

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.7>

УДК: 621.396.669

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЙ СЛУЧАЙНЫХ И ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА СИСТЕМУ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КОГНИТИВНЫМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

А.А. Генов<sup>1</sup>, А.А. Слепых<sup>2</sup>, А.В. Сухов<sup>3</sup>, В.И. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>3</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Статья поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

**Аннотация.** В статье рассмотрены принципы построения адаптивного алгоритма радиолинии с псевдослучайным переключением рабочих частот и проведена оценка эффективности воздействия на него случайных и преднамеренных помех. Разработана программная модель радиоканала с помеховыми воздействиями на него и получены численные значения количества правильно принятых символов в различных помеховых ситуациях. Приведены результаты статистического моделирования, позволяющие оценить применение идентификации распределения ошибочных символов для определения типа и количества помех.

**Ключевые слова:** псевдослучайное переключение частот, расширение спектра, адаптивная радиолиния, преднамеренные помехи.

**Финансирование:** Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме №FNEF-2022-0022 «Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки

элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях”.

**Автор для переписки:** Генов Анатолий Анатольевич, [kt-mati@mail.ru](mailto:kt-mati@mail.ru)

## **Введение**

Тенденция совершенствования современных систем передачи данных направлены на адаптивную конфигурацию характеристик, таких как скорость передачи данных, помехоустойчивость, скрытность. На сегодняшний день варьирование данными параметрами возможно за счет применения технологий SDR (программно определяемая радиосистема – Software-defined radio) и когнитивного радио. При этом, как известно из ряда исследований, изменение одного параметра радиоканала непременно влечет нелинейное изменение других параметров, хотя при этом отсутствует прямая функциональная зависимость между ними. С учетом возможностей использования технологии SDR наибольший интерес представляют асинхронные системы передачи данных на основе псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Это прежде всего связано с их широкими возможностями к управлению параметрами структуры сигнально-кодовой конструкции самой ППРЧ [1]. При этом относительно высокая помехоустойчивость является важным свойством всех радиоканалов с ППРЧ.

Также особенностью систем с когнитивной ППРЧ является их гибкость в обеспечении защищенности от преднамеренных и непреднамеренных помех, воздействие которых приводит к блокированию частотных каналов (частот адресной группы).

Возможность программной подстройки режимов функционирования ППРЧ позволяет создавать алгоритмы управления системой радиосвязи, которые в свою очередь способны адаптивно восстанавливать комплексный показатель устойчивости радиоканала в условиях помеховых воздействий в кратчайший срок [3-6]. При этом возникает необходимость поиска оптимальных параметров

функционирования радиоканала в условиях динамически меняющихся помеховых воздействий. В описанных условиях решить задачу перебором не представляется возможным, поэтому необходимо разработать методы и алгоритмы, позволяющие описать правила варьирования ими. Одним из возможных решений данной задачи может быть описано на основе применения методов теории игр [2]. При этом противодействующими сторонами являются система радиосвязи и система постановки помех. Алгоритмы управления параметрами систем с когнитивным ППРЧ и постановка им помех могут быть представлены последовательными сетевыми моделями, включающими смешанные стратегии с нестабильной эффективностью для применения в соответствующих условиях радиоэлектронного противоборства.

## 1. Устойчивость систем с ППРЧ к помехам

Рассмотрим теоретическую оценку устойчивости системы с ППРЧ при воздействии типовых помех, используемых для радиоэлектронного подавления:

*Быстрая ППРЧ – помеха в частотной полосе:*

Для систем с ППРЧ с многопозиционной частотной манипуляцией средняя вероятность ошибки на бит [3] равна

$$P_{ib} = \frac{N}{2(N-1)} P_s, \quad N = 2^k, \quad (1)$$

где  $P_s$  – вероятность ошибки на символ.

При наличии помех:

$$P_s = \sum_{m=0}^N P(m) S_m, \quad (2)$$

где  $P(m)$  – безусловная вероятность порождения  $m$  частотных позиций;  $S_m$  – условная вероятность ошибки при поражении  $m$  частотных позиций на  $N$  информационных;

$$S_m = \frac{m}{N} S_{m1} + \frac{N-m}{N} S_{m0}, \quad (3)$$

где  $S_{m0}$  – вероятность ошибки при условии, что среди  $m$  пораженных позиций сигнальной позиции нет;  $S_{m1}$  – вероятность ошибки при условии, что среди пораженных позиций есть и сигнальная.

