

**Исследование частотной дисперсии для трансionoсферных радиолиний с использованием оценок полного электронного содержания**

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова, А. А. Кислицын

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, RyabovaMI@volgatech.net*

*Рассмотрены эффекты частотной дисперсии в трансionoсферных радиоканалах. Сформулированы общие положения теории частотной дисперсии набега фазы. Получены выражения для полосы когерентности широкополосных каналов и критического значения полного электронного содержания. Представлены экспериментальные результаты суточных ходов и критических значений ТЕС для среднеширотной ионосферы.*

*The paper presents the findings of the research into the effects of frequency dispersion in transionoсpheric radio channels. We discussed the general framework of the theory of frequency dispersion of the phase taper. The equations for the coherence band of the wideband channels and the critical value of the total electronic content (TEC) were obtained. The experimental results of daily variations and critical TEC values for the mid-latitude ionosphere are presented.*

**Введение**

В настоящее время актуальной является задача расширения полосы частот в системах космической связи и радиолокации Земли из космоса, решению которой препятствует существующая проблема преодоления частотной дисперсии среды распространения – ионосферы [1-6]. Преодоление этой проблемы невозможно без комплексного исследования эффекта частотной дисперсии на новом уровне. Частотная дисперсия связана с зависимостью от частоты фазовой скорости распространения в среде волнового колебания. Различия в фазовых скоростях спектральных компонент сигналов может приводить к нарушениям фазо-частотных характеристик (ФЧХ) спектра и к искажениям сигнала, вплоть до полного его «разрушения» [7, 8]. Было показано, что дисперсия обусловлена зависимостью от частоты показателя преломления среды. Трансионoсферное распространение возможно на частотах, превышающих критическую частоту ионосферы. Поэтому теория трансionoсферного распространения имеет свои особенности, связанные с этим условием. Они проявляются в том, что для определения показателя преломления необходимо провести интегральную оценку электронной концентрации вдоль пути от передатчика к приемнику. При больших значениях высоты ионосферы задача сводится к определению полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) [9–11]. Научная идея заключается в адаптации значений полного электронного содержания для восстановления ФЧХ тракта. Однако следует понимать, что профиль концентрации ионосферы испытывает различные вариации (суточные, сезонные, связанные с циклом солнечной активности и случайными возмущениями профиля). Очевидно, что они приводят к соответствующим пространственно-временным вариациям ТЕС и, как следствие, к вариациям параметров частотной дисперсии. Таким образом, условия распространения сигнала значительно усложняются и накладываются ограничения на применимую полосу частот [12]. Решение данной проблемы заключается в нахождении критического значения полного электронного содержания  $N_{t_{kr}}$  ионосферы, в пределах которого для конкретных систем космической связи отсутствуют дисперсионные искажения.

**Цель работы** – проведение комплексных исследований частотной дисперсии трансionoсферных каналов на основе определения критического значения полного электронного содержания ионосферы.

**Определение параметров частотной дисперсии, полосы когерентности через полное электронное содержание**

Подробная методика для определения общих положений параметров частотной дисперсии для канала с ограниченной полосой частот  $B_{ch}$  и средней частотой  $\bar{f} = (f_1 + f_2)/2$  представлены в работах [13–16]. Для трансionoсферных широкополосных сигналов, при исследовании более сильных искажений дополнительно необходимо провести анализ выражений для показателя преломления и набега фазы. Учитывая, что трансionoсферное распространение возможно, когда частота волны превышает плазменную частоту максимума ионосферы, выражение для показателя преломления представить в виде разложения в ряд Тейлора по степеням отношения

$$\left( \frac{\omega_p^2(z)}{\omega^2} \right):$$

$$n(z) = \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_p^2(z)}{\omega^2} \right)} \approx 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{f_p^2(z)}{f^2} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{f_p^2(z)}{f^2} \right)^2 - \frac{1}{16} \left( \frac{f_p^2(z)}{f^2} \right)^3 \dots =$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{k \cdot N_t}{f^2} \right) - \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{k \cdot N_t}{f^2} \right)^2 - \frac{1}{16} \cdot \left( \frac{k \cdot N_t}{f^2} \right)^3$$
(1)

где  $N_t$  – полное электронное содержание, TECU ( $1TECU = 10^{16}$ ,  $i^{-2}$ ,  $k=80,5$ ).

