

**С. В. Дворников**, д-р техн. наук, проф., e-mail: practicsv@yandex.ru,  
**А. В. Пшеничников**, д-р техн. наук, доц., e-mail: siracooz77@mail.ru,  
**С. С. Манаенко**, канд. техн. наук, ст. преп., e-mail: manaenkoss@mail.ru,  
Военная академия связи им. С. М. Буденного

## Статистическая модель помехозащищенных радиотехнических систем на основе порогового метода управления частотным ресурсом

*Разработана статистическая модель помехозащищенных радиотехнических систем с пороговым методом управления частотным ресурсом. Сформулирована и доказана гипотеза о зависимости функции плотности распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех в помехозащищенных радиоприемниках от параметров массива исключаемых рабочих частот. Сделаны выводы по области практической реализации разработанных решений.*

**Ключевые слова:** помехозащищенные радиоприемники, пороговый метод управления, частотный ресурс, уровень сигнала и помех, статистическая модель

### Введение

Актуальной проблемой разработки современных радиотехнических систем (РТС) является обеспечение требуемой устойчивости их функционирования в различных условиях сигнальной и помеховой обстановки. Существенные проблемы при решении задач данной предметной области возникают в условиях преднамеренных деструктивных воздействий (ПДВ).

Анализ реализуемых на практике режимов функционирования современных РТС показывает, что в условиях ПДВ широкое применение получил режим *FHSS* (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) [1–5]. Вместе с тем в работах [3, 6, 7] показано, что реализация указанного режима *FHSS* основана на снижении эффективности функционирования РТС вследствие существенного увеличения требуемых ресурсов, а также существенной нагрузки на подсистему управления. При этом наиболее сложно рассмотренные задачи формализуются при представлении каналов радиосвязи моделями с неоднородными параметрами ввиду отсутствия соответствующего научно-методического аппарата.

Таким образом, возникает противоречие между реализацией режимов функционирования РТС в условиях неоднородных воздействий и практическими требованиями к их эффективности. С учетом указанных обстоятельств теоретические аспекты решения формализованных классов задач представлены в работе [8], в которой отражены результаты оценки статистических характеристик помехозащищенных радиоприемников с управлением частотными ресурсами. Данная работа является логическим продолжением работы [8] и посвящена исследованию РТС с *FHSS* на основе порогового метода управления частотным ресурсом.

### 1. Формализация метода повышения эффективности РТС, использующих режим *FHSS*

Оригинальные подходы к решению задач синтеза методов повышения эффективности РТС отражены в достаточно большом числе исследований в данной предметной области. Наиболее распространенными из них являются подходы, основанные на разработке агрегированных сигнальных конструкций с повышенными свойствами помехоустойчивости при заданных значениях пропускной способности радиоканалов [9, 10].

Альтернативным подходом является использование методов, основанных на разработке сложных моделей РТС, учитывающих параметры потоков деструктивных воздействий различного характера [10, 11]. Особенностью данных решений являются возможности по технической реализации элементов РТС, учитывающих параметрические особенности ПДВ.

Вместе с тем общим недостатком представленных методов является низкая эффективность функционирования РТС в условиях наличия пораженных частотных каналов, используемых режимом *FHSS*, а также сложность в получении их количественных оценок при неоднородных параметрах радиоканалов.

Для решения такого класса задач воспользуемся подходами, предложенными в работах [10, 11]. Их особенность состоит в том, что они основаны на управлении ресурсами РТС, в частности частотно-временными. Так, в работе [12] показано, что такие алгоритмы обеспечивают наибольшую эффективность РТС в условиях ПДВ, о чем свидетельствует их практическая реализация, например в системах стандарта *ALE 2G* [13]. Учитывая указанные обстоятельства, обобщим данные подходы

с позиций решений, реализующих алгоритмы активного зондирования частотных каналов [14, 15], с последующей отбраковкой непригодных каналов, определив такой метод как пороговый метод управления частотным ресурсом. Указанные способы формализуем с позиций управления частотно-временным ресурсом РТС, использующих режим *FHSS* в условиях ПДВ.

