

Статистические модели замираний сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям

Л.Е. Назаров^{1,2}, В.В. Батанов²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 1414190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1

E-mail: levnaz2018@mail.ru

²АО «Информационные спутниковые системы», г. Железнодорожск 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: bvitaly@inbox.ru

Рассмотрены модели узкополосных трансионосферных радиолиний, влияние которых обуславливает замирания сигналов при их распространении за счет случайных флуктуаций электронной плотности ионосферных неоднородностей. Приведена методика оценивания вероятности ошибочного приема сигналов с фазовой манипуляцией с использованием рассмотренных моделей замираний сигналов. Произведены оценки энергетических потерь при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям с параметрами индекса сцинтилляции, типичными для L- частотного диапазона, по отношению к распространению в свободном пространстве.

Ключевые слова: ионосфера, сигналы, замирания сигналов, вариации амплитуд, вариации фаз, распределение Релея-Райса, вероятность ошибочного приема

Statistical models of signal fading during propagation along transionosphere radio links

L.E. Nazarov¹, V.V. Batanov

¹ Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Fryazino

² JSC "Information Satellite System, Zheleznogorsk

Models of narrow-band transionosphere radio lines are considered, the influence of which causes fading of signals during their propagation due to random fluctuations of the electron density of ionosphere irregularities. A technique for estimating the probability of erroneous reception of signals with phase shift keying using the considered models of signal fading is presented. Estimates of energy losses during propagation along ionosphere satellite radio lines with scintillation index parameters typical for the L-frequency range with respect to propagation in free space are made.

Keywords: ionosphere, signals, fading, error-performances

Введение

Эффективность спутниковых информационных систем относительно надежности передачи информации определяется состоянием трансионосферной радиолинии «космический аппарат» - «наземный приемный пункт» (НПП) [1]. При распространении по данным линиям сигналы подвергаются комплексу искажающих факторов, снижающих верность передачи информации по отношению к распространению в свободном пространстве. Одно из важных искажений обусловлено многолучевостью распространения, которая порождает вариации амплитуд и фаз сигналов (замираний сигналов) [2-4], вызываемые случайными временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей [1-6]. Статистические модели замираний дают возможность оценить энергетические потери по отношению к распространению сигналов в свободном пространстве, которые необходимо учитывать при расчете энергетических бюджетов спутниковых радиолиний. Созданию и развитию моделей помех данного типа посвящен ряд работ [3,7].

Актуальной является проблема обобщения моделей замираний сигналов, учитывающих влияние амплитудных и фазовых вариаций, и применения этих моделей при анализе помехоустойчивости передачи информации по рассматриваемым радиоприемам.

На вход НПП при распространении сигналов $s(t)$ по трансферной радиоприеме «вниз» (симметрично «вверх») поступает сигнал $s'(t)$, содержащий сумму $s(t)$ и его копии с различными амплитудами, временными задержками и начальными фазами за счет рассеяния и отражения на ионосферных неоднородностях и помехи

$$s'(t) = \text{Re}(A(t)\exp(j(2\pi ft + \varphi_c(t))) + n(t)). \quad (1)$$

Здесь $f, A(t), \varphi_c(t)$ - центральная частота, амплитуда и фаза сигнальной составляющей за счет влияния ионосферных неоднородностей; $n(t)$ - канальный аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). Амплитуда $A(t)$ и фаза $\varphi_c(t)$ представляют случайные стационарные процессы на анализируемом интервале времени.

Сигнальные составляющие характеризуются случайными вариациями амплитуд A и начальных фаз $\varphi = \varphi_c + \varphi_{\Pi}$ для цифровых сигналов $s(t)$. Здесь φ_c - случайная фаза за счет влияния ионосферных неоднородностей, φ_{Π} - случайная фаза за счет влияния АБГШ. Эти вариации приводят к деградации вероятностных характеристик (вероятность ошибочного приема на информационный бит $P_{\text{б}}$) при передаче информации по отношению к распространению в свободном пространстве. Количественное оценивание вероятности $P_{\text{б}}$ и соответствующих энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве может быть выполнено с использованием статистических моделей замираний сигналов, характеризуемых законами плотностей распределения $p(A)$ и $p(\varphi)$ для A и φ [2-4].

Статистические модели замираний сигналов

Замирания сигналов определяются рядом параметров - центральной частотой f , солнечной активностью, сезонным и суточным временем и др. [1,3]. При создании и развитии статистических моделей замираний сигналов с учетом этих факторов используются два подхода - на основе аналитического описания процесса распространения сигналов [3] и на основе использования эмпирических соотношений относительно плотности распределения $p(A)$ и $p(\varphi)$ [8].

Модели замираний сигналов из второго класса связывают параметры плотностей распределения $p(A)$ и $p(\varphi_c)$ с индексом сцинтилляции $S_4^2 = (\langle A^4 \rangle - (\langle A^2 \rangle)^2) / (\langle A^2 \rangle)^2$ [3,4]. Здесь $\langle \rangle$ - операция усреднения по ансамблю сигналов либо по времени, полагая случайный процесс A эргодическим.

