

Модели сцинтилляции сигналов при распространении по трансionoсферным линиям связи

Л.Е.Назаров, В.В.Батанов, В.М. Смирнов

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 сигналов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи, обуславливающих явление сцинтилляции (замираний) сигналов. Даны теоретические модели сцинтилляций, использующие индексы сцинтилляций, приведены оценки энергетических потерь за счет сцинтилляций сигналов P-, L- частотного диапазона по отношению к распространению сигналов в свободном пространстве.

Available observations of ionospheric scintillation for transionospheric channels in P-, L- frequency bands are analyzed to evaluate the adequacy of existing models used for interpretation of scintillation data. The known theoretical models are reviewed. The signal/noise degradations due to signal distortions are evaluated.

Сцинтилляции (замирания) сигналов при распространении по спутниковым трансionoсферным линиям передачи вызываются возмущениями ионосферы, которые проявляются в случайном образовании неоднородностей (глобул) электронной концентрации [1]. Эти неоднородности определяют рассеяние радиоволн и их многолучевое распространение по спутниковой линии, что обуславливает фазовые и амплитудные вариации сигналов (возникновение частотного смещения и замираний). В докладе приведены описания соответствующих математических моделей [1-4].

Плотность распределения амплитуды $p(A)$ сигналов при распространении по трансionoсферной линии передачи обычно описывается законом m -распределения

Накагами
$$p(A) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\sigma^2} \right)^m A^{2m-1} \exp\left(-\frac{mA^2}{\sigma^2}\right).$$
 Здесь σ^2 - флуктуационная составляющая мощности результирующих сигналов; $m \geq 1/2$ - параметр замираний, задаваемый соотношением $m = \frac{\Omega^2}{\langle (A^2 - \Omega)^2 \rangle}$, $\Omega = \langle A^2 \rangle$ [1,2].

Для $m > 1$ распределение Накагами аппроксимируется распределением Релея-Райса

$$p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{AA_0}{\sigma^2}\right).$$
 Здесь A_0 - средняя амплитуда сигнальной

компоненты прямой видимости; $I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(x \cos \varphi) d\varphi$ - модифицированная

функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Распределение Релея-Райса

характеризуется коэффициентом Райса $c = \frac{A_0^2}{2\sigma^2}$.

При описании сцинтилляций ионосферы вводится в рассмотрение индекс мерцаний $S_4 = \frac{\langle A^4 \rangle - \langle A^2 \rangle^2}{\langle A^2 \rangle^2}$ [1-3]. Параметры S_4 , m и коэффициент Райса c при условии

$$A_0^2 / \sigma^2 > 1 \text{ связаны соотношениями } c = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \approx \frac{2}{S_4}.$$

Математические модели распространения сигналов по спутниковым ионосферным линиям передачи и оценивания параметров сигналов (оценивание коэффициента Райса c , индекса мерцаний S_4 , замираний сигналов, пр.) основываются на реализации двух подходов [3]:

- на основе многолучевого распространения сигналов за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях;
- на теории дифракции на ионосферных неоднородностях.

Модель ионосферы, поясняющая многолучевое распространение сигналов, представляется в виде а) однородного слоя F с толщиной h_3 и средней электронной концентрацией (ЭК) $\bar{N}(h = h_m) = N_m$, задаваемой средней интегральной электронной концентрацией $\bar{N}_{TF} = h_3 \bar{N}_m$; б) тонкого неоднородного слоя, расположенного на нижней границе слоя F ионосферы и описываемого статистическими характеристиками электронной концентрации слоя F ионосферы $\Delta N_{TF}(x, y)$ с нулевым средним $\langle \Delta N_{TF}(x, y) \rangle = 0$ и с дисперсией $\sigma_{\Delta T_{TF}}^2 = \sqrt{\pi} l_s h_3 (\beta_{и} \bar{N}_m)^2$ [3]. Здесь

$$\Delta N_{TF}(x, y) = \int_F \Delta N(h) dh - \text{флуктуации интегральной ЭК для слоя } F \text{ ионосферы; } \Delta N(h) -$$

флуктуации ЭК слоя F ионосферы со свойством $\frac{\Delta N(h)}{\bar{N}(h)} = const$; $\bar{N}(h)$ - среднее значение ЭК; h_3 - эквивалентная толщина слоя F с постоянной по высоте средней ЭК, равной ее максимальному значению \bar{N}_m ; l_s - характерный размер ионосферных неоднородностей; $\beta_{и} = \frac{\sqrt{\langle \Delta N^2(h) \rangle}}{\bar{N}(h)}$ - интенсивность ионосферных неоднородностей.

