

УДК 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты

С. В. Дворников^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-4889-0001

С. С. Дворников^а, канд. техн. наук, начальник отделения управления информационным ресурсом, orcid.org/0000-0001-7426-6475

А. В. Пшеничников^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-5063-3314, siracooz77@mail.ru

^аВоенная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064, РФ

Введение: в условиях современной загрузки радиочастотного диапазона особую актуальность приобретают решения задач обеспечения показателей эффективности функционирования радиосистем в различных условиях сигнальной и помеховой обстановки. Одним из эффективных направлений исследований данной предметной области является управление радиочастотным ресурсом. **Цель исследования:** разработка системы обоснований по выбору частотного ресурса для работы радиотехнических систем в режиме с псевдослучайной перестройкой рабочих частот. **Результаты:** на базе разработанного аналитического аппарата определены условия для предварительного тестирования рабочих частот в режиме прямого ответа в радиоканалах с псевдослучайной перестройкой рабочих частот. Обоснованы практические условия достижения требуемых показателей эффективности временного выигрыша от параметров процесса предварительного тестирования рабочих частот. Доказано положение, улучшающее показатели своевременности передачи сообщений в радиолинии с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты от увеличения массива выделенных частот и скорости программной перестройки. Особенностью разработанных теоретических подходов является формализация показателей эффективности функционирования радиосистем на основе отношения времени без учета процессов предварительного тестирования ко времени, необходимому для реализации режима тестирования при фиксированном объеме информационного сообщения. Критерием выбора группы частот определен допустимый уровень ошибок в принимаемой тестовой последовательности, по результатам оценки которого формируется группа непригодных частот. На основе проведенного моделирования выявлены соотношения между количеством непригодных частот и обеспечиваемым выигрышем по своевременности передачи информации в зависимости от показателей процессов тестирования рабочих частот. **Практическая значимость:** разработанные решения в своей совокупности обеспечивают повышение показателей своевременности передачи сообщений в радиотехнических системах в режиме программной перестройки рабочих частот.

Ключевые слова — анализ частотного ресурса, предварительное тестирование рабочих частот, многоканальные радиотехнические системы, режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

Для цитирования: Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 62–68. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

For citation: Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Analysis of frequency resource for FHSS mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 62–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Введение

В настоящее время режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (Frequency-Hopping Spread Spectrum — FHSS) находит широкое применение в радиотехнических системах (РТС) различного назначения. Теоретические подходы к формализации свойств FHSS активно разрабатываются и отражены в достаточно большом количестве научной литературы, в частности, в [1–5], а также в практических исследованиях алгоритмов технической реализации РТС [6–9].

Вместе с тем одним из сдерживающих факторов дальнейшего продвижения в инфотелекоммуникационном пространстве РТС с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочих

частот (ППРЧ) является их низкая эффективность в условиях наличия пораженных каналов в выделенном для работы частотном ресурсе.

В интересах решения данной проблемы используются различные способы активного зондирования частотных каналов [1, 10–12]. Однако такой подход ведет к увеличению времени передачи, что не всегда допустимо ввиду различных практических особенностей реализации РТС.

В настоящей статье представлены результаты, обосновывающие условия, при которых использование режима предварительного тестирования дает выигрыш в оперативности передачи информации. Авторами разработан соответствующий научно-методический аппарат, позволяющий получить количественную оценку временного выигрыша.

Анализ условий зондирования частотных каналов

В общем случае режим зондирования предполагает выполнение следующих технологических процедур.

Формируется тестовое сообщение S_T длительностью Δt , которое последовательно передается на каждой из N рабочих частот из группы $\{F\}_N$, выделенных для очередного сеанса связи.

На приемном конце линии радиосвязи сообщение S_T последовательно принимают на каждой частоте из заданной группы $\{F\}_N$, демодулируют и из демодулированной комбинации символов формируют ответное сообщение \hat{S}_T , которое также последовательно передают в обратном направлении на каждой из N рабочих частот (рис. 1), здесь n и i — текущие значения нумерации частот в группе $\{F\}_N$.