Для случая шумовой помехи в частотной полосе выражение для вероятности ошибки примет вид:

$$S_{m1} = 1 - \exp\left(-\frac{R_s}{2(N_t + N_j)}\right) \sum_{N=0}^{m+1} \binom{m-1}{k} \sum_{l=0}^{n-m} \binom{n-m}{l} (-1)^l \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{\frac{N_i + N_j}{N_t} l + 1} \right] \exp\left(-\frac{R_s}{(2N_t + N_j) \left[ k + \frac{N_t + N_j}{N_t} l + 1 \right]}\right)$$

В [7] получено выражение для наилучшей помехи в частотной полосе:

$$\mu = \begin{cases} \frac{k * x_0}{\frac{R_s}{N_j}}, & \frac{R_s}{N_j} > kx_0 \\ 1, & \frac{R_s}{N_j} \leq kx_0 \end{cases},$$

где  $k = \log_2 N$ ;  $x_0$  – константа, зависящая от  $N$  (табл.1).

Таблица 1. Значения константы  $x_0$  от информационных параметров ППРЧ.

N=2	C	X <sub>0</sub>
2	0,3679	2,00
4	0,2330	1,192
8	0,1954	0,927
16	0,1813	0,798
32	0,1759	0,723

Если не учитывать  $N_t$ , то максимально возможное значение

$$P_{ib} = \begin{cases} \frac{k * x_0}{\frac{R_s}{N_j}}, & \frac{R_s}{N_j} > kx_0 \\ \frac{1}{2(N-1)} \sum_{l=2}^N (-1)^l \exp\left(-\frac{l-1}{l} * \frac{R_s}{N_j}\right), & \frac{R_s}{N_j} < kx_0 \end{cases},$$

где  $c$  – константа, зависящая от  $N$  (табл. 1).

*Быстрая ППРЧ – помеха в виде сетки частот:*

В случае аддитивной смеси сигнала и сетки гармонических помех есть две ситуации, для которых необходимо вычислить вероятности ошибки. Первая состоит в том, что сигнальная частотная позиция не поражена помехой, поражена любая другая позиция, и амплитуда сигнала  $\sqrt{2R_s}$  меньше амплитуды помехи  $\sqrt{2R_j}$ . Вторая ситуация состоит в том, что сигнальная позиция поражена помехой, и амплитуда сигнала меньше половины амплитуды помехи [8]. Из простых геометрических соображений ясно, что часть окружности радиуса  $\sqrt{2R_s}$ , лежащая внутри окружности радиуса  $\sqrt{2R_j}$  при условии, что центр окружности  $\sqrt{2R_s}$  лежит на окружности  $\sqrt{2R_j}$  составляет

$$F = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{R_s}}{2\sqrt{R_j}} \right), & 0 \leq \sqrt{R_s} \leq \sqrt{R_j} \\ 0 & , \quad \sqrt{R_s} > 2\sqrt{R_j} \end{cases} . \quad (4)$$

Если  $0 \leq \sqrt{R_s} < \sqrt{R_j}$ , то

$$S_m = \begin{cases} 0, & m = 0, \\ \frac{N-1}{N}, & m = 1, \\ \frac{N-m}{N} + \frac{N}{m} \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{R_s}}{2\sqrt{R_j}} \right), & 1 < m \leq N \end{cases} . \quad (5)$$

Если  $\sqrt{R_j} < \sqrt{R_s} < 2\sqrt{R_j}$ , то

$$S_m = \begin{cases} 0, \\ \frac{m}{N\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{R_s}}{2\sqrt{R_j}} \right), & 1 < m \leq N \end{cases} , \quad (6)$$

для  $\sqrt{R_s} > 2\sqrt{R_j}$ ,  $S_m = 0$ .

## 2. Оценка воздействий случайных и преднамеренных помех на систему с ППРЧ

Возможны три стратегии постановки помех:

- 1) Помеха на соседних позициях – сигнал равномерно распределяется по диапазону

$$P_{ib} = \begin{cases} \frac{N}{2(N-1)} [1 - (1-\mu)^{(N-1)}] \left[ 1 - \mu + \frac{\mu}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{\mu \frac{R_s}{R_j}}{2}} \right), 0 \leq \mu \leq \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{(-1)} \right] \\ \frac{N}{2(N-1)} [1 - (1-\mu)^{(N-1)}] \frac{\mu}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{\mu \frac{R_s}{R_j}}{2}} \right), \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{(-1)} < \mu \leq 4 \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{(-1)} \\ 0, \mu > 4 \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{(-1)} \end{cases} \quad (7)$$

- 2) Помеха на соседних позициях – сигнал на соседних позициях

$$P_{ib} = \begin{cases} \frac{N}{2(N-1)} \cdot \frac{\mu}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{\mu R_s / R_j}}{2} \right), 0 \leq \mu \leq 4 \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{-1} \\ 0, \mu > 4 \left( \frac{R_s}{R_j} \right)^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