Совокупность M лучей формирует суммарный сигнал $u_r(t)$, комплексная огибающая которого имеет вид

$$\dot{u}_r(t) = \dot{u}(t) \sum_{i=1}^M \exp(-j80.8\pi \Delta N_{TF}(x_i, y_i) / (cf_0)).$$

Коэффициент передачи многолучевой ионосферной линии передачи определяется флуктуациями фазового фронта волны в горизонтальной плоскости на выходе неоднородной ионосферы $z = z_3$, которые обусловлены флуктуациями интегральной ЭК $\Delta N_{TF}(x_i, y_i) \Delta \varphi = 80.8\pi \Delta N_{TF}(x_i, y_i) / (cf_0)$.

Выражение для комплексной огибающей сигнала $\dot{u}_r(t)$ позволяет получить выражение относительно средней мощности $P_r = \frac{1}{2} \langle |\dot{u}_r(t)|^2 \rangle = P_{r,p} + P_{r,фл}$. Здесь $P_{r,p}$ - регулярная составляющая, $P_{r,фл}$ - флуктуационная составляющая.

Для оценивания составляющих мощности $P_{r,p}$ и $P_{r,фл}$ используют теорию статистической радиофизики - явление замираний сигналов при их распространении через ионосферные линии передачи объясняется дифракцией радиоволн на неоднородностях ионосферы. В этом случае известно аналитическое выражение для средней мощности $P_r = |U_0|^2 \exp(-\sigma_\varphi^2) + |U_0|^2 (1 - \exp(-\sigma_\varphi^2))$. Здесь U_0 - комплексная огибающая поля на входе; σ_φ^2 - дисперсия флуктуаций фазового фронта на выходе неоднородного ионосферного слоя. Возрастание дисперсии фазового фронта σ_φ^2 приводит к увеличению флуктуационной составляющей $P_{r,фл}$ и к уменьшению регулярной составляющей $P_{r,p}$.

Дисперсия фазового фронта σ_φ^2 определяется соотношением $\sigma_\varphi^2 = (80.8\pi/(cf_0))^2 \sigma_{\Delta N_{TF}}^2$. В соответствии с приведенным выше соотношением $\sigma_{\Delta N_{TF}}^2 = \sqrt{\pi} l_s h_\Sigma (\beta_{и} \bar{N}_m)^2$ имеем $\sigma_\varphi^2 = (80.8\pi/(cf_0))^2 \sqrt{\pi} l_s h_\Sigma (\beta_{и} \bar{N}_m)^2$. Параметр Райса c имеет вид $c = \frac{\exp(-\sigma_\varphi^2)}{1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)}$.

Приведем расчет дисперсии фазового фронта σ_φ^2 и параметра Райса c для известных экспериментальных значений параметров рассматриваемой модели [1-3]:

- $h_\Sigma = 2.55 \cdot 10^5$ - эквивалентная толщина слоя F с постоянной по высоте средней ЭК;
- $\bar{N}_m \approx 2 \cdot 10^{12}$ эл/м³ - максимальное значение ЭК;
- $l_s \approx 3.9 \cdot 10^2$ м - характерный размер ионосферных неоднородностей, при расчетах полагают этот параметр практически постоянным;
- $\beta_{и} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ - интенсивность ионосферных неоднородностей, для нормальной ионосферы в полярной и приполярной зонах может достигать 0.1...0.2.

Оценки дисперсии σ_φ^2 , вычисленные для приведенных параметров модели, достигают значений в пределах $\sigma_\varphi^2 \in 0.0275 \dots 0.350$ рад², что соответствуют значениям параметра Райса в пределах $c \in 2.35 \dots 36.0$.

