

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИГНАЛОВ С ПРОГРАММНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ И ЧАСТОТНО-ИНТЕРВАЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Лященко С.А.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-10-18

Ключевые слова: линия радиосвязи, оценка помехоустойчивости, деструктивное воздействие, сигнальная конструкция, модель радиолинии.

Аннотация: в статье описана разработанная модель помехоустойчивой сигнально-кодовой конструкции с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием, а также оценка ее помехоустойчивости в условиях деструктивного воздействия. В качестве показателя эффективности функционирования радиолинии использована вероятность ошибки приема элемента сигнала. Приводятся аналитические зависимости приема элемента сигнала от величины участка частот, на который оказывается деструктивное воздействие. Показано, что без дополнительных мер по повышению помехоустойчивости линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием обеспечивается их поражение помехой. Приводятся данные расчета, подтверждающие правомерность сделанных выводов.

Цель работы состоит в обосновании решения проблемы повышения помехоустойчивости линий радиосвязи путем применения сигналов с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием. Также в описании в описании формирования исследуемого сигнала.

Результаты исследования: В статье предложено решение задачи повышения помехоустойчивости, выраженное в синтезе применения основ методов теории сигналов, основ построения помехоустойчивых систем и теории систем. Описан процесс формирования сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием. Проведен сравнительный анализ зависимости символьной, битовой скоростей, количества битов информации, передаваемых в одном символе, эффективности использования канала и избыточности от различных комбинаций m и k сигнала ПЧМ при одинаковой ширине спектра сигнала. Предложена и описана модель предлагаемой сигнально-кодовой конструкции. Представлены графические зависимости вероятности ошибки приема элемента сигнала при использовании сигналов частотной модуляции, перестановочной модуляции и сигналом с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием.

Научная новизна: впервые предложено решение повышения помехоустойчивости линий радиосвязи, заключающееся в синтезе двух способов обработки сигнала, а именно в программной перестройке рабочей частоты и частотно-интервальном кодировании.

Введение

Обеспечение помехоустойчивости линий радиосвязи, характеризующей способность обеспечения требуемого качества связи при воздействии преднамеренных помех, было и остается приоритетным направлением на всех этапах развития систем радиосвязи. Методы повышения помехоустойчивости линий радиосвязи представлены в работе [1]. Предложенные решения основываются на увеличении базы сигнала с использованием различных технологий.

В настоящее время одними из самых распространенных способов повышения качества радиосвязи при деструктивном воздействии на

радиолинии, являются использование сигналов с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [3] и применение технологии многочастотной модуляции (МНЧМ) [2], исследованию особенностей которых и посвящена эта статья.

Вопросам поиска решения проблемы помехоустойчивости линий радиосвязи и исследованию физических свойств каналов радиосвязи посвящено большое количество работ [4, 13], в которых отмечается, что ограниченность частотного ресурса достаточно часто приводит к ситуациям, когда на выделенном для организации связи диапазоне частот наблюдается работа сторонних радиоэлектронных средств. Очевидно,

¹Лященко Станислав Алексеевич, адъюнкт кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: parij61@mail.ru

что в таких условиях достаточно затруднительно обеспечить требуемое качество передающей информации. Поскольку достоверность принимаемой информации в этом случае будет выражена суммарным эффектом от воздействия помех и непосредственно канальных шумов.

Также, в работах [7] широко проанализированы основные аспекты помехоустойчивости средств радиосвязи (СРС) с ППРЧ в условиях деструктивного воздействия, а также приведен глубокий анализ помехоустойчивости типовых СРС с ППРЧ с М-ичной и двоичной частотной модуляцией. В работах [5, 6] уделено особое внимание перестановочной модуляции (ПЧМ) в различных технологиях передачи информации, а также в интересах выбора антенных систем множественной передачи и приема информации. В работе [8, 9, 12] предложено и доказано применение адаптивных методов обработки сигналов, а в [10] предложена интегральная модель радиолинии, обеспечивающая требуемые показатели эффективности ее функционирования.

Таким образом, дальнейшее направления развития проблематики повышения помехоустойчивости непосредственно связано в необходимости поиска решения своевременного перехода с частот, пораженных помехами, на частоты, удовлетворяющие требованиям ведения радиосвязи.

Помехозащищенность сигналов с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием

Решение поставленной задачи находится в синтезе применения основ методов теории сигналов, основ построения помехоустойчивых систем и теории систем.