- 3) Помехи распределены равномерно с интервалом в  $N$  позициях – сигнал на соседних позициях

$$P_{ib} = \begin{cases} \frac{\beta}{2}, 0 \leq \beta \leq N \left( \frac{R_s}{R_j} \right) \\ \beta > N \left( \frac{R_s}{R_j} \right) \end{cases} \quad (9)$$

где  $\beta = N\mu$ . При  $\frac{R_s}{R_j} < N$  наихудшей помехой является помеха с  $\beta = 1$ , при этом

$$P_{ib} = 0.5 \quad (10)$$

Если же  $\frac{N}{\beta} > \frac{R_s}{R_j} > N$ , то наихудшей помехой будет помеха с  $|\sqrt{R_s}| = |\sqrt{R_j}|$ ,

т.е. с  $\beta = \frac{N}{R_j}$ , при которой

$$P_{ib} = \frac{N}{2R_s R_j} \tag{11}$$

Результаты численного анализа полученных соотношений для наихудшей стратегии постановки сетки гармонических помех (СПП) с шумом (Ш) сведены в табл. 2.

Таблица 2. Средняя вероятность ошибки на бит.

Отношение сигнал/помеха, дБ	Тип помехи	Стратегия помехопостановки					
		1		2		3	
		N=2	N=8	N=2	N=8	N=2	N=2
10	СПП	$9.3 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$4.0 \cdot 10^{-6}$
	СПП+Ш	$5.7 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$
15	СПП	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$
	СПП+Ш	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$6.7 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$7.3 \cdot 10^{-2}$
20	СПП	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$
	СПП+Ш	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$
Влияние шума		Улучшает хар-ки	Улучшает хар-ки	Не изменяет хар-ки	Ухудшает хар-ки	Улучшает хар-ки	Улучшает хар-ки

Из анализа полученных значений таблицы следует, что против сетки помех нет необходимости использовать случайную частотную манипуляцию из-за незначительности улучшения характеристик по сравнению с обычной частотной манипуляцией существенно усложняется процедура обработки сигнала. Порядок улучшения характеристик системы при добавлении шума в 1 и 3 случаях объясняется уменьшением вероятности события  $\sqrt{R_s} = \sqrt{R_j}$  и ненулевым значением вероятности события  $\sqrt{R_s} = \sqrt{R_j}$ .

Относительную эффективность шумовой и гармонической помехи можно оценить для равных  $P_{ib}$  следующим образом

$$\left(\frac{R_s}{R_j}\right) = \frac{N}{2C \cdot K} \left(\frac{R_s}{N_j}\right).$$

Значения разности  $\Delta = \left(\frac{R_s}{R_j} - \frac{R_s}{N_j}\right)$ ,  $\Delta$ , дБ для различных  $N$  приведена в табл.3.

Таблица 3. Значения разности  $\Delta$  для различных  $N$ .

$N$	$\Delta$ , дБ
2	4.3
4	6.3
8	8.3
16	10.5
32	12.6

Результаты сравнения эффективности шумовой и гармонических помех по максимальному значению  $P_{ib}$  приведены в табл. 4.

Таблица 4. Средняя вероятность ошибки на бит для различных типов наихудших помех.

Отношение сигнал/помеха, дБ	Тип помехи (шумовая с учетом теплового шума, а гармоническая с учетом и без)	Шумовая помеха		Гармоническая помеха		$\Delta$ , дБ	
		$N=2$	$N=8$	$N=2$	$N=8$	$N=2$	$N=8$
10	СГП	-	-	$10^{-2}$	$4 * 10^{-1}$	4,3	8,3
	Шумовая	$3,7 * 10^{-2}$	$5,8 * 10^{-2}$	-	-	-	-
	СГП + тепловой шум	-	-	$6 * 10^{-2}$	$2,3 * 10^{-1}$	1,6	5,4
20	СГП	-	-	$10^{-2}$	$4 * 10^{-2}$	4,3	8,3
	Шумовая	$3,7 * 10^{-3}$	$5,8 * 10^{-3}$	-	-	-	-
	СГП + тепловой шум	-	-	$6 * 10^{-3}$	$2,3 * 10^{-2}$	1,6	5,4

Также в таблице 4 приведены необходимые повышения  $R_s/R_j$  над  $R_s/N_j$  для достижения равного значения  $P_{ib}$ . При учете шумов на приемнике радиоканала шумовая помеха в частотной полосе не на много проигрывает по сравнению с гармонической.

