

16. **Piestrak S. J.** Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
17. **Berger J. M.** A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels, *Information and Control*, 1961, vol. 4, iss. 1, pp. 68–73.
18. **Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI., Efanov D.** Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems, *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, September 26–29, 2015, pp. 181–187.
19. **Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI.** Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems, *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 365–371.
20. **Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, vol. 52, iss. 1, pp. 1–12.
21. **Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** The research of two-modulus codes with summation of ones in data bits with calculation by modulo "four", *Electronic Modeling*, 2018, vol. 40, iss. 4, pp. 29–54 (in Russian).
22. **Sogomonyan E. S., Slabakov E. V.** *Samoproverjaemye ustrojstva i otkazoustojchivyye sistemy* (Self-checking devices and fault-tolerant systems), Radio & Svyaz', Moscow, 208 p. (in Russian).
23. **Das D., Touba N. A.** Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1999, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155.
24. **Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** *O svoystvakh koda s summirovaniem v skhemakh funkcional'nogo kontrol'ya* (On Sum Code Properties in Concurrent Error Detection Systems), *Avtomatika i telemekhanika*, 2010, iss. 6, pp. 155–162 (in Russian).
25. **Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** *Primenenie modul'nykh kodov s summirovaniem dlya postroeniya sistem funkcional'nogo kontrol'ya kombinatsionnykh logicheskikh skhem* (Application of Modular Summation Codes to Concurrent Error Detection Systems for Combinational Boolean Circuits), *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, iss. 10, pp. 152–169 (in Russian).
26. **Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** *Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemykh oshibok informatsionnykh razryadov* (Formation of the Berger Modified Code with Minimum Number of Undetectable Errors of Data Bits), *Electronnoye Modelirovanje*, 2012, vol. 34, iss. 6, pp. 17–29 (in Russian).
27. **Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V.** *O kodah s summirovaniem edinichnykh razryadov v sistemah funkcional'nogo kontrol'ya* (On Codes with Summation of Data Bits in Concurrent Error Detection Systems), *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 8, pp. 131–145. (in Russian).
28. **Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V.** *Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistematicheskikh kodov* (Errors Classification in Information Vectors of Systematic Codes), *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, iss. 5, pp. 333–343 (in Russian).
29. **Efanov D. V.** *Sintez samoproveryaemykh kombinatsionnykh ustrojstv na osnove kodov s ehffektivnym obnaruzheniem simmetrichnykh oshibok* (The Synthesis of Self-Checking Combinational Devices on the Basis of Codes with the Effective Symmetrical Error Detection), *Trudy SPIIRAN*, 2018, iss. 4, pp. 62–91 (in Russian).

УДК 621.391

DOI: 10.17587/it.25.35-40

С. В. Дворников, д-р техн. наук, проф., e-mail: practicsdv@yandex.ru,
А. В. Пшеничников, канд. техн. наук, доц., e-mail: siracooz77@mail.ru,
С. С. Манаенко, канд. техн. наук, e-mail: manaenkoss@mail.ru,

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург

Статистические характеристики помехозащищенных радиолиний с управлением частотным ресурсом

Приведены результаты исследования статистических характеристик помехозащищенных радиолиний, функционирующих в условиях неоднородности сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах. Предлагается реализация принципов адаптивной помехозащищенной радиосвязи. Доказана гипотеза об изменении функции плотности распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех в помехозащищенных радиолиниях с адаптивным управлением. Обоснована необходимость разработки методов оценки вероятностно-временных характеристик таких радиолиний.

Ключевые слова: помехозащищенные режимы функционирования, адаптивное управление, частотный ресурс, статистические характеристики

Введение

Существенное увеличение возможностей средств преднамеренного деструктивного воздействия на ресурсы радиолиний обуславливает поиск новых подходов к обеспечению помехозащищенности их функционирования.

В настоящее время большинство технических решений по реализации помехозащищенных режимов ограничивается применением алгоритмов медленной программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в совокупности с помехоустойчивыми видами модуляционных форматов [1–7].