Для дальнейших исследований представим радиоканал моделью канала прерывистой связи, учитывающей быстрые и медленные замирания, а также неоднородные условия сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах.

Основываясь на известных результатах, приведенных, в частности, в [1], представим функции распределения огибающих сигналов  $U_c$  и помех  $U_n$  на рабочих частотах на основе закона Релея

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

и Райса

$$\begin{aligned} W(U_c) &= \\ &= \frac{2U_c}{U_{c\text{эфф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2 + U_{c\text{ср}}^2}{U_{c\text{эфф}}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_c U_{c\text{ср}}}{U_{c\text{эфф}}^2}\right); \\ W(U_n) &= \\ &= \frac{2U_n}{U_{n\text{эфф}}^2} \exp\left(-\frac{U_n^2 + U_{n\text{ср}}^2}{U_{n\text{эфф}}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_n U_{n\text{ср}}}{U_{n\text{эфф}}^2}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $U_{c\text{эфф}}$ ,  $U_{n\text{эфф}}$  — 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.

В работе [14] обосновано, что такое представление распределения огибающих сигналов и помех справедливо на коротких временных интервалах, измеряемых единицами минут, на протяжении которых параметры распределения  $U_{c\text{эфф}}$  ( $U_{n\text{эфф}}$ ) являются постоянными.

На более длительных временных интервалах параметры распределений сигналов и помех уже приобретают случайный характер и описываются плотностями вероятности  $W(U_{c\text{эфф}})$  и  $W(U_{n\text{эфф}})$  соответственно.

Плотности вероятности  $W(U_{c\text{эфф}})$ ,  $W(U_{n\text{эфф}})$ , в соответствии с работой [14], опишем логарифмически нормальным законом и предста-

вим выраженные в децибелах относительно 1 мкВ значения  $U_{c\text{эфф}}$  и  $U_{n\text{эфф}}$  как случайные величины в виде следующих выражений:

$$W(U_{c\text{эфф}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{U_{c\text{эфф}}}} \exp\left(-\frac{(U_{c\text{эфф}} - \overline{U_{c\text{эфф}}})^2}{2\sigma_{U_{c\text{эфф}}}^2}\right); \quad (3)$$

$$W(U_{n\text{эфф}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{U_{n\text{эфф}}}} \exp\left(-\frac{(U_{n\text{эфф}} - \overline{U_{n\text{эфф}}})^2}{2\sigma_{U_{n\text{эфф}}}^2}\right), \quad (4)$$

где  $\overline{U_{c\text{эфф}}}$  и  $\overline{U_{n\text{эфф}}}$ ,  $\sigma_{U_{c\text{эфф}}}$  и  $\sigma_{U_{n\text{эфф}}}$  — средние значения и среднеквадратические отклонения уровней сигналов и помех соответственно.

К сожалению реализация процедур рассмотренного метода связана со снижением показателей быстродействия РТС по сравнению с режимом непосредственного использования выделенных частотных каналов. Так, в работе [15] приведены теоретические подходы к оценке данных показателей. В частности, обосновано, что с увеличением массива непригодных частот приводит почти к двухкратному возрастанию времени, затрачиваемого на передачу информационных пакетов фиксированной длительности. При этом наибольшее абсолютное возрастание данного показателя происходит в условиях равенства длины тестовой последовательности и информационного пакета.

Однако представленные ограничения получены в условиях однородных параметров радиоканала на рабочих частотах. В условиях неоднородности распределений вида (3) и (4) как моделей каналов на каждой из выделенных частот применение формализованного метода управления ресурсами РТС в режиме *FHSS* приведет к дополнительному снижению эффективности вследствие изменения статистических характеристик радиоканалов.

Данные утверждения основываются на нарушении условий центральной предельной теоремы Ляпунова [16] ввиду ограниченного массива выделенных частот для работы РТС и появления в связи с этим зависимых случайных процессов, вносящих существенный вклад в общий процесс.

