

### **Анализ влияния трансионосферных линий связи на вероятностные характеристики приема сигналов с фазовой манипуляцией**

Л.Е.Назаров, В.В.Батанов, З.Т. Назарова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, пл.Введенского, 1 nazarov@ire.rssi.ru, bvitaly@inbox.ru*

*Приведены методы описания искажений сигналов при их распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. Эти методы основаны на представлении действия ионосферных линий в виде линейной фильтрации. Даны описания методов оценивания энергетических потерь при корреляционной обработке искаженных сигналов по отношению к распространению в свободном пространстве. Произведено численное оценивание энергетических потерь для сигналов с фазовой манипуляцией.*

*The results of analysis for signal distortions propagating through the ionospheric satellite communication channels are presented in the report. The descriptions of signal distortions are based on the frequency-domain solution for ionospheric channel as linear filter. The signal/noise degradations due to phased shift keying signal distortions are evaluated.*

При распространении по спутниковым линиям передачи сигналы испытывают искажения за счет влияния ионосферы как дисперсионной среды [1-3]. По отношению к распространению в свободном пространстве эти искажения приводят к энергетическим потерям при корреляционной обработке, составляющей основу синхронизации и демодуляции сигналов. Суть искажений - изменение огибающей сигналов и возникновение межсимвольной (МСИ) и межканальной (МКИ) интерференций.

Актуальной является проблема оценивания этих энергетических потерь за счет влияния ионосферы спутниковых линий для класса сложных сигналов. В докладе при решении данной проблемы рассматривают двумерные сигналы с 4-уровневой фазовой манипуляцией (ФМ4), широко используемые в приложениях.

Основу анализа распространения сигналов по ионосферным линиям представляет решение волнового уравнения относительно плоской волны  $E(z, f)$  с частотой  $f$ , нормально падающей на слой неоднородной среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(z, f)$  и распространяющейся по оси  $z$  [3]

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

Здесь  $c$  - скорость света.

В общем случае для произвольной функции  $\varepsilon(z, f)$  уравнение (1) не имеет решения, представимого через известные функции. Важным направлением является определение приближенных решений уравнения (1), в частности, приближение геометрической оптики, которое для неоднородной ионосферы имеет вид [3]

$$E(z, t) = E(0, t) \exp \left( - \frac{j2\pi f}{c} \int_0^z \sqrt{\varepsilon(z, f)} dz \right). \quad (2)$$

При распространении сигналов с цифровой манипуляцией  $s(t)$  с частотной полосой  $\Delta F$  задача их описания усложняется. В этом случае каждая спектральная компонента в составе спектра сигналов  $\Delta F$  при распространении приобретает частное фазовое смещение  $\Delta\varphi(z, f)$  за счет дисперсионных свойств неоднородной ионосферы, что обуславливает искажения сигналов на входе приемного устройства [4-6].

Коэффициент диэлектрической проницаемости ионосферы  $\varepsilon(z, f)$  в виде неоднородной сферически-симметричной среды задается соотношением [1]

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

Здесь  $f_p(z) = \sqrt{80.8 N_e(z)}$  - собственная частота ионосферы (кГц);  $N_e(z)$  - электронная плотность ионосферы (эл/см<sup>3</sup>) на высоте  $z$ .

Известные методы описания сигналов при их распространении основаны на представлении действия ионосферных линий в виде линейной стационарной фильтрации [2-4]. Сигнал  $\hat{s}(t)$  на выходе ионосферной линии, задаваемой

коэффициентом передачи  $\dot{H}(z, f)$ , имеет вид  $\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(j2\pi f t) df$ . Здесь  $\dot{S}(f)$  -

спектр сигнала  $s(t)$ . Коэффициент передачи  $\dot{H}(z, f)$  задается соотношением

$$\dot{H}(f, z) = \exp(j2\pi f \tau(z, f)) = \exp\left(j2\pi f \int_0^z \frac{dx}{c_\phi}\right). \text{ Здесь } c_\phi = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon(f, z)}} - \text{ фазовая скорость.}$$

Искажения сигналов при применении корреляционной обработки обуславливают наличие энергетических потерь  $\Delta E$  по отношению к распространению в свободном пространстве и заключаются в двух факторах. Во-первых, происходит временное рассеяние составляющих радиоимпульсов при распространении в ионосферной линии. Во-вторых, изменяется огибающая сигналов.