Для описания процесса формирования сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием в линии радиосвязи (ЛРС) необходимо разработать ее функциональную модель, учитывающую применение первичной модуляции формируемого сигнала на основе принципа однополосной моду-

ляции, а так же расширение спектра формируемого сигнала в диапазоне 40 кГц методом программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) при соблюдении условия — база формируемого сигнала $B \geq 10$. Работа системы предусматривает условия ионосферного канала с логнормальными замираниями. В качестве манипулирующего сигнала в полосе частот 3,1 кГц выберем сигнал с перестановочной частотной модуляцией.

Задача состоит в обеспечении помехоустойчивости линии радиосвязи в условиях деструктивного воздействия и многолучевого распространения радиоволн, следовательно, наилучшие результаты могут быть получены при использовании в средствах радиосвязи сигнала с расширенным спектром.

Одним из таких методов является метод расширения спектра способом программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), базирующийся на изменении частоты и временного положения сигнала в соответствии со специальным кодом, формируемым на основе программной последовательности. Поскольку для передачи сообщений в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки применяются сигналы с ППРЧ, обладающие широким спектром, то выбор текущих значений рабочих частот должен исключить их взаимное влияние.

Применение принципа ППРЧ при формировании модели сигнальной конструкции сигнала с ППРЧ и частотно-интервальным кодированием, обеспечит препятствие эффективного воздействия на СРС организованных помех. При формировании сигнально-кодовой конструкции предлагаемого сигнала определим, что при расширении спектра методом ППРЧ, база формируемого сигнала $B \geq 10$ [11], что позволит обеспечить более высокую скорость передачи информации, рациональное использование частотного ресурса и возможность оптимального и качественного резервирования частотных поддиапазонов формируемой СКК и оперирование ими в процессе передачи информации (рис.1).

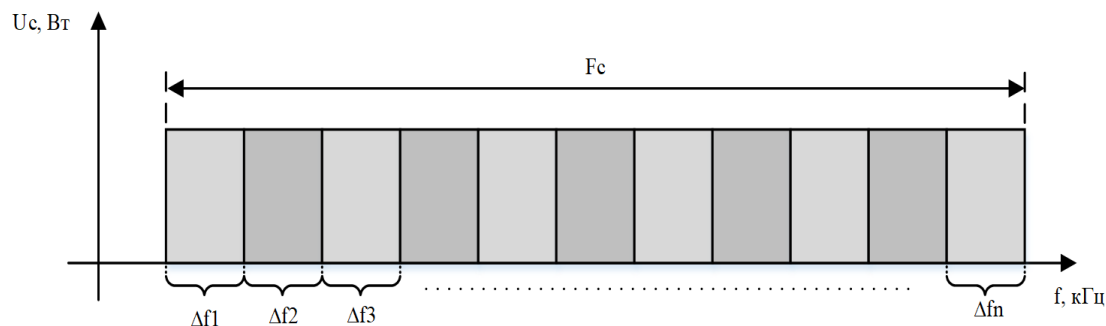


Рис.1. Шумоподобный сигнал с базой $B \gg 10$

Введем понятие первичной модуляции формируемого сигнала, который будет служить в качестве «упаковки» в процессе передачи в линии радиосвязи.

В реальной системе связи сигнал в процессе передачи искажается и сообщение на выходе системы воспроизводится с некоторой ошибкой, которая может быть обусловлена такими факторами, как искажения, вносимыми самой системой (аппаратурные искажения), и искажения за счет воздействия внешних помех. В качестве модулирующего сигнала целесообразно использовать сигнал с однополосной модуляцией т.к. выигрыш в мощности передатчиков с однополосной модуляцией по отношению, например, к передатчикам с амплитудной модуляцией, превышает 16 раз в канале с переменными параметрами, а в вопросе помехоустойчивости однополосная модуляция обладает значительно более высокой помехоустойчивостью по сравнению с амплитудной модуляцией, особенно в условиях деструктивного воздействия.