В общем случае такие решения изначально по своей сути противоречивы, поскольку основываются на снижении энергетического потенциала радиолинии вследствие реализации режима ППРЧ и применения многомерных сигнальных конструкций с достаточно низкими свойствами помехозащищенности. Для решения данного противоречия в работе [8] предложены модели помехозащищенных линий радиосвязи. Из анализа полученных в [8] решений следует, что наиболее эффективным видом управления ресурсами помехозащищенных радиолиний, обеспечивающими повышение их свойств помехоустойчивости, является реализация методов адаптивного управления. При технической реализации выбранных методов управления наибольшую актуальность приобретает задача оценки их вероятностно-временных характеристик.

Решение данной задачи нашло отражение в ряде работ [9–14]. Анализ предложенных в них решений показывает, что они получены в граничных условиях статистической однородности рабочих частот, что существенно сужает область их практического применения. Для разрешения данного противоречия в статье представлены результаты исследования статистических характеристик помехозащищенных радиолиний с управлением их ресурсами.

Модель помехозащищенной радиолинии с возможностью адаптивного управления частотным ресурсом

При проведении исследований полагалось, что канал связи является каналом прерывистой связи с быстрыми и медленными замираниями, а также неоднородными условиями сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах. В качестве режима помехозащиты был выбран режим медленной ППРЧ. Предполагалось, что статистические характеристики линии радиосвязи с ППРЧ определяются характеристиками сигналов и помех на рабочих частотах.

В работе [15] приведены результаты исследований функций распределений огибающих сигналов и помех на рабочей частоте радиолинии. В частности показано, что они описываются законами Релея

$$\begin{aligned} W(U_c) &= \frac{2 U_c}{U_{c \text{эфф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2}{U_{c \text{эфф}}^2}\right); \\ W(U_n) &= \frac{2 U_n}{U_{n \text{эфф}}^2} \exp\left(-\frac{U_n^2}{U_{n \text{эфф}}^2}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

и Райса

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

$$W(U_n) = \frac{2 U_n}{U_{n \text{эфф}}^2} \exp\left(-\frac{U_n^2 + U_{n \text{ср}}^2}{U_{n \text{эфф}}^2}\right) I_0\left(\frac{2 U_n U_{n \text{ср}}}{U_{n \text{эфф}}^2}\right), \quad (3)$$

где $U_{c \text{эфф}}$, $U_{n \text{эфф}}$ — эффективные напряжения флюктуирующей составляющей сигнала и помехи соответственно, являющиеся параметрами распределений; $U_{c \text{ср}}$, $U_{n \text{ср}}$ — амплитуды регулярной составляющей сигнала и помехи; I_0 — функция Бесселя нулевого порядка.

Флюктуация фазы сигнала и помехи φ характеризуется равномерным распределением в интервале от 0 до 2π :

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi}. \quad (4)$$

Вместе с тем представленные распределения огибающих сигналов и помех справедливы на относительно коротких временных интервалах (до нескольких минут), на которых параметры распределения $U_{c \text{эфф}}$ ($U_{n \text{эфф}}$) можно считать постоянными. Заметно, что на более длительных временных интервалах параметры распределений сигналов и помех в законах Релея (Райса) являются случайной величиной с плотностью вероятности $W(U_{c \text{эфф}})$ и $W(U_{n \text{эфф}})$ соответственно.

Согласно работе [15] плотности вероятности $W(U_{c \text{эфф}})$, $W(U_{n \text{эфф}})$ описываются логарифмически нормальным законом, а выраженные в децибелах относительно 1 мкВ значения $U_{c \text{эфф}}$ и $U_{n \text{эфф}}$, характеризующие уровни сигналов и помех, являются случайными величинами y и x , плотности вероятности которых определяются нормальным законом:

$$W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right); \quad (5)$$

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

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

Для учета адаптивного управления частотным ресурсом радиолинии с ППРЧ введем понятие коэффициента использования частоты:

$$\alpha_i = \frac{\tau_{\Sigma i}}{T_a}, \quad (7)$$

где $\tau_{\Sigma i}$ — суммарный временной интервал работы радиолинии на i -й частоте ($i = 1, 2, \dots, m$); m — число рабочих частот; T_a — время анализа функционирования радиолинии с ППРЧ.

