

## **Модели сцинтилляции сигналов при распространении по ионосферным линиям связи**

Л.Е. Назаров, Д.В. Антонов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
г. Фрязино, пл.Введенского, 1, levnaz2018@mail.ru, dmitry.vl.antonov@gmail.ru*

*Даны описания моделей сцинтилляции сигналов, обусловленные временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей. Даны результаты численного оценивания статистического параметра эмпирических моделей - индекса сцинтилляции для среднеширотной радиолинии P- частотного диапазона. Определен возможный диапазон значений индекса сцинтилляции для рассматриваемой радиолинии. С использованием эмпирической модели сцинтилляции произведены расчеты вероятностных характеристик приема сигналов с фазовой манипуляцией, распространяемых по рассматриваемой радиолинии с данным диапазоном индекса сцинтилляции. The results of analysis for signals propagating through the ionospheric satellite communication channels are presented. As a measure of distortion estimates concerning to the free space propagating the signal/noise degradation and the detection error-performances are used. The descriptions of signal distortions due to ionospheric influence are based on the time-domain solution for ionospheric channel as linear stationary filter.*

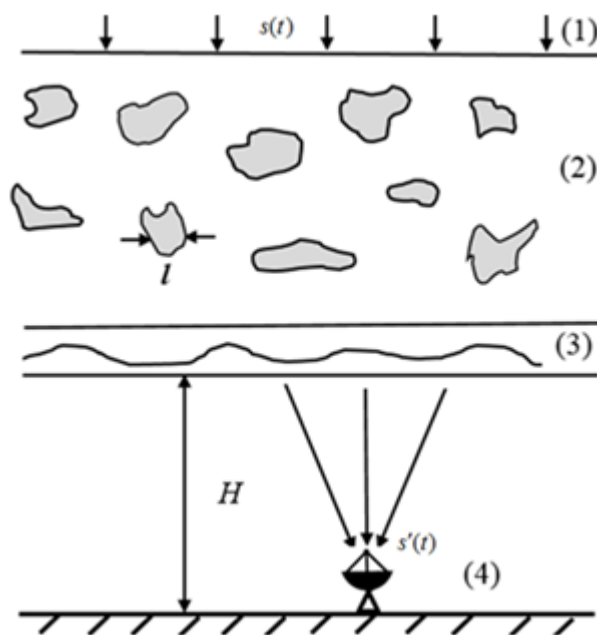
Сцинтилляции (замирания) амплитуд сигналов при распространении по спутниковым ионосферным линиям передачи вызываются временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей [1,2]. Решение задач распространения сигналов через подобные случайно-неоднородные среды предполагает установление статистической связи между характеристиками поля электронной плотности и характеристиками сигналов на входе приемных устройств [2].

Созданию и развитию моделей сцинтилляции сигналов посвящен ряд работ [1,2]. С использованием этих моделей возможно вычислить статистические характеристики вариаций мощностей сигналов, оценить вероятностные характеристики при приеме сигналов и выполнить сравнение с вероятностными характеристиками приема сигналов при распространении в свободном пространстве [3,4]. На основе этого сравнения оцениваются соответствующие энергетические потери  $\Delta E$ , которые необходимо учитывать в энергетических бюджетах радиолиний [4,5].

Результаты экспериментальных и теоретических исследований с использованием этих моделей показывают зависимость  $\Delta E$  за счет сцинтилляции от множества факторов [1,2,5]. Достаточно детально исследованы радиолинии L- частотного диапазона, активно используемые спутниковыми системами глобальной навигации [5,6]. Актуальной является проблема обобщения, развития и дополнения этих результатов для радиолиний P- частотного диапазона, также активно используемых спутниковыми системами передачи информации. Примером является международная спутниковая поиско-спасательная система Коспас-Сарсат, работающая в частотном диапазоне 406.0...406.1 МГц) [7].