В табл. 5 приведены значения требуемых отношений  $R_s/R_j$ ; и  $R_s/N_j$  для  $N$  равного 2 и 8 при различном числе  $l$  скачков частоты на бит информации для быстрой ППРЧ, с учетом качества канала  $P_{ib} = 10^{-5}$ .

Таблица 5. Требуемые значения отношения сигнал/помеха для заданного качества канала  $P_{ib} = 10^{-5}$ .

$l$	$\frac{R_s}{N_j}$ , дБ		$\frac{R_s}{R_j}$ , дБ	
	$N = 2$	$N = 8$	$N = 2$	$N = 8$
1	45,7	47,7	50	56
3	28	25,6	27,4	33,9
6	15,7	14,6	20	23
9	9,9	9,9	14,2	18,8

Одной из характеристик в системах с ППРЧ при защите от помех является фактическое время работы на одной частоте. Чем меньше это время, тем выше вероятность того, что сигналы средства радиосвязи с ППРЧ не будут подвержены воздействию преднамеренных помех. Основными видами помех, которые сравнительно просто реализуются в системах РЭП, являются: шумовая заградительная помеха; шумовая помеха в части полосы; полигармоническая помеха; ответная (ретранслированная) помеха.

Оценка качества передачи данных при этом определяется по условной вероятности ошибки на бит при  $M$ -ичной ЧМ и  $L$ -кратным разнесением символов может быть представлена в виде [7]:

$$P(E; \gamma|I) = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \binom{M-1}{m} \frac{(-1)^{m+1}}{(M+1)^L} \exp\left(-\frac{m}{m+1} k \lambda_I\right) \times \\ \times \sum_{r=0}^{m(L-1)} \frac{1}{(m+1)^r} C_r(m, L) L_r^{L-1}\left(-k \frac{\lambda_I}{m+1}\right),$$

где  $\lambda_I$  – параметр нецентральности хи-квадрат распределения выходной статистики частотного канала, содержащего полезный сигнал,

$$\lambda_I = \frac{2}{L} \left[ I \frac{E_s}{G_0 + G_j/\gamma} + (L-I) \frac{E_s}{G_0} \right];$$

$L_r^{L-1}(x)$  – обобщенный полином Чебышева-Лаггера степени  $r$ ,

$$L_r^{L-1}(x) = r! \sum_{m=0}^r (-1)^m \binom{r+L-1}{r-m} \frac{x^m}{m!};$$

$$C_r(m, L) \triangleq \begin{cases} m^r, 0 \leq r \leq L-1; \\ \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{L-1} \binom{r}{n} [(m+1)n-r] C_{r-n}(m, L), r > L-1. \end{cases}$$

А средняя вероятность ошибки (СВО) будет равна:

$$P_E = \sum_{l=0}^L \binom{L}{l} \gamma^l (1-\gamma)^{L-1} P(E; \gamma|L).$$

В нашем случае рассматривается параметр  $M = 2$  при восьмикратном частотном разнесении символов,  $L = 8$ . Важно отметить, что с увеличением

числа скачков частоты внутри одного символа выражение для средней вероятности ошибки на бит серьезно усложняется, что вызвано сложностью определения распределений статистик принятия решения.

### **3. Моделирование функционирования системы с ППРЧ при воздействии различных помех**

Для более эффективной оценки помехоустойчивости систем передачи данных с ППРЧ необходимо провести моделирование функционирования при воздействии различных помех с задаваемыми параметрами и определить качественные показатели появления символьных ошибок, а также оценить их распределение как случайных величин и для полученных распределений провести идентификацию. Информация о типе распределения ошибок позволят скорректировать параметры ППРЧ в условиях заданных помеховых воздействий.

В общем случае алгоритм когнитивного ППРЧ на каждом временном интервале выбирает для передачи информации рабочую частоту равновероятно из имеющейся сетки частот, а стратегия постановки помех распределяет равномерно среднюю мощность помех на сетке рабочих частот радиоканала. При этом структуру помехи на каждой частоте в заданном диапазоне следует считать одинаковой, а для разнесенных диапазонов – оптимальной с учетом характеристик радиоканала. Структура типового радиоканала с ППРЧ представлена на рис. 1.