В целях дальнейшего исследования рассмотренных аспектов докажем следующее предположение:

*непрерывный равномерный закон выбора рабочих частот для РТС в режиме FHSS не изменяет функцию распределения, характеризую-*

ющую превышение уровня сигнала над уровнем помех на всем массиве рабочих частот

$$F_{FHSS \text{ равн}}(z) = F_f(z),$$

где

$$F_f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} W_f(s) ds, \quad z = U_{с \text{эфф}}(\text{дБ}) - U_{п \text{эфф}}(\text{дБ}).$$

При технической реализации процесса зондирования выделенного диапазона в целях исключения рабочих частот, реализующего пороговый метод управления частотным ресурсом, в общем случае функция распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех отличается от функции распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех на рабочих частотах, причем вид данной функции зависит от размера массива отбракованных частот.

## 2. Статистическая модель РТС с FHSS

Для доказательства сформулированного предположения воспользуемся аналитическим аппаратом свертки функций вида (3) и (4) на массиве рабочих частот.

Данный подход накладывает некоторые ограничения на степень зависимости рабочих частот, что может привести к незначительному искажению конечных результатов. Поэтому для получения общего вида функций распределения частот для РТС в режиме с FHSS воспользуемся методами имитационного моделирования, формализовав, таким образом, статистическую модель РТС в режиме с FHSS.

Для обеспечения требуемой точности получаемой оценки анализируемых статистических функций  $W_{FHSS}^*(z)$  сделаем допущение, что массив рабочих частот РТС составляет  $m = 1000$  рабочих частот, причем плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех на каждой из них описываются нормальными законами вида (3) и (4) с различными параметрами распределений, а такие параметры, как математические ожидания  $z$  и дисперсии  $\sigma_z$  указанных распределений, представляют собой случайные массивы, описываемые равномерным законом распределения в заданных границах.

Для формализации метода управления рабочие субканалы представлены вариационным рядом, в котором субканалам с большим индексом соответствуют значения с большим превышением уровня сигнала над уровнем помех:

$$z_1 \leq z_2 \leq \dots \leq z_{1000}. \quad (5)$$

Имитационная модель РТС в режиме с FHSS на основе метода отбраковки рабочих частот была реализована в среде MATLAB.

На основе разработанной имитационной модели и в соответствии с известными законами распределения уровней сигналов и помех на рабочих частотах  $W^*f(z)$  проведено моделирование сигнальной и помеховой обстановки на массиве  $W^*f(z)$ . На следующих этапах имитировалось функционирование РТС в заданных условиях, на основе которого и проводился набор статистики превышений уровня сигнала над уровнем помех. Полученные массивы данных обрабатывали и с использованием нормировок рассчитывали статистические функции распределения в каждом из радиоканалов.

Обобщенный программный код ядра имитационной модели обработки массивов данных представлен ниже в виде технологических процедур.

```

%Исходные данные для моделирования
l1 = 500; %граница порога неиспользуемых частот
l2 = 1000; %общее число частот
n = 10000; %число измерений отношения сигнал/шум на одной частоте
%задание значений параметров статистических характеристик законов
%распределения помех на каждой частоте
b1 = random('uniform',0.5,3.5,l2,1);
m1 = random('uniform',22,28,l2,1);
for i = 1:l2
    b(i,1:n) = b1(i);
    m(i,1:n) = m1(i);
end
%создание массива значений отношения сигнал/шум на каждой частоте,
%распределенных по нормальному закону
z = normrnd(m,b,[l2,n]);
%представление значений отношений сигнал/шум вариационным рядом,
%в котором частотам с большим индексом соответствует большее превышение
%уровня сигнала над уровнем помех
z = sort(z);
%отбраковка частот со значением сигнал/шум, не удовлетворяющим требуемому
%значению
z = z(l1 + 1:l2,:);
%создание массива значений сигнал/шум, используемых при моделировании линии
%ППРЧ
z = z(:);
%построение статистической функции распределения в радиоканале.
[w1,w2] = hist(z,100);
w4 = w1./((l2-l1)*n);
grid on
hold on
plot(w2,w4);

