

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО ТРАНСИОНОСФЕРНЫМ ЛИНИЯМ

Батанов В.В., Назаров Л. Е.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им.
В.А.Котельникова РАН

Введение

При распространении по транссионосферным линиям сигналы подвергаются искажениям за счет влияния земной ионосферы как дисперсионной среды [1-7]. Рассматривается модель искажений комплексной огибающей сигналов, обуславливающие возникновение интерференционных межсимвольных (МСИ) и межканальных (МКИ) помех в дополнение к тепловым помехам в виде аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). Помехи МСИ и МКИ снижают надежность передачи информации по данным линиям [8].

Актуальными являются проблемы оценивания деградации вероятностных характеристик при приеме сигналов относительно распространения в свободном пространстве и разработки и моделирования алгоритмов обработки сигналов при приеме, снижающих действие рассматриваемых интерференционных помех.

Постановка задачи

Методы анализа распространения сигналов по стационарным ионосферным линиям основаны на решении волнового уравнения с учетом магнитного поля Земли $\vec{H}(\vec{r})$ относительно электрического поля $E(z, f)$ плоской волны с частотой f [9]

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, f) - \text{grad div } \vec{E}(\vec{r}, f) + \frac{(2\pi f)^2 \vec{E}(\vec{r}, f)}{c^2} \left(\vec{\varepsilon}(\vec{r}, f) - j \frac{2}{f} \vec{\sigma}(\vec{r}, f) \right) = 0. \quad (1)$$

Здесь c - скорость света в свободном пространстве;
 $\vec{\varepsilon}(\vec{r}, f) = (\varepsilon_x(\vec{r}, f), \varepsilon_y(\vec{r}, f), \varepsilon_z(\vec{r}, f))$, $\vec{\sigma}(\vec{r}, f) = (\sigma_x(\vec{r}, f), \sigma_y(\vec{r}, f), \sigma_z(\vec{r}, f))$ -

соответственно тензоры диэлектрической проницаемости и проводимости, зависящие от $\vec{H}(\vec{r})$.

В изотропном случае без учета влияния магнитного поля Земли $\vec{H}(\vec{r})$ при нормальном падении плоской волны на среду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$ и $\sigma(\vec{r}, f) = 0$, распространяющейся по оси z , и при выполнении условия $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$ (λ - длина волны) решение (1) задается приближением геометрической оптики [9]

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

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

Для цифровых сигналов $s(t)$ задача усложняется - сигналы представляются в виде суммы монохроматических сигналов, каждый из которых приобретает фазовое $\Delta\varphi(z, f)$ и амплитудное смещения за счет дисперсионных и поглощающих свойств ионосферы, что определяет искажение сигналов [3,4,6,7]. Эти искажения обуславливают возникновение помех МСИ и МКИ.

Цель работы - привести описание и результаты моделирования алгоритма обработки сигналов на выходе трансionoсферной линии, компенсирующего влияние помех МСИ и МКИ.

Модели распространения сигналов по трансionoсферным линиям

Рассматриваемая модель ионосферы трансionoсферных радиолний соответствует сферически-симметричной среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$ [5,10]

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

Здесь $f_p(z) = \sqrt{80.8 N_9(z)}$ - собственная частота ионосферы (кГц); $N_9(z)$ (эл/см³) - электронная плотность ионосферы на высоте z .

Для электронной плотности $N_9(z)$ известен ряд моделей, например, однослойная модель Чэпмена [5,7]

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

Здесь γ, b - параметры; z_M - высота, на которой достигается максимальное значение электронной плотности N_M [7].

Искаженные сигналы $\hat{s}(t)$ на выходе линии представляются как результат линейной фильтрации передаваемых сигналов $s(t)$ [9]

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

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

$\tau(z, f) = \exp\left(j2\pi f \int_0^z \frac{dx}{c_\Phi(x, f)}\right)$ - время распространения сигнала с частотой f

вдоль лучевой линии АВ (сплошная линия АВ на рис.1, поясняющего схему трансфоносферной линии); $c_\Phi(x, f) = c/n(x, f)$ - фазовая скорость.