Оценивание энергетических потерь  $\Delta E$  производится на основе сравнительного анализа вероятностей  $P_6$  информационных битов для сигналов без искажений  $s(t)$  и с искажениями  $\hat{s}(t)$ .

Для модели помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) правило оптимального приема основано на вычислении взаимной корреляции входной реализации с сигналами  $s(t)$  и вероятность ошибочного приема  $P_6$  для сигналов ФМ4

имеет вид  $P_6 = 1 - F\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)$ . Здесь  $E_s$  - энергия сигналов прямого (квадратурного)

канала;  $N_0$  - спектральная плотность АБГШ (односторонняя);

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt.$$

Полагая помехи МСИ и МКИ аддитивными, можно оценить их эффективную

спектральную плотность  $N_{\Pi}$  и отношение сигнал/помеха  $\mu = \left\langle \frac{E_{\hat{s}}}{N_{\Pi}} \right\rangle = \left\langle \frac{2P_{\hat{s}}}{P_{\Pi}} \right\rangle$ . Здесь  $P_{\hat{s}}$ ,

$E_{\hat{s}}$  - мощность и энергия сигналов  $\hat{s}(t)$ ,  $P_{\Pi}$  - мощность помех МСИ и МКИ,  $\langle \rangle$  - операция усреднения по множеству сигналов  $s(t)$ .

Вероятность ошибочного приема  $P_6$  при передаче сигналов ФМ4 по ионосферным линиям передачи и при наличии АБГШ со спектральной плотностью  $N_0$  можно

оценить  $P_6 = 1 - \left\langle F\left(\frac{2E_{\hat{s}}}{N_0 + N_{\Pi}}\right) \right\rangle$ . Усреднение производится по энергии  $E_{\hat{s}}$  искаженных

сигналов  $\hat{s}(t)$  и по спектральной плотности  $N_{\Pi}$  помех МСИ и МКИ.

Ниже приведены результаты оценивания энергетических потерь  $\Delta E$  по отношению к распространению сигналов в свободном пространстве при наличии помехи АБГШ.

Параметры моделируемой ионосферной линии - модель дневной ионосферы, высота линии передачи  $z=400$  км, центральная частота  $f_0=400$  МГц. Варьируемые параметры - длительность сигналов  $T$  (частотная полоса  $\Delta F = \frac{2}{T}$ ), отношение сигнал/помеха  $\frac{E_s}{N_0}$ ; угол направления линии прямой видимости  $\theta_A = 0^0 \dots 80^0$ .

В таблице 1 приведены полученные оценки энергетических потерь  $\Delta E$  для значения  $P_{\bar{0}} = 10^{-5}$  при распространении сигналов по рассматриваемой ионосферной линии передачи для углов  $\theta_A = 0^0$ ,  $\theta_A = 80^0$ . Видно, что с уменьшением длительности  $T$  наблюдается увеличение значений  $\Delta E$  - при  $T=100$  нс имеем  $\Delta E = 1.50$  дБ для  $\theta_A = 0^0$ ,  $\Delta E = 2.00$  дБ для  $\theta_A = 80^0$ ; при  $T=50$  нс имеем  $\Delta E = 3.50$  дБ для  $\theta_A = 0^0$  и  $\Delta E = 4.50$  дБ для  $\theta_A = 80^0$ .

В таблице 1 также приведены соответствующие оценки энергетических потерь  $\Delta E_{им}$  при распространении радиоимпульса с прямоугольной огибающей. Наблюдаемые значения энергетических потерь  $\Delta E$  превышают значения энергетических потерь для одиночных радиоимпульсов  $\Delta E_{им}$ , например, для  $\theta_A = 80^0$  при  $T=100$  нс имеем  $\Delta E = 2.00$  дБ и  $\Delta E_{им} = 1.00$  дБ. Эти отличия объясняются наличием помех МСИ и МКИ.

