

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ / RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-4-8-14

УДК 621.396.62



Интегральная модель помехозащищенных линий радиосвязи

С. В. Дворников¹, А. В. Пшеничников¹, С. С. Манаенко¹, И. Н. Глухих¹¹ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

Основным способом помехозащиты линий радиосвязи, способных противодействовать различного рода помехам как естественного, так и искусственного характера, как правило, является расширение базы сигнала. Однако данный способ не учитывает характер деструктивных воздействий в условиях ограниченности частотно-энергетических ресурсов радиоканалов. В связи с этим актуальными являются работы, посвященные разработке функциональных моделей помехозащищенных радиолиний, учитывающих плотность распределения сигнальной энергии в ограниченном пространстве состояний. В данной статье представлена интегральная модель помехозащищенных линий радиосвязи, особенностью которой является учет статистических параметров модели канала радиосвязи. Представлены подходы к оценке эффективности разработанной функциональной модели радиолинии на основе расчета достоверности передачи информации. Теоретические решения получены с помощью методов статистической радиотехники и теории электросвязи, обобщены для моделей каналов с переменными параметрами в условиях преднамеренного деструктивного воздействия. На базе аналитического моделирования показан положительный эффект от практической реализации разработанной модели.

Ключевые слова: помехозащищенность, интегральная модель, линия радиосвязи, достоверность

Для цитирования:

Интегральная модель помехозащищенных линий радиосвязи / Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С., Глухих И. Н. // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 4. С. 8–14. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-4-8-14

© Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С., Глухих И. Н., 2018



Integral model of noise-free radio communication lines

S.V. Dvornikov¹, A.V. Pshenichnikov¹, S.S. Manaenko¹, I.N. Glukhikh¹

¹ Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russian Federation

The development of radio equipment, which can be the basis for radio lines, that can counteract various kinds of interference, both natural and artificial, has always been given special attention. In this case, the main way to interfere with such radio links is, as a rule, the expansion of the signal base. However, this method does not take into account the nature of the destructive effects in conditions of limited frequency and energy resources of radio channels. In this connection, the studies focused on the development of functional models of noise-free radio communication lines, taking into account the density of signal energy distribution in a limited state space, are relevant. This paper considers the development of an integrated model of noise-free radio communication lines, which is characterized by the accounting of statistical parameters of the radio channel model. The approaches to the estimation of efficiency of the developed functional model of the radio lines based on the calculation of information transmission reliability are presented. Theoretical solutions were obtained by the methods of statistical radio engineering and the theory of telecommunications; they are generalized for the models of channels with variable parameters in conditions of nonrandom destructive influence. A positive effect of the practical implementation of the developed model is shown on the basis of analytical modeling.

Keywords: noise immunity, integrated model, radio link, reliability

For citation:

Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Glukhikh I.N. Integral model of noise-free radio communication lines. Radiopromyshlennost, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 8-14. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-4-8-14

Введение

Современные достижения в области науки и техники позволяют радиопромышленности разрабатывать и производить радиотехническое оборудование, возможности которого существенно расширяют границы практической реализации режимов функционирования радиолиний в сложных условиях сигнальной и помеховой обстановки. Вместе с тем достижения, характеризуемые когнитивными признаками на основе реализации сетевых систем управления [1], стимулируют систему информационного противоборства к поиску новых теоретических решений по реализации методов деструктивного воздействия, которые интегрируют разработанные технологии программно-определяемой радиосистемы, базирующиеся на решениях, представленных в [2].

Анализ инновационной деятельности радиопромышленности [3, 4] показал, что наиболее значимыми научными решениями являются алгоритмы реализации методов повышения устойчивости функционирования линий радиосвязи, в том числе и в условиях преднамеренного деструктивного воздействия [5]. Возможности известных подходов к синтезу помехозащищенных радиосистем, как правило, основываются на значительном расширении базы сигнала [6–8] и в большинстве случаев не учитывают характер деструктивных воздействий

в условиях ограниченности частотно-энергетических ресурсов радиоканалов. Другим очевидным недостатком известных подходов является сложность их агрегирования на этапе проектирования средств комплексов радиосвязи на единой теоретической платформе.

Вместе с тем функциональные модели помехозащищенных линий радиосвязи, построенные на альтернативных подходах, могут быть получены, в частности, на основе статистической радиотехники с учетом плотности распределения сигнальной энергии в ограниченном пространстве состояний. Такой подход определяет актуальность решения широкого класса задач, наиболее приоритетной из которых является разработка базовой модели помехозащищенной радиолинии и методик оценки эффективности ее функционирования. Рассмотрению данных вопросов как одного из этапов предстоящего исследования посвящена данная статья.

