

МОДЕЛИ СЦИНТИЛЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО ИОНОСФЕРНЫМ СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛИНИЯМ

Назаров А. Е., Антонов Д. В., Батанов В. В., Зудилин А. С., Смирнов В. М.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

Поступила 16.04.2019, принята 21.04.2019

Представлена чл.-корр. РАЕН Я.А. Плушиным

Приведены описания моделей сцинтилляции (замираний) сигналов, обусловленные случайными временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей. Даны результаты численного оценивания статического параметра эмпирических моделей - индекса сцинтилляции (статистического момента четвертого порядка от амплитуды сигналов) для среднеширотной радиолинии R-частотного диапазона спутниковой информационной системы Коспас-Сарсат. 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 вычисленным диапазоном индекса сцинтилляции, и определен требуемый запас по энергетике до 6.8 дБ для вероятности ошибки 0.001 по отношению к распространению в свободном пространстве.

Ключевые слова: ионосферные спутниковые радиолинии, сигналы, сцинтилляции сигналов, модели сцинтилляции, вероятность ошибки приема, Коспас-Сарсат

УДК 621.391.01

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (57)
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (58)
3. МОДЕЛИ СЦИНТИЛЛЯЦИИ СИГНАЛОВ (59)
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ (59)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (62)

ЛИТЕРАТУРА (63)

1. ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляции (замирания) сигналов при распространении по спутниковым ионосферным линиям передачи вызываются случайными временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей [1-5].

Решение задач распространения сигналов через такие случайно-неоднородные среды предполагает установление связи между статистическими характеристиками поля электронной плотности и характеристиками сигналов на входе приемных устройств

[2-4, 6, 7]. Созданию и развитию частных моделей сцинтилляции сигналов посвящен достаточно широкий ряд работ [2, 4, 8, 9]. С использованием этих моделей возможно вычислить статистические характеристики вариаций мощностей сигналов (например, средних мощностей, статистических моментов мощностей) и, как следствие, оценить вероятностные характеристики при приеме сигналов и выполнить сравнение с вероятностными характеристиками приема сигналов при распространении в свободном пространстве [10, 11]. На основе этого сравнения оцениваются соответствующие энергетические потери, которые необходимо учитывать в энергетических бюджетах радиолиний.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований с использованием этих моделей показывают зависимость энергетических потерь за

счет сцинтилляции от центральной частоты, от пространственного размещения передающих и приемных устройств, солнечной активности, суточного времени [3, 4]. Достаточно детально исследованы радиолинии L -частотного диапазона, активно используемые спутниковыми системами глобальной навигации (Глонасс, GPS, Galileo, др.) [12-17]. 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 поисково-спасательная система Коспас-Сарсат, работающая в частотном диапазоне 406.0...406.1 МГц [18].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 приведена схема, поясняющая распространение сигналов $s(t)$ по спутниковой ионосферной радиолинии. Исследования показывают, что основной вклад в сцинтилляцию сигналов определяется неоднородностями электронной плотности $N_e(\vec{r}, t)$ ионосферного слоя F , имеющих размеры l , сравнимые с размерами первой зоны Френеля $r_0 = \sqrt{\lambda H}$ (λ – длина волны сигналов) [1, 4, 15]. 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 ($H_0 \approx 19200$ км), падающие сигналы $s(t)$ относятся к дальней зоне излучения и полагаются плоскими волнами. В моделях [1, 4] 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, 3].

Для базовой модели канальной помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума $n(t)$ (АБГШ) правило оптимального приема цифровых сигналов, реализующего статистический критерий максимального правдоподобия, основано на вычислении взаимной корреляции входной реализации $s'(t) + n(t)$ с исходным сигналом $s(t)$ [10]. В этом случае вероятность ошибочного приема бита P_b при когерентном приеме сигналов с двухфазовой и четырехфазовой манипуляцией (ФМ2 сигналы, ФМ4 сигналы) без помехоустойчивого кодирования определяется соотношением [10]

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

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 $p(A)$, среднюю вероятность ошибки с учетом сцинтилляции можно вычислить с использованием выражения [10]