Тогда для набега фазы при трансionoсферном распространении будем иметь формулу:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{c} \int [\omega \cdot n(\omega, z)] dz \approx$$

$$\approx \omega \int_s \frac{dz}{c} - \left[ \frac{1}{f} \frac{\pi k}{\tilde{n}_s} \int N_e(z) dz + \frac{1}{f^3} \frac{\pi k^2}{4c} \int N_e^2(z) dz + \frac{1}{f^5} \frac{\pi k^3}{8c} \int N_e^3(z) dz + \dots \right] =$$

$$= \omega \int_s \frac{dz}{c} - \left[ \frac{\alpha_1}{f} + \frac{\alpha_2}{f^3} + \frac{\alpha_3}{f^5} \right],$$
(2)

Определив первые три производные от фазы по частоте в точке  $\bar{f}$ , получим характеристики частотной дисперсии:

$$\tau_g(f) = \frac{d\varphi}{d\omega}(f) = \frac{1}{2\pi} \left[ 2\pi \int_s \frac{dz}{c} + \frac{\alpha_1}{f^2} + 3 \frac{\alpha_2}{f^4} + 5 \frac{\alpha_3}{f^6} + \dots \right]$$
(3a)

$$s(f) = \frac{d\tau_g}{df}(f) = -\frac{1}{\pi} \left[ \frac{\alpha_1}{f^3} + 6 \frac{\alpha_2}{f^5} + 15 \frac{\alpha_3}{f^7} + \dots \right]$$
(3b)

$$v(f) = \frac{d^2 \tau_g}{df^2}(f) = \frac{3}{\pi} \left[ \frac{\alpha_1}{f^4} + 10 \frac{\alpha_2}{f^6} + 35 \frac{\alpha_3}{f^8} + \dots \right] \quad (3c)$$

На фиксированной частоте  $f = \bar{f}$  числа:  $\tau_g(\bar{f})$ ,  $s(\bar{f})$ ,  $v(\bar{f})$  являются параметрами фазовой дисперсии канала на этой частоте.

В работах [13,14, 17] показано, что для систем космической связи при решении практических задач достаточно выполнения условия  $\bar{f} > \sqrt[3]{\alpha_2}$  (высокочастотное (ВЧ) приближение). При соблюдении этого условия фазовая дисперсия первого  $\tau_g(\bar{f})$ , второго  $s(\bar{f})$ , и третьего  $v(\bar{f})$  порядка будут иметь вид:

$$\tau_g(\bar{f}) = \int \frac{dz}{s \cdot c} + \frac{\alpha_1}{2\pi\bar{f}^2} = \int \frac{dz}{s \cdot c} + \frac{k}{2 \cdot c \cdot \bar{f}^2} \cdot N_t \quad (4a)$$

$$s(\bar{f}) = -\frac{1}{\pi} \frac{\alpha_1}{\bar{f}^3} = -\frac{k}{c \cdot \bar{f}^3} \cdot N_t \quad (4b)$$

$$v(\bar{f}) = \frac{3}{\pi} \frac{\alpha_1}{\bar{f}^4} = \frac{3 \cdot k}{c \cdot \bar{f}^4} \cdot N_t \quad (4c)$$

Из выражений 4(a) – 5 (c) видно, что при фиксированном значении частоты параметры дисперсии в транссионосферном радиоканале определяются значениями полного электронного содержания ионосферы.

Кроме того, в случае дисперсии второго порядка водится понятие полосы когерентности (ПК). Это полоса частот на границах которой набег нелинейной составляющей фазы частотной характеристики канала равен 1 радиан. Согласно (4b) для ПК транссионосферного радиоканала будем иметь формулу:

$$B_k = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot |s|}} = \sqrt{\frac{4 \cdot c \cdot \bar{f}^3}{\pi k N_t}} \quad (5)$$

Таким образом, можно выделить два подхода к решению задачи исследованию дисперсионных искажений в транссионосферном радиоканале.

Первая сводится к нахождению рабочих частот и полосы канала, которые не будут подвержены дисперсионным искажениям при конкретном значении ПЭС в заданный момент времени.