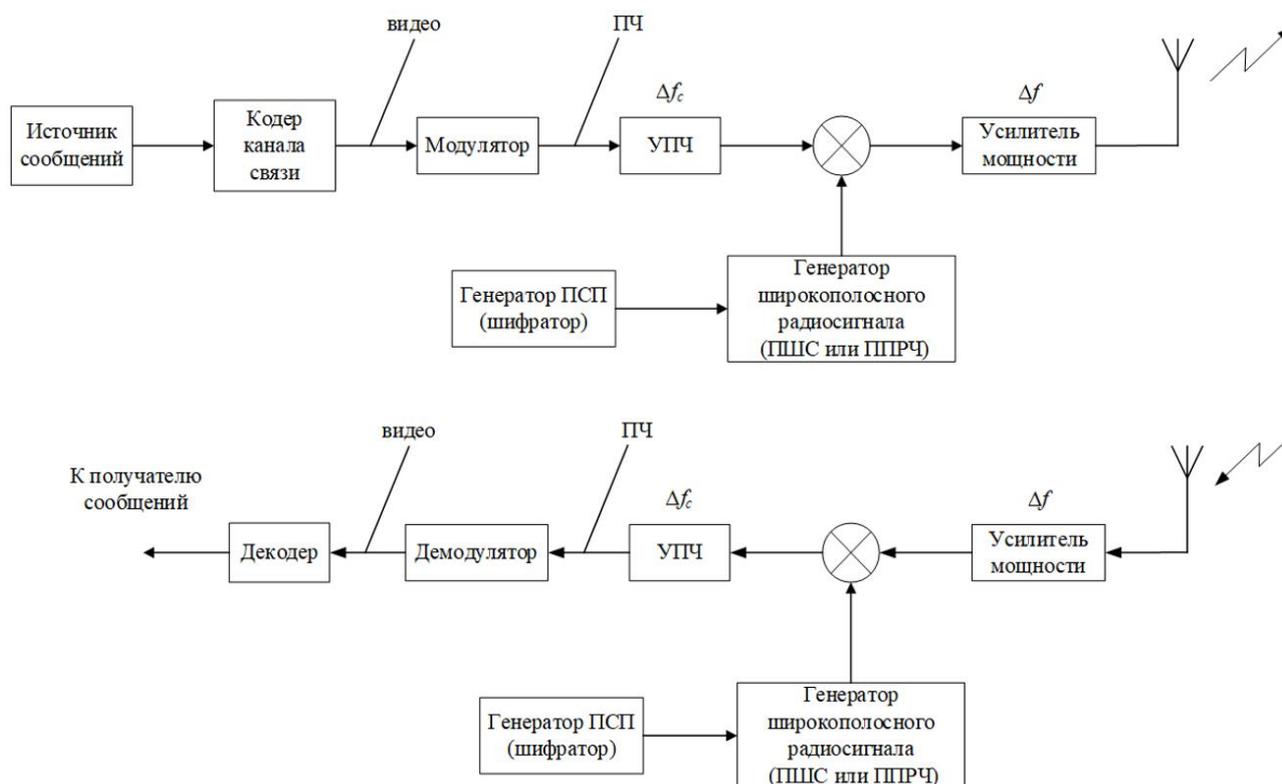


Рис. 1. Структура типового радиоканала с ППРЧ.

С целью оценки возможности подавления радиоканала с ППРЧ было проведено программное моделирование воздействий преднамеренных помех со случайной в определенном интервале длительностью  $t$  и вводимым количеством  $N$  одновременно функционирующих постановщиков. Включение постановщиков происходит на различных поддиапазонах без взаимных наложений.

Одновременно с постановщиками помех на радиолинию воздействуют и широкополосные (грозовые) помехи. Такие помехи моделируются в виде краткосрочных (в пределах длительности одного чипа  $\tau$ ) воздействий, поражая с вероятностью  $p = 0,5$  все сигналы в диапазоне. Интенсивность появления широкополосных помех вводится на этапе начала моделирования и выбирается в зависимости от известной статистики таких помех в заданном районе местности. При этом учитывается, что широкополосные (грозовые) помехи имеют случайную природу.

Для получения результатов оценивания характеристик помехоустойчивости радиоканала с управляемым ППРЧ и оценки изменения

помехоустойчивости был создан программный комплекс в среде MATLAB R2019a [2], состоящий из трех составляющих – симулятор передатчика, программа генератора широкополосных и узкополосных помех и приемника. Изначально на передатчике создается передаваемое сообщение заданного размера, формируется сетка частот и правило ее перестройки. Затем программа проводит создание сигнала и наложение помех согласно входным данным:

```
Command Window
Введите количество символов: 5
Введите количество горизонтальных помех: 1
Введите вероятность грозовой помехи: 0.125
Binary signal:
      0      1      1      0      0
```

Рис. 2. Окно ввода входных данных.