```

В представленной модели происходит формирование массива из 1000 случайных величин, распределенных по закону, определяемому выражениями (3) и (4) с различными значениями параметров математического ожидания  $m$  и дисперсии  $b$ . После выполнения данной процедуры осуществляется построение вариационного ряда в соответствии с формулой (5). На основе границ отбраковки частот формируется массив случайных чисел, который и определяет режим функционирования РТС. Расчет статистических характеристик РТС осуществлялся по данным сформированного массива.

Реализация разработанной имитационной модели выбора рабочих частот для РТС в режиме с FHSS осуществлялась с использованием процедур *Simulink* с построением графиков состояний в фиксированные моменты времени, определяемые параметрами FHSS с учетом структурно-функциональных особенностей РТС.

### 3. Результаты эксперимента

Для подтверждения сформулированного предположения был проведен эксперимент, результаты которого приведены на рис. 1–4. При этом для удобства их сравнения использованы одинаковые масштабирующие коэффициенты для их отображения в единой системе координат.

Так, на рис. 1 представлены результаты моделирования при отбраковке  $n = 10, 50, 100$  частот соответственно при общем их числе  $m = 1000$ . Анализ полученных результатов показывает, что при заданных параметрах управления частотно-временным ресурсом РТС в режиме с FHSS, определяемом отбраковкой не более 10 % частот, общий вид функции распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех может быть аппроксимирован законами распределения вида (3) и (4), с параметрами, определяемыми центральной предельной теоремой Ляпунова.

На рис. 2 приведены статистические характеристики РТС при отбраковке соответственно  $n = 250, 300, 400$  рабочих частот.

Для рассматриваемых условий при отбраковке не более 40 % частот изменение функции распределения превышения уровня сигнала над уровнем помех может быть аппроксимировано на основе моделей (1) и (2).

При отбраковке  $n = 700, 800, 900$ , характеризующих исключение от 40 до 90 % от общего массива рабочих частот, оставшиеся каналы

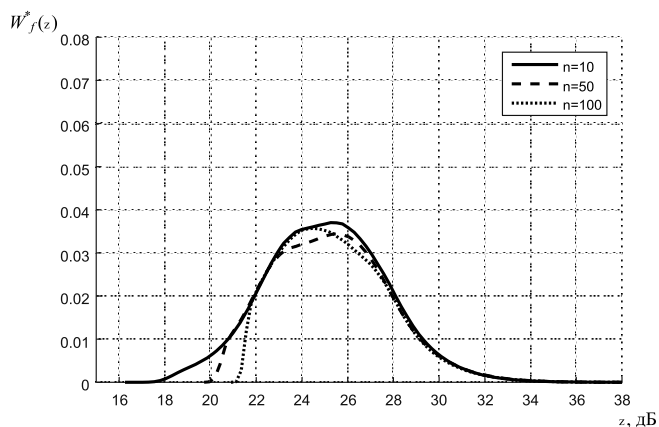


Рис. 1. Функции плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех при исключении  $n = 10, 50, 100$  рабочих частот

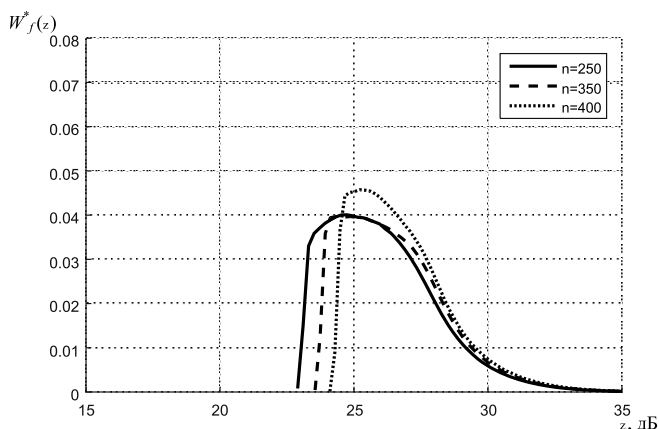


Рис. 2. Функции плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех при исключении  $n = 250, 350, 400$  рабочих частот