В качестве манипулирующего сигнала, использующего для формирования сигнальных символов предлагается использовать сигнальную конструкцию, формируемую на основе кода с постоянным весом МТК-3, а именно перестановочной частотной модуляцией (ПЧМ) в полосе стандартного телефонного канала от 300 до 3 400 Гц. Полоса пропускания каждого подканала в общей занимаемой полосе частот ΔW определяется как:

$$\Delta f_m = \frac{\Delta W}{m} = \frac{3400-300}{m} \quad (1)$$

Для ПЧМ-7/3 полоса пропускания подканала составляет: $\Delta f_m = 443$ Гц, ПЧМ-8/1 $\Delta f_m = 388$ Гц. В качестве примера будет выбран ПЧМ-7/3, т. к. доказано [13], что при формировании СКК в части полосы, с m -общим количеством тоновых колебаний (для ПЧМ-7/3 $m = 7$, ПЧМ-8/3 $m = 8$), и k -активными тоновыми колебаниями (для ПЧМ-7/3 $k = 3$, ПЧМ-8/1 $k = 1$), уменьшение тоновых колебаний в символе ведет к повышению помехоустойчивости сигнально-кодовой конструкции в целом: для сигнала ПЧМ-8/1 — на 3дБ, для сигнала ПЧМ-7/2 — на 2дБ. При этом необходимо учесть, что наряду с уменьшением общего количества тоновых колебаний снижается информационная скорость на длительности импульса (табл.1). Следовательно, при выборе размерности СКК ПЧМ есть необходимость в поиске компромисса между помехоустойчивостью и информационной скоростью.

В таблице 1 представлена зависимость символьной, битовой скоростей, количества битов информации, передаваемых в одном символе, эффективности использования канала и избыточности от различных комбинаций m и k сигнала ПЧМ при одинаковой ширине спектра сигнала.

Таблица 1

m	32	18	17	16	16	8	7
k	16	5	2	8	5	2	3
B, бит	29	13	7	13	12	4	5
Rs, Бод	96,875	172,2222	182,3529	193,75	193,75	387,5	442,8571

Модель предлагаемой сигнально-кодовой конструкции сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием предполагает две ветви обработки сигнала, причем каждая из предлагаемых ветвей предусматривает свой независимый алгоритм.

Определим, что выбранная сигнальная конструкция ПЧМ формируется в первой ветви обработки на основе частотной манипуляции с m ортогональными тоновыми колебаниями при излучении k тоновых колебаний одновременно, определяемых текущей кодовой последовательностью.

Агрегирование выбранных методов представим в виде следующей совокупности форма-

лизованных способов:

В каждой полосе частот в диапазоне 0,3–3,4к Гц формируется такой вид модуляции, который так же, как и сигнал перестановочной частотной модуляции, формирует ту же комбинацию информационных битов.

Выбирается равномерный двоичный семи-элементный равномерный код, число элементов которого строго соответствует числу доступных для передачи поднесущих частот на частотном интервале 0,3–3,4кГц.

Из всех доступных комбинаций равномерного двоичного кода исключены комбинации, в которых присутствуют только одни информационные единицы либо одни информационные нули.

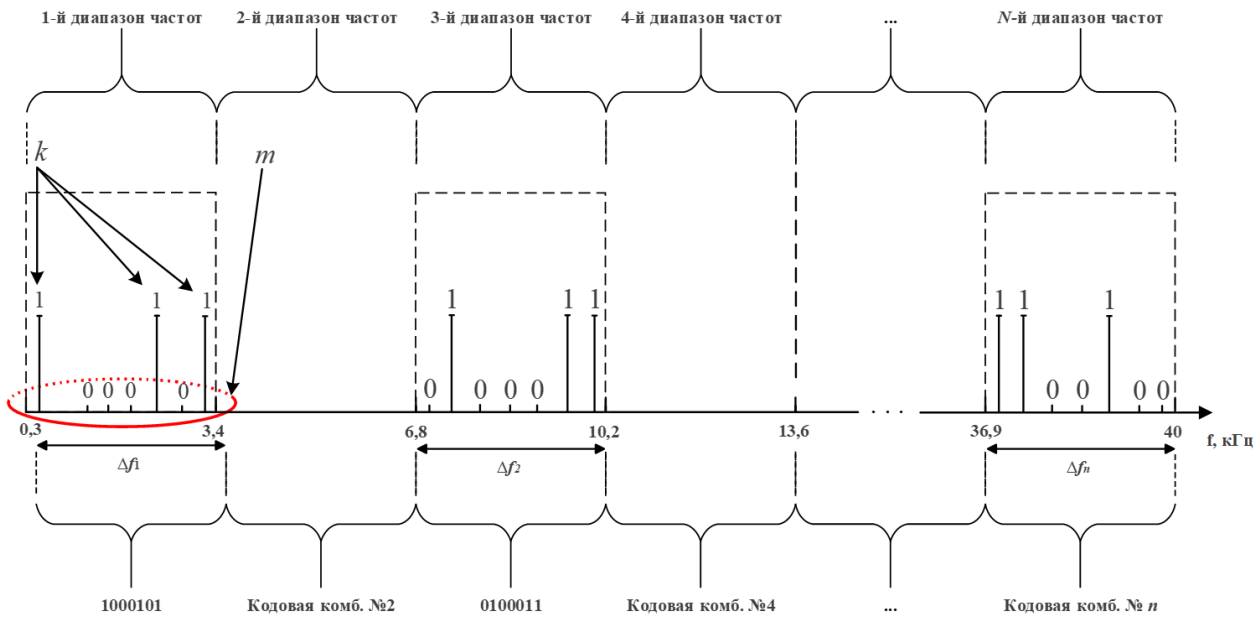


Рис. 2. Представление фрагмента обобщенной сигнально-кодовой конструкции сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием

Формируются сигналы в виде амплитудно-манипулированных колебаний на длительности каждого передаваемого символа только на тех поднесущих частотах, которым соответствуют информационные единицы, определяемые комбинацией элементов кода, причем формируют результирующий частотно-манипулированный сигнал (ЧМС) путем аддитивного сложения колебаний всех поднесущих частот.

Демодуляция ЧМС на поднесущих частотах осуществляется, как независимые частотно-разнесенные амплитудно-манипулированные колебания по критерию максимального правдоподобия, путем сравнения рассчитанного среднего значения мощности его спектральных компонент в пределах выделенных частотных полос каждой из поднесущих между собой.

Одновременно с формированием частотно-манипулированного сигнала во второй ветви системы формируется такой вид модуляции, который так же, как и сигнал перестановочной модуляции формирует ту же кодовую комбинацию и передается одновременно в том же частотном интервале, которому соответствует эта уникальная комбинация элементарного кода. Таким образом, формируется две ветви обработки в одном частотном диапазоне.

Величина канального алфавита определена, как все возможные комбинации из $m = 7$ общего количества тоновых колебаний по $k = 3$ активных и равна:

$$A_0 = C_m^k = \frac{m!}{k!(m-k)!} = C_7^3 = \frac{7!}{3!(7-3)!} = 35 \quad (2)$$

Битовый поток разбивается на информационные блоки, ставится в соответствие каждому информационному блоку свою уникальную комбинацию элементов кода (УКЭК), которая и определяет передаваемый символ. Для частотно-модулированного сигнала ПЧМ-7/3, который состоит из 7-ми поднесущих, остается $A_{\text{пчм-7/3}} = 2^B = 2^5 = 32$ разрешенных комбинаций, которые можно использовать для кодирования информационных блоков. Отсюда следует, что код из 32 комбинаций позволяет кодировать информационный блок, состоящий из 5 битов ($B = 5$):

$$B = \left\lfloor \log_2 C_m^k \right\rfloor = \log_2 \left[\frac{7!}{3!(7-3)!} \right] = 32 \quad (3)$$

При этом выбор УКЭК для кодирования информационных блоков может осуществляться в произвольном порядке.

В соответствии с обобщенной структурно-функциональной моделью линии декаметровый связи с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием (рис.2), а также, ввиду того, что предметом рассмотрения определен сигнал, передаваемый от дискретного источника сообщений, то показателем эффективности функционирования радиолинии на физическом уровне является вероятность

символьной ошибки $P_{\text{ош}}$ на временном интервале $0 - t_1$.

Расчет вероятности ошибки элемента сигнала целесообразно провести, основываясь на аналогичные расчеты при некогерентном приеме сигналов многочастотной модуляции по огибающей, в процессе которого, принимаемые сигналы после проходного фильтра разделяются двумя узкополосными фильтрами и поступают на детекторы огибающих. Напряжения поступающих сигналов с выходных детекторов сравниваются между собой устройством сравнения, а итоговое решение принимается по наибольшему напряжению.

Очевидно, на выходе фильтра без сигнала действует только напряжение помех $U_{\text{п}}$, а на выходе фильтра с сигналом — напряжение суммы сигнала и помех $U_{\text{сп}}$. В общем случае напряжения $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{сп}}$ являются случайными величинами с плотностями распределения вероятностей $\omega(U_{\text{п}})$ и $\omega(U_{\text{сп}})$. Сигнал в момент детектирования будет воспроизведен неправильно при условии, если $U_{\text{сп}} < U_{\text{п}}$. Отсюда, вероятность ошибки элемента сигнала при равных вероятностях передачи посылок нажатия и отжатия будет определяться выражением:

$$P_{\text{ош}} = \int_0^{\infty} \omega(U_{\text{сп}}) \left[\int_{U_{\text{сп}}}^{\infty} \omega(U_{\text{п}}) dU_{\text{п}} \right] dU_{\text{сп}} \quad (4)$$