Окончательно формируют группу рабочих частот $\{\hat{F}\}_M = \{f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m, \dots, f_M\}$, включающую только те M -частоты, на которых демодулированные ответные сообщения \hat{S}_T соответствовали первоначальным S_T .

Критерием выбора окончательной группы из M -частот может выступать допустимый уровень ошибок в принятой тестовой последовательности \hat{S}_T , по результатам оценки которого формируют группу непригодных частот $\{\hat{F}\}_L$. Таким образом, повышают вероятность того, что оставшиеся частоты $\{F\}_N - \{\hat{F}\}_L = \{\hat{F}\}_M$ будут соответствовать требованиям для связи и информационные пакеты $S_{ин}$ будут передаваться на рабочих частотах из группы $\{F\}_M$ без ошибок.

В режиме без предварительного тестирования каналов информационные пакеты $S_{ин}$ передают непосредственно на частотах предварительно выбранной группы $\{F\}_M$. Затем передается запрос на передающую сторону о повторной передаче пакетов, принятых с ошибками.

В дальнейшем для оценки эффективности разработанного подхода будем полагать, что скорость передачи информации в РТС постоянна и не зависит от режима ее работы.

Анализ условий обеспечения выигрыша от режима предварительного тестирования выделенных для работы частот

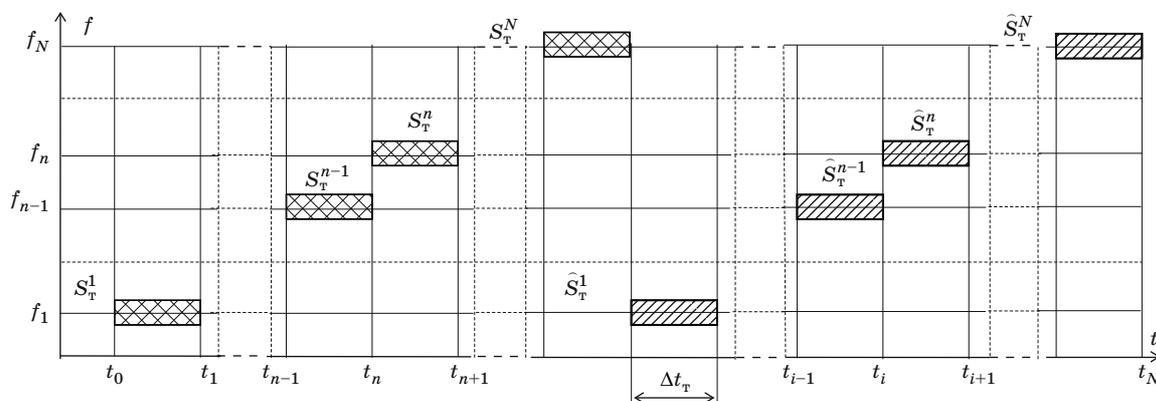
Исходя из реализации процедур предварительного тестирования можно предположить, что выигрыш в быстродействии по сравнению с режимом непосредственного использования выделенных частотных каналов обеспечивается не во всех случаях.

Для исследования данного аспекта и получения численных значений введем показатель эффективности $\gamma_{эф}$ как отношение времени без процедур предварительного тестирования $T_{бт}$, затрачиваемого на передачу K информационных пакетов длительностью $\Delta t_{ин}$ каждый (с учетом постоянства скорости передачи), ко времени $T_{ст}$, необходимому для реализации режима тестирования, аналогичный предложенному в работе [11]:

$$\gamma_{в} = T_{бт} / T_{ст}. \quad (1)$$

В целях получения аналитической зависимости показателя эффективности (1) формализуем значения $T_{бт}$ и $T_{ст}$ с позиций особенностей реализации указанных режимов. Для этого рассмотрим порядок использования выделенной группы частот $\{F\}_N$ при условии наличия в ней пораженных частот, т. е. частотных каналов, не отвечающих требованиям.