Важное значение представляет задача, когда при заданной полосе канала  $B_{ch}$  и несущей частоте необходимо определить значение критического ТЕС  $N_{tkr}$  дисперсионной характеристики при котором искажения минимальны. Нетрудно показать, что критический ТЕС  $N_{tkr}$ , в случае дисперсии второго порядка будет равен:

$$N_{tkr} = \frac{c \cdot \bar{f}^3}{k \cdot B_{ch}^2} \quad (6)$$

Из выражение (6) видно, что значение  $N_{tkr}$  главным образом определяется рабочей частотой и полосой канала.

### Результаты натуральных экспериментов

Для задачи нахождения критического значения ПЭС выбирались десять дней для летнего (июнь) и зимнего (декабрь) периодов при спокойной ионосфере (Кр-индекс  $< 3$ , солнечные вспышки отсутствовали). В качестве транссионосферных были выбраны каналы с несущими частотами  $f_p=260$  МГц (система Гонец); б) радиоканал с  $f_p=300$  МГц (системы Гонец, Сигнал); в) радиоканал с  $f_p=1200$  МГц (системы ГЛОНАСС, GPS); г)

радиоканал с  $f_p=1600$  МГц (системы Globalstar, Ellipso, Odyssey, ГЛОНАСС, GPS). На первом этапе были построены суточные ходы ТЕС по средним значениям за десять дней для каждого сезона и соответствующие доверительные интервалы (сплошная линия, рис. 1 – 2). Критическое значение ТЕС, вычисленное по (6) для различных трансионосферных радиоканалов представлены пунктирными линиями.

При этом исследовались широкополосные полосы частот с коэффициентами широкополосности  $\eta$  равными 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

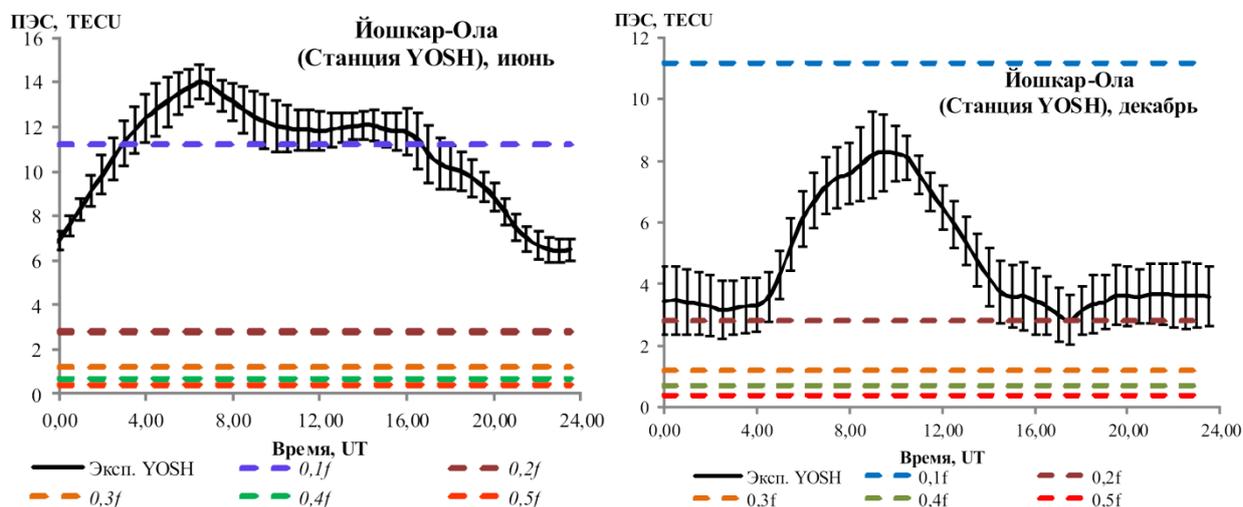


Рис. 1. Суточный ход ТЕС (сплошная линия) и критические значения ТЕС (пунктирные) для различных полос каналов при  $f_p=300$  МГц.