При проведении исследований введено ограничение: сумма коэффициентов использования частот в радиолинии с ППРЧ равна единице.

Коэффициенты использования частот определим в виде вектора использования рабочих частот $A = \|\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m\|$, характеризующего процесс управления частотно-временным ресурсом радиолинии с ППРЧ, под которым в работе понимаются частоты и относительное время использования каждой частоты на интервале анализа работы радиолинии с ППРЧ. Вектор использования рабочих частот определяет алгоритм управления частотным ресурсом радиолинии.

Предположим, что радиолиния функционирует на $m = 4$ частотах. Элементарный временной интервал работы радиолинии на одной частоте составляет величину τ_f , длительность анализа работы радиолинии $T_a = 17 \tau_f$, суммарные временные интервалы работы радиолинии на первой, второй, третьей и четвертой частотах составляют $\tau_{\Sigma 1} = 6\tau_f$, $\tau_{\Sigma 2} = 2\tau_f$, $\tau_{\Sigma 3} = 5\tau_f$, $\tau_{\Sigma 4} = 4\tau_f$ соответственно. Тогда в соответствии с выражением (7) коэффициенты использования частот в радиолинии с ППРЧ равны $\alpha_1 = \frac{6}{17}$, $\alpha_2 = \frac{2}{17}$, $\alpha_3 = \frac{5}{17}$, $\alpha_4 = \frac{4}{17}$.

Коэффициент использования частоты в радиолинии с ППРЧ может быть представлен различными способами. Учитывая, что при условии мгновенной перестройки радиолинии с частоты на частоту суммарное число перестроек в радиолинии $K_{\text{пер } \Sigma}$ определяется отношением длительности анализа работы радиолинии с ППРЧ к длительности элементарного временного интервала работы радиолинии на одной частоте

$$K_{\text{пер } \Sigma} = \frac{T_a}{\tau_f}, \quad (8)$$

а суммарное число перестроек радиолинии на i -ю частоту за время T_a определяется отношением суммарного временного интервала работы радиолинии на i -й частоте к величине τ_f :

$$K_{\text{пер } \Sigma i} = \frac{\tau_{\Sigma i}}{\tau_f}, \quad (9)$$

коэффициент использования i -й частоты, определяемый выражением (7), представим как

$$\alpha_i = \frac{K_{\text{пер } \Sigma i}}{K_{\text{пер } \Sigma}}. \quad (10)$$

Число перестроек радиолинии на i -ю частоту $K_{\text{пер } i}$ соответствует числу элементарных временных интервалов работы радиолинии на

одной частоте τ_f при передаче информации на i -й частоте

$$S_i = K_{\text{пер } i}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Поэтому другим представлением коэффициента использования частоты в радиолинии с ППРЧ является отношение числа временных интервалов S_i к общему числу элементарных временных интервалов работы S_0 , составляющих длительность анализа:

$$\alpha_i = \frac{S_i}{S_0}, \quad (11)$$

где $S_0 = \frac{T_a}{\tau_f}$.

В изложенной модели радиолинии с ППРЧ значения коэффициентов использования частот функционально определим величиной превышения уровня сигнала над уровнем помех

$$\alpha_i = f(z_i), \quad (12)$$

где $z_i = y_i - x_i$.

Таким образом, полученная модель помехозащищенной радиолинии полностью реализует возможность управления ее частотным ресурсом.

При этом для методов адаптивного управления справедливо неравенство

$$\frac{df(z_i)}{dz_i} > 0. \quad (13)$$

Выражения (5)—(13) определяют функциональную модель помехозащищенной радиолинии, обеспечивающую адаптивное управление ее частотным ресурсом в условиях неоднородной сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах.

Разработанная модель явилась основой для получения статистических характеристик помехозащищенных радиолиний.

