Секция 1

СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ЗОНДИРОВАНИЯ. РАДИОМОДЕМЫ, РАДИОЛИНИИ И РАДИОСЕТИ

УДК 621.391.825

DOI 10.33286/978-5-6041917-2-9.9-16

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНИЙ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПЕРЕДАЧУ ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ ИОНОСФЕРНЫМИ ВОЛНАМИ

М.А. Семисошенко

*Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Рассмотрены показатели помехоустойчивости радиолинии, статистические характеристики радиосигналов и радиопомех в каналах декаметровой радиосвязи при использовании ионосферных радиоволн. Получены аналитические выражения плотности вероятности (плотности распределения) случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции в линии декаметровой радиосвязи, осуществляющей передачу сообщений ионосферными волнами при описании замираний огибающей радиосигнала законом распределения Накагами и нормальном законе распределения уровней радиосигналов и радиопомех.

Ключевые слова: линия декаметровой радиосвязи, помехоустойчивость радиолинии, радиосигнал, радиопомеха, ионосферная волна, вероятность ошибочного приема элемента радиосигнала, плотность вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала, закон распределения Накагами огибающей радиосигнала, нормальный закон распределения уровней радиосигналов и радиопомех.

INTERFERENCE OF DECAMETER RADIO LINKS TRANSMITTING DISCRETE MESSAGES BY SKYWAVES

M.A. Semisoshenko

*S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

The noise immunity indicators of the radio link, the statistical characteristics of radio signals and radio noise in decameter radio channels using ionospheric radio waves are considered. Analytical expressions of probability density (distribution density) of random value of probability of erroneous reception of radio frequency signal element of a decoupling radio link transmitting messages by ionospheric waves when describing fading of the envelope of the radio signal by the Nakagami distribution law and the normal law of distribution of levels of radio signals and interference.

Keywords: decameter radio communication line, noise immunity of the radio line, radio signal, radio interference, ionospheric wave, the probability of erroneous reception of the radio signal element, probability density of a random value for the probability of erroneous reception of a radio signal element, the Nakagami distribution law of the envelope of the radio signal, the normal distribution law of the levels of radio signals and radio interference.

К современным линиям декаметровой радиосвязи, осуществляющим передачу дискретных сообщений с помощью ионосферных радиоволн, предъявляются высокие требования по помехоустойчивости. Реализация этих требований, а также поиск и применение различных методов повышения помехоустойчивости радиолиний предполагает формирование методик оценки их помехоустойчивости, использующих выбранные показатели помехоустойчивости линий радиосвязи.

В настоящее время большинство приведенных в научно-технической литературе методик оценки помехоустойчивости линий декаметровой радиосвязи, осуществляющих передачу дискретных сообщений, в качестве показателей помехоустойчивости используют показатели достоверности радиосвязи, которые описываются вероятностью ошибочного приема элемента радиосигнала $p_{\text{ош}}$,

$$p_{\text{ош}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск}}}{N}, \quad (0 \leq p_{\text{ош}} \leq 0,5), \quad (1)$$

где $N_{\text{иск}}$ – количество искаженных при приеме элементов радиосигнала; N – общее количество переданных элементов радиосигнала.

При этом аналитические зависимости, описывающие величину $p_{\text{ош}}$ в ионосферных декаметровых радиоканалах, учитывают как математические модели быстрых интерференционных замираний огибающих радиосигналов, так и виды радиосигналов, радиопомех, их структуру, способ обработки радиосигналов в радиоприемнике и другие характеристики.

Многочисленные экспериментальные исследования статистических характеристик радиосигналов в каналах декаметровой радиосвязи, использующих ионосферное распространение радиоволн, свидетельствуют о широком многообразии законов распределения, описывающих статистические характеристики огибающих радиосигналов U_c при быстрых интерференционных замираниях [1–7].

Наиболее распространенными из них являются законы распределения Релея, Райса (обобщенное распределение Релея), распределение Накагами (m -распределение), одностороннее нормальное распределение.