Результатом данной программы является:

- отображение графика зависимости амплитуды от времени (для малого количества символов);
- отображение графика зависимости частоты от времени (для малого количества символов, рис. 2, 3);

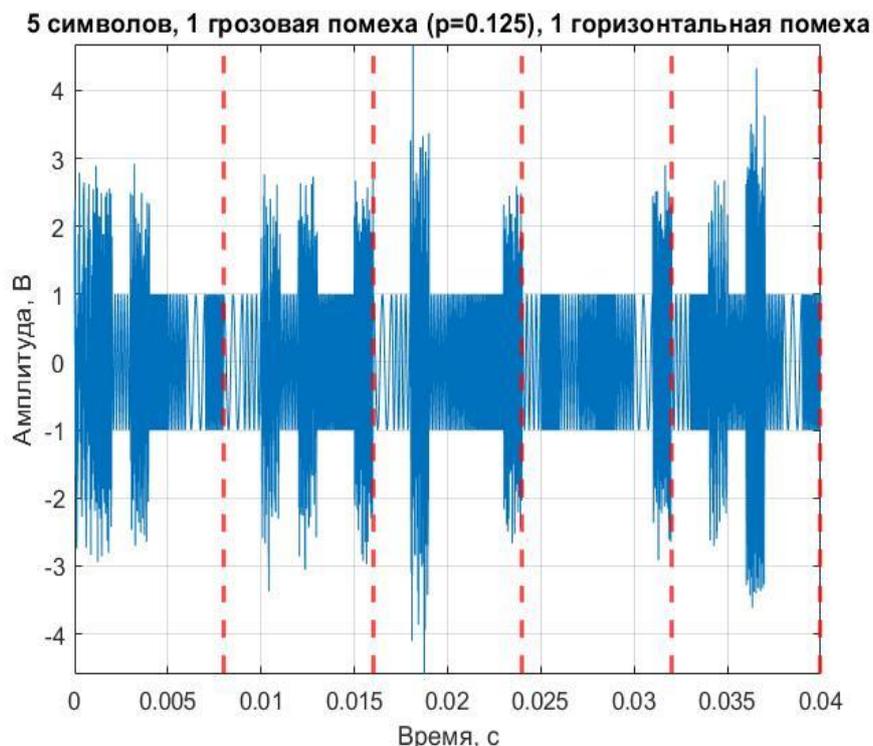


Рис. 3. Пример сигнала из 5 символов.

- формирование массива ошибок для последующего анализа (рис. 4);

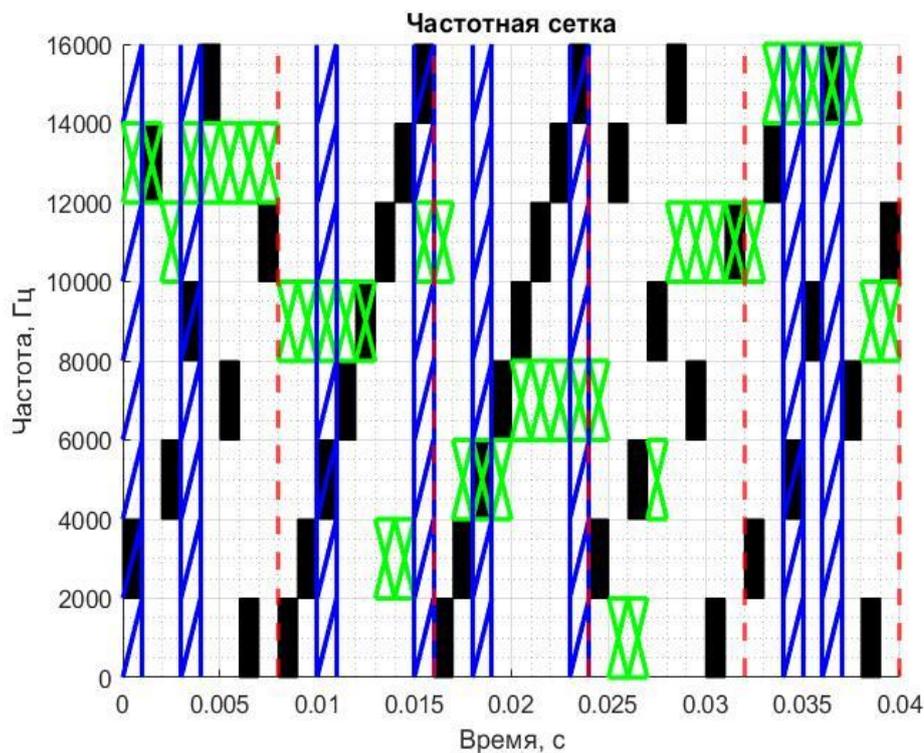


Рис. 4. Пример сигнала из 5 символов.

- гистограмма распределения ошибок (рис. 5).