Статистические характеристики помехозащищенных радиолиний

Статистические характеристики радиолиний с ППРЧ определены функцией распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех. Если в радиолинии с ППРЧ реализован равномерный закон использования частот, определяемый условием $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 1/m$, то функцию превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ представим в виде

$$F_{\text{ППРЧ}}(z) = \int_{-\infty}^z W_f(s) ds. \quad (14)$$

Анализ выражения (14) позволяет выдвинуть гипотезу, которую сформулируем в следующей редакции:

равномерный закон использования рабочих частот в радиолинии с ППРЧ определяет идентичность функций распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии и функции распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех на сумме рабочих частот

$$F_{\text{ППРЧ равн}}(z) = F_f(z), \quad (15)$$

где $F_f(z) = \int_{-\infty}^z W_f(s) ds$.

Следовательно, при технической реализации в радиолинии закона использования частот, отличного от равномерного, функция распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех в общем случае будет отличаться от функции распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех на рабочих частотах.

Для доказательства данной гипотезы получен общий вид статистических плотностей вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ $W_{\text{ППРЧ}}^*(z)$ при различных значениях коэффициентов использования рабочих частот $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, реализующих адаптивное управление частотным ресурсом радиолинии.

Для соблюдения необходимой точности анализируемых статистических плотностей $W_{\text{ППРЧ}}^*(z)$ предполагалось, что в линии радиосвязи программная перестройка осуществляется с использованием $m = 1000$ рабочих частот, плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех на рабочих частотах описывается нормальным законом с математическим ожиданием $\bar{z} = 25$ дБ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_z = 1$ дБ.

В целях обеспечения адаптивного управления в радиолинии с ППРЧ рабочие частоты представлены вариационным рядом, в котором частотам с большим индексом соответствует большее превышение уровня сигнала над уровнем помех

$$z_1 \leq z_2 \leq \dots \leq z_{1000}. \quad (16)$$

Гистограмма, характеризующая статистическую плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех на 1000 рабочих частотах, приведена на рис. 1. На рис. 2 представлена гистограмма, характеризующая статистическую плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ при равномерном законе использования частот ($\alpha_1 = \dots = \alpha_{1000} = 0,001$).

На рис. 3 представлена гистограмма, характеризующая статистическую плотность

вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех при значениях коэффициентов использования частот $\alpha_1 = \dots = \alpha_{320} = 0, \alpha_{320} = \dots = \alpha_{1000} = 1,47 \cdot 10^{-3}$, то есть при реализации порогового метода управления.

На рис. 4 представлена гистограмма, характеризующая статистическую плотность веро-

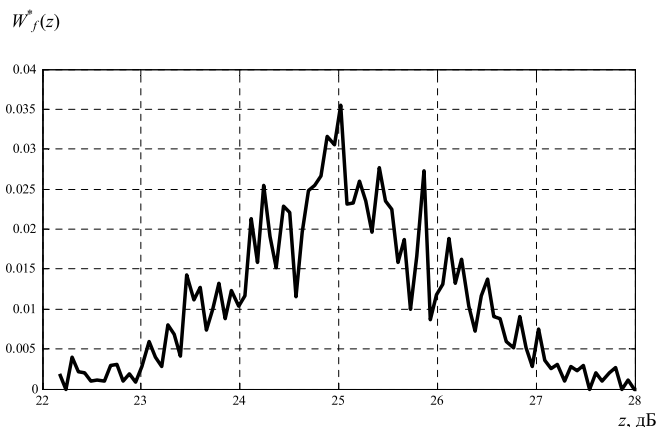


Рис. 1. Статистическая плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех на рабочих частотах

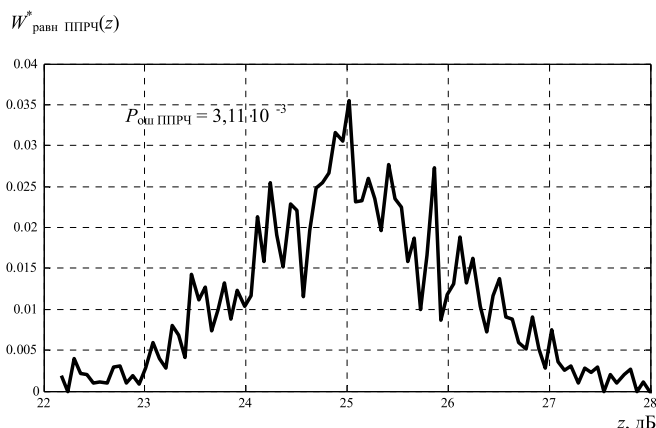


Рис. 2. Статистическая плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ при $\alpha_1 = \dots = \alpha_{1000} = 0,001$