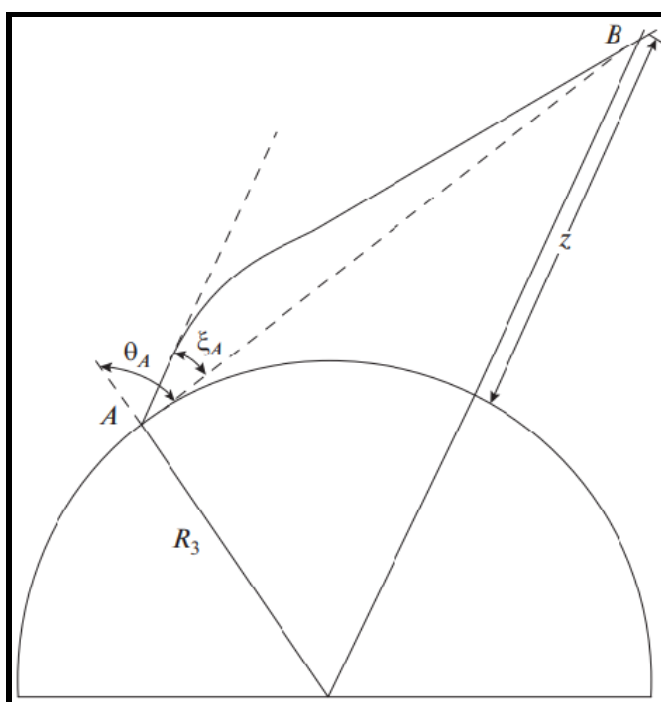


Рис.1. Распространение сигналов по спутниковой ионосферной линии.

Время распространения $\tau(z, f)$ задается соотношением [5]

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

Здесь R_3 - радиус Земли; θ_A - видимый зенитный угол; ζ_A - рефракционная поправка к θ_A [5].

Значения поправки ζ_A для модели дневной и ночной ионосферы и $\theta_A < 80^\circ$, $f > 1$ ГГц не превышают $\zeta_A < 10''$ [3]. Вследствие малых значений параметра ζ_A при оценивании $\tau(z, f)$ применяется выражение без учета ζ_A

$$\tau(z, f) = \frac{e^2}{2\pi m_e f^2} \frac{0.01(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3)^2 \sin^2 \theta_A}} \int_0^z N_3(x) dx. \quad (7)$$

Здесь e, m_e - заряд и масса электрона.

Из соотношения (7) следует, что для описания трансionoсферной линии необходима оценка полного электронного содержания

$\alpha_{\text{ПЭС}} = \int_0^z N_3(x) dx$. Метод оценки параметра $\alpha_{\text{ПЭС}}$ основан на вычислении

разности времени задержек $\Delta\tau(f_1, f_2) = \tau(z, f_1) - \tau(z, f_2)$ распространения (методы фазовой или групповой задержек) для пилот-сигналов с центральными частотами f_1 и f_2 . При реализации этого подхода параметр $\hat{\alpha}_{\text{ПЭС}}$ оценивается с использованием соотношения [5]

$$\hat{\alpha}_{\text{ПЭС}} = \frac{\Delta\tau(f_1, f_2)}{\frac{e^2}{2\pi m_e f^2} \frac{(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3 \sin \theta_A)^2}} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, обратный линейный фильтр трансionoсферной линии, снижающий действие интерференционных помех МСИ и МКИ, задается его коэффициентом передачи $H^{-1}(z, f) = \exp(-j\varphi(z, f))$, здесь фаза $\varphi(z, f)$ определяется на основе соотношения

$$\varphi(z, f) = \frac{e^2}{cm_e f} \frac{0.01(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3)^2 \sin^2 \theta_A}} \hat{\alpha}_{\text{ПЭС}}. \quad (9)$$

Результаты моделирования

Одной из основных характеристик систем передачи информации является вероятность правильного приема $P_{\text{пр}}$ при приеме сигналов [8]. Для АБГШ оптимальный прием, основан на вычислении взаимной корреляции входной реализации $r(t) = \hat{s}(t) + n(t)$ с передаваемым сигналом $s(t)$.