Относительно значений индекса S_4 замирания классифицируются как слабые для $S_4 < 0.3$, средние для $0.3 < S_4 < 0.6$ и сильные для $S_4 > 0.6$ [4].

Для слабых и средних и отчасти сильных плотность распределения $p(A)$ задается

законом Релея-Райса $p(A) = \frac{A}{\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma_p^2}\right) I_0\left(\frac{AA_0}{\sigma_p^2}\right)$ [4]. Здесь A_0 - амплитуда

регулярной сигнальной составляющей; σ_p^2 - мощность многолучевых компонент в составе $s'(t)$. Распределение Релея-Райса характеризуется коэффициентом Райса

$c = A_0^2 / 2\sigma_p^2$, который связан с параметром S_4 соотношением $c = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$,

здесь $m = 1/S_4^2$.

Для слабых и средних замираний эмпирическая плотность распределения фаз φ_c ($-\pi \leq \varphi_c \leq \pi$) за счет влияния ионосферы задается нормальным законом

$$p(\varphi_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left(-\frac{\varphi_c^2}{2\sigma_c^2}\right) \text{ с нулевым средним и дисперсией } \sigma_c^2 = S_4^2 \text{ [4].}$$

Для канала АБГШ с односторонней спектральной плотностью N_0 плотность распределения фазы φ_{Π} ($-\pi \leq \varphi_{\Pi} \leq \pi$) на выходе демодулятора сигналов определяется соотношением

$$p(\varphi_{\Pi}) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{2E_c \sin^2(\varphi_{\Pi})}{N_0}\right) \int_0^{\infty} x \cdot \exp\left(-\frac{(x - \sqrt{4E_c/N_0} \cos(\varphi_{\Pi}))^2}{2}\right) dx. \quad (1)$$

Здесь $E_c = A^2 T_c / 2$ - энергия сигналов; T_c - длительность сигналов.

Полагая фазы φ_c и φ_{Π} статистически независимыми, можем задать плотность

распределения суммарной фазы $\varphi = \varphi_c + \varphi_{\Pi}$ как $p(\varphi) = \int_0^{2\pi} p_1(x) p_2(\varphi - x) dx$. Здесь

$p_1(x)$ и $p_2(x)$ задаются плотностями распределения $p(\varphi_c)$ и $p(\varphi_{\Pi})$ соответственно.

Вероятность ошибки $P_{\text{б}}$ при когерентном приеме цифровых сигналов с m -фазовой манипуляцией (сигналы ФМ- m объемом $M = 2^m$) с постоянной амплитудой A , интенсивно используемых в спутниковых информационных системах, имеет вид

$$P_{\text{б}}(A) = \frac{1}{m} \left(1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} p(\varphi) d\varphi \right). \text{ Для амплитуды } A \text{ в виде случайной стационарной}$$

величины с плотностью распределения $p(A)$ средняя вероятность ошибки $P_{\text{б}}$ с учетом

$$\text{замираний задается соотношением } P_{\text{б}} = \int_0^{\infty} P_{\text{б}}(A) p(A) dA.$$

Ниже приведены результаты вычислений вероятностей ошибки $P_{\text{б}}$ с использованием моделей и соответствующих энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве.

На рис.1, рис.2 приведены вероятности ошибки $P_{\text{б}}$ при приеме сигналов ФМ2 и ФМ4 для модели замираний, задаваемой плотностью распределения амплитуды $p(A)$ Релея-Райса. По оси абсцисс отложены значения $E_{\text{б}}/N_0$, здесь $E_{\text{б}}$ - энергия на бит, определяемая как $E_{\text{б}} = E_c/m$.

Кривая 1 на рис.1 соответствует сигналам ФМ2 при распространении в свободном пространстве - вероятность $P_{\text{б}} = 10^{-4}$ обеспечивается при $E_{\text{б}}/N_0 = 8.5$ дБ. Кривая 2 соответствует ионосферной линии с параметром $S_4 = 0.1$. Энергетические потери при распространении по рассматриваемой модели линии по отношению к кривой 1 для

$P_{\zeta} = 10^{-4}$ достигает 0.5 дБ. Кривая 3 соответствует распространению сигналов по ионосферной линии с параметром $S_4 = 0.2$. В этом случае энергетические потери по отношению к кривой 1 для $P_{\zeta} = 10^{-4}$ достигает 1.5 дБ. При уменьшении значений P_{ζ} энергетические потери увеличиваются.