Так, математические выражения для плотности вероятности (плотности распределения) огибающих радиосигнала $\omega(U_c)$ при распределениях Релея, Райса, Накагами и одностороннем нормальном распределении имеют следующий вид:

– при распределении Релея

$$\omega(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2}{U_{c\text{эф}}^2}\right), \quad (2)$$

где $U_{c\text{эф}}$ – эффективное напряжение флуктуирующей составляющей радиосигнала;

– при распределении Райса

$$\omega(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2 + e_{c0}^2}{U_{c\text{эф}}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_c e_{c0}}{U_{c\text{эф}}^2}\right), \quad (3)$$

где e_{c0} – амплитуда регулярной составляющей радиосигнала; $I_0(\cdot)$ – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента;

– при распределении Накагами

$$\omega(U_c) = \frac{2m^m U_c^{2m-1}}{\Gamma(m) U_{c\text{эф}}^{2m}} \exp\left(-m \frac{U_c^2}{U_{c\text{эф}}^2}\right), \quad m \geq 0,5, \quad (4)$$

где $m = \frac{(U_{c\text{эф}}^2)^2}{M[(U_c^2 - U_{c\text{эф}}^2)^2]}$ – отношение квадрата мощности принимаемого радиосигнала к дисперсии его мгновенной мощности; $\Gamma(m)$ – гамма-функция параметра m ;

– при одностороннем нормальном распределении

$$\omega(U_c) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}U_c} \exp\left(-\frac{U_c^2}{2U_{c\text{эф}}^2}\right). \quad (5)$$

В ряде случаев плотности вероятности огибающих радиосигнала в ионосферных радиоканалах декаметрового диапазона описываются и другими законами распределений. Так, например, в работе [3] предложено использовать четырехпараметрическое распределение.

Из выражений (2)...(5) наиболее полной, универсальной математической записью плотности вероятности случайной величины огибающей радиосигнала в ионосферном радиоканале декаметрового диапазона является распределение Накагами (4).

Так, при $m = 1$ распределение Накагами преобразуется к распределению Релея (2), при $m > 1$ – к распределению Райса (3), при $m = 0,5$ – к одностороннему нормальному распределению (5).

С учетом зависимостей (2)...(5) выражения для вероятности ошибочного приема элемента наиболее широко используемого в ионосферных радиоприемниках декаметрового диапазона радиосигнала частотной манипуляции ($F1B$) при некогерентном способе приема на фоне нормальной станционной помехи с эффективным напряжением $U_{п\text{эф}}$ определяются следующим образом [1–7]:

– при распределении Релея

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{h_0^2 + 2}, \quad (6)$$

где $h_0^2 = \frac{U_{c\text{эф}}^2}{U_{п\text{эф}}^2}$ – отношение мощности радиосигнала к мощности аддитивной радиопомехи

в виде нормального шума на входе радиоприемника;

– при распределении Райса

$$P_{\text{ош}} = \frac{k^2 + 1}{h_0^2 + 2k^2 + 2} \exp\left(-\frac{k h_0^2}{h_0^2 + 2k^2 + 2}\right), \quad (7)$$

где $k = \frac{e_{c0}}{U_{c\text{эф}}}$;

– при распределении Накагами

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_0^2}{2m}\right)^{-m}, \quad m \geq 0,5, \quad (8)$$

– при одностороннем нормальном распределении

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{h_0^2 + 1}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Вместе с тем приведенные в (6)...(9) выражения для вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала могут служить оценкой помехоустойчивости декаметровых радиоприемников лишь на сравнительно коротких временных интервалах (от десятков секунд до единиц минут) [5], на которых параметры $U_{c\text{эф}}$ распределений (2)...(5), а также величины $U_{п\text{эф}}$ и h_0^2 можно считать постоянными.