Ниже рассматриваются сигналы $s(t)$ на основе двухпозиционной фазовой манипуляции (сигналы ФМ2), используемые при синхронизации систем связи различного назначения, включая спутниковые системы связи, в системах радиолокации [1,8]. Сигналы $s(t)$ представляют последовательность элементарных сигналов $s_i(t, \varphi_{il})$ длительностью T [8]

$$s(t) = \text{Re} \left(\sum_{i=1}^n A u(t + iT) \exp(j(\varphi_{il} + 2\pi f t)) \right). \quad (10)$$

Здесь $u(t + iT) = 1$ при $iT \leq t < (i+1)T$, иначе $u(t + iT) = 0$; A, φ_{il} - амплитуда и фаза элементарных сигналов; $l = 0, 1$; n - количество элементарных сигналов. Фазы манипуляции φ_{il} для текущего значения i задаются правилом $\varphi_{il} = \pi l$ и определяются значениями передаваемого бита.

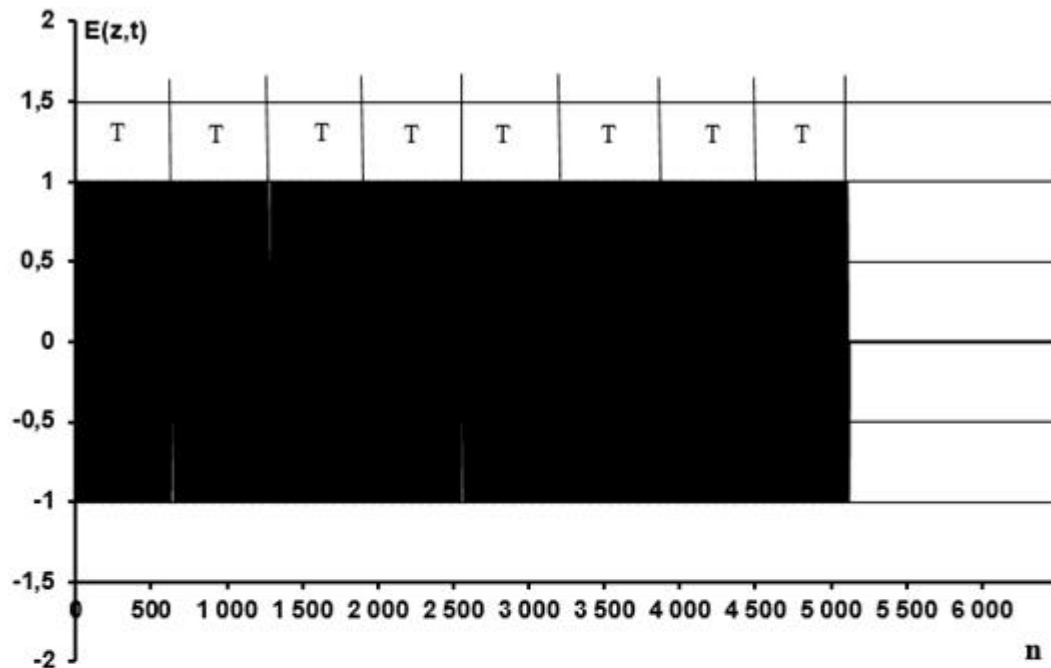
Моделирование трансионосферных линий выполнено с целью оценивания деградации вероятности $P_{\text{пр}}$ при приеме сигналов $\hat{s}(t)$ относительно распространения в свободном пространстве и эффективности приведенного алгоритма обработки сигналов при приеме, снижающего действие помех МСИ и МКИ. Характеристики трансионосферной линии - модель (4) с параметрами дневной ионосферы, высота $z = 400$ км, центральная частота $f_0 = 1500$ МГц, видимый зенитный угол $\theta_A = 0 \dots 80^\circ$. Сигналы $s(t)$ содержат $n = 8$ элементарных сигналов ФМ2 с длительностью $T = 20$ нсек (частотная полоса $\Delta F = 100$ МГц).