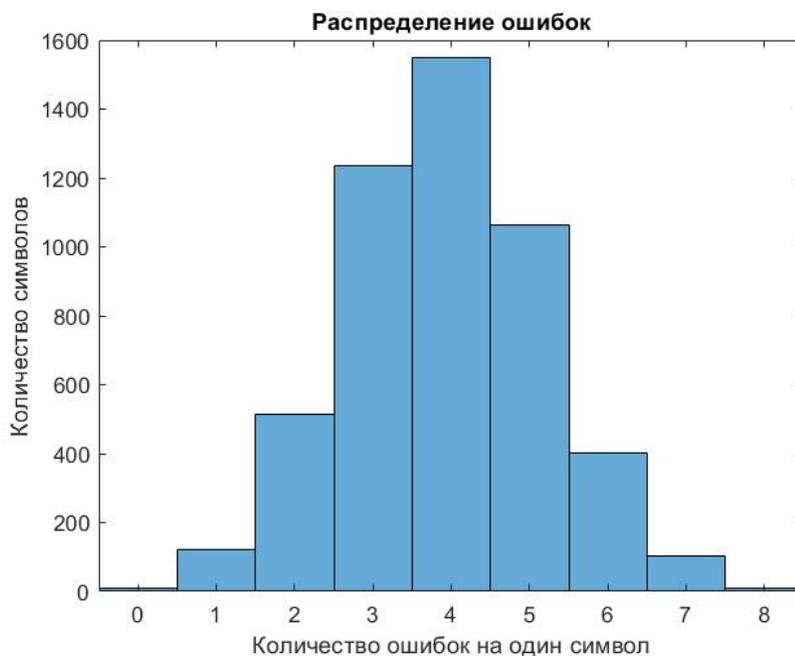


Рис. 5. Гистограмма распределения ошибок.

Подсчет ошибок происходит по определенному уровню амплитуды. Алгоритм программы учитывает, что «выбитая» частота не может быть восстановлена.

Для определения обнаружения символа в условиях помех в приемном канале ППРЧ производится анализ всех принятых чипов последовательности частот с учетом «поражения» отдельных чипов, с целью проверки гипотезы наличия символа. Эмпирические и теоретические функции распределения представлены на рис. 6.

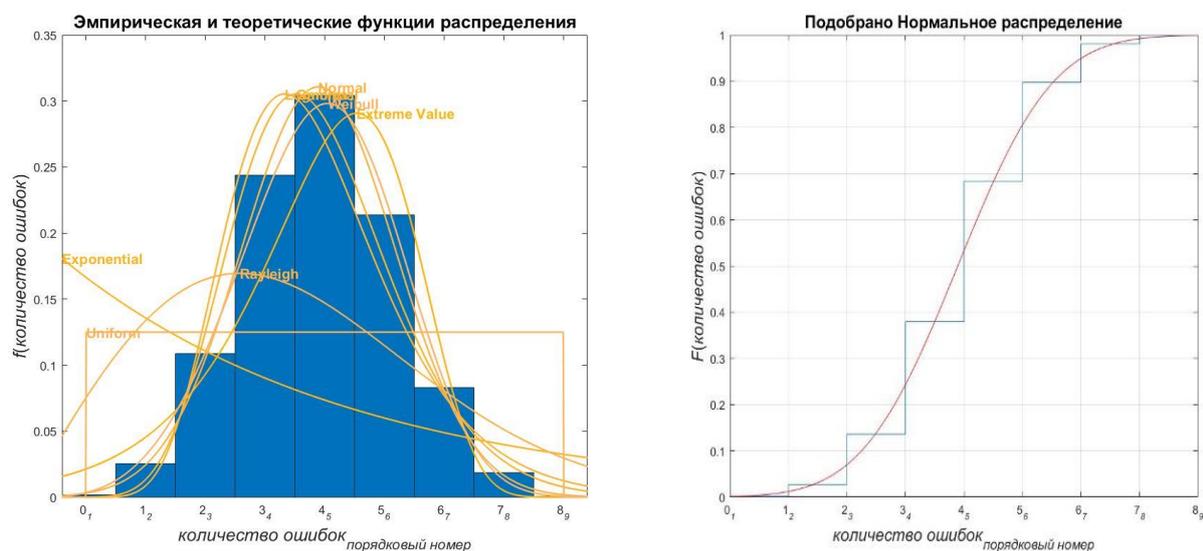


Рис. 6. Эмпирические и теоретические функции распределения (передано 5000 символов, 1 грозовая помеха ( $p = 0.125$ ), 4 горизонтальных помехи).

На рис. 7 приведены результаты моделирования других помеховых воздействий на радиоканал с ППРЧ.