Если на вход приемника действует помеха типа «белый шум», то на выходе фильтра без сигнала огибающая помех $U_{\text{п}}$ имеет рэлеевскую плотность распределения:

$$\omega(U_{\text{п}}) = \frac{2U_{\text{п}}}{U_{\text{п-эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{U_{\text{п-эф}}^2}\right), \quad (5)$$

где $U_{\text{п-эф}}$ — эффективное напряжение помех. При рассмотрении канала декаметрового диапазона с переменными параметрами (релеевскими замираниями), амплитуда сигнала имеет плотность вероятностей:

$$\omega(U_{\text{мс}}) = \frac{2U_{\text{мс}}}{U_{\text{с-эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_{\text{мс}}^2}{U_{\text{с-эф}}^2}\right), \quad (6)$$

$U_{\text{с-эф}}$ — эффективное напряжение сигнала.

Превышение сигнала над помехой $h = \frac{U_{\text{мс}}}{U_{\text{п-эф}}}$

является случайной величиной с плотностью распределения вероятностей:

$$\omega(h) = \frac{2h}{h_0^2} \exp\left(-\frac{h^2}{h_0^2}\right), \quad (7)$$

где $h_0 = \frac{U_{\text{с-эф}}}{U_{\text{п-эф}}}$, — среднее превышение сигнала над помехами в канале с замираниями. Отсюда,

$$\frac{h}{h_0} = \frac{U_{\text{мс}}}{U_{\text{с-эф}}}. \quad (8)$$

Произведем интегрирование по dh :

$$P_{\text{ош ЧТ}} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \omega(h) dh = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \frac{2h}{h_0^2} \exp\left(-\frac{h^2}{h_0^2}\right) dh = \frac{1}{2+h_0^2} \quad (9)$$

Тем самым нашли вероятность символьной ошибки при некогерентном приеме для сигнала ЧМн-2 (ЧТ) в канале с переменными параметрами (канал с замираниями).

При $m > 2$, то есть для сигналов $S_1, S_2, \dots, S_m$, вероятность ошибки можно вычислить согласно выражению:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = P_{\text{ош}}(S_1, S_2, S_3, \dots, S_m) \quad (10)$$

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, вероятность символьной ошибки при равных значениях вероятности передачи информационных «нуля» и «единицы» представим в виде:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = \int_0^{\infty} \omega(S_1) dS_1 \int_{S_1}^{\infty} \omega(S_2) dS_2 \times \dots \times \int_{S_1}^{\infty} \omega(S_m) dS_m \quad (11)$$

Приближенным представлением выражения (11) является выражение:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = \frac{m-1}{2} \exp\left(-\frac{h_0^2}{2}\right) \quad (12)$$

где m — число субканалов в символе ЧМ- m ($m = 8$ для сигналов ЧМн-8). Тем самым нашли вероятность символьной ошибки при некогерентном приеме для сигнала многочастотной модуляции в канале с переменными параметрами (канал с замираниями). Для сигнала перестановочной модуляции при некогерентном приеме в канале с переменными параметрами выражение (12) примет вид:

$$P_{\text{ош}} = \sum_{n=1}^{k-1} (-1)^{n+1} C_{k-1}^n \frac{1}{nh^2 + n+1} \quad (13)$$

Далее, для расчета вероятности ошибочного приема элемента сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием, определим общую вероятность ошибки приема элемента сигнала, с учетом работы системы по двум независимым ветвям обработки.

Известно, что для наиболее широко используемых дискретных сигналов достоверность количественно оценивается вероятностью ошибочного приема элемента сигнала (символа, посылки) $P_{\text{ош}}$ ($0 \leq P_{\text{ош}} \leq 0,5$). При аппаратурных испытаниях оценкой этой вероятности служит отношение числа искаженных символов $N_{\text{иск}}$ к общему числу переданных символов N :

$$P_{\text{ош}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск}}}{N_{\text{пер}}} \quad (14)$$

Учитывая тот факт, что при передаче информации, применяется способ его обработки по двум независимым каналам на приемной стороне, вероятность ошибочного приема элемента сигнала после его демодуляции будет равна:

$$P_{\text{ош.общ.}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q1} + N_{\text{иск.}Q2}}{N_{\text{пер}}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q1}}{N_{\text{пер}}} + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q2}}{N_{\text{пер}}} \quad (15)$$

откуда $N_{\text{пер}} = N_{\text{иск.}Q1} + N_{\text{иск.}Q2}$.