На рис.1 приведена схема, поясняющая распространение сигналов  $s(t)$  по спутниковой ионосферной радиолинии. Основной вклад в сцинтилляцию сигналов вносятся неоднородностями электронной плотности  $N_e(\vec{r}, t)$  ионосферного слоя F, имеющих размеры  $l$ , сравнимые с размерами первой зоны Френеля  $r_0 = \sqrt{\lambda H}$  ( $\lambda$  - длина волны сигналов) [1,2]. Для расположения бортового передающего устройства на

высоте  $H_0 \gg H$  ( $h = 350..400$  км – высота ионосферного слоя  $F$ ), что является справедливым условием для спутниковых систем глобальной навигации ( $H_0 \cong 19200$  км), сигналы  $s(t)$  полагаются плоскими волнами. В моделях [1,2] эффект ионосферных неоднородностей задается действием тонкого экрана с полем случайного фазового распределения  $\varphi(\vec{r}, t)$ . Амплитуда  $A$  результирующего сигнала  $s'(t)$  на входе наземного приемного пункта является случайной величиной и определяется путем применения методов дифракции с учетом случайного поля  $\varphi(\vec{r}, t)$  [1].



**Рис.1. Распространение сигналов по спутниковой ионосферной радиолинии: 1 - плоская волна; 2 - ионосферный слой с неоднородностями; 3 - фазовый фронт; 4 - наземный приемный пункт.**

Для канальной помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума  $n(t)$  правило оптимального приема сигналов, реализующего критерий максимального правдоподобия, основано на вычислении взаимной корреляции входной реализации  $s'(t) + n(t)$  с исходным сигналом  $s(t)$  [3]. В этом случае вероятность ошибочного приема бита  $P_b$  при когерентном приеме сигналов с двухфазовой и четырехфазовой манипуляцией (ФМ2 и ФМ4 сигналы) определяется соотношением [3]

$$P_b(E_b / N_0) = 1 - F(\sqrt{2E_b / N_0}). \quad (1)$$

Здесь  $E_b$  - энергия сигналов на информационный бит;  $N_0$  - спектральная плотность АБГШ (односторонняя);  $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2 / 2) dt$ .

Полагая амплитуду  $A$  сигнала  $s'(t)$  случайной стационарной в широком смысле величиной с плотностью распределения  $p(A)$ , вероятность ошибки с учетом сцинтилляции можно вычислить с использованием выражения

$$P_b = \int_0^{\infty} P_b(E_b A^2 / N_0) p(A) dA. \quad (2)$$

Рассматриваемые скинтиляции сигналов и их статистические характеристики определяются рядом параметров - центральной частотой  $f_0$ , пространственным размещением передающего и приемного устройства, солнечной активностью, скоростью движения ионосферных неоднородностей, суточным временем, др. [1,2,8,9]. При создании и развитии моделей скинтиляции сигналов с их учетом используются два подхода - на основе применения аналитических методов описания распространения сигналов с ионосферными неоднородностями и на использовании эмпирических соотношений относительно плотности распределения  $p(A)$  [1,2].

В подходе на основе аналитических методов описания распространения сигналов полагают наличие ионосферных неоднородностей с пространственными вариациями электронной плотности  $N_e(\vec{r}, t)$  с масштабом, сравнимым с длиной волны  $\lambda$  [1]. Полагаются также малыми ее временные вариации с масштабом  $1/f_0$ . В этом случае составляющая электрического поля  $E$ , падающего вертикально на ионосферный слой при распространении, является решением волнового уравнения [8,9]

$$\frac{d^2 E(x, t)}{dx^2} + k^2 \varepsilon(x, t) E(x, t) = 0. \quad (3)$$

Здесь  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число для свободного пространства,  $\varepsilon(x, t)$  - диэлектрическая проницаемость среды.

Полагается, что основные вариации диэлектрической проницаемости  $\delta\varepsilon(x, t) \cong 4\pi r_e N_e / k^2$  происходят в ограниченном объеме с линейными размерами  $l$ , сравнимыми с размерами первой зоны Френеля  $r_0$  ( $r_e$  - радиус электрона). При этом условии уравнение (3) трансформируется в уравнение параболического типа [1]

$$-j2k \frac{\partial U}{\partial x} + \nabla_1^2 U + k^2 \varepsilon(x, t) U = 0. \quad (4)$$

Здесь  $u = U \exp(-jkx)$ ,  $\nabla_1^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ .

Уравнение (4) является стохастическим, его решение определяет связь между случайными величинами  $U$  и  $\varepsilon(x, t)$  и устанавливает их статистические характеристики (например, статистические моменты, включая четвертый момент амплитуды сигнала  $s'(t)$ , используемый для оценки диапазона замираний сигналов).

Уравнение (4) является нелинейным, проблема поиска его решения в виде замкнутых аналитических выражений остается открытой. Известны его приближенные решения Борна и Рытова в виде суммы слагаемых, зависящих от малого параметра  $\varepsilon'(x, t) \ll 1$ , где  $\varepsilon(x, t) = 1 + \varepsilon'(x, t)$  [2]. Использование слагаемого, зависящего от  $\varepsilon'(x, t)$ , дает приближение Борна  $U'(x, t)$  (рассеяние Дебая-Борна), соответствующего однократному рассеянию при условии  $U'/U_0 \ll 1$  [2]. Для  $U'/U_0 \cong 1$  решение (4) эквивалентно решению задачи с многократным рассеянием [7].

Приближение Рытова (метод малых возмущений) основано на использовании соотношения  $\psi = Ln(U)$ , функция  $\psi$  является решением уравнения [1,2]

$$-2k \frac{\partial \psi}{\partial x} + \nabla_1^2 \psi + (\nabla_1 \psi)^2 + k^2 \varepsilon = 0. \quad (5)$$

Решение (5) в приближении Рытова определяет линейную связь между случайными функциями  $\psi$  и  $N_e(\vec{r}, t)$ , и связь статистических моментов функции  $Ln(A)$  от амплитуды сигнала  $s'(t)$  и флуктуаций электронной плотности  $N_e(\vec{r}, t)$ . Однако рассматриваемые аналитические подходы с использованием приближенных решений уравнения (4) не дают достаточно точных результатов в общем случае отношений  $U'/U_0$  по отношению к экспериментальным измерениям [1].

Более точные модели сцинтилляции из рассматриваемого класса основаны на включении тонкого фазового экрана на высоте  $H$  слоя ионосферы  $F$  - ионосферные неоднородности возмущают фазовое поле экрана, с его использованием вычисляются результирующие сигналы  $s'(t)$  методами теории дифракции [1].

Модели сцинтилляции сигналов из второго класса связывают параметры эмпирических плотностей распределения  $p(A)$  амплитуды сигнала  $s'(t)$  с индексом сцинтилляции  $S_4 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2$ , значения которого задают важную для приложений характеристику - диапазон замираний сигналов  $P_f$  [2,5]. Здесь  $I = A^2(t)$  - мощность сигналов;  $\langle \rangle$  - операция усреднения по ансамблю сигналов. По значениям индекса  $S_4$  замирания классифицируются: слабые до  $S_4 < 0.3$ ; средние  $0.3 < S_4 < 0.6$ ; сильные  $S_4 > 0.6$ . Увеличение значений  $S_4$  сопровождается увеличением энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве.

Замирания амплитуды сигналов  $P_f$  (дБ) на входе приемного устройства определяется примерным соотношением  $P_f = 27.5 S_4^{1.26}$  [2]. Более точная связь  $P_f$  и  $S_4$  может быть определена с использованием эмпирических моделей плотности распределения  $p(A)$ , значения параметров которых могут быть заданы с использованием рассмотренных выше аналитических моделей (4), (5) либо с использованием экспериментальных исследований радиолиний.

Для сцинтилляций плотность  $p(A)$  может представлена известными законами распределения: логнормальным распределением [2],  $m$ -распределением Накагами [3], распределением Релея-Райса.

