

## **Оценивание вероятностных характеристик приема КАМ-сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям**

Л.Е. Назаров<sup>1,2</sup>, В.В. Батанов<sup>2</sup>

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

E-mail: levnaz2018@mail.ru

<sup>2</sup>АО «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 квадратурно-амплитудной 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, КАМ-сигналы, замирания сигналов, вариации амплитуд, вариации фаз, распределение Релея-Райса, вероятность ошибочного приема*

## **Estimation of the probabilistic characteristics of QAM signal reception during propagation along transionosphere radio lines**

L.E. Nazarov<sup>1</sup>, V.V. Batanov

<sup>1</sup>Fryazinsky Branch of the V.I. V.A. Kotelnikov RAS  
1414190, Fryazino, Moscow region, pl. Vvedensky, 1

E-mail: levnaz2018@mail.ru

<sup>2</sup>JSC "Information Satellite Systems", Zheleznogorsk  
662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, st. Lenin, 52

E-mail: bvitaly@inbox.ru

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 quadrature-amplitude 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, QAM-signals, fading, error-performances*

### **Введение**

При распространении по спутниковым радиолиниям передачи сигналы подвергаются действию искажающих факторов в дополнение к влиянию канальных тепловых шумов, снижающих верность передачи информации по отношению к распространению в свободном пространстве [1]. Одно из важных искажений обусловлено многолучевостью распространения за счет рассеяния и отражения сигналов на ионосферных неоднородностях, которая порождает временные вариации амплитуд (замирания сигналов) [1-5].

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 [2,36,7]. В работе [5] приведены соответствующие оценки энергетических потерь для сигналов с многофазовой манипуляцией (ФМ-сигналы), широко используемых в информационных спутниковых системах.

Сигналы с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ-сигналы) составляют альтернативу ФМ-сигналам относительно вероятностных характеристик при приеме при распространении в свободном пространстве [8]. Это обуславливает широкое использование КАМ-сигналов в информационных спутниковых системах.

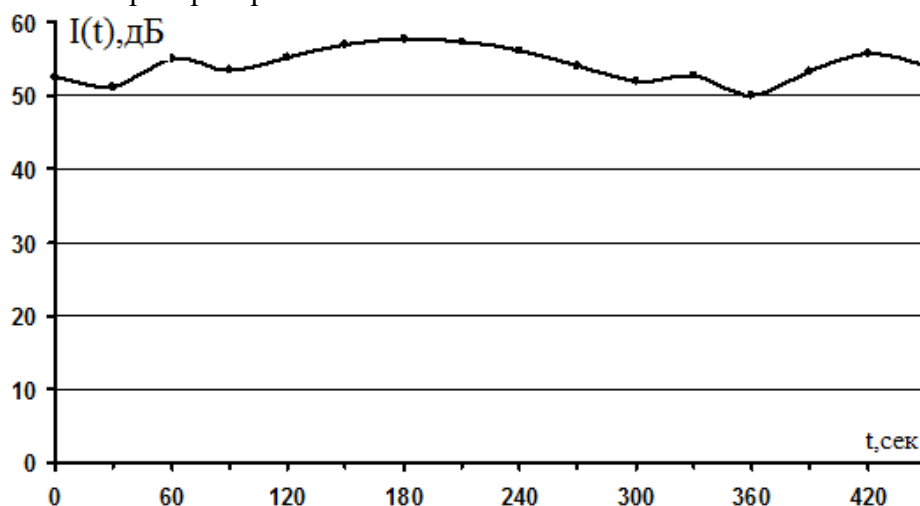
Актуальной является проблема применения моделей замираний для оценивания вероятностных характеристик приема класса КАМ-сигналов при распространении по трансионосферным линиям и их сравнительный анализ по отношению к распространению в свободном пространстве.

На вход наземного приемного пункта поступает сигнал  $s'(t)$ , содержащий сумму  $s(t)$  и его копий с различными амплитудами, временными задержками и начальными фазами за счет рассеяния и отражения на ионосферных неоднородностях

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

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

На рис.1 в качестве примера приведена кривая зависимости мощности сигналов  $I(t)$  от времени, полученная путем обработки сигналов спутниковой информационной системы в  $P$ -частотном диапазоне. Вариации значений  $I(t)$  (замирения амплитуды сигналов), достигающие 5 дБ и более, обусловлены рассматриваемым влиянием ионосферной линии распространения.



**Рис. 1. Фрагмент зависимости мощности сигналов  $I(t)$  от времени, полученной путем обработки сигналов спутниковой информационной системы в  $P$ -частотном диапазоне**

Замирания сигналов приводят к деградации вероятностных характеристик  $P_0$  при передаче информации по отношению к распространению в свободном пространстве [8].