Далее определим вероятность ошибки приема элемента сигнала при работе радиолинии в режиме программной перестройки при использовании m -рабочих частот в соответствии с выражением расчета общей вероятности ошибки системы:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \lim_{L_{\text{пер}} \rightarrow \infty} \frac{L_{\text{иск} \Sigma}}{L_{\text{пер}}} \quad (16)$$

где $L_{\text{иск} \Sigma}$ — общее количество искаженных элементов сигнала в радиолинии с ППРЧ на интервале стационарности параметров функций распределения Релея ($L_{\text{иск} \Sigma} = L_{\text{иск} 1} + L_{\text{иск} 2} + \dots + L_{\text{иск} m}$);

$L_{\text{пер}}$ — количество элементов сигнала, передаваемых за время $0-t1$ ($L_{\text{пер}} = L_{\text{пер} 1} + L_{\text{пер} 2} + \dots + L_{\text{пер} m}$).

Представим выражение (16) в виде:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \lim_{L \rightarrow \infty} \left(\frac{L_{\text{иск} 1}}{L_{\text{пер} 1}} \cdot \frac{L_1}{L_1} + \frac{L_{\text{иск} 2}}{L_{\text{пер} 2}} \cdot \frac{L_2}{L_2} + \dots + \frac{L_{\text{иск} m}}{L_{\text{пер} m}} \cdot \frac{L_m}{L_m} \right) \quad (17)$$

при условии, что $L_i \rightarrow \infty$ ($i = 1, 2, \dots, m$), а также, учитывая выражение (17) и свойства пределов, вероятность ошибки приема элемента сигнала в радиолинии с ППРЧ определим, как

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{\text{ош} i}, \quad (18)$$

где $P_{\text{ош} i}$ — вероятности ошибки приема элемента сигнала на каждой частоте ($i = 1, 2, \dots, n$), которые не изменяются на интервалах $0-t_1, t_1-t_2, \dots, t_{k-1}-t_k$.

Подставив (12) в выражение (18) и взяв во внимание стационарность величины вероятности ошибки на каждой частоте получим:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{m-1}{2} \exp\left(-\frac{h_0^2}{2}\right) \quad (19)$$

Далее, с учетом выражения (18) и известного выражения расчета вероятности ошибки приема элемента сигнала перестановочной частотной модуляции в канале с переменными параметрами, получим выражение для расчета вероятности ошибки приема элемента сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием в канале с переменными параметрами:

$$P_{\text{ош ППРЧ и ЧИК}} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{k-1} \sum_{i=1}^m \frac{(m-1)}{2} (-1)^{n+1} C_{k-1}^n \frac{1}{nh^2 + n+1} \quad (20)$$

На рисунке 3 для различных каналов связи представлены графические зависимости $P_{\text{ош}} = f(h_0)$ при использовании сигналов частотной модуляции, перестановочной модуляции и сигналом с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием.

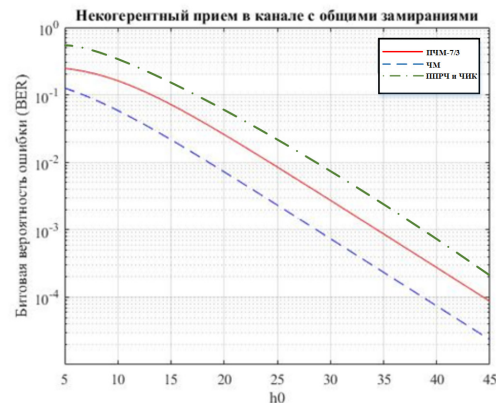


Рис.3. Помехоустойчивость дискретных сигналов в канале с переменными параметрами без воздействия преднамеренных помех

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что сигналы с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-

интервальным кодированием обла-дают худшей помехоустойчивостью, по сравнению с сигналами ЧМ и ПЧМ-7/3. Это обусловлено шириной спектра сигнала ППРЧ и ЧИК, занимаемой частотную ось в диапазоне 40кГц, на всей величине которого действуют непреднамеренные помехи, на ряду как спектр сигнала ЧМ и ПЧМ не больше 3,1 кГц. Но выигрыш сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием будет виден при работе системы в условиях сложной помеховой обстановки.

Заключение

Направление дальнейших исследований видится в уточнении параметров разработанной модели при наличии деструктивного воздействия и подходов к оценке эффективности полученной обобщенной модели, а также в необходимости поиска решений по повышению помехоустойчивости линии радиосвязи с ППРЧ и частотно-интервальным кодированием путем разработки алгоритма подбора и резервирования непораженных помехой участков частот.

