

УДК 621.372.037.372; 621.391.26

**РАСШИРЕНИЕ АЛФАВИТА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ МАТРИЦ
ДЛЯ ПЕРЕДАЧ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА****С.С. ДВОРНИКОВ***(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет);***канд. техн. наук Д.С. РЯБЕНКО***(Полоцкий государственный университет)*

Анализируется возможность расширения информационного алфавита сигналов, сформированных на основе частотно-временных матриц для средств радиосвязи декаметрового диапазона. Предлагается метод, обеспечивающий увеличение размерности матриц за счет дополнительной модуляции поднесущих частот функциями Уолша. Представлены результаты компьютерного моделирования по оценке эффективности разработанного подхода. Обосновывается сохранение требуемой помехоустойчивости передачи в целом.

Введение. К системам радиосвязи, функционирующим в условиях радиоэлектронного подавления, предъявляются жесткие требования по обеспечению защищенности их радиоканалов. Указанные мероприятия, согласно [1], направлены как на снижение негативных последствий деструктивного воздействия, так и на ограничение несанкционированного доступа. К ним относят режимы с псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) и методы прямого расширения спектра на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [2]. Однако для декаметрового диапазона применение данных методов связано с определенными сложностями ввиду ограниченности по частоте используемых радиоканалов. Кроме того, применение большинства помехоустойчивых способов ведет к снижению информационной скорости, что является нежелательным явлением.

Таким образом, необходим поиск решений, позволяющих при сохранении допустимой помехоустойчивости не только сохранить, но и повысить скорость передачи, в частности за счет увеличения размерности информационного алфавита. На поиск такого решения и направлено данное исследование.

Предложения по расширению информационного алфавита. Для обеспечения скрытности и помехоустойчивости передач в декаметровом диапазоне широко используются системы радиосвязи (СРС), в которых сигналы формируются на основе частотно-временных матриц (ЧВМ) [3]. Особенность такого подхода состоит в том, что каждый сигнальный символ кодируется определенной комбинацией частот на заданном временном интервале, поэтому его передача во времени эквивалентна режиму с ППРЧ. В результате информационная емкость такого сигнала определяется размерностью его ЧВМ, то есть чем больше размерность матрицы, тем выше информационная емкость и, как следствие, скорость передачи.

Однако для декаметровых СРС размерность ЧВМ ограничивается частотной емкостью выделенного радиоканала, поскольку ширина спектра такого сигнала будет определяться в соответствии с выражением

$$\Delta F = 1/T_h, \quad (1)$$

где T_h – длительность субчастоты информационного сигнала.

Очевидно, что сам по себе режим ППРЧ обеспечивает определенную скрытность, если порядок смены частот в ЧВМ неизвестен системе мониторинга. Причем чем больше размерность ЧВМ, тем выше скрытность передачи. Согласно [3] размерность ЧВМ определяет помехозащищенность СРС. Заметим, что для ЧВМ режим ППРЧ является внутрисимвольным [4], так как каждый информационный элемент длительностью T_s передается N поднесущими, длительность каждой из которых равна T_h . Такой подход позволяет по результатам приема всех поднесущих в пределах интервала T_s принимать решение о значении символа. Следовательно если в результате деструктивных воздействий отдельные поднесущие сигнала и будут подавлены, то, используя мажоритарный критерий, по оставшимся непораженным помехами частотным позициям ЧВМ можно принять правильное решение.

В качестве примера на рисунке 1 показана ЧВМ сигнала, у которого одна из поднесущих подавлена помехой (помеха на частоте f_2).

Между тем эффективность мажоритарного подхода определяется размерностью ЧВМ (чем выше размерность, тем сильнее помехоустойчивость ЧВМ). Однако в ограниченном частотном канале обеспечение большого значения N связано с серьезными техническими сложностями.

Представленные выше аргументы стимулируют поиск новых подходов к решению данного вопроса. В частности, предлагается расширить алфавит канального кодирования за счет дополнительной модуляции поднесущих ЧВМ посредством ПСП, то есть последовательно осуществлять перемножение каждого частотного элемента ЧВМ с модулирующей последовательностью [4]. В результате указанная операция умножения приведет к расширению спектра, то есть полезный сигнал трансформируется в широкополосный сигнал (ШПС), вследствие чего возрастет его энергетическая скрытность по отношению к несанкционированным средствам радиомониторинга.