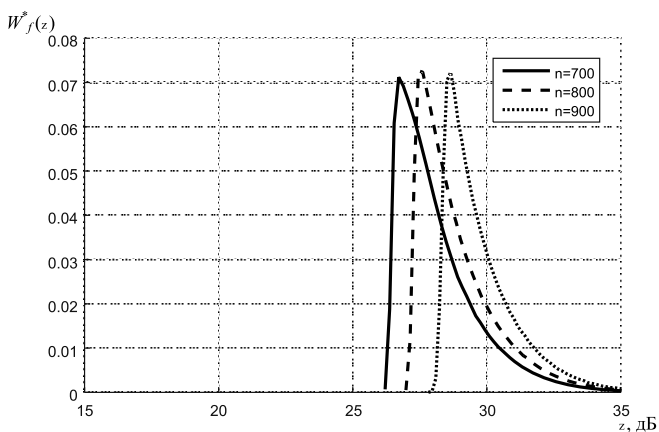


Рис. 3. Функции плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех при исключении  $n = 700, 800, 900$  рабочих частот

аппроксимируются функцией распределения экспоненциального закона (рис. 3).

Дальнейшая отбраковка массива частот (более 90 %) описывается нормальным законом

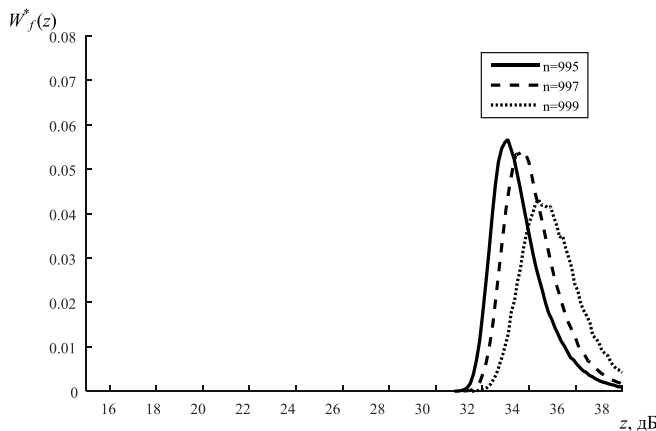


Рис. 4. Функции плотности вероятности превышения уровня сигнала над уровнем помех при исключении  $n = 995, 997, 999$  рабочих частот

распределения статистических характеристик РТС (рис. 4), параметры которого могут быть определены на основе центральной предельной теоремы Ляпунова.

Таким образом, результаты имитационного моделирования полностью подтверждают сформулированное предположение.

### Заключение

Полученные результаты имитационного моделирования подтверждают и обосновывают характер изменения статистических характеристик РТС в режиме с FHSS с пороговым методом управлением частотным ресурсом, что определяет их использование при расчете показателей достоверности и своевременности передачи информации в организуемых на их основе каналах радиосвязи. Следует отметить, что функции распределения экспоненциального вида характеризуют наибольшее снижение заданных показателей эффективности, соответствующее поражению более 50 % частотного ресурса.

В заключение следует отметить, что управление частотно-временным ресурсом РТС в режиме с FHSS на основе зондирования и отбраковки рабочих частот в моделях радиоканалов с неоднородными параметрами наиболее эффективно в случае, когда более 40 % от общего массива частот поражено в результате ПДВ. Данный факт подтверждает выводы теоретического исследования в работе [15].