Результаты статистических исследований, приведенные в работе [5], свидетельствуют о том, что на более длительных временных интервалах эффективные значения радиосигнала и радиопомех на входе радиоприемника $U_{c\text{эф}}$ и $U_{п\text{эф}}$ являются случайными величинами, распределенными преимущественно по логарифмически-нормальному закону, а

уровни радиосигналов и радиопомех ($y = 20 \lg(U_{с\ эф} / 1 \text{ мкВ})$, $x = 20 \lg(U_{с\ эф} / 1 \text{ мкВ})$) описываются нормальным законом распределения с плотностями вероятности

$$\omega(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2} \right], \quad (10)$$

$$\omega(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \right], \quad (11)$$

где $\bar{y}$, $\bar{x}$ – средние значения уровней радиосигнала (радиопомехи); σ_y , σ_x – среднеквадратические отклонения уровней радиосигнала (радиопомехи).

С учетом зависимостей (10), (11) величина z , характеризующая превышение уровня радиосигнала над уровнем радиопомех на входе радиоприемника,

$$z = y - x = 10 \lg h_0^2 \quad (12)$$

также является случайной величиной с плотностью вероятности [5]

$$\omega(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(z - \bar{z})^2}{2\sigma_z^2} \right], \quad (13)$$

где $\bar{z} = \bar{y} - \bar{x}$ – среднее превышение уровня радиосигнала над уровнем радиопомех; $\sigma_z = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}$ – среднеквадратическое отклонение превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех.

Приведенные зависимости свидетельствуют о случайном характере изменения показателя помехоустойчивости линии радиосвязи, определяемого величиной вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $p_{\text{ош}}$, при функционировании радиолинии на временных интервалах, превышающих единицы минут.

В соответствии с принятым в теории вероятностей обозначением случайных величин [8] обозначим случайную величину вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала как $P_{\text{ош}}$. При этом наиболее полной характеристикой случайной величины $P_{\text{ош}}$ является ее функция распределения $F(p_{\text{ош}})$ или плотность вероятности (плотность распределения) $\omega(p_{\text{ош}})$.

Так, функция распределения случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $F(p_{\text{ош}})$ определяется вероятностью такого события, что случайная величина $P_{\text{ош}}$ примет значение, меньше заданной неслучайной величины $p_{\text{ош}}$,

$$F(p_{\text{ош}}) = p(P_{\text{ош}} < p_{\text{ош}}). \quad (14)$$

При задании некоторого допустимого (требуемого) значения вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $p_{\text{ош доп}}$, определяемого исходя из допустимой (требуемой) достоверности приема дискретных сообщений, выражение (14) преобразуется к виду

$$F(p_{\text{ош доп}}) = p(P_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош доп}}) = \int_0^{p_{\text{ош доп}}} \omega(p_{\text{ош}}) dp_{\text{ош доп}}, \quad (15)$$

где $\omega(p_{\text{ош}})$ – плотность вероятности (плотность распределения) случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала.

Таким образом, функция распределения $F(p_{\text{ош}})$ и плотность вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ являются наиболее полными характеристиками случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $P_{\text{ош}}$ и представляют основной показатель помехоустойчивости линии радиосвязи.

Показатель помехоустойчивости линии радиосвязи вида (15), характеризующий степень выполнения требований по достоверности приема информации, принято называть вероятностью радиосвязи с достоверностью не хуже допустимой [9]. Ранее при описании показателя помехоустойчивости $p(P_{\text{ош}} < p_{\text{ош доп}})$ широко использовался термин «надежность радиосвязи» [5], который в настоящее время является устаревшим.

В современной научно-технической литературе определение вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже допустимой p ($P_{\text{ош}} < p_{\text{ош доп}}$) осуществляется на основе подхода, предложенного в работах [5; 9] и использующего не аналитическое выражение плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$, а выражение плотности вероятности случайной величины превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех $\omega(z)$.

Вместе с тем знание полной информации о характеристиках случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $P_{\text{ош}}$ предусматривает прежде всего определение аналитического выражения для плотности вероятности (плотности распределения) случайной величины $P_{\text{ош}}$, а также проведение анализа зависимости плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$.

Для получения аналитического выражения для плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ воспользуемся математическим аппаратом закона распределения функции случайной величины [8]. С этой целью представим выражения для вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $p_{\text{ош}}(h_0^2)$ вида (6)...(9) с учетом выражения (12) как функцию $p_{\text{ош}} = \varphi(z)$.