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

Суть задачи – привести описания моделей

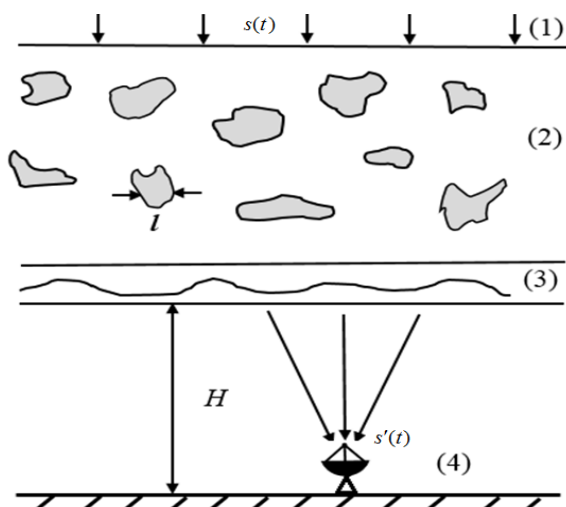


Рис. 1. Распространение сигналов по спутниковой ионосферной радиолинии: 1-плоская волна; 2-ионосферный слой с неоднородностями; 3- фазовый фронт; 4- наземный приемный пункт.

сцинтилляции амплитуд сигналов как случайного процесса при распространении по неоднородным спутниковым ионосферным радиолиниям, дать результаты вычисления вероятности ошибки для сигналов с фазовой манипуляцией с учетом моделей сцинтилляции и привести количественные оценки энергетических потерь при приеме этих сигналов для P -частотного диапазона по отношению к распространению в свободном пространстве.

3. МОДЕЛИ СЦИНТИЛЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

Рассматриваемые сцинтилляции 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, и др. [3, 4].

При создании и развитии моделей сцинтилляции сигналов с учетом этих факторов используются два подхода – на основе применения аналитических методов описания распространения сигналов с ионосферными неоднородностями и на использовании эмпирических соотношений относительно плотности распределения $p(\mathcal{A})$ [1, 5].

В подходе на основе аналитических методов описания распространения сигналов полагают наличие ионосферных неоднородностей с малыми пространственными вариациями электронной плотности $N_e(\vec{r}, t)$ с масштабом, сравнимым с длиной волны λ [1, 4]. Полагаются также малыми ее временные вариации с масштабом $1/f_0$. В этом случае составляющая электрического поля E , падающего вертикально на ионосферный слой (ось x) при распространении, является решением волнового уравнения [3, 19, 20]

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

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

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

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

Здесь

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

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 $\varepsilon(x, t) = 1 + \varepsilon'(x, t)$ [1, 6, 7]. Для приближения $\varepsilon'(x, t) = 0$ решение (4) в виде $U_0(x, t)$ определяет распространение сигналов в свободном пространстве. Использование слагаемого, зависящего от $\varepsilon'(x, t)$, дает приближение Борна $U'(x, t)$ (рассеяние Дебая-Борна), соответствующего однократному рассеянию при условии $U'/U_0 \ll 1$ [7]. Для $U'/U_0 \approx 1$ решение (4) эквивалентно решению задачи с многократным рассеянием [7].

Приближение Рытова (метод малых возмущений) основано на использовании соотношения $\psi = Ln(\mathcal{A})$, функция ψ является решением уравнения [1, 6, 7]

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

Решение (5) в приближении Рытова определяет линейную связь между случайными функциями ψ и $N_e(\vec{r}, t)$ и связь статистических моментов функции $L_n(A)$ от амплитуды сигнала $s'(t)$ и флуктуаций электронной плотности $N_e(\vec{r}, t)$. Вместе с тем отмечается, что 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 (рис. 1) – ионосферные неоднородности возмущают фазовое поле экрана, с его использованием вычисляются результирующие сигналы $s'(t)$ методами теории дифракции [1, 4]. Модификации данного подхода включают несколько экранов с некоррелированными фазовыми полями [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 [5, 9]. Здесь $I = A^2(t)$ – мощность сигналов; $\langle \rangle$ – операция усреднения по ансамблю сигналов, либо по времени, полагая случайный процесс $A(t)$ эргодическим.

Диапазон замираний амплитуды сигналов P_f (дБ) на входе приемного устройства определяется примерным соотношением $P_f = 27.5 S_4^{1.26}$ [5]. 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.

По значениям индекса S_4 замирания классифицируются: слабые до $S_4 < 0.3$; средние $0.3 < S_4 < 0.6$; сильные $S_4 > 0.6$ [5]. Увеличение значений S_4 сопровождается увеличением энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве.

Для сцинтилляций плотность $p(A)$ может быть представлена известными законами распределения: логнормальным распределением [2], m -распределением Накагами [5], распределением Релея-Райса, $-\alpha$ - μ -распределением [9].