Описание модели помехозащищенной линии радиосвязи

Представим канал радиосвязи моделью, характеризуемой прерывистой связью с быстрыми и медленными замираниями (типичные условия для каналов с ионосферным распространением радиоволн), а также неоднородными условиями сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах [9, 10].

Статистические характеристики рассматриваемой линии радиосвязи определим на основе функций распределения, огибающих мощности сигналов и помех, детерминированных законами Релея

$$W(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c.эфф}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2}{U_{c.эфф}^2}\right), \quad (1)$$

$$W(U_{п}) = \frac{2U_{п}}{U_{п.эфф}^2} \exp\left(-\frac{U_{п}^2}{U_{п.эфф}^2}\right) \quad (2)$$

и Райса

$$W(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c.эфф}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2 + U_{c.ср}^2}{U_{c.эфф}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_c U_{c.ср}}{U_{c.эфф}^2}\right), \quad (3)$$

$$W(U_{п}) = \frac{2U_{п}}{U_{п.эфф}^2} \exp\left(-\frac{U_{п}^2 + U_{п.ср}^2}{U_{п.эфф}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_{п} U_{п.ср}}{U_{п.эфф}^2}\right), \quad (4)$$

где U_c , $U_{п}$ – амплитуда соответственно сигнала и помехи, $U_{c.эфф}$, $U_{п.эфф}$ – эффективное значение напряжения соответственно флюктуирующей составляющей сигнала и помехи, являющееся параметром распределений, $U_{c.ср}$, $U_{п.ср}$ – амплитуда соответственно регулярной составляющей сигнала и помехи, I_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Предположим, что флюктуация фазы сигнала и помех φ характеризуется равномерным распределением в интервале от 0 до 2π :

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi}. \quad (5)$$

Отметим, что выбранные распределения для представленной модели сигналов и помех имеют место на коротких временных интервалах (до нескольких минут), в пределах которых параметры распределения $U_{c.эфф}$ ($U_{п.эфф}$) являются неизменными, а следовательно, и вероятностно-временные параметры в радиолинии также можно полагать постоянными. На более длительных временных интервалах параметры распределений сигналов и помех в законах Релея (Райса) характеризуются случайными величинами с плотностью вероятности соответственно $W(U_{c.эфф})$ и $W(U_{п.эфф})$.

Плотности вероятности $W(U_{c.эфф})$, $W(U_{п.эфф})$ выберем логарифмически нормально распределенными и выразим их в децибелах [11]:

$$W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (6)$$

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (7)$$

где σ_y и σ_x , \bar{y} и \bar{x} – соответственно среднеквадратические отклонения и средние значения уровней сигналов, помех.

С учетом представленной стохастической модели радиоканала, описываемой выражениями (6), (7), в качестве параметра, характеризующего достоверность передачи сообщений в радиолинии, основываясь на методах статистической теории связи, выберем вероятность ошибки приема элемента сигнала $P_{ош}$ и функцию распределения вида $P(P_{ош} \leq P_{ош доп})$.

Необходимо отметить, что оценка достоверности передачи сообщений в помехозащищенной радиолинии по показателю вероятности ошибки приема элемента сигнала $P_{ош}$ может быть осуществлена только на относительно коротких временных интервалах, о чем говорилось ранее.

На более длительных интервалах величины $U_{c.эфф i}$ ($U_{п.эфф i}$) ($i = 1, 2, \dots, m$) описываются случайными величинами. Поэтому вероятность ошибки приема элемента сигнала в радиолинии как функция от приведенных случайных величин также будет случайной. Далее, основываясь на методах теории случайных величин и процессов, достоверность передачи сообщений в радиолинии охарактеризуем функцией распределения случайной величины $P_{ош}$, которую определим вероятностью радиосвязи с достоверностью не хуже заданной $P(P_{ош} \leq P_{ош доп})$ [6, 12].

В рамках рассмотренного подхода к обеспечению требуемой эффективности функционирования линии радиосвязи и с учетом введенной системы показателей и статистических распределений в качестве системообразующего (для построения моделей помехозащищенных линий радиосвязи) выберем метод группового использования частот [8].

На основе элементов общей теории управления функциональную модель линий радиосвязи в условиях преднамеренного деструктивного воздействия представим в виде матрицы (рис. 1).

