

## **Модели распространения цифровых сигналов по транссионсферным радиолиниям**

Л.Е. Назаров, В.В. Батанов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1.  
E-mail: levnaz2018@mail.ru*

*Приведены описания моделей распространения и искажений цифровых сигналов по транссионсферным радиолиниям со свойством частотной дисперсии. Рассмотрен метод снижения искажений цифровых сигналов при их приеме с использованием глобальной одночастотной модели земной ионосферы Клобушара.*

*Ключевые слова: транссионсферные радиолинии, ионосфера, цифровые сигналы, искажения*

## **Models of digital signal propagation over transionospheric radio links**

L.E. Nazarov, V.V. Batanov

*Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Moscow oblast Vvedensky Sq. 1*

*Descriptions of models of propagation and distortion for digital signals over transionospheric radio links with the property of frequency dispersion are given. A method for reducing distortion of digital signals during their reception using Klobuchar's global single-frequency model of the earth's ionosphere is considered*

*Keywords: transionospheric radio links, ionosphere, digital signals, distortions*

### **Введение**

Ионосфера является неоднородной дисперсионной средой распространения, которая обуславливает фазо-частотные и амплитудно-частотные искажения цифровых сигналов при их распространении [1]. Искажения сигналов при применении корреляционной обработки при приеме цифровых сигналов обуславливают наличие энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве и заключаются в двух факторах [1-3]:

- происходит временное рассеяние сигналов при распространении по ионосферной линии;
- изменяется огибающая сигналов по отношению к огибающей исходного сигнала.

Наряду с аддитивными канальными помехами теплового происхождения эти искажения являются основными факторами снижения надежности передачи информации. Искажения огибающих сигналов (искажения фазо-частотных и амплитудно-частотных характеристик) обуславливают возникновение помех межсимвольной и межканальной интерференций.

В изотропном случае (без учета магнитного поля Земли) при нормальном падении плоской волны с частотой  $f$  на среду с неоднородной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon(z, f)$  и распространяющейся по оси  $z$  с граничным условием  $E(0, f)$  при  $z = 0$  уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2 E(z, f)}{dz^2} + \frac{(2\pi)^2 f^2}{c^2} \varepsilon(z, f) E(z, f) = 0. \quad (1)$$

При условии  $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$  ( $\lambda$  - длина волны) решение задается приближением геометрической оптики:

$$E(z, f) = \text{Re} \left( E(0, f) \exp \left( -\frac{j2\pi f}{c} \int_0^z n(x, f) dx \right) \right), \quad (2)$$

$n(x, f) = \sqrt{\varepsilon(x, f)}$  - коэффициент преломления среды.

Для цифровых сигналов  $s(t)$  в виде последовательности радиоимпульсов длительностью  $T$  задача усложняется. В этом случае сигналы представляются суммой монохроматических волн, каждая приобретает фазовое  $\Delta\varphi(z, f)$  и амплитудное смещения за счет дисперсионных и поглощающих свойств ионосферы, что определяет искажение этих сигналов [2,3]. Эти искажения обуславливают возникновение интерференционных помех, представляющих случайный процесс, характеристики которого зависят от центральной частоты  $f_0$  и полосы частот  $\Delta F$  сигналов, от характеристик ионосферной линии.

Актуальной является проблема создания и развития моделей данного типа искажений сигналов и оценивания мощностей интерференционных помех для сигналов с увеличением их частотной полосы с использованием этих моделей.

### Модели ионосферы

Рассматриваемые модели ионосферы трансionoсферных радиолоний соответствуют непрерывной сферически-симметричной среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon(z, f) = 1 - f_p^2(z) / f^2. \quad (3)$$

Здесь  $f_p(z) = \sqrt{80.8 N_9(z)}$  - собственная частота ионосферы (кГц);

$N_9(z)$  (эл/см<sup>3</sup>) - электронная плотность ионосферы на высоте  $z$ .

Модель  $\varepsilon(z, f)$  является вещественной, т.е. поглощение радиоволн полагается малым. Это обуславливает лишь фазо-частотные искажения сигналов при распространении.

Для электронной плотности  $N_9(z)$  известен ряд моделей, например, однослойная модель [2-4]:

$$N_9(z) = \sqrt{\gamma \cdot \exp[-(\exp(b(z - z_M)) + bz)]}, \quad (4)$$

где  $\gamma, b$  - параметры;

$z_M$  - высота, на которой достигается максимальное значение электронной плотности  $N_M$ ;

Для дневного времени  $N_M \leq 10^6$  эл/см<sup>3</sup> при  $z_M = 300...350$  км,  $b = 0.01$ ,  $\gamma = 5 \cdot 10^{13}$ .

Искаженные сигналы при распространении представляются как результат линейной фильтрации передаваемых сигналов  $s(t)$ .

$$\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(j2\pi f t) df \quad (5)$$

где  $\dot{S}(f)$  - спектр сигнала  $s(t)$ ;

$\dot{H}(f, z) = \exp(j2\pi f \tau(z, f))$  - коэффициент передачи ионосферной линии, как линейного фильтра;

$$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{dx}{c(x, f)} - \text{фазовое время распространения гармонического сигнала с}$$

частотой  $f$  вдоль лучевой линии;

$$c(x, f) = c/n(x, f) - \text{фазовая скорость.}$$

Время распространения  $\tau(z, f)$  задается соотношением [2,3]:

$$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{n(x, f)(R_3 + x) dx}{c \sqrt{n^2(x, f)(R_3 + x)^2 - (n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \zeta_A))^2}} \quad (6)$$

$R_3$  - радиус Земли;

$\theta_A$  - видимый зенитный угол;

$\zeta_A$  - рефракционная поправка к  $\theta_A$ .