Наиболее часто плотность амплитуды $p(A)$ сигналов при распространении по ионосферной радиолинии описывается распределением Накагами [4, 5]

$$p(A) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\sigma^2} \right)^m A^{2m-1} \exp \left(-\frac{mA^2}{\sigma^2} \right). \quad (6)$$

Здесь σ^2 – флуктуационная составляющая мощности сигнала $s'(t)$; $m \geq 1/2$ – параметр, задаваемый соотношением $m = \frac{\Omega^2}{\langle (A^2 - \Omega)^2 \rangle}$, $\Omega = \langle A^2 \rangle$ [21]. Параметры S_4 и m связаны соотношением $m = 1/S_4$ [5].

Распределение Накагами аппроксимируется распределением Релея-Райса [21]

$$p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp \left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma^2} \right) I_0 \left(\frac{AA_0}{\sigma^2} \right). \quad (7)$$

Здесь A_0 – средняя амплитуда сигнальной компоненты; $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка [21].

Распределение Релея-Райса характеризуется коэффициентом Райса $c = A_0^2 / 2\sigma^2$ [21]. Параметры S_4 , m и коэффициент Райса c при условии $A_0^2 / \sigma^2 > 1$ 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 $0.3 \dots 0.5$, т.е. замирания могут быть отнесены к классу слабых-средних замираний, для полярных областей значения S_4 могут достигать 1 [5] 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 (центральная частота $f_0 = 406$ МГц) 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 .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Международная спутниковая система Коспас-Сарсат предназначена для определения местоположения аварийных радиобуев, функционирующих в P -частотном диапазоне $406.0 \dots 406.1$ МГц (линия «вверх») и в L -частотном диапазоне (линия «вниз») [18]. Информационные сообщения радиобуев второго поколения передаются по радиолинии с использованием

цифровых ФМ4 сигналов со смещением [10], длительность сигналов 1 секунда с номинальным временным интервалом включения 30 секунд, длительность синхронизирующей последовательности 160 мсек [18]. Ретрансляторы сигналов радиобуев расположены на спутниках систем глобальной навигации (Глонасс, GPS, Gallileo [17]).

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 второго поколения в виде записей в цифровом формате, полученных с использованием технических средств станции приема от среднеорбитальных навигационных спутников GPS (рис. 2а), Gallileo (рис. 2б) для дневного времени. Страны-производители радиобуев – Франция, США, радиобуи функционируют в тестовом режиме [18].

Особенностью рассматриваемой радиолинии является совместное влияние ионосферных неоднородностей на распространение сигналов в P - (линия «вверх») и L - (линия «вниз») частотных диапазонах.

При обработке вычислялись точечные оценки $I(t)$ для дискретного времени включения радиобуев путем корреляционной обработки входных реализаций с

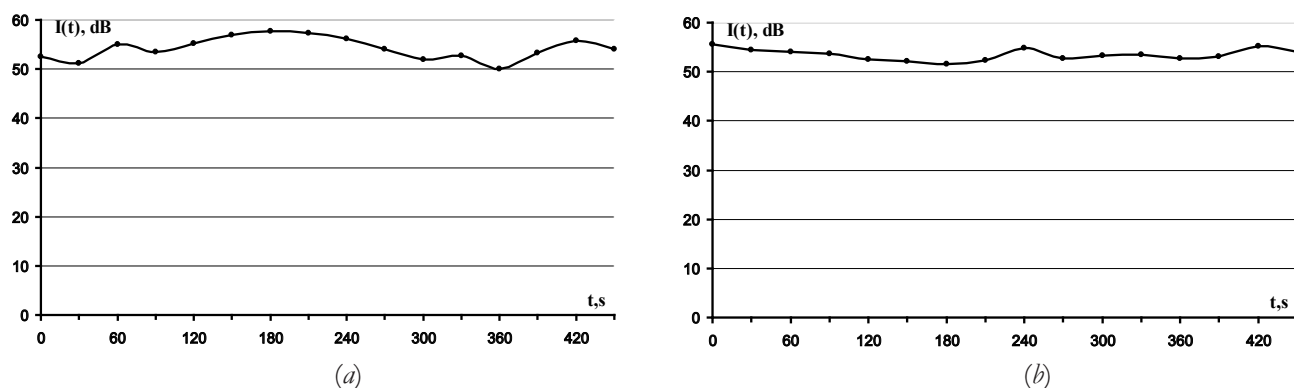


Рис. 2. Фрагменты зависимости мощности сигналов $I(t)$ от времени, полученные путем обработки сигналов радиобуев спутниковой поисково-спасательной системы Коспас-Сарсат второго поколения (дневное время, июль 2018 г.): (а) навигационный спутник GPS; (б) навигационный спутник Gallileo.