Разработанная функциональная модель обобщает решения, предложенные в [13], при этом в предлагаемой модели временные интервалы выбирают исходя из интервала стационарности параметров функций распределения Релея (Райса), поэтому вероятность ошибки приема элемента сигнала на данных интервалах является постоянной.

Время анализа T характеризуется инвариантностью параметров логарифмически нормального закона распределения $U_{c.эфф}$ и $U_{п.эфф}$, что определяет период расчета величины $P(P_{ош} \leq P_{ош доп})$ в частотно-временной матрице, определяющей функциональную модель помехозащищенной радиолинии.

Особенностью модели является то, что резервные частоты образуют список вторичных частот. Такой подход практически позволяет реализовать метод группового использования частот. В результате разработанная функциональная модель может обеспечить управление частотно-временными ресурсами радиолинии, которая описывается вероятностно-временными характеристиками (1)–(7).

	$0-t_1$	t_1-t_2	\dots	$t_{n-1}-t_n$
f_1	1	1	0	1
f_2	1	1	1	1
f_3	0	1	1	1
\dots				
f_{n-1}	1	0	0	0
f_n	1	1	1	1
f_{n+1}	0	0	1	0
f_{n+2}	1	1	0	0
f_{n+3}	0	0	0	1
f_{n+5}	0	0	0	0
\dots				
f_m	0	0	0	0

Рисунок 1. Функциональная модель помехозащищенной линии радиосвязи: 1 – частота f_n используется в соответствующий интервал времени $t_{n-1}-t_n$; 0 – частота не используется
 Figure 1. Functional model of the noise-free radio communication line: 1 – frequency f_n is used in the corresponding time interval $t_{n-1}-t_n$; 0 – frequency is not used

Оценка достоверности передачи сообщений в интегральной модели помехозащищенной линии радиосвязи

Для подтверждения правомерности разработанной модели проведем оценку достоверности передачи информации. Для этого введем понятие коэффициента использования частоты в помехозащищенной радиолнии.

Под коэффициентом использования i -й частоты α_i будем понимать отношение суммарного временного интервала использования частоты в радиолнии к длительности периода анализа T , на котором эффективные значения уровней сигналов и помех являются постоянными:

$$\alpha_i = \frac{\tau_{\Sigma i}}{T}. \quad (8)$$

Коэффициенты α_i образуют вектор A , который определяет метод управления ее частотно-временными ресурсами:

$$A = \|\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m\|. \quad (9)$$

В общем случае вектор A зависит от времени:

$$A(t) = \|\alpha_1(t) \alpha_2(t) \dots \alpha_m(t)\|. \quad (10)$$

С учетом разработанной интегральной модели линии радиосвязи величина вероятности ошибки приема элемента сигнала в радиолнии не зависит от вектора использования рабочих частот, определяется параметрами статистических распределений и может быть вычислена как среднеарифметическое значение вероятности ошибки на рабочих частотах. Отметим, что на данных временных интервалах достаточно важным видится решение задачи разработки алгоритмов выбора рабочих частот из сформированного вторичного списка.

Вместе с тем вектор коэффициентов A на интервале анализа T определяет значение величины вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже заданной $P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$. Разработаем методику оценки данного показателя, для чего введем следующую систему ограничений. Предположим, что в радиолнии для передачи информации выделено m рабочих частот. На каждой из используемых частот процессы изменения превышения уровня сигнала над уровнем помех $Z_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) на интервале анализа T являются нормальными

независимыми случайными процессами с математическим ожиданием \bar{z}_i и среднеквадратическим отклонением σ_i . На основе методики, приведенной в [6], определим вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже заданной на каждой из рабочих частот $P_i(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Далее, основываясь на равнозначности событий, описываемых вероятностями $P_i(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ и $P_i(z \geq z_{\text{доп}})$, где $z_{\text{доп}}$ – допустимое превышение уровня сигнала над уровнем помех, определяемое исходя из заданной величины $P_{\text{ош доп}}$, вероятность радиосвязи с достоверностью не хуже заданной на i -й рабочей частоте представим в виде

$$P_i(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = P_i(z \geq z_{\text{доп}}) = \frac{\bar{\tau}_{\text{пр}i}}{\bar{\tau}_{\text{пр}i} + \bar{\tau}_{\text{нпр}i}}, \quad (11)$$

где $\bar{\tau}_{\text{пр}i}$ – средняя длительность пригодного состояния радиоканала на i -й частоте; $\bar{\tau}_{\text{нпр}i}$ – средняя длительность непригодного состояния радиоканала на i -й частоте.