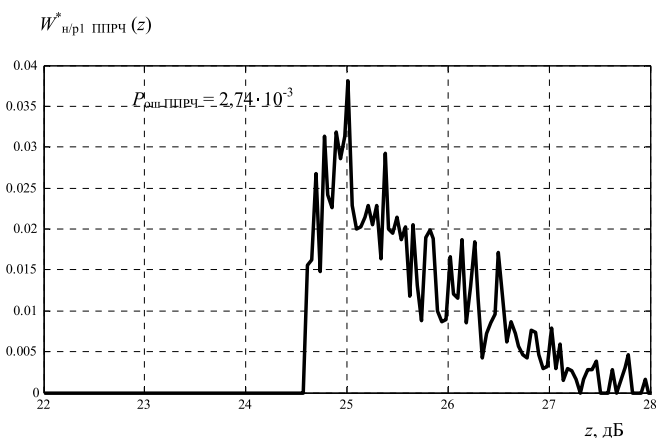


Рис. 3. Статистическая плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ при $\alpha_1 = \dots = \alpha_{320} = 0, \alpha_{320} = \dots = \alpha_{1000} = 1,47 \cdot 10^{-3}$

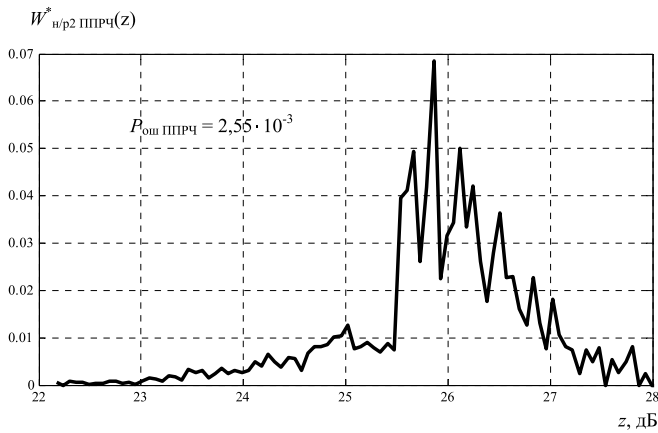


Рис. 4. Статистическая плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии с ППРЧ при $\alpha_1 = \dots = \alpha_{320} = 2,5 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_{320} = \dots = \alpha_{692} = 3,33 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_{692} = \dots = \alpha_{1000} = 0,796$

ятности превышения уровня сигнала над уровнем помех радиолинии с ППРЧ при значении коэффициентов использования частот $\alpha_1 = \dots = \alpha_{320} = 2,5 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_{320} = \dots = \alpha_{692} = 3,33 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_{692} = \dots = \alpha_{1000} = 0,796$. Представленный в данном варианте закон использования частот в радиолинии с ППРЧ предусматривает преимущественную перестройку на частоты, на которых превышение уровня сигнала над уровнем помех имеет большие значения.

Результаты, представленные на рис. 1–4, получены методом имитационного моделирования. При этом первоначально, в соответствии с известными законами распределения уровней сигналов и помех на рабочих частотах $W^*f(z)$ моделировали сигнальную и помеховую обстановку на этих частотах. Далее осуществляли программную перестройку по законам использования частот, описываемых соответствующим вектором коэффициентов использования частот $A = \|\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m\|$. Затем собирали статистику превышений уровня сигнала над уровнем помех, после чего рассчитывали статистическую плотность вероятности. Вероятность ошибки в радиолинии с ППРЧ получена исходя из статистической плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех в радиолинии

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{ош}}(z) W_{\text{ППРЧ}} d(z). \quad (16)$$

Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. При равномерном законе использования частот в помехозащищенных радиолиниях

статистическая плотность вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех идентична статистической плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех на рабочих частотах.

2. В случае равномерного закона использования рабочих частот в помехозащищенных радиолиниях могут использоваться известные методы оценки их эффективности.