С учетом функции $p_{\text{ош}} = \varphi(z)$ и зависимости плотности вероятности $\omega(z)$ общее выражение для плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала принимает вид [5]

$$\omega(p_{\text{ош}}) = \omega[z(p_{\text{ош}})] \left| \frac{dz}{dp_{\text{ош}}} \right|, \quad (16)$$

где $z = \varphi^{-1}(p_{\text{ош}})$ – функция, обратная функции $p_{\text{ош}} = \varphi(z)$.

Применительно к замираниям огибающей радиосигнала U_c , описываемым законом распределения Накагами вида (4), а также с учетом (8), (12) и (13) плотность вероятности $\omega[z(p_{\text{ош}})]$ в выражении (16) при использовании радиосигнала частотной манипуляции представим в следующем виде:

$$\omega[z(p_{\text{ош}})] = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - (2\sigma_z^2)^{-1} \left\{ \left\{ 10 \lg \left\{ 2m \left[(2p_{\text{ош}})^{-\frac{1}{m}} - 1 \right] \right\} - \bar{z} \right\}^2 \right\} \right\}, \quad (17)$$

а модуль производной $\left| \frac{dz}{dp_{\text{ош}}} \right|$ в выражении (16) – в виде

$$\left| \frac{dz}{dp_{\text{ош}}} \right| = \frac{10}{m \ln 10 \times \left[1 - (2p_{\text{ош}})^{\frac{1}{m}} \right] p_{\text{ош}}}. \quad (18)$$

Тогда выражение для плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции при некогерентном способе обработки и замираниях огибающей радиосигнала по закону распределения Накагами имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega(p_{\text{ош}}) = & \frac{10}{\sigma_z \sqrt{2\pi} m \ln 10 \times \left[1 - (2p_{\text{ош}})^{\frac{1}{m}} \right] p_{\text{ош}}} \times \\ & \times \exp \left\{ - (2\sigma_z^2)^{-1} \left\{ \left\{ 10 \lg \left\{ 2m \left[(2p_{\text{ош}})^{-\frac{1}{m}} - 1 \right] \right\} - \bar{z} \right\}^2 \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

При условии $m = 1$ получим выражение для плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ радиосигнала частотной манипуляции при некогерентном способе обработки и замираниях огибающей радиосигнала, распределенной по закону Релея,

$$\omega(p_{\text{ош}}) = \frac{10}{\sigma_z \sqrt{2\pi} \ln 10 \times (1 - p_{\text{ош}}) p_{\text{ош}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_z^2} \left[10 \lg \left(\frac{1 - 2p_{\text{ош}}}{p_{\text{ош}}} \right) - \frac{\bar{z}}{z} \right]^2 \right\}. \quad (20)$$

При $m = 0,5$ (одностороннее нормальное распределение огибающей радиосигнала U_c) выражение (19) преобразуется к виду

$$\omega(p_{\text{ош}}) = \frac{20}{\sigma_z \sqrt{2\pi} \ln 10 \times (1 - 4p_{\text{ош}}^2) p_{\text{ош}}} \times \exp \left\{ -(2\sigma_z^2)^{-1} \left\{ 10 \lg [(2p_{\text{ош}})^{-2} - 1] - \frac{\bar{z}}{z} \right\}^2 \right\}. \quad (21)$$

В качестве примера на рис. 1 приведены графики зависимости плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции, построенные в соответствии с выражением (19) при различных параметрах m замираний радиосигнала по закону распределения Накагами.

Рис. 1. Зависимости плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ для радиосигнала частотной манипуляции при различных параметрах m замираний огибающей радиосигнала по закону распределения Накагами:

1 – $m = 0,5$ (одностороннее нормальное распределение); 2 – $m = 0,7$;
3 – $m = 1$ (распределение Релея); 4 – $m = 1,1$ (распределение Райса)

Приведенные на рис. 1 зависимости плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ для радиосигнала частотной манипуляции получены при следующих исходных данных параметров сигнальной и помеховой обстановки: значение среднего превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех $\bar{z} = 20$ дБ; среднеквадратическое отклонение превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех $\sigma_z = 3$ дБ.