Литература

1. Дворников С.В., Марков Е.В. Маноши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // T-Comm - T.15: Телекоммуникации и транспорт. — 2021. — №6. С. 4–9. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9
2. Дворников С.В., Балыков А.А. Предложения по повышению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной модуляцией // Электроника. Радиотехника, T Comm Tom 14. — 2020. — №6. С.20-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26
3. Блинов П.В., Юрченко С.П. Помехозащищенность радиолинии с межсимвольной ППРЧ в условиях помех // Охрана, безопасность, связь. — 2020. — № 5–3. С. 35–39.
4. Русин А.А., Бибарсов М.Р., Аюков Б.А., Гордиенко Д.Ю., Лященко С.А., Дворников С.В., Устинов А.А. Анализ потерь помехоустойчивости в условиях медленных замираний // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2022. — №. 1. С. 81–85.
5. Дворников С.В., Балыков А.А., Дворников С.С., Попов Е.А. Помехоустойчивость сигналов с перестановочной частотной модуляцией в каналах с постоянными параметрами при некогерентном приеме // Радиотехника. — 2019. — №. 12. С.24-31. DOI: 10.18127/00338486-201912(20)-04
6. Дворников С.В., Балыков А.А., Пшеничников А.В., Овчинников Г.Р., Присяжнюк А.С. Способ передачи информации по коротковолновому каналу связи с использованием частотно-манипулированных сигналов. Патент РФ № 2 705 357, от 11.04.2019, опубликован: 07.11.2019 Бюл. № 31.
7. Бредихина Е.В., Колбая К.Ч., Косинов Е.С, Савельев М.А. Совершенствование алгоритмов управления автоматизированных частотно-адаптивных линий декаметровой связи // Теория и техника радиосвязи. — 2024. — №. 1. С. 92–98.
8. Федоров И.В, Липатников В.А., Белов А.В. Повышение помехоустойчивости адаптивного радио в условиях случайной сигнально-помеховой обстановки // Интернаука. — 2021. — №. 41 – 1 (217).
9. Марков Е.В., Дворников С.В. Способы повышения помехозащищенности декаметровой линии радиосвязи посредством использования широкополосных сигналов с адаптивно изменяющейся базой // В сборнике: Технологии. Инновации. Связь. Сборник материалов научно-практической конференции. Санкт-Петербург. — 2022. — С. 238 – 242.
10. Балыков А.А. Модель канала декаметровой радиосвязи, учитывающая влияние скользящей по спектру помехи // Информация и космос. — 2020. — №. 1.
11. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания // Информатика и автоматизация. — 2023. — № 2. — С. 261 - 288.
12. Марков Е.В. Повышение помехоустойчивости коротковолновых линий радиосвязи в условиях релейских и райсовских замираний // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2023. — № 3. — С. 129- 135.
13. Тишков В.В., Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н., Обоснование облика построения перспективных комплексов и средств на основе опыта организации связи при проведении специальной военной операции. Москва.: Военная мысль №9, 2023. С. 59-72.

INTERFERENCE IMMUNITY OF SIGNALS WITH PROGRAMMED FREQUENCY HOPPING AND FREQUENCY-INTERVAL CODING

Lyashchenko S.A.¹

Keywords: radio communication line, noise immunity assessment, destructive impact, signal design, radio line model.

Abstract: The paper describes the developed model of noise-resistant signal-code design with programmed tuning of operating frequency and frequency-interval coding, as well as the evaluation of its noise immunity under destructive impact. As an indicator of the efficiency of the radioline is used the probability of error in the reception of the signal element. Analytical dependencies of the reception of the signal element on the value of the frequency section, which is destructive impact. It is shown that without additional measures to improve noise immunity of radio communication lines with programmed tuning of the operating frequency and frequency-interval coding provides their defeat by interference. The calculation data confirming the validity of the conclusions are given.

The purpose of the work is to substantiate the solution of the problem of improving noise immunity of radio communication lines by using signals with program tuning of the operating frequency and frequency-interval coding. Also in the description of the formation of the studied signal.

Results: The article proposes a solution to the problem of improving noise immunity, expressed in the synthesis of the application of the basics of signal theory methods, the basics of building noise-immune systems and system theory. The process of signal formation with program tuning of operating frequency and frequency-interval coding is described. A comparative analysis of the dependence of symbol, bit rates, the number of bits of information transmitted in one symbol, channel utilization efficiency and redundancy on various combinations of m and k of the IFM signal at the same width of the signal spectrum is carried out. A model of the proposed signal-code design is proposed and described. Graphical dependences of the probability of error probability of a signal element when using frequency modulation signals, permutation modulation and signal with programmed tuning of the working frequency and frequency-interval coding are presented.

