introduction to statistical Radiophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 464 p.

Received 20.09.2018