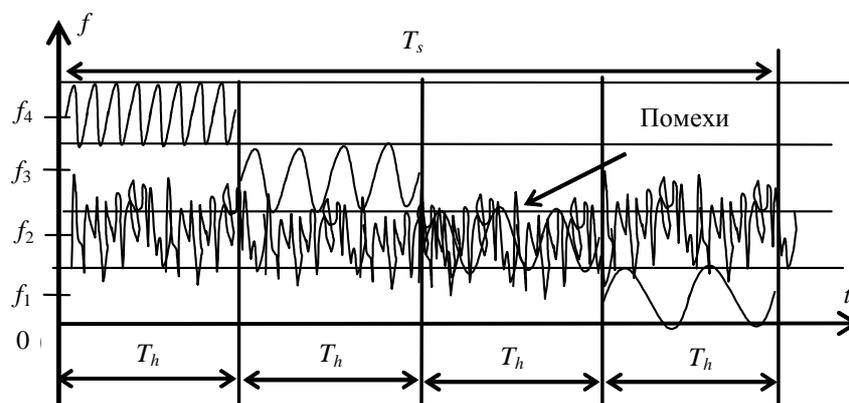


Рис. 1. Частотно-временная матрица, у которой одна из субчастот подавлена помехой

Предложенный подход открывает новые возможности по экономии частотного ресурса, если большую часть информации кодировать за счет выбора структуры модулирующей последовательности (под структурой ПСП понимается порядок следования нулей и единиц). Положительным моментом такого подхода является то, что формируемые ШПС обладают относительно низкой спектральной плотностью полезной энергии [5], поэтому они не оказывают существенного мешающего воздействия сторонним СРС.

Прием сформированных указанным выше образом сигналов целесообразно осуществлять на основе корреляционной обработки.

Предложения по выбору псевдослучайных последовательностей. В качестве модулирующих ПСП предлагается выбрать последовательности на основе функций Уолша, поскольку они обладают свойствами ортогональности [6].

Задать функции Уолша можно, например, через функции Радамахера [7]:

$$r_i(x) = \text{sign}[\sin(2^i \pi x)], \quad 0 \leq x < 1 \quad (2)$$

где аргумент $x = t/T$ – безразмерное время; T – период функции; $i = 0, 1, 2, \dots$ – порядок функции.

Функции Радамахера являются единичными, их знак определяется знаком аргумента.

В результате система функций Уолша $wal_j(x)$ (при $j \geq 1$ число j представляется в двоичной системе счисления упорядоченной суммой $j = 2^{\gamma_1} + 2^{\gamma_2} + \dots + 2^{\gamma_p}$, где $\gamma_1 < \gamma_2 < \dots < \gamma_p$) принимает вид

$$wal_j(x) = r_{\gamma_1+1}(x) r_{\gamma_2+1}(x) \dots r_{\gamma_p+1}(x). \quad (3)$$

Одним из основных достоинств функций Уолша является то, что они обеспечивают минимальный уровень взаимных помех.

Таким образом, для расширения алфавита канального кодирования предлагается поднесущие ЧВМ дополнительно модулировать ПСП на основе функций Уолша. В результате указанной операции каждая из поднесущих ЧВМ будет представлять собой ШПС. Указанные операции позволят снизить энергетическую заметность сигналов, повысить их помехозащищенность и обеспечат увеличение алфавита канального кодирования.

Результаты компьютерного моделирования. Для подтверждения правомерности теоретических предположений было проведено компьютерное моделирование.

В качестве исходных данных рассматривалась информационная система со следующими параметрами: длительность символа $T_s = 40$ мс; интервал ортогональности $\Delta f = 400$ Гц. Защитный интервал вы-

бирался из условия четырехкратного перекрытия полосы $\Delta f_{\text{защ}} = 4\Delta f = 4 \cdot 400 = 1600$ Гц (определено из практического опыта).

Для моделирования определена стандартная модель канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ).

В общем случае по характеру воздействия все мешающие излучения (шумы и помехи) можно разделить на сосредоточенные по спектру (гармонические) и сосредоточенные по времени (квазиимпульсные) помехи, а также флуктуационные шумы радиоканала.

С учетом указанных условий принимаемую смесь полезного сигнала с шумами и помехами, обладающими сосредоточенным, импульсным и флуктуационным характером, можно представить в следующем виде:

$$z(t) = s(t, \mathfrak{R}(t)) + \eta_{\text{сосп}}(t) + \eta_{\text{имп}}(t) + \eta_{\text{фл}}(t). \quad (4)$$

Здесь $s(t, \mathfrak{R}(t))$ – полезный сигнал; $\mathfrak{R}(t)$ – дискретный параметр сигнала, определяемый видом модуляции.