При упрощающем условии быстрого снижения электронной плотности  $N_3(z)$  от ее максимального значения  $N_M$  без учета угловой поправки  $\zeta_A$  вследствие ее малого значения, известно приближение [1]:

$$\tau(z, f) = \frac{4.03 \cdot 10^7}{c f^2} \frac{(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3 \sin \theta_A)^2}} \int_0^z N_3(x) dx + L_{AB} / c \quad (7)$$

Инверсный фильтр для трансионосферной радиоперели, включение которого при приеме цифровых сигналов компенсирует влияние интерференционных помех, задается коэффициентом передачи:

$$\dot{H}^{-1}(z, f) = \exp(-j\varphi(z, f)), \quad (8)$$

где фаза  $\varphi(z, f) = 2\pi f \tau(z, f)$ .

Результирующий сигнал  $s_r(t)$  с учетом инверсного фильтра определяется соотношением:

$$s_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}(f) \dot{H}^{-1}(z, f) \exp(j2\pi f t) df. \quad (9)$$

где  $\dot{Y}(f)$  - частотный спектр реализации  $y(t)$  на входе приемного устройства. Для вычисления параметра  $\tau(z, f)$  при формировании обратного фильтра необходимо знание относительно полного электронного содержания:

$$\alpha_{ПЭС} = \int_0^z N_3(x) dx \quad (10)$$

Для оценивания  $\alpha_{ПЭС}$  можно использовать метод на основе двухчастотных пилот-сигналов [3]. Для решения этой задачи можно применить альтернативную методику, которая основана на использовании глобальной одночастотной модели Клобушара

земной ионосферы, разработанной для повышения точности измерений навигационной системы GPS [5].

Глобальная одночастотная модель земной ионосферы Клобушара разработана для коррекции временных задержек  $\Delta\tau_{\text{и}}$  при распространении сигналов по трансionoсферной радиолинии по отношению к распространению в свободном пространстве [5]. Оценивание  $\tau(z, f)$  при использовании этой модели выполняется для задаваемых параметров:

- долгота  $\psi_{\text{ПР}}$  и широта  $\lambda_{\text{ПР}}$  приемной наземной станции;
- угол места  $E_{\text{КА}}$  и азимут  $A_{\text{КА}}$  космического аппарата GPS;
- время  $T_{\text{GPS}}$  (сек) в формате всемирного времени UT;
- коэффициенты  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ , передаваемые в альманахе навигационных сообщений либо по наземным линиям в формате REXIX.

Полученное значение  $\alpha_{\text{ПЭС}}$  дает возможность оценить временные задержки  $\tau(z, f)$  в частотной полосе  $\Delta F$  цифровых сигналов и сформировать инверсный фильтр  $\dot{H}^{-1}(z, f)$  для трансionoсферной радиолинии.

Пример расчета временной задержки сигналов  $\tau(z, f)$  при распространении по трансionoсферной радиолинии с использованием модели Клобушара приведен для пространственных координат приемной наземной станции и космического аппарата GPS  $\psi_{\text{ПР}} = 40^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda_{\text{ПР}} = 100^{\circ}$  з.д.,  $E_{\text{КА}} = 20^{\circ}$ , азимут  $A_{\text{КА}} = 210^{\circ}$ . Параметры модели Клобушара  $\alpha_0 = 3.82 \times 10^{-8}$ ,  $\alpha_1 = 1.49 \times 10^{-8}$ ,  $\alpha_2 = -1.79 \times 10^{-7}$ ,  $\alpha_3 = 0$ ,  $\beta_0 = 1.43 \times 10^5$ ,  $\beta_1 = 0$ ,  $\beta_2 = -3.28 \times 10^5$ ,  $\beta_3 = 1.13 \times 10^5$ . Для этих параметров модели  $\Delta\tau_{\text{и}}$  достигает 77.6 нс [10], соответствующее значение видимого зенитного угла  $\vartheta = 70^{\circ}$  и значение  $\alpha_{\text{ПЭС}}$ , вычисленное с использованием соотношения (9), равно  $6.48 \times 10^{13}$  эл/см<sup>2</sup>.

### Выводы

В докладе дается описание искажений фазо-частотных характеристик огибающих цифровых сигналов при их распространении по трансionoсферным радиолиниям. Искажения сигналов за счет дисперсионных свойств земной ионосферы обуславливают возникновение интерференционных помех, снижающих надежность передачи информации, и при использовании класса цифровых сигналов с увеличением частотной эффективности разрушающих работу спутниковых информационных систем. Суть методов обработки цифровых сигналов при приеме, снижающих искажающее влияние интерференционных помех, заключается в формировании обратного линейного фильтра с инверсным коэффициентом передачи относительно трансionoсферной радиолинии. В докладе приведены методы формирования обратного фильтра с использованием двух опорных частот и с использованием глобальной модели земной ионосферы Клобушара - дано описание этого метода, основанного на оценивании полного электронного содержания трансionoсферной радиолинии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

### Литература

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. Москва, Связь. 1969. 156 с.
2. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Анализ искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. №5. С.37-45.
3. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм приема широкополосных сигналов при распространении по трансionoсферным линиям. // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. № 4(38). С. 24–29. <https://doi.org/10.25210/jfop-2004-024029>
4. Electron density models and data for transionospheric radio propagation. P Series, Radiowave propagation. Report ITU-R P.2297-1. Electronic Publication, Geneva, 2019. 30 p.
5. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1987. V. 23. №3. P.325-331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>