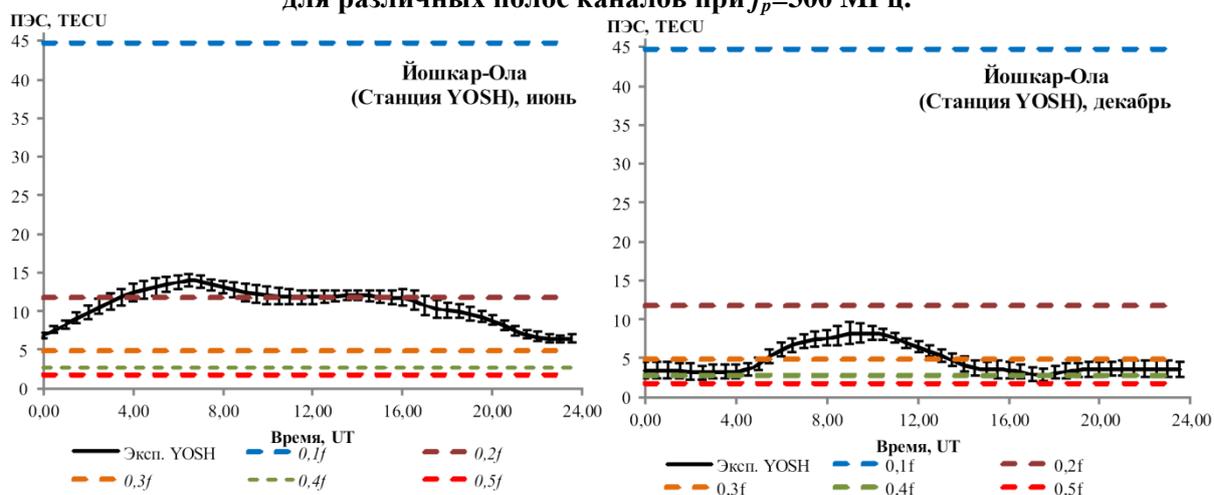


Рис. 2. Суточный ход ТЕС (сплошная линия) и критические значения ТЕС (пунктирные) для различных полос каналов при  $f_p=1200$  МГц.

Результаты критических значений ТЕС для выбранных частот и полос представлены в табл. 1

Таблица 1. Результаты критических значений ТЕС.

Рабочая частота, МГц	Критическое значение ТЕС, $10^{-16} \text{ м}^{-2}$				
	$0,1f$	$0,2f$	$0,3f$	$0,4f$	$0,5f$
260	9,7	2,4	1,1	0,61	0,38
300	11,18	2,8	1,2	0,7	0,45

1200	44,72	11,18	4,9	2,8	1,8
1600	59	14	6,6	3,7	2,4

Таким образом, на основании таблицы 3 и полученных суточных ходов полного электронного содержания можно сделать следующие выводы:

- для частоты  $f_p = 260$  МГц в летний период практически на всех исследуемых полосах частот сигналы будут подвержены дисперсионным искажениям. Лишь для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (26 МГц) возможна безискаженная передача сигнала (кроме интервала времени с 2.00-19.00 ч.). Оптимальной полосой можно считать  $B_{ch} = 0,07 \cdot f_p$  (18 МГц). В зимний период для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (26 МГц) дисперсионные искажения на протяжении всего дня не сказываются на распространение сигнала. Для всех остальных случаев полосы канала будут дисперсны;

- для частоты  $f_p = 300$  МГц в летний период практически на всех исследуемых полосах частот сигналы будут подвержены дисперсионным искажениям. Лишь для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (30 МГц) возможна безискаженная передача сигнала (кроме интервала времени с 2.00-19.00 ч). Оптимальной полосой можно считать  $B_{ch} = 0,08 \cdot f_p$  (24 МГц).. В зимний период для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (30 МГц) дисперсионные искажения на протяжении всего дня не сказываются на распространение сигнала. Для всех остальных случаев полосы канала будут дисперсионны;

- для частоты  $f_p = 1200$  МГц в летний период для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (120 МГц) в течение всего дня дисперсионные искажения отсутствуют; для  $B_{ch} = 0,2 \cdot f_p$  (240 МГц) искажения не влияют на радиосигнал с 0.00-3.00 и с 15.00-0.00. В зимний период полосы  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  и  $B_{ch} = 0,2 \cdot f_p$  можно считать бездисперсионными;

- для частоты  $f_p = 1600$  МГц в летний и зимний периоды для  $B_{ch} = 0,1 \cdot f_p$  (160 МГц) и  $B_{ch} = 0,2 \cdot f_p$  (320 МГц) в течение всего дня дисперсионные искажения отсутствуют. Также дисперсионные искажения будут минимальными для  $B_{ch} = 0,3 \cdot f_p$  (480 МГц) кроме дневного времени с 6.00-12.00.