Совокупность мешающих воздействий в (4) представляет комплекс помех: $\eta_{\text{сосп}}(t)$ – сосредоточенных, $\eta_{\text{имп}}(t)$ – импульсных (квазиимпульсных), $\eta_{\text{фл}}(t)$ – флуктуационных. Последняя составляющая в уравнении (4) близка по структуре к гауссовой и определяется как шумами радиоканала, так и собственными шумами приемного и передающего трактов.

Как правило, сосредоточенные помехи преимущественно имеют узкий спектр, локализованный в относительно узкой частотной полосе приемного тракта, а импульсные помехи, напротив, представляют регулярные или хаотические последовательности кратковременных импульсов, ширина спектра которых превышает полосу пропускания приемного тракта.

Поскольку в эксперименте принималось условие, что ширина спектра полезного сигнала совпадает с полосой пропускания приемного тракта, то вся совокупность шумов и помех вырождается в АБГШ различной интенсивности [8]. Указанные обстоятельства обуславливают правомерность выбора модели канала с АБГШ для компьютерного моделирования.

Учитывая, что целью исследования является анализ зависимости помехоустойчивости передачи информационного сообщения от вида модуляционного формата, показателем, определяющим качество процесса, целесообразно определить вероятность ошибки на бит.

Значение вероятности ошибки на бит P_b можно рассчитать согласно [2]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (5)$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит; N_0 – спектральная плотность мощности шума или аддитивных помех.

В формуле (5) $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$ – функция плотности распределения вероятности.

В ходе эксперимента оценивалась помехоустойчивость предложенного подхода, предусматривающего использование ЧВМ с дополнительной модуляцией их поднесущих ПСП на основе функций Уолша.

В качестве исходных были выбраны следующие ЧВМ:

- размерностью 2×2 , в которой каждая из ее субчастот дополнительно модулировалась ПСП на основе функций Уолша длиной в 16 элементов;
- размерностью 4×4 , в которой каждая из ее субчастот дополнительно модулировалась ПСП на основе функций Уолша длиной в 8 элементов;
- размерностью 8×8 , в которой каждая из ее субчастот дополнительно модулировалась ПСП на основе функций Уолша длиной в 4 элемента.

Тогда с учетом выражения (4) аналитическую модель можно представить как

$$z_m(n, t) = \sum_n^N \sin(2\pi f_n t) \delta_n(T_h) + wal_m(T_h) + \eta(t), \quad (6)$$

где m – текущее значение разновидности функции Уолша; N – число частотных позиций ЧВМ; T_h – длительность субпосылки ЧВМ; T_s – длительность сигнала ЧВМ; f_n – значение частоты n -й субпосылки (поднесущей) ЧВМ; $\eta(t)$ – деструктивные аддитивные помехи.

В формуле (6)

$$\delta_n(T_h) = \begin{cases} \delta_n(T_h) = 1 & \text{при } \frac{T_s}{N}(n-1) \leq T_h < \frac{T_s}{N}n; \\ \delta_n(T_h) = 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

В качестве альтернативного решения рассматривалась ЧВМ размерностью 32×32 без дополнительной модуляции ее поднесущих (фактически сигнал ППРЧ). Выбор указанных конструкций обусловлен тем, что каждая из ЧВМ обеспечивала передачу пятиэлементной информационной комбинации.

Результаты оценки помехоустойчивости представлены на рисунке 2.