На рис. 2 приведены графики зависимости плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции при среднем превышении уровня радиосигнала над уровнем радиопомех $\bar{z} = 20$ дБ, параметре $m = 0,7$ закона распределения Накагами огибающей радиосигнала и различных значениях среднеквадратического отклонения превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех: $\sigma_{z1} = 3$ дБ; $\sigma_{z2} = 5$ дБ; $\sigma_{z3} = 7$ дБ; $\sigma_{z4} = 10$ дБ.

На рис. 3 приведены графики зависимости плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции при параметре $m = 0,7$ закона распределения Накагами огибающей радиосигнала, среднеквадратическом отклонении превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех $\sigma_z = 3$ дБ и различных значениях среднего превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех: $\bar{z}_1 = 15$ дБ; $\bar{z}_2 = 20$ дБ; $\bar{z}_3 = 25$ дБ; $\bar{z}_4 = 30$ дБ.

Рис. 2. Зависимости плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ для радиосигнала частотной манипуляции при различных значениях среднеквадратического отклонения превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех:

1 – $\sigma_z = 3$ дБ; 2 – $\sigma_z = 5$ дБ; 3 – $\sigma_z = 7$ дБ; 4 – $\sigma_z = 10$ дБ

Рис. 3. Зависимости плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ для радиосигнала частотной манипуляции при различных значениях среднего превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех:

1 – $\bar{z} = 15$ дБ; 2 – $\bar{z} = 20$ дБ; 3 – $\bar{z} = 25$ дБ; 4 – $\bar{z} = 30$ дБ

Приведенные на рис. 1–3 графики свидетельствуют о существенной зависимости значений плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала $\omega(p_{\text{ош}})$ от параметров сигнальной и помеховой обстановки.

Это вызывает необходимость учета при построении алгоритмов анализа и выбора частот в перспективных частотно-адаптивных радиопомехах совокупности параметров радиосигналов и радиопомех, учитывающих не только текущие значения уровней радиосигналов и радиопомех y и x , но и их средние значения $\bar{y}$ и $\bar{x}$, среднеквадратические отклонения σ_y и σ_x , а также значения параметра распределения Накагами m огибающей радиосигнала.

Учет совокупности параметров радиосигналов и радиопомех при анализе и выборе частот в перспективных частотно-адаптивных радиополосах позволит использовать частоты, на которых обеспечивается максимально возможная вероятность радиосвязи с достоверностью не хуже допустимой p ($P_{\text{ош}} < p_{\text{ош доп}}$).

Таким образом, полученные аналитические выражения плотности вероятности случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосигнала частотной манипуляции при различных законах замираний огибающей радиосигнала определяют помехоустойчивость линий радиосвязи и являются наиболее полными характеристиками случайной величины $P_{\text{ош}}$.

Приведенные аналитические выражения плотности вероятности $\omega(p_{\text{ош}})$ позволяют выполнить всесторонний анализ случайной величины вероятности ошибочного приема элемента радиосвязи с целью формирования предложений по повышению помехоустойчивости линий декаметровый радиосвязи, осуществляющих передачу дискретных сообщений ионосферными волнами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов.радио, 1970. 728 с.
2. *Зюко А.Г.* Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972. 360 с.
3. *Кловский Д.Д.* Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
4. *Кириллов Н.Е.* Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Связь, 1971. 256 с.
5. *Комарович В.Ф., Сосунов В.Н.* Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.
6. *Хворостенко Н.П.* Статистическая теория демодуляции. М.: Связь, 1968. 335 с.
7. *Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н.* Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник / под ред. Л.М. Финка. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
8. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.
9. Военные системы радиосвязи. Часть 1 / под ред. В. В. Игнатова. Л.: ВАС, 1989. 386 с.