3. Применение адаптивного управления ресурсами радиолинии приводит к изменению их статистических характеристик, что обуславливает необходимость разработки дополнительных методов оценки их вероятностно-временных характеристик.

4. Применение управления ресурсами помехозащищенных радиолиний позволяет повысить эффективность их функционирования.

5. Пороговый метод управления ресурсами помехозащищенных радиолиний менее эффективен, чем адаптивное управление.

Направление дальнейшего исследования авторы связывают с разработкой методов оценки вероятностно-временных характеристик помехозащищенных радиолиний с адаптивным управлением.

Список литературы

1. Дворников С. В., Манаенко С. С., Пшеничников А. В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12, № 2. С. 87–93.
2. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 685–689.
3. Дворников С. В., Манаенко С. С., Дворников С. С., Погорелов А. А. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 2. С. 140–143.
4. Дворников С. В., Кузнецов Д. А., Кожевников Д. А., Пшеничников А. В., Манаенко С. С. Теоретическое обоснование синтеза ансамбля биортогональных сигналов с повышенной помехоустойчивостью // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5 (22). С. 16–20.
5. Yen-Ming Chen, Yeong-Luh Ueng. Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Rayleigh Block Fading Channels // IEEE Trans. Com. — 2013. Vol. 61, N. 1. P. 128–135.
6. Pickholtz R. L., Shilling D. L., Milstein L. B. Theory of spread-spectrum communications // IEEE Trans. Com. 1982. Vol. COM-30, N. 5. P. 855–884.
7. Ray K. J., Wang B. Cognitive Radio Networking and Security: A Game-Theoretic View. Cambridge University Press, 2010. 618 p.
8. Пшеничников А. В. Интегральная модель радиолинии в конфликтной ситуации // Информация и космос. 2016. № 4. С. 39–45.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ.; Под ред. А. В. Назаренко. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
10. Athanasios D., Kalivas G. SNR estimation for low bit rate OFDM systems in AWGN channel // Proceedings of the ICN/ICONS/MCL. 2006. 198 p.
11. Chandler G. Development and Evaluation of an LPI Figure of Merit for Direct-Sequence and Frequency-Hopping Systems // IEEE Milcom'89, Commun., Conf. Boston. 1989. Vol. 2. P. 20–23.

12. **Волинская А. В., Сапожников И. В.** Моделирование линейного мультипараметрического модема для каналов передачи информации с низким отношением сигнал/помеха // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 8. С. 590—594.

13. **Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е.** и др. Помехозащищенность систем радиосвязи / Под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.

14. **Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С., Дворников С. С.** Метод формирования помехозащищенных сигнальных конструкций // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 9. С. 669—676.

15. **Комарович В. Ф., Сосунов В. Н.** Случайные помехи и надежность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.

S. V. Dvornikov, Professor, e-mail: practicsv@yandex.ru,
A. V. Pshenichnikov, Assistant Professor, e-mail: siracooz77@mail.ru,
S. S. Manaenko, Assistant Professor, e-mail: manaenkoss@mail.ru,
Military Communications Academy, St. Petersburg

Statistical Characteristics of Noise-Free Radio Links with Frequency Resource Management

The article summarizes the results of a study of the statistical characteristics of noise-immune radiolines operating under conditions of heterogeneity of the signal and interference conditions at operating frequencies. As an estimation parameter, the amount of excess of the signal level above the interference level was chosen, which determines the probabilistic and temporal characteristics of the information transfer process. The notion of the frequency utilization factor determining the radio resource management strategy has been introduced. The dependence of the frequency utilization factor on the signal level exceeding the level of interference is determined. The notion of adaptive control of the frequency-time resource of an interference-free radio link is introduced. A hypothesis about the influence of control methods on the statistical characteristics of noise-protected radio links is formulated. For its justification, an imitation model of an interference-free radio link has been constructed, on the basis of which statistical functions for distributing the signal level over the level of interference have been obtained. The development of the simulation model is based on the probabilistic and temporal characteristics that determine the change in the energy parameters of radio signals and interference at the operating frequencies of the radio link. The peculiarity of the developed approach is the consideration of the methods of resource control of the radio link in the development of the stochastic model of the radio channel. It is substantiated that threshold management methods are less effective than adaptive control methods. It is shown that the implementation of the uniform law of the use of radio link resources does not change the functional dependence of the probabilistic-temporal characteristics, therefore, with the given control method, known algorithms for calculating the efficiency of the me-protected radio links are practically implemented. Control methods, other than uniform, determine the change in the distribution law characterizing the signal level exceeding the level of interference in the radio link; therefore, with such methods of determining the type of control, known methods for estimating the efficiency of the functional models of radio links are inadequate for the calculation conditions.