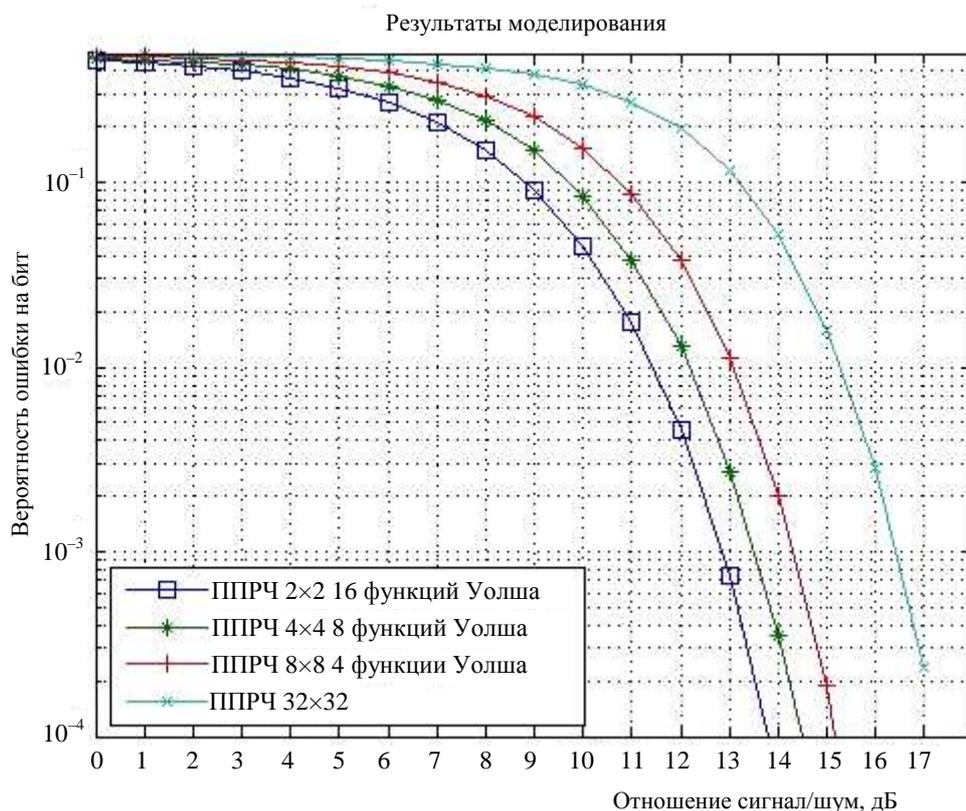


Рис. 2. Сравнительная оценка разработанных научно-технических предложений

В рассмотренных экспериментах при выборе алфавита канального кодирования исходили из условия обеспечения максимальной ортогональности формируемых конструкций, а именно чтобы каждая ЧВМ имела уникальные неповторяющиеся комбинации номиналов субчастот и временных интервалов. Такой подход позволяет увеличить степень различия используемых символов и тем самым повысить вероятность принятия правильного решения при демодуляции.

Анализ полученных результатов, проиллюстрированных рисунком 2, позволяет сделать следующее заключение: применение комбинированного способа, при котором ЧВМ 2×2 расширяется 16-разрядной последовательностью Уолша, обеспечило наилучшую помехоустойчивость.

Заданное значение вероятности ошибки на бит, согласно выражению (5), определяемое значением 10^{-4} [2], обеспечивается при отношении сигнал/шум (ОСШ), равном 14 дБ, что лишь на 1 дБ уступает ЧВМ размером 2×2 без дополнительной модуляции.

Однако следует отметить, что при этом предложенная модель ЧВМ позволяет осуществлять передачу пятиэлементной последовательности. В то время как для ЧВМ 32×32 (с аналогичной информационной емкостью алфавита) подобный результат достигается лишь при ОСШ, равном 17 дБ. Кроме того, предложенный подход требует меньший частотный ресурс по отношению к подходу, основанному на увеличении размерности ЧВМ.

Таким образом, в заключение проведенного исследования можно сделать **вывод**, что предлагаемый подход обеспечивает требуемый компромисс между увеличением размерности алфавита канального кодирования и сохранением помехоустойчивости. А поскольку процедуры дополнительного модулиро-

вания поднесущих фактически ведут к формированию ШПС, то можно утверждать, что при этом обеспечивается приемлемая скрытность факта работы СРС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каневский, З.М. Теория скрытности / З.М. Каневский, В.П. Литвиненко. – Воронеж: ВГУ, 1991. – 144 с.
2. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов [и др.]; под ред. В.И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Каргашин, В.Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля // Специальная техника. – 2000. – № 3–5.
5. Дворников, С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений / С.В. Дворников. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 268 с.
6. Залмазон, Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залмазон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
7. Григорьев, В.А. Сигналы зарубежных систем электросвязи: учебник / В.А. Григорьев. – СПб.: ВАС, 2007. – 368 с.
8. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации / А.А. Алексеев [и др.] // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11, № 1. – С. 65–76.

Поступила 02.03.2015

EXPANSION OF THE ALPHABET SIGNALS BASED ON TIME-FREQUENCY TRANSMISSION MATRICES FOR DECAMETER WAVES

S. DVORNIKOV, D. RYABENKO

The possibility of expanding the information alphabet signals generated on the basis of time-frequency matrix to radio communications decameter. We propose a method that provides increasing the dimension of the matrix due to the additional subcarrier modulation Walsh functions. Presents the results of computer simulation to evaluate the effectiveness of the developed approach. Substantiates the preservation of the required noise immunity transfer in general.