Наиболее часто плотность распределения амплитуды  $p(A)$  сигналов при распространении по ионосферной радиолинии описывается Накагами [2]

$$p(A) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left( \frac{m}{\sigma^2} \right)^m A^{2m-1} \exp \left( - \frac{mA^2}{\sigma^2} \right). \quad \text{Здесь } \sigma^2 \text{ - флуктуационная составляющая}$$

мощности сигнала  $s'(t)$ ;  $m \geq 1/2$  - параметр, задаваемый соотношением

$$m = \frac{\Omega^2}{\langle (A^2 - \Omega)^2 \rangle}, \quad \Omega = \langle A^2 \rangle. \quad \text{Параметры } S_4 \text{ и } m \text{ связаны соотношением } m = 1/S_4 \text{ [2].}$$

Распределение Накагами аппроксимируется распределением Релея-Райса

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

компоненты;  $I_0(x)$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Распределение Релея-Райса характеризуется коэффициентом Райса  $c = A_0^2/2\sigma^2$ . Параметры  $S_4$ ,  $m$  и коэффициент Райса  $c$  при условии  $A_0^2/\sigma^2 > 1$

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

В соответствии с экспериментальными данными для нормальной ионосферы средних широт и для радиолинии с центральной частотой  $f_0 = 400$  МГц значение индекса мерцаний  $S_4$  не превышает 0.3...0.5, т.е. замирания могут быть отнесены к классу слабых-средних замираний, для полярных областей значения  $S_4$  могут достигать 1 [2] и в этом случае замирания могут быть отнесены к классу сильных замираний.

Ниже приведены результаты оценивания индекса  $S_4$  на основе экспериментальных измерений амплитуд сигналов спутниковой системы Коспас-Сарсат и приведены вероятностные характеристики при приеме сигналов, вычисленные с использованием соотношения (2) и модельных описаний плотности распределения амплитуды  $p(A)$  (6), (7) с параметрами, соответствующими оценкам  $S_4$ .

Международная спутниковая система Коспас-Сарсат предназначена для определения местоположения аварийных радиобуев, функционирующих в  $P$ -частотном диапазоне 406.0 ...406.1 МГц (линия «вверх») и в  $L$ - частотном диапазоне (линия «вниз») [18]. Информационные сообщения радиобуев второго поколения передаются по радиолинии с использованием цифровых ФМ4 сигналов с смещением [7], ретрансляторы сигналов радиобуев расположены на спутниках систем глобальной навигации (Глонас, GPS, Galileo).

На рис.2 приведены фрагменты зависимости мощности сигналов  $I(t)$  от времени, вычисленные путем обработки в ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН принимаемых сигналов радиобуев в виде записей в цифровом формате, полученных с использованием технических средств станции приема от среднеорбитальных навигационных спутников GPS (рис.2а)), Galileo (рис.2б).

В результате обработки сигналов спутниковой системы Коспас-Сарсат (временной период март-октябрь 2018 г.) определен возможный диапазон значений индекса сцинтилляции  $S_4$  для исследуемого частотного диапазона  $S_4 = 0.27...0.49$ , примерный диапазон замираний амплитуды сигналов  $P_f = 5.25...11.20$  дБ. Соответствующие значения параметра распределения Накагами (6) находятся в диапазоне  $m = 2.04...3.70$ , соответствующий диапазон значений коэффициента Райса распределения Релея-Райса (7)  $c = 4.1...7.4$ .

На рис.3 приведены вероятности ошибки  $P_b$  при когерентном приеме ФМ4 сигналов, вычисленные с использованием соотношений (1), (2), для модели сцинтилляции, задаваемой плотностью распределения амплитуд Релея-Райса (7) с приведенными оценками параметра Райса  $c$ . Кривая 1 соответствует распространению в свободном пространстве - вероятность  $P_0 = 10^{-3}$  обеспечивается при отношении

$E_G/N_0 = 6.7$  дБ. Кривая 2 соответствует максимальному значению параметру Райса в диапазоне их оценок  $c = 7.4$ , вероятность  $P_G = 10^{-3}$  обеспечивается при отношении  $E_G/N_0 = 10.0$  дБ, энергетический проигрыш по отношению к кривой 1 достигает 3.3 дБ. Кривая 3 соответствует минимальному значению параметру Райса в диапазоне их оценок  $c = 4.1$ . Видно, что вероятность  $P_G = 10^{-3}$  обеспечивается при отношении  $E_G/N_0 = 13.5$  дБ, что соответствует энергетическому проигрышу по отношению к кривой 1 до 6.8 дБ.