Keywords: anti-interference mode of operation, adaptive control, frequency resource, statistical characteristics

DOI: 10.17587/it.25.35-40

References

1. **Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Pshenichnikov A. V.** *Spektral'no-jeffektivnye signaly s nepreryvnoj fazoj* (Spectral-effective signals with continuous phase), *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87—93 (in Russian).

2. **Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S.** *Pomehoustojchivaja model' signala QAM-16 s transformirovannym sozvezdijem* (Interference-signal model QAM-16 with a transformed constellation), *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 685—689 (in Russian).

3. **Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S., Pogorelov A. A.** *Sintez fazomanipulirovannyh vejjvet-signalov* (Synthesis of phase-shift wavelet signals), *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 140—143 (in Russian).

4. **Dvornikov S. V., Kuznecov D. A., Kozhevnikov D. A., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S.** *Teoreticheskoe obosnovanie sinteza ansambli biortogonal'-nyh signalov s povyshennoj pomehoustojchivost'ju* (Theoretical justification for the synthesis of an ensemble of biorthogonal signals with increased noise immunity), *Voprosy radioelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2015, no. 5 (22), pp. 16—20 (in Russian).

5. **Yen-Ming Chen, Yeong-Luh Ueng.** Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Rayleigh Block Fading Channels, *IEEE Trans. Com.*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 128—135.

6. **Pickholtz R. L., Shilling D. L., Milstein L. B.** Theory of spread-spectrum communications, *IEEE Trans. Com.*, 1982, vol. COM-30, no. 5, pp. 855—884.

7. **Ray K. J., Wang B.** Cognitive Radio Networking and Security: A Game-Theoretic View. Cambridge University Press, 2010, 618 p.

8. **Pshenichnikov A. V.** *Integral'naja model' radiolinii v konfliktnoj situacii* (Integral model of a radio link in a conflict situation), *Informacija i Kosmos*, 2016, no. 4, pp. 39—45 (in Russian).

9. **Sklyar B.** *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* (Digital communication. Theoretical foundations and practical application), Moscow, Vil'jams, 2003, 1104 p. (in Russian).

10. **Athanasios D., Kalivas G.** SNR estimation for low bit rate OFDM systems in AWGN channel, *Proceedings of the ICN/ICONS/MCL*, 2006, 198 p.

11. **Chandler G.** Development and Evaluation of an LPI Figure of Merit for Direct-Sequence and Frequency-Hopping Systems, *IEEE Milcom'89, Commun., Conf. Boston*, 1989, vol. 2, pp. 20—23.

12. **Волинская А. В., Сапожников И. В.** *Modelirovanie linejnogo mul'tiparametricheskogo modema dlya kanalov pedachy informacii s nizkim otnosheniem signal/pomekha* (Modelling of the Linear Multiparametrical Modem for Channels of Information Transfer with the Low Relation a Signal/Noise), *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 590—594 (in Russian).

13. **Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е.** и др. *Pomehozashishhennost' sistem radiosvjazi* (Interference immunity of radio communication systems), Moscow, Radio i svjaz', 2000, 384 p. (in Russian).

14. **Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S.** *Metod formirovanija pomehozashishhennyh signal'nyh konstrukcij* (A method of forming multiposition jamproof signal constructions), *Informacionnye Tehnologii*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 669—676 (in Russian).

15. **Комарович В. Ф., Сосунов В. Н.** *Sluchajnye pomehi i na-dezhnost' KV svjazi* (Random interference and reliability of short-wave coupling), Moscow, Svjaz', 1977, 136 p. (in Russian).