### Заключение

В случае дисперсии второго порядка получено выражение для определения критического значения ПЭС. Экспериментальным путём определены критические значения ПЭС для различных радиоканалов для среднеширотной ионосферы, а также рассчитаны полосы когерентности при максимальных и минимальных значениях ПЭС для частот, удовлетворяющих условию ВЧ-приближения.

*Работа выполнена при поддержке гранта министерства образования и науки РФ: № 3.4074.2017/ПЧ и грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 16-37-60068; № 17-07-00799; № 18-07-01377; № 18-37-00079.*

### Литература

1. Propagation of broadband HF signals in a medium with nonlinear dispersion / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. N. Mikheeva, N. V. Ryabova, M. I. Ryabova // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. Vol. 60, No. 11. Pp. 1205—1214.
2. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Искажения широкополосного радиосигнала в ионосфере, вызванные нелинейной частотной дисперсией // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2 (18). С. 5-15.

3. Cannon, P. S. Characterization and modeling of the HF communications channel/ P. S. Cannon, M. J. Angling, B. Lundborg. // Review of Radio Science: 1999-2002. –2002. - P. 597–622.
4. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Искажения широкополосного радиосигнала в ионосфере, вызванные нелинейной частотной дисперсией // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2 (18). С. 5-15.
5. Wideband Scattering Functions for HF Ionospheric Propagation Channels / V. E. Gherm, N. N. Zernov, B. Lundborg et al. // Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics. - 2001. – V.63. - P.1489-1497.
6. Dmitry V. Ivanov, Vladimir A. Ivanov, Natalia V. Ryabova, Aidar R. Nasibullin, Denis A. Vedenkin, Maria I. Ryabova, Andrei A. Chernov, Vladimir V. Ovchinnikov, "Fiber material dispersion effect on a matched compression of an optical pulse with frequency modulation ", Proc. SPIE 10342, Optical Technologies for Telecommunications 2016, 103420E, (6 April 2017); doi: 10.1117/12.2270754
7. K.G. Budden Radiowaves in the ionosphere, Cambridge: Univ. press, 1961.
8. P. S. Cannon, M. J. Angling, B. Lundborg, "Characterization and modeling of the HF communications channel", Review of Radio Science: 1999-2002. Pp. 597–622, 2002.
9. V.M. Smirnov, E.V.Smirnova, S.I. Tynyankin, V.N. Skobelkin, A.P. Mal'kovskii, "Hardware-software complex for the Earth ionosphere monitoring in a real-time mode", Heliogeophysical research, no 2(4), pp. 32-38, 2013.
10. Yu.V. Yasyukevich, A.A. Mylnikova, A.S. Polyakova, "Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data", Results in Physics, vol. 5, pp. 32–33, 2015. Doi:10.1016/j.rinp.2014.12.006.
11. E.L. Afraimovich, N.P.Minko, S.V.Fridman. "Spectral and dispersion characteristics of traveling ionospheric disturbances as deduced from transionospheric sounding data", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 56, Iss. 11, September, pp. 1431-14461994.
12. Терентьев М.В., Чубинский Н.П. Компенсация дисперсионных искажений, ограничивающих полосу частот космической радиолинии / VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд. -полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 419-423.
13. Ivanov D., Ivanov V., Ryabova N., Ryabova M., Kislitsin A., Chernov A., Konkin N. Dispersive Distortions of System Characteristics of Broadband Transionospheric Radio Channels // Journal of Applied Engineering Science 15(2017)4, 487? P. 500-555 doi:10.5937/jaes15-11784
14. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Кислицын А.А., Рябова М.И., Катков Е.В. Эффекты частотной дисперсии группового запаздывания при трансионосферном распространении радиоволн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Том.20, № 3, ч.2. С. 31-36.
15. Иванов В.А., Иванов Д.В., Михеева Н.Н., Рябова М.И. Исследование регулярной и стохастической дисперсии в ионосферных широкополосных высокочастотных радиоканалах // Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 10. С. 678-686.
16. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Мальцев А.В. Адаптивное обнаружение и выделение широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией при сжатии его в частотной области // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 8. С. 34-45.

17. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябова М.И., Кислицын А.А. Определение параметров частотной дисперсии трансионосферного радиоканала // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59 № 12-2. С. 105-108.