В общем случае формирование частотной группы $\{F\}_M$ происходит по результатам тестирования первоначального массива $\{F\}_N$ путем передачи на каждой из N частот тестовой последова-



■ **Рис. 1.** Частотно-временное представление реализации режима тестирования частот

■ **Fig. 1.** Frequency-time representation of the implementation of the test mode frequencies

тельности S_T длительностью Δt_T . Следовательно, затраченное время с учетом обратной передачи тестовой последовательности \hat{S}_T составит $T_T = 2N\Delta t$ при условии $S_T = \hat{S}_T$.

После формирования частотной группы $\{\hat{F}\}_M$ полезная информация, состоящая из K информационных пакетов длительностью $\Delta t_{и}$ каждый, будет передана за временной интервал $T_{и} = K\Delta t_{и}$.

В результате значение $T_{ст}$ составит

$$T_{ст} = K\Delta t_{и} + 2N\Delta t_T. \quad (2)$$

Очевидно, что с позиций борьбы за повышение быстродействия передача тестовой последовательности S_T является избыточной операцией.

Теперь рассмотрим особенности реализации режима ППРЧ без предварительного тестирования частот.

Так, значение

$$T_{6T} = K\Delta t_{и} \quad (3)$$

будет обеспечено только при условии

$$\{\hat{F}\}_M = \{F\}_N, \quad (4)$$

которое, как правило, на практике не достижимо. Поэтому при наличии ошибок в канале используют режим повторной передачи сообщений, принятых с ошибкой, аналогично используемому в системах АЛОНА [13, 14].

В этом случае процесс передачи полезной информации можно представить совокупностью следующих этапов. На первом этапе непосредственно передают само информационное сообщение. На втором этапе с приемного конца на передающий конец линии радиосвязи пересылаются данные о группе $\{F\}_L$, состоящей из L -частот, на которых информационные пакеты были приняты с ошибками. Если при этом допустить, что данные о каждой непригодной частоте из массива $\{F\}_L$ передают посредством сообщения, длительность которого совпадает с тестовым, то общее время, необходимое для передачи сведений о непригодных частотах, составит $\Delta t_T L$. На третьем этапе по оставшимся $\{\hat{F}\}_M$ пригодным частотам передают информационные пакеты, принятые с ошибками в ходе первого этапа.

Заметим, что каждая из L -частот может неоднократно назначаться в режиме ППРЧ для передачи информации. В частности, при равномерном выборе каждой из N частот первичного массива $\{F\}_N$ при исходном объеме информационных пакетов, равном K , таких назначений будет K/N .

В результате общее время передачи информационных пакетов при их повторной передаче составит

$$T_{6T} = K\Delta t_{и} + \Delta t_T L + \Delta t_{и} \frac{K}{N} L. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что время T_{6T} будет возрастать с увеличением значения массива L . В частности, на рис. 2 показаны графики зависимости потребного времени $T_{6T}(L)$ как функции L при следующих постоянных значениях $K = 100\,000$, $N = 100$, $\Delta t_T = 0,001$ с и переменной $\Delta t_{и}$.

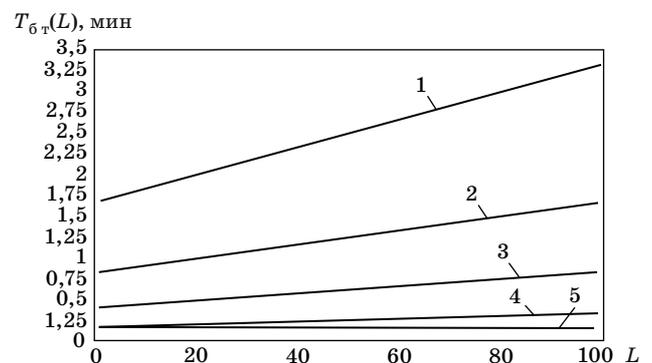
Анализ представленных результатов показывает, что увеличение массива $\{\hat{F}\}_L$ (т. е. при $L \rightarrow N$) приводит к почти двухкратному возрастанию времени T_{6T} независимо от начального значения $\Delta t_{и}$. При этом наибольшее абсолютное возрастание T_{6T} происходит только в случае, когда $\Delta t_T \approx \Delta t_{и}$ (на рис. 2 линия 1). Результирующее значение T_{6T} достаточно слабо зависит от изменения параметра Δt_T . Так, даже десятикратное увеличение (уменьшение) Δt_T не приводит к видимым изменениям функции $T_{6T}(\Delta t_T)$.