Статистические характеристики замираний определяются рядом параметров - центральной частотой  $f$ , солнечной активностью, сезонным и суточным временем и др. [2]. При создании и развитии статистических моделей замираний сигналов с учетом

этих факторов используются два подхода - на основе аналитического описания распространения сигналов [2] и на основе использования эмпирических соотношений относительно законов плотности распределения амплитуды  $p(A)$  [3].

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

Известно соотношение, определяющее зависимость индекса  $S_4$  от частоты  $f$  для слабых и средних замираний [3]  $S_4 \approx f^{-1.5}$ .

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  $S_4 > 0.6$  [3].

Для описания плотности распределения  $p(A)$  наиболее широко используется  $m$ -распределение Накагами [7,17]

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

Здесь  $\sigma^2$  - средняя мощность сигнальных составляющих в составе  $s'(t)$ ;  $m \geq 1/2$  - параметр, задаваемый соотношением  $m = \frac{\Omega^2}{\langle A^2 - \Omega \rangle^2}$ ,  $\Omega = \langle A^2 \rangle$ .

Параметры  $S_4$  и  $m$  связаны соотношением [3]  $m = 1/S_4^2$ .

Распределение Накагами аппроксимируется законом Релея-Райса [8]

$$p(A) = \frac{A}{\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma_p^2}\right) I_0\left(\frac{AA_0}{\sigma_p^2}\right). \quad (3)$$

Здесь  $A_0$  - амплитуда регулярной сигнальной составляющей;  $\sigma_p^2$  - мощность многолучевых компонент в составе  $s'(t)$ ;  $I_0(x)$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Диапазон значений замираний амплитуд сигналов  $P_d$  относительно амплитуды  $A_0$  определяется соотношением [3]  $P_d = 13.8 S_4^{1.26}$  (дБ).

Распределение Релея-Райса (3) характеризуется коэффициентом Райса  $c = A_0^2 / 2\sigma_p^2$ , который связан с параметром  $m$  соотношением  $c = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$ .

Вероятность ошибки  $P_6$  при приеме КАМ-сигналов с объемом  $M = 2^k$  имеет вид [8]

$$P_6(A) = \frac{2(L-1)}{L \log_2 L} Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \frac{A^2 T_c}{N_0}}\right). \quad (4)$$

Здесь  $A$  - средняя амплитуда КАМ-сигналов;  $L$  - количество уровней амплитуды в одном измерении (для четных  $k$  справедливо соотношение  $L = \sqrt{M}$ );  $T_c$  -

длительность сигналов;  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2/2) dy$ .

Для амплитуды  $A$  в виде случайной стационарной величины с плотностью распределения  $p(A)$  средняя вероятность ошибки  $P_6$  с учетом замираний задается

$$\text{соотношением [8]} \quad P_6 = \int_0^{\infty} P_6(A) p(A) dA.$$

Результаты оценивания вероятностей ошибки  $P_6$  получены для ряда параметров  $k$  КАМ-сигналов с использованием моделей замираний и соответствующих оценок энергетических потерь по отношению к распространению в свободном пространстве.

Для  $P$ - частотного диапазона в соответствии с экспериментальными данными для нормальной ионосферы средних широт индекс  $S_4$  принимает значения до 0.7, для полярных областей значения  $S_4$  могут достигать 1 [4]. Соответствующие значения  $S_4$  для  $L$ - частотного диапазона оцениваются на основе известных значений индекса сцинтилляции для  $P$ - частотного диапазона.

В таблице 1 приведены статистические характеристики замираний сигналов для нормальной ионосферы средних широт для  $P$ - (400 МГц) и  $L$ - (1500 МГц) частотных диапазонов: значения параметра  $m$  для распределения Накагами (2), значения коэффициентов  $c$  для распределения Релея-Райса (3). Следует отметить, что значения замираний  $P_d$  для  $P$  частотного диапазона достигают 8.5 дБ, это может значительно снижать надежность передачи информации по данным радиoliniям или даже разрушить функционирование информационных систем.