Введем следующую систему обозначений: $T_{\text{пр}}$ – длительность пригодного состояния радиоканала на интервале анализа T ; $T_{\text{нпр}}$ – длительность непригодного состояния радиоканала в радиолинии на интервале анализа T ; $\Delta t_{\text{пр}}$ – длительность элементарного интервала пригодного состояния радиоканала в радиолинии.

Аппроксимируем изменения состояния радиоканала моментами времени $t_k = k\tau_f$, где $k = 1, 2, \dots, m$; τ_f – длительность элементарного интервала работы радиолинии на частоте f .

В заданной системе ограничений величина вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже заданной для разработанной модели помехозащищенной радиолинии представим в виде [14]

$$P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_{\text{пр}}}{T}. \quad (12)$$

Выразим длительность пригодного состояния радиоканала и временной интервал T через временные параметры функционирования радиолинии:

$$T_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \Delta t_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \tau_f, \quad (13)$$

$$T = T_{\text{пр}} + T_{\text{нпр}} = S_0 \tau_f, \quad (14)$$

где $S_{\text{пр}}$ – количество элементарных временных интервалов пригодного состояния радиоканала на длительности T ; S_0 – общее количество элементарных временных интервалов работы радиолинии на длительности T .

После преобразований (12) определим как

$$P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = \lim_{S_0 \rightarrow \infty} \left(\frac{S_{\text{пр}1}}{S_0} \cdot \frac{S_1}{S_1} + \frac{S_{\text{пр}2}}{S_0} \cdot \frac{S_2}{S_2} + \dots + \frac{S_{\text{пр}m}}{S_0} \cdot \frac{S_m}{S_m} \right), \quad (15)$$

где $S_{\text{пр}1}, S_{\text{пр}2}, \dots, S_{\text{пр}m}$ – количество элементарных временных интервалов пригодного состояния радиоканала соответственно в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m ; S_1, S_2, \dots, S_m – общее количество элементарных временных интервалов работы радиолинии соответственно в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m .

Учтем, что

$$P_i(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = \lim_{S_i \rightarrow \infty} \frac{S_{\text{пр}i}}{S_i},$$

а $\alpha_i = S_i/S_0$, тогда

$$P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = \alpha_1 P_1(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) + \alpha_2 P_2(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) + \dots + \alpha_m P_m(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}). \quad (16)$$

Обобщим выражение (16) для случая деструктивного воздействия помех с неизменной стратегией воздействия.

В данных условиях вероятность радиосвязи с достоверностью не хуже заданной на каждой из рабочих частот представим в виде [8]

$$P_{\text{пр}i}(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош}}^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_{\text{пр}i}}}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z_{\text{пр}i} - \bar{z}_{\text{пр}i})^2}{2\sigma_{z_{\text{пр}i}}^2}\right) F\left(\frac{\bar{z} - z^*}{\sigma_z}\right) dz_{\text{пр}i}, \quad (17)$$

где $P_{\text{ош}}^*$ – фиксированное значение вероятности ошибки приема элемента сигнала в радиолинии в условиях одновременного воздействия непреднамеренных и преднамеренных помех; $z^* = \varphi^{-1}(P_{\text{ош}}^*, z_{\text{пр}i})$; φ^{-1} – функция, обратная $\varphi(z, z_{\text{пр}i}) = P_{\text{ош.пр}i}(z)$; F – интеграл вероятности, определяемый согласно выражению

$$F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты расчета вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже заданной в разработанной интегральной модели радиолинии при воздействии шумовых помех и следующих исходных данных: $m = 3$, $\bar{z}_1 = 25$ дБ, $\bar{z}_2 = 20$ дБ, $\bar{z}_3 = 15$ дБ, $\bar{z}_{\text{пр}i} = 20$ дБ, $\bar{z}_{2\text{пр}i} = 25$ дБ, $\bar{z}_{3\text{пр}i} = 30$ дБ, $\sigma_{z_1} = 5$ дБ, $\sigma_{z_2} = 8$ дБ, $\sigma_{z_3} = 7$ дБ, $\sigma_{z_{\text{пр}i1}} = 3$ дБ, $\sigma_{z_{\text{пр}i2}} = 5$ дБ, $\sigma_{z_{\text{пр}i3}} = 6$ дБ, вид радиосигнала – F1-200.