Таким образом, при фиксированных значениях $\{\hat{F}\}_L$ и N в качестве основных мер повышения оперативности передачи информации в режиме с ППРЧ следует рассматривать увеличение исходного массива выделенных частот $\{F\}_N$, повышение скорости ППРЧ.

В интересах дальнейшего исследования преобразуем выражение (5) к следующему виду:

$$\begin{aligned} T_{6T} &= \Delta t_{и} K + \Delta t_T L + \Delta t_{и} L \frac{K}{N} \\ &= \Delta t_{и} K \left[1 + \frac{\Delta t_T L}{\Delta t_{и} K} + \frac{L}{N} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Представление (6) позволяет оценить факторы, влияющие на снижение оперативности из-за наличия непригодных частот в первоначально выделенной группе $\{F\}_N$ как некоторого коэффи-



■ **Рис. 2.** Зависимость потребного времени от числа непригодных частот: 1 — $\Delta t_{и1} = 0,001$; 2 — $\Delta t_{и2} = 0,0005$; 3 — $\Delta t_{и3} = 0,00025$; 4 — $\Delta t_{и4} = 0,0001$; 5 — $T = K\Delta t_{и4}$

■ **Fig. 2.** The dependence of the time required from the number of unsuitable frequencies: 1 — $\Delta t_{и1} = 0,001$; 2 — $\Delta t_{и2} = 0,0005$; 3 — $\Delta t_{и3} = 0,00025$; 4 — $\Delta t_{и4} = 0,0001$; 5 — $T = K\Delta t_{и4}$

циента $\beta = \left[1 + \frac{\Delta t_{\text{T}} L}{\Delta t_{\text{И}} K} + \frac{L}{N} \right]$, определяющего возрастание времени, обусловленное наличием непригодных каналов.

Анализ условий, при которых обеспечивается выигрыш от предварительного тестирования выделенного частотного ресурса

Согласно формуле (2), режим предварительного тестирования однозначно приводит к увеличению времени, затрачиваемого на передачу полезной информации, на величину $\chi = 2N\Delta t_{\text{T}}$.

Для получения количественной оценки $T_{\text{с.т.}}(\chi)$ изначально сделаем предположение, что $K\Delta t_{\text{И}} > 2N\Delta t_{\text{T}}$, и введем понятие коэффициента реакции радиолинии как отношение

$$n = \frac{K\Delta t_{\text{И}}}{N\Delta t_{\text{T}}} \tag{7}$$

Кроме того, введем понятие безразмерного коэффициента пригодности используемых частот, характеризующего изначально выделенную группу $\{\tilde{F}\}_N$:

$$m = \frac{N-L}{N} \tag{8}$$

Согласно (7), $m = 1$, если $L = 0$, т. е. в выделенной группе $\{\tilde{F}\}_N$ все частоты непригодны, и наоборот, $m = 0$, если $L = 1$, т. е. в группе $\{\tilde{F}\}_N$ нет пригодных частот.