На рис.1 приведены вероятности ошибки  $P_{\bar{0}}$  для сигналов длительностью  $T = 40$  нс от значений  $\frac{E_s}{N_0}$  при наличии АБГШ. Кривая 1 соответствует распространению в свободном пространстве, кривые 2, 3 и 4 соответствуют распространению по ионосферной линии с углами  $\theta_A = 0^0$ ,  $60^0$  и  $80^0$ . Для  $P_{\bar{0}} = 10^{-5}$  и  $\theta_A = 0^0$  значения  $\Delta E$  достигают 4 дБ по отношению к распространению в свободном пространстве. Для  $\theta_A = 60^0$ ,  $80^0$  и  $\frac{E_s}{N_0} > 23$  дБ вероятности ошибочного приема практически постоянны - при отсутствии помех АБГШ получена оценка  $P_{\bar{0}} = 0.000085$  ( $\theta_A = 60^0$ ) и  $P_{\bar{0}} = 0.0005$  ( $\theta_A = 80^0$ ), что объясняется влиянием помех МСИ и МКИ.

**Таблица 1. Оценки энергетических потерь  $\Delta E$  и  $\Delta E_{им}$  при распространении сигналов ФМ4 по трансionoсферной линии передачи,  $\theta_A$  - угол направления прямой видимости.**

T, нс	100	90	80	70	60	50
$\theta_A = 0$						
$\Delta E$ , дБ	1.50	1.80	2.15	2.55	2.90	3.50
$\Delta E_{им}$ , дБ	0.55	0.65	0.70	0.85	0.95	1.15
$\theta_A = 80^0$						
$\Delta E$ , дБ	2.0	2.40	2.85	3.35	3.90	4.50
$\Delta E_{им}$ , дБ	1.00	1.12	1.40	1.45	1.50	1.75

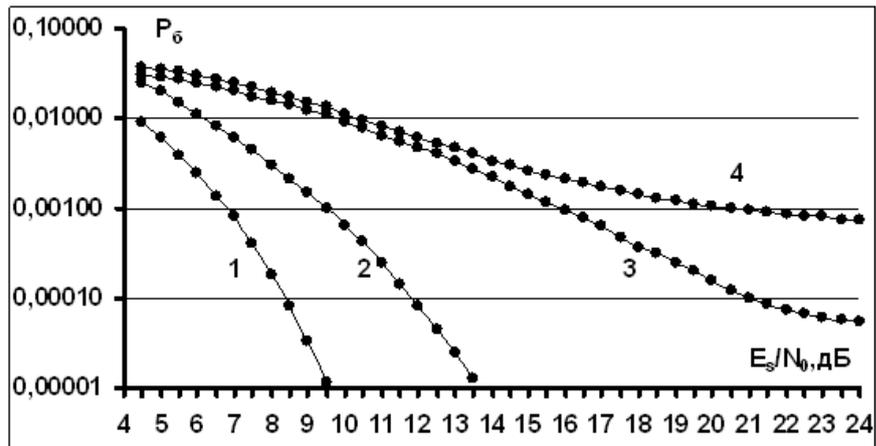


Рис. 1. Вероятности ошибочного приема сигналов ФМ4 (длительность сигналов  $T=40$ нс): 1 – распространение в свободном пространстве; 2,3,4 – распространение по ионосферной линии с углами  $\theta_A = 0, \theta_A = 60^\circ$  и  $\theta_A = 80^\circ$ .

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (№16-07-00746).*

### Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Гос. Издательство по вопросам связи и радио. 1960. 392 с.
2. Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах. // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48. №9. Стр.1045-1057.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука. 1967. 684 с.
4. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Зудилин А.С. Искажения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. // Журнал радиоэлектроники. 2016. №2. <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/6/text.pdf>.
5. 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. Стр. 37-45.
6. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. Стр.866-874.