Заметим, что практическая реализация РТС с управлением их ресурсами предполагает дальнейшую оценку эффективности ее алгоритмов функционирования. При этом известные методики оценки, приведенные в частности в работах [3, 7, 17], не учитывают данный аспект, что

существенно ограничивает их практическое применение. Таким образом, можно полагать, что результаты имитационного моделирования открывают новое направление в решении целого класса задач, связанного с оценкой эффективности РТС со сложными моделями управления их ресурсами.

### Список литературы

1. Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm // IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM). Donostia. San Sebastian. Spain. 2017. P. 1–6.
2. Motlagh N. H. Frequency Hopping Spread Spectrum: An Effective Way to Improve Wireless Communication Performance. Advanced Trends in Wireless Communications. 2011. 221 p.
3. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: РадиоСофт, 2008. 512 с.
4. Каунов А. Е., Поддубный В. Н. Воздействие различных видов заградительных помех на линию радиосвязи с ППРЧ // Радиотехника. 2006. № 6. С. 58–63.
5. Frédéric Maussang, Benjamin Ollivier, René Garello. On the use of a FHSS modulated signal in multi-users underwater detection context // OCEANS 2017. Aberdeen. 2017. P. 1–4.
6. Anđjela Draganić, Irena Orović, Srdjan Stanković. Spread-spectrum-modulated signal noising based on median ambiguity function // ELMAR 2017 International Symposium. 2017. P. 63–66.
7. Борисов В. И., Лимарев А. Е., Лепендин А. В., Маркин В. Г., Шестопалов В. И., Чаркин Д. Ю. Вероятность ошибки на бит при множественном доступе в сетях с ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 2015. № 4. С. 36–46.
8. Дворников С. В., Пшеничников А. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 221–228.
9. Povalac A., Sebesta J. Phase of arrival ranging method for UHF RFID tags using instantaneous frequency measurement // ICECom, Conference Proceedings, 2010.
10. Пшеничников А. В. Интегральная модель радиолинии в конфликтной ситуации // Информация и космос. 2016. № 4. С. 39–45.
11. Marko Hoyhtya. Adaptive power and frequency allocation strategies in cognitive radio systems // Espoo 2014. VTTScience 61. P. 115–119.
12. Дворников С. В., Русин А. А., Пшеничников А. В. Обобщенная функциональная модель радиолинии с управлением ее частотным ресурсом // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3 (26). С. 49–56.
13. Отчет МСЭ-R F.2061 Системы фиксированной ВЧ радиосвязи, 2006.
14. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ-связи. М.: Связь, 1977. 136 с.
15. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Гордейчук А. Ю. Адаптивный выбор частот в многоканальных системах передачи видео // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 4. С. 68–74.
16. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
17. Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. Оценка помехоустойчивости гибридных ППРЧ-ШПС систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 4. С. 85–91.

S. V. Dvornikov, Dr. Tech. sciences, prof., e-mail: practicsdv@yandex.ru,  
A. V. Pshenichnikov, Dr. Tech. Sciences, Assoc., e-mail: siracooz77@mail.ru,  
S. S. Manaenko, Ph.D., Art. prep., e-mail: manaenkoss@mail.ru,  
St. Petersburg Military Academy of Communications