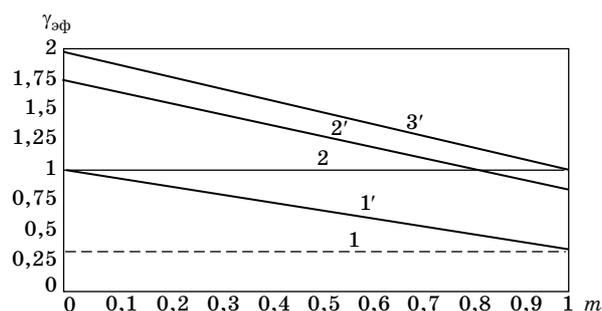
Тогда с учетом сделанных допущений получим

$$\gamma_{\text{эф}}(m, n) = \frac{T_{\text{б.т.}}}{T_{\text{с.т.}}} = \frac{K\Delta t_{\text{И}} + L\Delta t_{\text{T}} + L\Delta t_{\text{И}} \frac{K}{N}}{K\Delta t_{\text{И}} + 2N\Delta t_{\text{T}}} = \frac{K\Delta t_{\text{И}}(2-m) + (1-m)N\Delta t_{\text{T}}}{K\Delta t_{\text{И}} + 2N\Delta t_{\text{T}}} = \frac{(2-m)n + (1-m)}{n+2} \tag{9}$$

В соответствии с (9) представленный показатель эффективности $\gamma_{\text{эф}}(m, n)$ является функцией от двух безразмерных параметров m : коэффициента пригодности частот и n , который, согласно (7), можно интерпретировать как коэффициент оперативности выявления пригодных частот, так как показывает, во сколько раз меньше требуется времени для тестирования частот по отношению к интервалу времени, необходимому для передачи информационного сообщения.

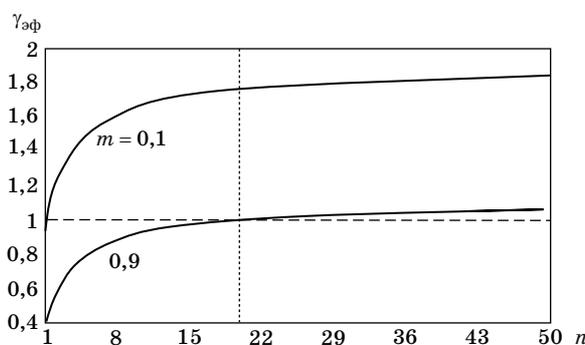
На рис. 3 показана зависимость $\gamma_{\text{эф}}(m)$ при $n = 1, n = 10$ и $n = 100$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. При $n = 1$, т. е.



■ **Рис. 3.** Зависимость показателя эффективности метода от коэффициента пригодности частот: 1 — $n = 1$, 1' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 2 — $n = 10$, 2' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 3' — $n = 100$, $\gamma_{\text{эф}}(m)$

■ **Fig. 3.** The dependence of the indicator of the effectiveness of the method frequency tolerance ratio: 1 — $n = 1$, 1' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 2 — $n = 10$, 2' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 3' — $n = 100$, $\gamma_{\text{эф}}(m)$



■ **Рис. 4.** Зависимость показателя эффективности метода от коэффициента оперативности выявления пригодных частот

■ **Fig. 4.** Dependence of the method efficiency indicator from the coefficient of operability to identify suitable frequencies

$K\Delta t_{\text{И}} = 2N\Delta t_{\text{T}}$, режим с предварительным тестированием будет проигрывать обычному режиму. Причем максимальный проигрыш, равный $\gamma_{\text{эф}} = 0,33$, будет обеспечен при $M = 0$, т. е. при условии пригодности всех выделенных для работы частот.

В то же время при $n = 10$ максимальный выигрыш достигнет величины $\gamma_{\text{эф}} = 1,75$ и асимптотически будет стремиться к $\gamma_{\text{в}} = 2$ с ростом n . При этом выбор значения $n > 100$ нецелесообразен, поскольку существенного увеличения $\gamma_{\text{эф}}$ не происходит.

В подтверждение сделанного заключения на рис. 4 представлены графики зависимости величины $\gamma_{\text{в}}$ от коэффициента n при различных m , в соответствии с которыми при наличии 10 % непригодных частот выигрыш по своевременности передачи информации будет обеспечен уже при коэффициенте оперативности выявления пригодных частот, равном $n = 18$, т. е. при условии, что объем тестовых сообщений в 18 раз будет меньше объема информационного сообщения.