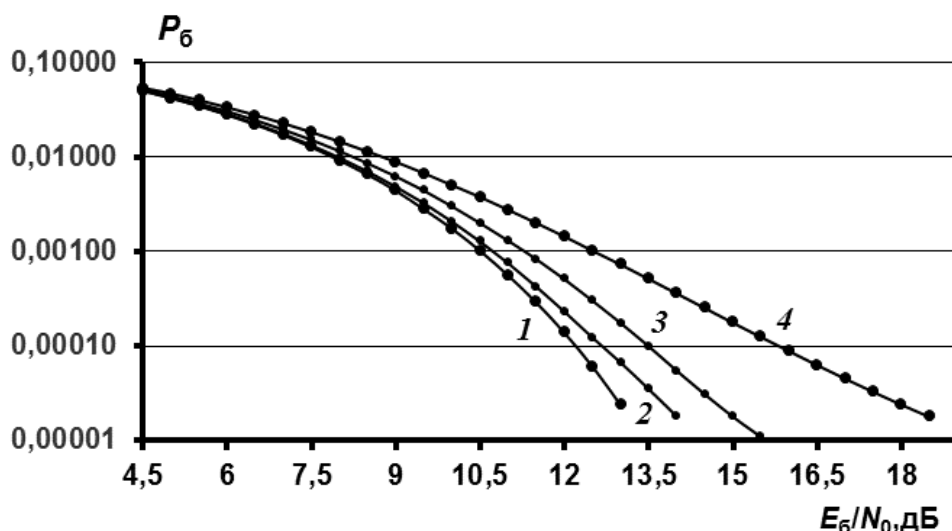
**Таблица 1. Статистические характеристики замираний сигналов для нормальной ионосферы средних широт**

Параметры	$P$ -частотный диапазон ( $f = 400$ МГц)	$L$ -частотный диапазон ( $f = 1500$ МГц)
$S_4$	до 0.70	до 0.095
$m$	>2.0	>110.0
$c$	>1.2	>99.2
$P_d$ (дБ)	до 8.5	до 0.8

На рис.2, приведены вероятности ошибки  $P_6$  при приеме КАМ-сигналов с объемом

$M = 2^4$ . По оси абсцисс отложены значения параметра сигнал/помеха  $\frac{E_6}{N_0} = \frac{A^2 T_c}{2kN_0}$ ,

здесь  $E_6$  - энергия на бит.



**Рис. 2. Вероятности ошибки  $P_{\text{б}}$  при когерентном приеме КАМ-сигналов с объемом  $M = 2^4$ : 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - канал с замираниями, параметр  $S_4 = 0.1$ ; 3 - канал с замираниями, параметр  $S_4 = 0.2$ ; 4 - канал с замираниями, параметр  $S_4 = 0.3$ .**

Кривая 1 на рис.2 соответствует КАМ-сигналам с объемом  $M = 2^2$  при распространении в свободном пространстве - вероятность  $P_{\text{б}} = 10^{-4}$  обеспечивается при отношении  $E_{\text{б}} / N_0 = 8.5$  дБ. Кривая 2 соответствует распространению сигналов по ионосферной линии с параметром  $S_4 = 0.1$ . Энергетические потери при распространении по рассматриваемой модели линии по отношению к кривой 1 для  $P_{\text{б}} = 10^{-4}$  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  $P_{\text{б}} = 10^{-4}$  достигает 1.25 дБ. Кривая 4 соответствует распространению сигналов по ионосферной линии с параметром  $S_4 = 0.3$ . В этом случае энергетические потери по отношению к кривой 1 для  $P_{\text{б}} = 10^{-4}$  достигает 3.75 дБ. При уменьшении значений  $P_{\text{б}}$  энергетические потери увеличиваются.

### **Выводы**

Рассмотрены модели узкополосных спутниковых ионосферных радиолиний, влияние которых обуславливает амплитудные вариации сигналов (замирания сигналов) за счет случайных временных и пространственных флуктуаций электронной плотности ионосферных неоднородностей. Параметры эмпирических моделей замираний относительно амплитуды сигналов на выходе ионосферной спутниковой радиолинии связаны с коэффициентом сцинтилляции сигналов.

С использованием моделей замираний сигналов приведена методика оценивания вероятности ошибочного приема КАМ-сигналов при приеме. С использованием данной методики 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. Оценочные значения энергетических потерь за счет влияния ионосферы достигают 3.5...3.8 дБ при вероятности ошибочного приема бита

$P_{\sigma} = 0.0001$  для КАМ-сигналов с объемом  $M = 2^2$ ,  $M = 2^4$ ,  $M = 2^6$  и значений коэффициента сцинтилляции до 0.3 дБ.

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

### **Литература**

1. 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.
2. Rino C.L. The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011. 244 p.
3. 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.
4. Crane R.K. Ionospheric Scintillation. // Proceeding of IEEE. 1977. V.2. P. 180-199.
5. 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.
6. Кутуза Б.Г., Мошков АВ, Пожидаев ВН. 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.
7. 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.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. 1104 с.