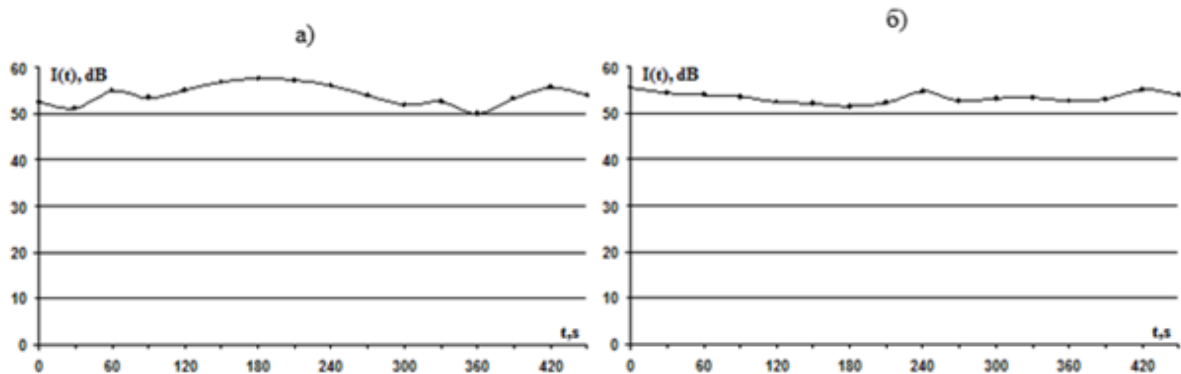


Рис.2. Фрагменты зависимости мощности сигналов  $I(t)$  от времени, полученные путем обработки сигналов радиобуев спутниковой поисково-спасательной системы Коспас-Сарсат: а) навигационный спутник GPS; б) навигационный спутник Galileo (рис.2б).

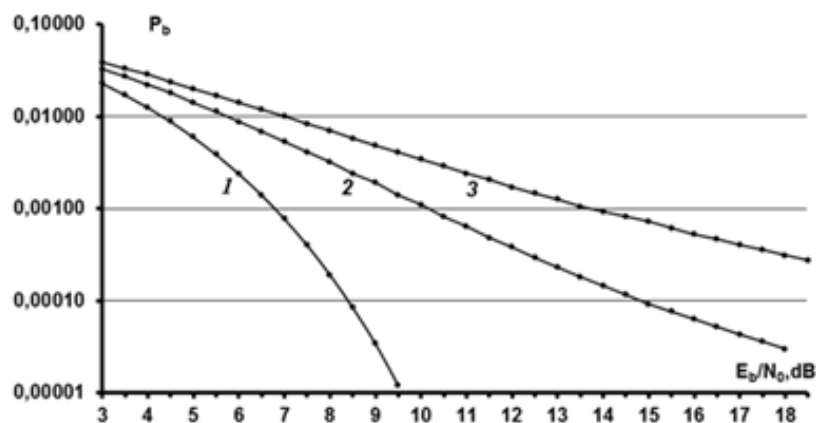


Рис.3. Вероятности ошибки при когерентном приеме ФМ4 сигналов, вычисленные для модели сцинтилляции, задаваемой плотностью распределения Релея-Райса: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - параметру Райса  $c = 7.4$ ; 3 - параметр Райса  $c = 4.1$ .

### Литература

1. Crane R.K. Ionospheric Scintillation. // Proceeding of IEEE, 1977, v.2, p. 180-199.
2. Rino C.L. The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2011, 244 p.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Перевод с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003, 1104 с.

4. 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.
5. Ghafoori F, Skone S. Impact of equatorial ionospheric irregularities on GNSS receivers using real and synthetic scintillation signals. // Radio Science, 2015, v.50, p. 294-317.
6. ГЛОНАСС: принципы построения, функционирования. М.: Радиотехника. 2010, 798 с.
7. Specification for second-generation COSPAS-SARSAT 406 MHz distress beacons. C/S T.018. Issue 1. 2016.
8. 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.
9. 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. 64, №1, стр. 3-14.