Заключение

Применение режима предварительного тестирования выделенного частотного ресурса обеспечивает временной выигрыш при условии, что время тестирования не превысит 10 % от времени, необходимого для передачи информационного сообщения. И это при условии, что не менее 18 % частот будут непригодными для передачи сообщений.

В то же время при временном интервале тестирования порядка 5,5 % указанный выигрыш будет обеспечен при 10 % непригодных частот, который будет асимптотически стремиться к $\gamma_B = 2$ с ростом числа непригодных частот.

Следует отметить, что дополнительные усилия по снижению длительности тестового сообщения до уровня не более 1 % от информационного не приведет к существенному выигрышу.

Таким образом, практическое применение режима предварительного тестирования становится целесообразным при условии, что в линиях радиосвязи будет не менее 10 % пораженных частот, а длительность тестового сообщения не превысит 4 % от информационного.

Представленные решения получены в области ограничений разработанного теоретического аппарата по анализу алгоритмов синхронизации в РТС, реализации сетевых решений и условий деструктивных воздействий [15–17]. Кроме того, разработанные подходы не учитывают повышение достоверности передачи сообщений на каждой из рабочих частот, используемых для организации режима ППРЧ, за счет улучшения энергетических характеристик сигналов [18, 19] и гибридного использования режимов на основе ППРЧ [20]. Данные направления выведены авторами в область дальнейших исследований.

Литература

1. 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.
2. Дворников С. В., Домбровский Я. А., Семисошенко М. А., Гулидов А. А., Иванов Р. В. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. *Информация и космос*, 2016, № 4, с. 11–14.
3. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. *Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты*. СПб., Свое издательство, 2013. 166 с.
4. Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/ECMSM.2017.7945892
5. Motlagh N. H. Frequency hopping spread spectrum: an effective way to improve wireless communication performance. *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011, pp. 188–202. doi:10.5772/15482
6. Пат. 2520401 РФ, МПК Н 01 Q 19/00, Н 04 В 1/00. Способ повышения скрытности радиоизлучающего средства в радиолинии с ППРЧ, В. А. Цимбал (РФ), С. Н. Шиманов (РФ), В. П. Пашинцев (РФ), С. О. Бурлаков (РФ), Д. А. Журавлёв (РФ), В. В. Митаки (РФ), Д. А. Потягов (РФ), Е. В. Грибанов (РФ), С. А. Коваль (РФ), И. А. Якимова (РФ). № 2012142151/08; заявл. 04.10.12; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18. 2 с.
7. Пат. 2506702 РФ, МПК Н 04 L 1/00, Н 04 L 7/00. Устройство синхронизации в системе радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, Е. В. Лебединский (РФ), Е. А. Каплин (РФ), А. А. Катанович (РФ), М. Б. Клионский (РФ), А. В. Яковлев (РФ), П. Д. Погарев (РФ). № 2011154279/08; заявл. 28.12.11; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. 2 с.
8. Maussang F., Ollivier B., Garello R. On the use of a FHSS modulated signal in multi-users underwater detection context. *Oceans 2017 — Aberdeen*, 2017, pp. 1–4. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084967
9. Бизюков П. Е., Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В. Исследование рангового алгоритма обнаружения сигнала с ППРЧ. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2017, № 5, с. 75–79.
10. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and applications*. Prentice Hall, 2001. 1079 p.
11. Дворников С. В., Устинов А. А., Гордейчук А. Ю. Адаптивный выбор частот в многоканальных системах передачи видео. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, 2018, № 4, с. 68–74.
12. Пат. 2447579 РФ, МПК Н 04 В 3/46. Способ активного контроля рабочих частот, В. В. Егоров (РФ), А. А. Катанович (РФ), С. А. Лобов (РФ), А. Н. Мингалев (РФ), А. Е. Тимофеев (РФ), В. П. Чемиренко (РФ). № 2010101884/08; заявл. 21.01.10; опубл. 10.04.12, Бюл. № 10. 2 с.
13. Сергиенко А. Б. *Цифровая связь*. СПб., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 164 с.
14. Chiani M. Coded slotted ALOHA: A graph-based method for uncoordinated multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, vol. 61, no. 12, pp. 6815–6832.
15. 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.
16. Евтеев А. А., Мальцев Г. Н. Помехоустойчивость радиотехнических систем в режиме поиска и обна-