Scientific novelty: for the first time proposed a solution to improve noise immunity of radio communication lines, which consists in the synthesis of two methods of signal processing, namely in the program tuning of the operating frequency and frequency-interval coding.

References

1. Dvorikov S.V., Markov E.V. Manoshi Je.A. Povyshenie pomehozashhishhennosti peredach dekametrovyyh radiokanalov v usloviyakh neprednamerennykh pomех // T-Somm - T.15: Telekommunikatsii i transport. — 2021. — №6. S. 4–9. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9
2. Dvornikov S.V., Balykov A.A. Predlozheniya po povysheniyu skorost'yu peredachi i pomехoustojchivost'yu signalov s perestanovochnoy modul'atsiej // Elektronika. Radiotekhnika, T Somm Tom 14. — 2020. — №6. S.20-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26
3. Blinov P.V., Jurchenko S.P. Pomехozashhishhennost' radiolinii s mezhsimvol'noj PPRCh v usloviyakh pomех // Ohrana, bezopasnost', svyaz'. — 2020. — № 5–3. S. 35–39.
4. Rusin A.A., Bibarov M.R., Ajukov B.A., Gordienko D.Ju., Ljashhenko S.A., Dvornikov S.V., Ustinov A.A. Analiz poter' pomехoustojchivosti v usloviyakh medlennykh zamiraniy // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika teledideniya. — 2022. — №. 1. S. 81–85.
5. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Dvornikov S.S., Popov E.A. Pomехoustojchivost' signalov s perestanovochnoy chastotnoj modul'atsiej v kanalakh s postojannymi parametrami pri nekogerentnom prieme // Radiotekhnika. — 2019. — №. 12. S.24-31. DOI: 10.18127/j00338486-201912(20)-04
6. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Pshenichnikov A.V., Ovchinnikov G.R., Prizhazhnyuk A.S. Sposob peredachi informatsii po korotkovolnovomu kanalu svyazi s ispol'zovaniem chastotno-manipulirovannykh signalov. Patent RF № 2 705 357, ot 11.04.2019, opublikovan: 07.11.2019 Bjul. № 31.
7. Bredihina E.V., Kolbaja K.Ch., Kosinov E.S., Savel'ev M.A. Sovershenstvovanie algoritmov upravleniya avtomatizirovannykh chastotno-adaptivnykh liniy dekametrovoj svyazi // Teorija i tehnika radiosvyazi. — 2024. — №. 1. S. 92–98.
8. Fedorov I.V., Lipatnikov V.A., Belov A.V. Povyshenie pomехoustojchivosti adaptivnogo radio v usloviyakh sluchajnoj signal'no-pomехovoj obstanovki // Internauka. — 2021. — №. 41 – 1 (217).

¹Stanislav A. Lyashchenko, Adjunct of the Department of Radio Communications, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: parij61@mail.ru

9. Markov E.V., Dvornikov S.V. Spособы povыshenija pomehozashhishhennosti dekametrovoj linii radiosvjazi posredstvom ispol'zovanija shirokopolosnyh signalov s adaptivno izmenjajushhejsja bazoj // V sbornike: *Tehnologii. Innovacii. Svjaz'*. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg. – 2022. – S. 238 – 242.
10. Balykov A.A. Model' kanala dekametrovoj radiosvjazi, uchityvajushhaja vlijanie skol'zjashhej po spektru pomehi // *Informacija i kosmos*. — 2020. — №. 1.
11. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. Pomehoustojchivost' signalov odnopolosnoj moduljacji s upravljaemym urovnem nesushhego kolebanija // *Informatika i avtomatizacija*. — 2023. — № 2. — S. 261 - 288.
12. Markov E.V. Povыshenie pomehoustojchivosti korotkovolnovyh linij radiosvjazi v uslovijah releevskih i rajsovskih zamiraniy // *Voprosy radioelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*. — 2023. — № 3. — S. 129 - 135.
13. Tishkov V.V., Ivanov V.G., Luk'janchik V.N., Obosnovanie oblika postroenija perspektivnyh kompleksov i sredstv na osnove opyta organizacii svjazi pri provedenii special'noj voennoj operacii. Moskva.: Voennaja mysl' №9, 2023. S. 59-72.