синхронизирующей последовательностью.

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 $P_b = 10^{-3}$ обеспечивается при отношении $E_b/N_0 = 6.7$ дБ.

Кривая 2 соответствует максимальному значению параметру Райса в диапазоне их оценок $c = 7.4$, вероятность $P_b = 10^{-3}$ обеспечивается при отношении $E_b/N_0 = 10.0$ дБ, энергетический проигрыш по отношению к кривой 1 достигает 3.3 дБ.

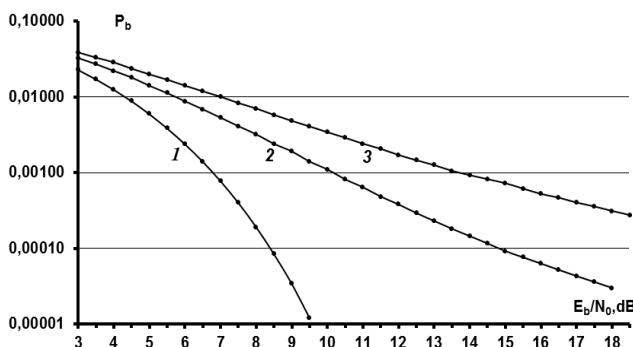


Рис. 3. Вероятности ошибки при когерентном приеме ФМ4 сигналов для модели сцинтилляции, задаваемой плотностью распределения Релея-Райса: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - параметр Райса $c = 7.4$; 3 - параметр Райса $c = 4.1$.

Кривая 3 соответствует минимальному значению параметру Райса в диапазоне их оценок $c = 4.1$. Видно, что вероятность 10^{-3} обеспечивается при отношении $E_b/N_0 = 13.5$ дБ, что соответствует энергетическому проигрышу по отношению к кривой 1 до 6.8 дБ.

Энергетические проигрыши увеличиваются при понижении задаваемых значений ошибки P_b .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены описания моделей сцинтилляции (замираний) сигналов, обусловленные случайными временными и пространственными флуктуациями электронной плотности ионосферных неоднородностей. Эти модели относятся к двум общим классам – на основе применения аналитических методов описания распространения сигналов с использованием теории стохастических уравнений и на основе эмпирических моделей относительно плотности распределения амплитуд сигналов на входе приемных устройств с использованием индекса сцинтилляции (статистического момента четвертого порядка от амплитуды сигналов).

Даны результаты численного оценивания индекса сцинтилляции для среднеширотной радиолинии спутниковой информационной системы Коспас-Сарсат. Особенностью этой радиолинии является совместное влияние ионосферных неоднородностей на распространение сигналов в P - (линия «вверх») и L - (линия «вниз») частотных диапазонах. В результате обработки сигналов системы Коспас-Сарсат определен возможный диапазон значений индекса сцинтилляции $0.27...0.49$. С использованием эмпирической модели сцинтилляции произведены расчеты вероятностных характеристик приема сигналов с фазовой манипуляцией, распространяемых по рассматриваемой радиолинии с данным

диапазоном индекса сцинтилляции, и определен требуемый запас по энергетике до 6.8 дБ для вероятности ошибки 0.001 по отношению к распространению в свободном пространстве. Это необходимо учитывать при расчете энергетического бюджета данной радиолинии.