- ружения по задержке сигналов с расширением спектра. *Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского*, СПб., 2016, № 652, с. 65–71.
17. Каунов А. Е., Поддубный В. Н. Воздействие различных видов заградительных помех на линию радиосвязи с ППРЧ. *Радиотехника*, 2006, № 6, с. 58–63.
18. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А., Дворников А. С. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, 2014, № 2, с. 51–56.

19. Дворников С. В., Дворников С. С., Спиринов А. М. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций. *Информационные технологии*, 2013, № 12, с. 52–55.
20. Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. Оценка помехоустойчивости гибридных ППРЧ-ППС систем радиосвязи. *Теория и техника радиосвязи*, 2018, № 4, с. 85–91.

UDC 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Analysis of frequency resource for FHSS modeS. V. Dvornikov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-4889-0001S. S. Dvornikov^a, PhD, Tech., Head of Information Resource Management, orcid.org/0000-0001-7426-6475A. V. Pshenichnikov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-5063-3314, siracooz77@mail.ru^aS. M. Budenny Military Academy of Communication, 3, Tikhoretskii Pr., 190064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When the radio frequency spectrum is as busy as it is today, it is especially important to ensure effective functioning of radio systems under various signal and interfering conditions. One of the research fields is radio frequency resource management. **Purpose:** Developing a system of proposals for choosing a frequency resource for radio system operation in the mode of frequency-hopping spread spectrum (FHSS). **Results:** On the basis of the developed analytical apparatus, we have specified the conditions for preliminary testing of working frequencies in the direct response mode in FHSS radio channels. Practical conditions are substantiated for achieving the required performance indicators from the parameters of the preliminary frequency testing process. A statement is proved that determines how the improvement of timely message delivery in a radio link with a pseudo-random adjustment of the operating frequency depends on the growth of the array of allocated frequencies and on the speed of the program adjustment. A feature of the newly developed theoretical approaches is the formalization of radio system performance indicators based on the ratio of the time without taking into account the preliminary testing processes to the time required to implement the test mode with a fixed amount of an information message. The chosen criterion for selecting a frequency group is the permissible level of errors in the received test sequence whose evaluation determines the group of specified unsuitable frequencies. On the basis of the conducted simulation, we have revealed the relationships between the number of unsuitable frequencies and the gains provided by the timeliness of information transfer, depending on the performance indicators found during the testing of the working frequencies. **Practical relevance:** The developed solutions, in their entirety, provide a better timeliness of message delivery in radio systems in FHSS mode.

Keywords — frequency resource analysis, preliminary testing of working frequencies, multi-channel radio systems, frequency-hopping spread spectrum.

For citation: Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Analysis of frequency resource for FHSS mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 62–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