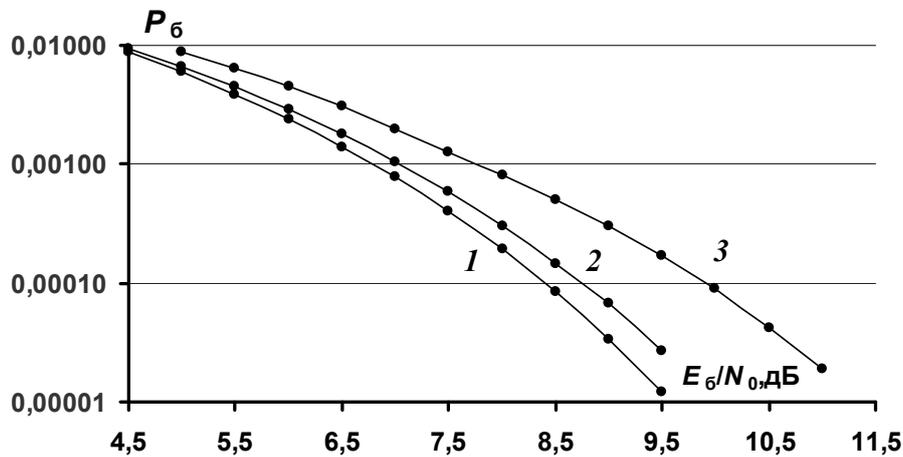


Рис.1. Вероятности ошибки P_{ζ} при приеме сигналов ФМ2 по каналу АБГШ: 1 - распространение в свободном пространстве; 2, 3 - распространение по каналам с замиранием, параметр $S_4 = 0.1$ и $S_4 = 0.2$.

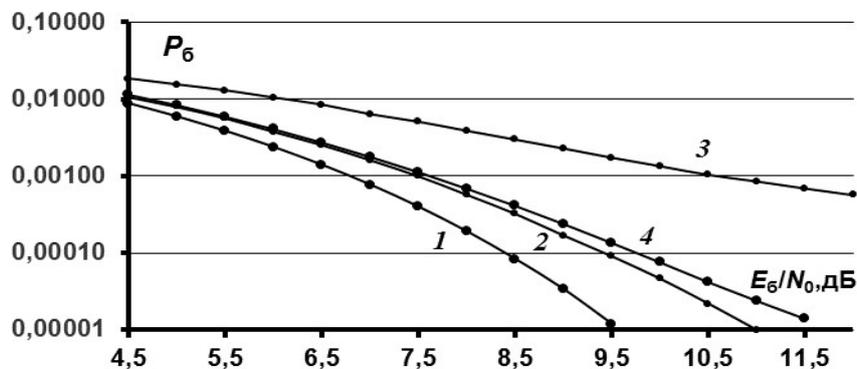


Рис.2. Вероятности ошибки P_{ζ} при приеме сигналов ФМ4 по каналу АБГШ: 1 - распространение в свободном пространстве; 2, 3 - распространение по каналам с замиранием, параметр $S_4 = 0.1$ и $S_4 = 0.2$ (без учета фазовой синхронизации); 4 - распространение по каналам с замиранием, параметр $S_4 = 0.2$ (с учетом фазовой синхронизации).

Кривая 1 на рис.2 соответствует сигналам ФМ4 при распространении в свободном пространстве - вероятность $P_{\zeta} = 10^{-3}$ обеспечивается при $E_b / N_0 = 6.9$ дБ. Кривая 2 соответствует ионосферной линии с параметром $S_4 = 0.1$. Энергетические потери при распространении по рассматриваемой модели линии по отношению к кривой 1 для $P_{\zeta} = 10^{-3}$ достигает 0.6 дБ. Кривая 3 соответствует распространению сигналов по ионосферной линии с параметром $S_4 = 0.2$. В этом случае энергетические потери по

отношению к кривой 1 для $P_G = 10^{-3}$ достигают 3.6 дБ. Кривая 4 на рис.2 соответствует распространению сигналов по ионосферной радиолинии с параметром $S_4 = 0.2$ при условии идеальной фазовой синхронизации, т.е без учета фазы Φ_C за счет влияния ионосферы при вычислении соотношения (11). Видно, что в этом случае энергетический выигрыш по отношению к кривой 3 для $P_G = 10^{-3}$ достигает 3 дБ.

Выводы

С использованием эмпирических моделей замираний сигналов произведены оценки энергетических потерь при приеме сигналов с фазовой манипуляцией при их распространении по трансionoсферным радиолиниям с параметрами индекса сцинтилляции, типичными для L- частотного диапазона, по отношению к распространению в свободном пространстве. Оценочные значения энергетических потерь достигают 3.6 дБ при вероятности ошибочного приема информационного бита $P_G = 0.001$ для сигналов ФМ4 и значений коэффициента сцинтилляции до 0.2 дБ без учета фазы за счет влияния ионосферы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-07-00525).

Литература

1. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 156 с.
2. 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.
3. Rino C.L. The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011. 244 p.
4. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation ITU-R P.531-11. Electronic Publication, Geneva, 2012, 24 p.
5. Кутуза Б.Г., Мошков А.В, Пожидаев В.Н. Комбинированный метод, который устраняет влияние ионосферы при обработке сигналов бортовых радиолокаторов Р-диапазона с синтезированной апертурой. // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. №9. Стр. 889-895.
6. Бова Ю. И., Крюковский А. С., Лукин Д. С. Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля. // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 4. №1. Стр. 3-7.
7. Crane R.K. Ionospheric Scintillation. // Proceeding of IEEE. 1977. V.2. P. 180-199.
8. Назаров Л. Е., Смирнов В. М. Вероятностные характеристики приема сигналов с замиранием при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. № 4(38). С. 18–23.