В соответствии с экспериментальными данными для нормальной ионосферы средних широт значение индекса мерцаний равно $S_4 \approx 0.28$ и $m = 3.57$, $c = 3.57$ и $\frac{A_0^2}{\sigma^2} = 7.14$. В таблице 1 приведены вероятности замираний сигналов $\text{Pr}(A < \alpha A_0)$ для $\alpha = 0.5$ (замирания 6 дБ), $\alpha = 0.64$ (замирания 4 дБ), $\alpha = 0.71$ (замирания 3.0 дБ), вычисленные для приведенного экспериментального значения коэффициента Райса $c = 3.57$.

На рис.1 в качестве примера приведена зависимость сигнал/помеха от времени, полученная ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в результате обработки тестовых радиосигналов спутниковой информационной системы, функционирующей в Р-частотном диапазоне (406 МГц). По оси абсцисс отложены значения времени (сек), по оси ординат отложены значения отношения сигнал/помеха P_c/N_0 (дБ), здесь P_c -

мощность сигналов, N_0 - эффективная спектральная плотность шумов в частотной полосе сигналов (100 кГц). Видны вариации значений сигнал/помеха ± 3 дБ относительно среднего значения, определяемые, в основном, сцинтилляцией сигналов за счет влияния трансионосферной линии передачи.

Таблица 1. Вероятности замираний сигналов АРБ-2 $\Pr(A < \alpha A_0)$.

α	0.5(замирания 6 дБ)	0.64(замирания 4 дБ)	0.71(замирания 3 дБ)
$\Pr(A < \alpha A_0)$	0.019	0.063	0.104

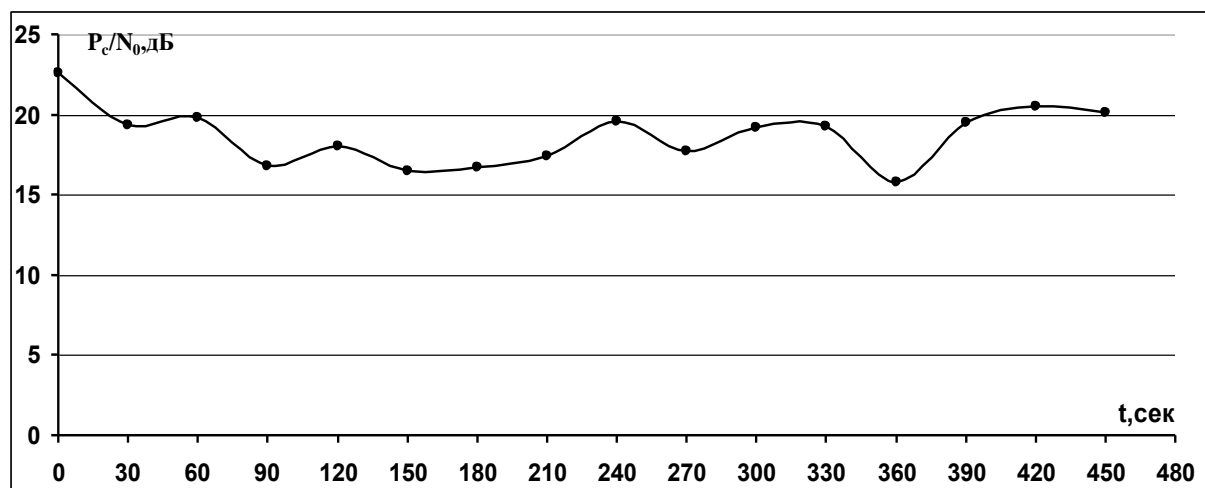


Рис.1. Зависимость сигнал/помеха от времени (получена ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в результате обработки тестовых радиосигналов спутниковой информационной системы в Р- частотном диапазоне).

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

Литература

1. Crane R.K. Ionospheric Scintillation.// Proceeding of IEEE. 1977. N2. P.180-199.
2. Крейн Р.К. Мерцания радиоволн в ионосфере.//ТИИЭР. 1977. Т.65.№2. С. 5-29.
3. Beniquel V., Forte B., Rasdicella S.M., Strangeways H.J., Cherm V.E., Zernov N.N. Scintillations effects on satellite to Earth links for telecommunication and navigation purposes.// Annals of Geophysics. 2004. Supplement to Vol. 47. N2/3. P.1179-1199.
4. 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.