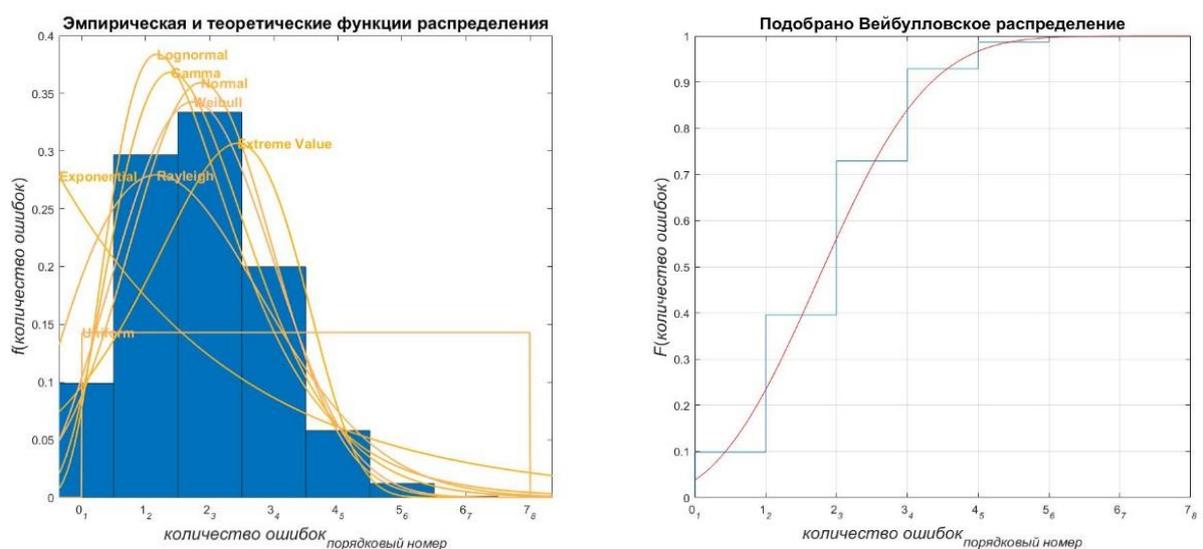


Рис. 7. Эмпирические и теоретические функции распределения (передано 5000 символов, 1 грозовая помеха ( $p = 0.125$ ), 2 горизонтальных помехи).

В разработанной модели применялся критерий обнаружения символа «3 из 8», что связано с заданными требованиями к вероятности ложного обнаружения сигнала.

## **Заключение**

Оценка полученных распределений вероятности ошибки и их идентификация осуществлялась по критериям Колмогорова и хи-квадрат. При этом на основе полученного массива ошибок происходит подбор вида и параметров распределения по принципу максимального правдоподобия, критерия согласия Колмогорова и хи-квадрат.

Разработанная программа позволяет проводить идентификацию типа полученной смеси сигнал плюс помеха за счет полученных результатов моделирования, которые характеризуют возможные сочетания количества и типов помех на приемной стороне. В итоге по идентифицированному распределению появляется возможность определить типы действующих помех и далее перестроить радиоканал.

**Финансирование:** Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме №FNEF-2022-0022 “Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях”.

## **Литература**

1. Борисов В.И. и др. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты*. Москва, Радио и связь. 2000. 384 с.
2. С.П. Инглин, *Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB*. Харьков, НТУ “ХПИ”. 2006. 612 с.

3. Чуднов А.М. Помехозащищенность системы передачи информации с псевдослучайным переключением частот в условиях наихудших помех. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1984. Т. 27. №9. С. 3-8.
4. Филатов В.И., Сухов А.В., Зайцев М.А., Генов А.А. Комплексная оценка показателей помехоустойчивости современных и перспективных систем передачи информации и связи. *Журнал радиоэлектроники*. 2020. № 9. С. 3.
5. Bazar T., Wu Y. A Complete Characterization of Minimax and Maximin Encoder-Decoder Policies for Communication Channels with Incomplete Statistical Description. *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1985. V. 31. №4. P. 482-489.
6. Cahn C Performance of Digital Matched Filter Correlator with Unknown Interference. *IEEE Trans. Commun.* 1971. V. 19. №6. P. 1163-1172.
7. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов. *Проблемы передачи информации*. 1986. Т. 22. №4. С. 49-54.
8. Чуднов А.М. *Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех*. Ленинград, ВАС. 1986. 86 с.

**Для цитирования:**

Генов А.А., Слепых А.А., Сухов А.В., Филатов В.И. Оценка воздействий случайных и преднамеренных помех на систему передачи данных с когнитивным псевдослучайным переключением рабочих частот. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.7>