References

- Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. *Pomekhozashchishchennost' system radiosvyazi rasshireniyem spectra signalov metodom psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoty* [Interference immunity of radio communication systems by extending the spectrum of signals using the pseudo-random tuning of the operating frequency]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008. 512 p. (In Russian).
- Dvornikov S. V., Dombrovsky Ya. A., Semisoshenko M. A., Gulidov A. A., Ivanov R. V. Evaluation of radiocommunication lines interference with slow software switching of the running frequency. *Informatsiya i kosmos*, 2016, no. 4, pp. 11–14 (In Russian).
- Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' system svyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty* [Interference immunity of communication systems with pseudo-random tuning of the operating frequency]. Saint-Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2013. 166 p. (In Russian).
- Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/ECMSM.2017.7945892
- Motlagh N. H. Frequency hopping spread spectrum: An effective way to improve wireless communication performance. *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011, pp. 188–202. doi:10.5772/15482
- Tsimbal V. A., Shimanov S. N., Pashintsev V. P., Burlakov S. O., Zhuravlev D. A., Mitaki V. V., Potjagov D. A., Gribanov E. V., Koval' S. A., Jakimova I. A., et al. *Sposob povysheniya skrytnosti radioizluchayushchego sredstva v radiolinii s PPRCH* [Method of increasing stealthiness of radio-frequency radiating means in pseudorandom operational frequency readjustment radio link]. Patent RF, no. 2520401, 2014.
- Lebedinskij E. V., Kaplin E. A., Katanovich A. A., Klionskij M. B., Jakovlev A. V., Pogarev P. D., et al. *Ustroystvo sinkhronizatsii v sisteme radiosvyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty* [Device for synchronisation in radio communication system with pseudorandom operational frequency readjustment]. Patent RF, no. 2506702, 2014.
- Maussang F., Ollivier B., Garelli R. On the use of a FHSS modulated signal in multi-users underwater detection context. *Oceans 2017 — Aberdeen*, 2017, pp. 1–4. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084967
- Bizyukov P. E., Litvinenko V. P., Litvinenko Yu. V. Investigation of the rank-algorithm of fhss detection. *Vestnik Voro-*

- nezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, no. 5, pp. 75–79 (In Russian).
10. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and applications*. Prentice Hall, 2001. 1079 p.
 11. Dvornikov S. V., Ustinov A. A., Gordeychuk A. Yu. Adaptive frequency selection in MULTI-channel video transmission systems. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2018, no. 4, pp. 68–74 (In Russian).
 12. Egorov V. V., Katanovich A. A., Lobov S. A., Mingalev A. N., Timofeev A. E., Chemirenko V. P., et al. *Sposob aktivnogo kontrolya rabochikh chastot* [Method of in-process control of operating frequencies]. Patent RF, no. 2447579, 2012.
 13. Sergienko A. B. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communication]. Saint-Petersburg, SPbGETU "LETI" Publ., 2012. 164 p. (In Russian).
 14. Chiani M. Coded slotted ALOHA: A graph-based method for uncoordinated multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, vol. 61, no. 12, pp. 6815–6832.
 15. Borisov V. I., Limarev A. E., Lependin A. V., Markin V. G., Shestopalov V. I., Charkin D. Yu. Bit error rate probability in FHSS networks with multiple access. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2015, no. 4, pp. 36–46 (In Russian).
 16. Yevteyev A. A., Mal'tsev G. N. *Pomekhoustoychivost' radiotekhnicheskikh sistem v rezhime poiska i obnaruzheniya po zaderzhke signalov s rasshireniyem spektra*. In: *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], Saint-Petersburg, 2016, no. 652, pp. 65–71 (In Russian).
 17. Kaunov A. E., Poddubny V. N. Influence of jams upon the line of radio communication with frequency hopping. *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 58–63 (In Russian).
 18. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Increased noise immunity signal 16-QAM constellation with transformed. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2014, no. 2, pp. 51–56 (In Russian).
 19. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Spirin A. M. Syntheses of manipulated signals on the base wavelet-functions. *Informatsionnyye tekhnologii*, 2013, no. 12, pp. 52–55 (In Russian).
 20. Charkin D. Yu., Alekhin S. Yu., Grigoriev E. V., Limarev A. E., Prokhorov V. E. Estimation of noise immunity of hybrid frequency hopping broadband radio communication systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2018, no. 4, pp. 85–91 (In Russian).

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 20%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Пресса России»: № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>; РУКОИТ: <http://www.rucont.ru>;

ИВИС: <http://www.ivis.ru>; Некс-Медиа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=news&id=11196>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2017 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayuschie-sistemy>).