## Statistical Model of Interference-Free Radio Systems Based on the Threshold Frequency Resource Control Method

One of the important problems of building modern radio systems is the fulfillment of the requirements for the stability of their functioning in difficult conditions of signal and interference conditions. The greatest relevance of the task of this subject area is acquired when it is necessary to take into account the parameters of deliberate destructive influences. Known approaches are based on expanding the base of signals based on the resources of radio engineering systems. Such approaches are quite effective in conditions of homogeneous models of radio channels, which are characterized by the same parameters of the functions of the distribution of signal characteristics and interference at operating frequencies. Under the conditions of inhomogeneous models of radio channels, the selected class of solutions is rather limited due to the uncertainty of the parameters of the statistical models of radio systems. The aim of the work is to study the properties of the statistical model of radio systems that implement the threshold method of controlling the frequency resource. This method is based on the implementation of procedures for sounding working channels, determining the signal level exceeding the noise level and eliminating working frequencies with unacceptable values of the measured parameter. To achieve the stated goal, a simulation model of noise-free radio engineering systems was developed based on the threshold frequency resource control method. A hypothesis is formulated, based on the dependence of statistical laws on the parameters of the array of excluded frequencies. To prove the hypothesis, an experiment was conducted using the developed simulation model. A set of statistics was carried out, on the basis of which the characteristics of the studied radio engineering systems were obtained. Analysis of the results confirms the validity of the formulated hypothesis. The main conclusions of the work confirm and justify the nature of changes in the statistical characteristics of noise-free radio engineering systems with a threshold method of frequency resource control. At the same time, the distribution functions of the exponential type characterize the largest decrease in the specified performance indicators. In conclusion, shows the approximate boundaries of the array of excluded frequencies, defining the nature of changes in statistical parameters. (не менее 200 слов).

**Keywords:** interference-free radio links, threshold control method, frequency resource, signal and interference level, statistical model

DOI: 10.17587/it.26.16-21

### References

1. Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm, *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals*, Donostia, San Sebastian, Spain, 2017, pp. 1–6.
2. Motlagh N. H. Frequency Hopping Spread Spectrum: Improving Wireless Communication Performance, *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011, 221 p.
3. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. Interference immunity of radio communication systems by extending the spectrum of signals by the method of pseudo-random tuning of the operating frequency, Moscow, RadioSoft, 2008, 512 p. (in Russian).
4. Kaunov A. Ye., Poddubny V. N. The impact of various types of barrage interference on a radio link with frequency hopping, *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 58–63 (in Russian).
5. Maussang F., Ollivier B., Garello R. On the use of the FHSS modulated signal in the multi-users underwater detection context, *OCEANS 2017*, Aberdeen, 2017, pp. 1–4.
6. Draganić A., Orović I., Stanković S. Spread-spectrum-modulated signal denoising based on median ambiguity function, *ELMAR 2017 International Symposium*, 2017, pp. 63–66.
7. Borisov V. I., Limarev A. E., Lependin A. V., Markin V. G., Shestopalov V. I., Charkin D. Yu. Probability of error per bit in case of multiple access in networks with frequency hopping, *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2015, no. 4, pp. 36–46 (in Russian).
8. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Formation of Spectral-Effective Signal Constructions in Radio Data Channels of Measuring Complexes, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Instrument making*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 221–228 (in Russian).
9. Povalac A., Sebesta J. UHF RFID tagging method using instantaneous frequency measurement, *ICECom, Conference Proceedings*, 2010.
10. Pshenichnikov A. V. Integral model of a radio link in a conflict situation, *Informatsiya i Kosmos*, 2016, no. 4, pp. 39–45 (in Russian).
11. Hoyhtya M. Adaptive power systems and radio systems, *Espoo 2014, VTTScience 61*, pp. 115–119.
12. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Rusin A. A. Generalized functional model of a radio link control its frequency resource, *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2016, no. 3, pp. 49–56 (in Russian).
13. Report ITU-R F.2061 Fixed HF radiocommunication systems, 2006 (in Russian).
14. Komarov V. F., Sosunov V. N. Random radio interference and reliability of HF communication, Moscow, Svyaz', 1977, 136 p. (in Russian).
15. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Gordeychuk A. Yu. Adaptive Frequency Selection in Multichannel Video Transmission Systems, *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2018, no. 4, pp. 68–74 (in Russian).
16. Wentzel, E. S., Ovcharov, L. A. Theory of Probability and its Engineering Applications, 2nd ed., Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 480 p. (in Russian).
17. Charkin D. Yu., Alekhin S. Yu., Grigoriev Ye. V., Limarev A. Ye., Prokhorov V. Ye. Evaluation of the noise immunity of hybrid frequency hopping circuits, radio communication systems, *Teoriya i Tekhnika Radiosvyazi*, 2018, no. 4, pp. 85–91 (in Russian).