Пример сигнала $s(t)$, а также сигнала $\hat{s}(t)$ на выходе транссионсферной линии ($\theta_A=10^0$) показан на рис.2 - видно искажение огибающей, временное рассеяние элементарных сигналов, определяющее интерференционные помехи, и временная задержка $\hat{s}(t)$ относительно $s(t)$. По оси абсцисс отложены номера отсчетов с частотой дискретизации 32 ГГц. Пилот-сигнал, используемый для оценки параметра $\hat{\alpha}_{ПЭС}$ и формирования обратного фильтра $\dot{H}^{-1}(z, f)$, представлял сумму двух радиоимпульсов с центральными частотами $f_1 = 1.50$ ГГц и $f_2 = 1.55$ ГГц.

На рис.3 приведены вероятности $P_{пр}$ при приеме сигналов $s(t)$ при наличии АБГШ, реализующем правило Неймана-Пирсона с вероятностью ложной тревоги $P_{лтпр} = 10^{-3}$. Кривая 1 соответствует теоретической кривой при приеме исходных сигналов $s(t)$ при распространении в свободном пространстве [1,8]. Кривая 2 соответствует распространению по транссионсферной линии - энергетические потери за счет рассеяния и влияния интерференционных по отношению к распространению в свободном пространстве достигают 0.3 дБ.

При использовании алгоритма обработки искаженных сигналов $\hat{s}(t)$ с целью компенсации данных помех энергетические потери незначительны - в этом случае для анализируемых значений отношения сигнал/помеха $E_c / N_0 > 9.5$ дБ соответствующая вероятностная кривая практически совпадает с вероятностной кривой 1 для распространения сигналов в свободном пространстве. Эти результаты показывают эффективность приведенного алгоритма компенсации искажений широкополосных сигналов, обусловленных влиянием транссионсферных линий распространения.

а)



б)

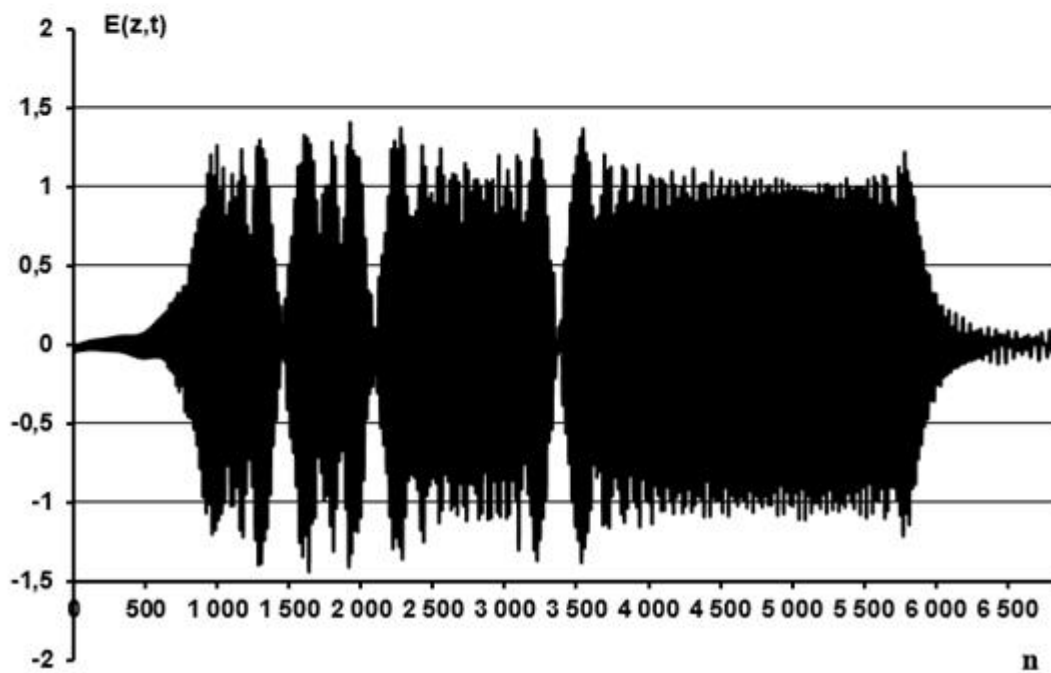


Рис.2. Вид сигнала на основе элементарных ФМ2 сигналов длительностью T :
 а) исходный сигнал; б) сигнал на выходе транссионсферной линии.