Из анализа результатов математического моделирования следует, что эффективность функционирования разработанной интегральной модели помехозащищенных радиолиний существенно зависит от значения вектора $A(t)$. В частности, при $\alpha_1 = 1/20$, $\alpha_2 = 1/5$, $\alpha_3 = 3/4$ и $P_{\text{ош}}^* = 0,05$ вероятность радиосвязи с достоверностью не хуже заданной в радиолинии увеличивается с 0,55 до 0,72 по сравнению с равномерным законом управления ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$).

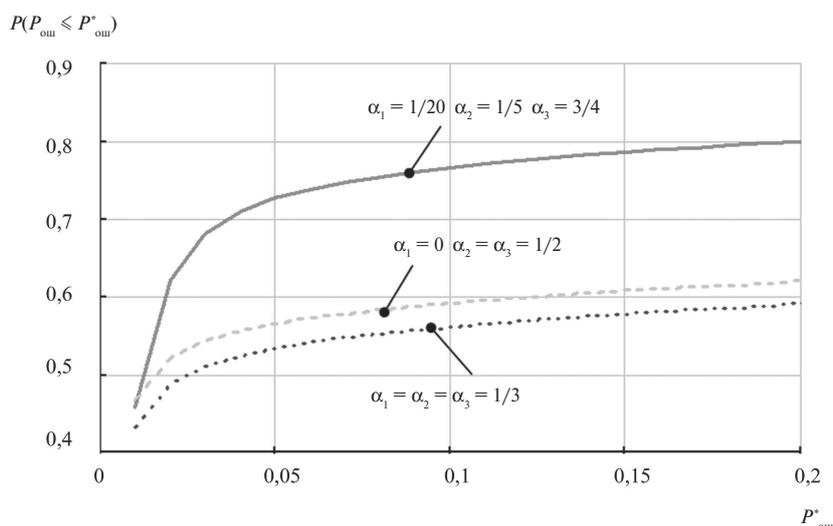


Рисунок 2. Зависимость вероятности радиосвязи с достоверностью не хуже заданной при воздействии шумовых помех и различных законов управления частотным ресурсом, заданных значениями $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

Figure 2. The dependence of the radio communication probability with the reliability not worse than the specified when exposed to noise interference and various laws of frequency resource control with set values $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

Выводы

Разработанный научно-аналитический аппарат формализует задачу управления ресурсами помехозащищенной линии радиосвязи в различных моделях радиоканалов и произвольных видах сигнальных конструкций. Это в свою очередь дает возможность сформулировать рекомендации специалистам в области разработки комплексов средств радиосвязи

на этапах синтеза помехозащищенных режимов работы. Особую актуальность решение данных задач приобретает при проектировании приемо-передающих устройств на основе программно-определяемой радиосистемы. Направление дальнейших исследований авторы связывают с разработкой временных циклов управления ресурсами разработанной интегральной модели помехозащищенных радиолиний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пшеничников А.В. Интегральная модель радиолинии в конфликтной ситуации // Информация и Космос. 2016. № 4. С. 39–45.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / под ред. А.В. Назаренко. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Пшеничников А.В., Дворников С.В., Эконом В.П. Метод оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций квадратурной модуляции с трансформированными констелляционными диаграммами // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 51–56. DOI: 10.21778/2413-9599-2017-1-51-56.
4. Дворников С.В. Методика оценки имитоустойчивости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64–69.
5. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.В. Пшеничников, С.С. Манаенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87–93.
6. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, В.И. Шестопалов. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
7. Тузов Г.И., Козлов М.Р. Помехозащищенность каналов связи с ППРЧ и кодированием в условиях помех в части полосы // Техника средств связи. Серия «Техника радиосвязи». 1990. Вып. 1. С. 18–24.
8. Семисошенко М.А. Управление автоматизированными сетями декаметрового диапазона в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. СПб.: ВАС, 1997. 364 с.
9. Финк Л.М. О потенциальной помехоустойчивости при замираниях сигнала // Радиотехника. 1959. Т. 14. № 9. С. 87–95.
10. Адаптивные автоматизированные системы военной радиосвязи / Ю.П. Килимник, Е.В. Лебединский, В.К. Прохоров, А.Н. Шаров. Л.: ВАС, 1978. 284 с.
11. Военные системы радиосвязи / под ред. В.В. Игнатова. Л.: ВАС, 1989. 386 с.
12. Антонюк Л.Я., Семисошенко М.А. Адаптивная радиосвязь в системах связи специального назначения // Электросвязь. 2007. № 5. С. 17–20.

13. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Физматиз, 1962. 564 с.

REFERENCES

1. Pshenichnikov A.V. Integral model of a radio link in a conflict situation. *Informatsiya i Kosmos*, 2016, no. 4, pp. 39–45. (In Russian).
2. Sklyar B. Nazarenko A.V. (ed.). *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical applications]. Moscow, Vilyams Publ., 2003, 1104 p. (In Russian).
3. Pshenichnikov A.V., Dvornikov S.V., Ekonom V.P. Method of evaluation of immunity of quadrature modulation signal structures with transformed constellation diagrams. *Radiopromyshlennost*, 2017, no. 1, pp. 51–56, DOI: 10.21778/2413-9599-2017-1-51-56. (In Russian).
4. Dvornikov S.V. Procedure of evaluation of imitation stability of robotic devices control channels. *Radiopromyshlennost*, 2016, no. 2, pp. 64–69. (In Russian).
5. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. Spectral-effective signals with a continuous phase. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87–93. (In Russian).
6. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. *Pomekhozashchishchennost sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty* [Immunity of radio communication systems with the expansion of the spectrum of signals by the method of pseudo-random tuning of the operating frequency]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2000, 384 p. (In Russian).
7. Tuzov G.I., Kozlov M.R. Noise immunity of communication channels with PPRCh and coding under interference conditions in a part of the band. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya Tekhnika radiosvyazi*, 1990, iss. 1, pp. 18–24. (In Russian).
8. Semisoshenko M.A. *Upravlenie avtomatizirovannyimi setyami dekametrovoi svyazi v usloviyakh slozhnoi radioelektronnoi obstanovki* [Management of automated decametre communication networks in a complex electronic environment]. Saint-Petersburg, VAS Publ., 1997, 364 p. (In Russian).
9. Fink L.M. On the potential noise immunity with signal fading. *Radiotekhnika*, 1959, vol. 14, no. 9, pp. 87–95. (In Russian).
10. Kilimnik Yu. P., Lebedinskii E.V., Prokhorov V.K., Sharov A.N. *Adaptivnyye avtomatizirovannyye sistemy voennoi radiosvyazi* [Adaptive automated military radio communication systems]. Leningrad, VAS Publ., 1978. 284 p. (In Russian).
11. Ignatov V.V. (ed.). *Voennyye sistemy radiosvyazi* [Military radio communication systems]. Leningrad, VAS Publ., 1989. 386 p. (In Russian).
12. Antonyuk L. Ya., Semisoshenko M.A. Adaptive radio communication in special communication systems. *Elektrosvyaz*, 2007, no. 5, pp. 17–20. (In Russian).
13. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. *Pomekhozashchishchennost sistem svyazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochei chastoty: monografiya* [Interference immunity of communication systems with a pseudo-random tuning of the operating frequency: monograph]. Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2013. 166 p. (In Russian).
14. Ventcel E. S. *Teoriya veroyatnostei* [Theory of probability]. Moscow, Fizmatiz Publ., 1962, 564 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дворников Сергей Викторович, д.т.н., профессор, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., д.3, тел.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: praktikdsv@yandex.ru.

Пшеничников Александр Викторович, к.т.н., доцент, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., д.3, тел.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: siracooz77@mail.ru.

Манаенко Сергей Сергеевич, к.т.н., старший преподаватель, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., д.3, тел.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: manaenkoss@mail.ru.

Глухих Иван Николаевич, адъюнкт кафедры, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., д.3, тел.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: siracooz77@mail.ru.

AUTHORS

Sergey V. Dvornikov, Dr.Sci. (Engineering), professor, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, 194064, Russia, tel.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: praktikdsv@yandex.ru.

Aleksandr V. Pshenichnikov, Ph.D. (Engineering), associate professor, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, 194064, Russia, tel.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: siracooz77@mail.ru.

Sergey S. Manaenko, Ph.D. (Engineering), assistant professor, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, 194064, Russia, tel.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: manaenkoss@mail.ru.

Ivan N. Glukhikh, junior scientific assistant, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, 194064, Russia, tel.: +7 (812) 247-93-11, e-mail: siracooz77@mail.ru.

Поступила 02.10.2018; принята к публикации 19.10.2018; опубликована онлайн 23.11.2018.
Submitted 02.10.2018; revised 19.10.2018; published online 23.11.2018.