Исследование статистических характеристик исследуемой радиолинии, в частности определение времени и частотной полосы когерентности, а также уточнение диапазона энергетического запаса с учетом методов помехоустойчивого кодирования, составляют направление перспективных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Crane RK. Ionospheric Scintillation. *Proceeding of IEEE*, 1977, 2:180-199.
2. Колосов МА, Арманд НА, Яковлев ОИ. *Распространение радиоволн при космической связи*. М., Связь, 1969, 156 с.
3. Яковлев ОИ, Якубов ВП, Урядов ВП, Павелъев АГ. *Распространение радиоволн*. М., ЛЕНАНД, 2009, 496 с.
4. Rino CL. *The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011, 244 p.
5. 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.
6. Рыгов СМ, Кравцов ЮА, Татарский ВИ. *Введение в статистическую радиофизику. Т. 2. Случайные поля*. М., Наука, 1978, 464 с.
7. Исимару А. *Распространение и рассеяние волн в случайных средах. Т. 2*. М., Мир, 1981, 280 с.
8. Priyadarshi S. Review of Ionospheric Scintillation Models. *Surveys in Geophysics*, 2015. 36(2):295-324.
9. Moraes AO, Vani BC, Costa E, Sousasantos J, Abdu MA, Rodrigues F, Gladek YC, Oliveira BA, Monico JF. Ionospheric Scintillation Fading Coefficients for the GPS L1, L2, and L5 Frequencies. *Radio Science*, 2018, 53:1165-1174.
10. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. М., Изд. дом "Вильямс", 2003, 1104 с.
11. Назаров АЕ, Батанов ВВ. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. *Радиотехника и электроника*, 2017, 62(9):866-874.
12. Humphreys TE, Psiaki ML, Kintner PM. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4):1624-1637.
13. Ghafoori F, Skone S. Impact of equatorial ionospheric irregularities on GNSS receivers using real and synthetic scintillation signals. *Radio Science*, 2015, 50:294-317.
14. Jiao Y, Morton Y, Taylor S, Pelgrum W. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals. *Radio Science*, 2013, 48(6):698-708.
15. Jiao Y, Xu D, Morton Y, Rino CL. Equatorial scintillation amplitude fading characteristics across the GPS frequency bands. *Navigation*, 2016, 63(3):267-281.
16. Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer-Verlag, New York, 1994, 392 p.
17. ГЛОНАСС: *принципы построения, функционирования*. М.: Радиотехника. 2010, 798 с.
18. Specification for second-generation COSPAS-SARSAT 406 MHz distress beacons. *C/S T.018. Issue 1*, 2016.
19. Кутуза БГ, Мошков АВ, Пожидаев ВН. Комбинированный метод, который устраняет влияние ионосферы при обработке сигналов бортовых радиолокаторов Р-диапазона с синтезированной апертурой. *Радиотехника и электроника*, 2015, 60(9):889-895.

20. Бова ЮИ, Крюковский АС, Лукин ДС. Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля. *Радиотехника и электроника*, 2019, 64(1):3-14.
21. Тихонов ВИ. *Статистическая радиотехника*. М., Советское радио, 1966, 678 с.

Назаров Лев Евгеньевич

д.ф.-м.н., с.н.с.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
levnaz2018@mail.ru

Антонов Дмитрий Владимирович

инженер

Институт радиотехники и электроники им. В.А.

Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
dmitry.vl.antonov@gmail.com

Батанов Виталий Викторович

инженер

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
bvitaly@inbox.ru

Зудилин Андрей Сергеевич

инженер

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
zudilinas@hotmail.ru

Смирнов Владимир Михайлович

д.ф.-м.н., с.н.с.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
vsmirnov@sunclass.ire.rssi.ru

THE SCINTILLATION MODELS FOR SIGNAL PROPAGATION THROUGH SATELLITE IONOSPHERIC CHANNELS

Lev E. Nazarov, Dmitry V. Antonov, Vitaly V. Batanov, Andrey S. Zudilin, Vladimir M. Smirnov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://fire.relarn.ru>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

levnaz2018@mail.ru, dmitry.vl.antonov@gmail.com, bvitaly@inbox.ru, zudilinas@hotmail.ru, vsmirnov@sunclass.ire.rssi.ru

Abstract. The results of analysis for signals propagating through the ionosphere satellite communication channels with temporal and spatial electron density irregularities in the ionosphere plasma are presented in the article. These electron density irregularities most commonly occur in low-latitude, auroral, and polar regions and refer to the random signal amplitude and phase fluctuations. Occurrence of scintillation is difficult to predict and model due to the variability of its numerous influencing factors, which include solar activities, inter-planetary magnetic field activities, local electric field and conductivity, convection processes, wave interactions. Satellite ionospheric radio waves in P-, L- frequency bands are vulnerable to scintillations that can severely impact the acquisition and tracking process in receivers, causing a degradation in navigation and in information systems (as example, Kospas-Sarsat system) solution accuracy, integrity, and continuity. The widely-used indice to measure ionospheric scintillation activity is the scintillation index for amplitude scintillation (the standard deviation of the received signal power normalized to the average signal power). The values of scintillation index (0.27...0.49) for Kospas-Sarsat channel (406.0-406.1 MHz) are evaluated in the article. The empirical model for probability density for signal amplitude as m-law Nakagami based on these values of scintillation index is used to evaluate error-performance degradation concerning to propagation through free space. The computer simulations for evaluation of these error-performance degradations are performed - the degradation of signal/noise is about 6.8 dB for bit-error 0.001.

Keywords: satellite ionosphere channels, signals, signal scintillations, error-performances, signals, phase shift keying signals, Kospas-Sarsat

UDC 621.391.01

Bibliography – 21 references

RENSIT, 2019, 11(1):57-64

Received 16.04.2019, *accepted* 21.04.2019

DOI: 10.17725/rensit.2019.11.057