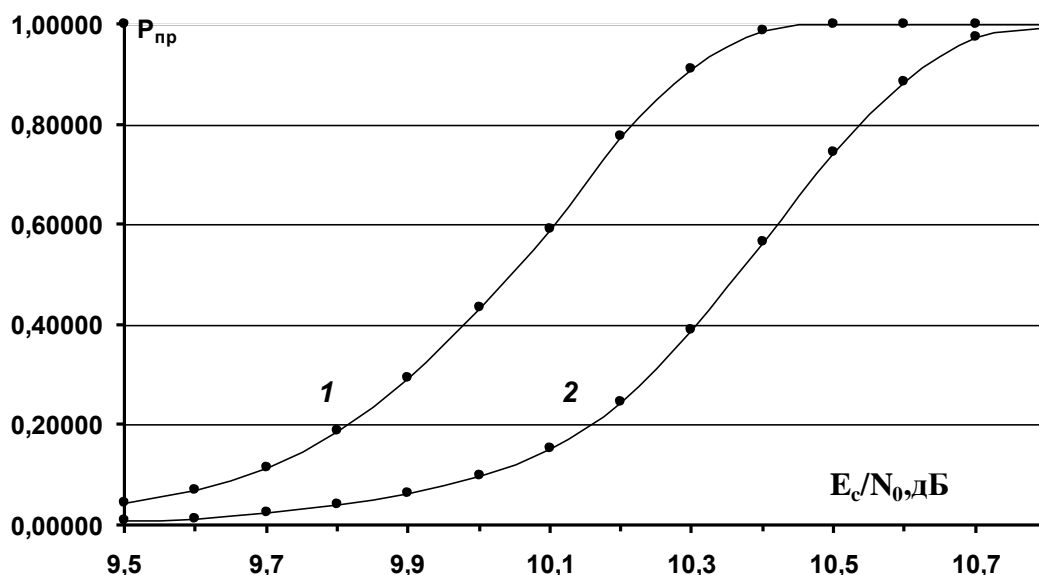


Рис.3. Вероятности $P_{\text{пр}}$ при когерентном приеме сигналов при наличии АБГШ, реализующем правило Неймана-Пирсона: 1- распространение в свободном пространстве; 2 - распространение по трансферной линии.

Заключение

Приведены методы описания искажений цифровых сигналов при их распространении по трансферным спутниковым линиям передачи, основанные на методах линейной фильтрации. Искажения фазо-частотных характеристик цифровых сигналов обуславливают временное рассеяние и возникновение межсимвольных и межканальных помех, которые снижают надежность связи. Особенностью этих помех является то, что невозможна их компенсация путем повышения мощности передаваемых сигналов. Приведено описание алгоритма компенсации данных искажений на основе использования пилот-сигнала и формирования обратного линейного фильтра. Показана возможность практически полной компенсации искажений широкополосных сигналов и достижения вероятностных характеристик правильного приема, близких к характеристикам правильного приема сигналов при их распространении в свободном пространстве.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00525).

ЛИТЕРАТУРА

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ. М.: Связь. 1979, 592 с.
2. Спутниковая связь и вещание: справочник. Под ред. Кантора Л.Я. М.: Радио и связь. 1997, 528 с.
3. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969, 156 с.
4. Арманд Н. А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах. // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48. №9. С. 1045-1057.
5. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В.П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009, 496 с.
6. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых линий связи. // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. Стр.1-9.
7. 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.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003, 1104 с.
9. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967, 688 с.
10. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation ITU-R P.531-11 (01/2012).