

**Радкевич Александр Анатольевич,**  
к.т.н, СИС, старший научный сотрудник,  
КВВУ им. Штеменко, г. Краснодар

**Стрелков Юрий Иванович,**  
к.т.н, профессор, старший научный сотрудник  
КВВУ им. Штеменко, г. Краснодар

**Диденко Максим Дмитриевич,**  
курсант, КВВУ им. Штеменко, г. Краснодар

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНО-СОСТАВНОЙ СТРУКТУРОЙ В СРЕДЕ MATHCAD

**Аннотация.** В статье излагается метод построения модели формирования и обработки сигналов с параллельно-составной структурой с помощью программы Mathcad.

**Ключевые слова.** Модель, амплитудно-кодовое уплотнение, функции Уолша.

Основными требованиями, предъявляемыми к системам цифровой связи, являются помехозащищенность и скрытность. Одним из способов повышения помехозащищенности канала связи является применение сложных сигналов параллельной или последовательной структуры [1, 2]. Формирование сигналов со сложной сигнально-кодовой конструкцией основано на использовании ансамбля ортогональных функций. В качестве таких функций часто используются функции Уолша [3].

Сущность предлагаемого метода кодирования заключается в том, что последовательность  $m$  информационных бит длительностью  $T_u=1/f_u$  поступает в демультимплексор, где преобразуются в  $m$  (для примера примем  $m$  равным 8) параллельных символов  $b1...b8$  длительностью  $T_c=m \cdot T_u=m/f_u$ , т. е. происходит накопление  $m$  бит. Далее каждый символ  $b1...b8$  умножается на соответствующую функцию Уолша, полученную на основе матрицы Адамара. Все полученные сигналы складываются в сумматоре, и на выходе сумматора образуется сложный составной сигнал с параллельной структурой.

В приемном устройстве принятый составной сигнал подается на  $m$  умножителей, на второй вход которых подаются функции Уолша. После интегрирования полученных сигналов в решающих устройствах формируются параллельные сигналы  $b1...b8$ , из которых в мультиплексоре восстанавливается исходный сигнал.

В настоящей статье предлагается метод построения модели формирования и обработки сигналов с параллельно-составной структурой с помощью программы Mathcad.

Матрицу функций Уолша можно построить с помощью матриц Адамара, определяемых равенством [3]

$$H_{2N} = \begin{bmatrix} H_N & H_N \\ H_N & -H_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

Полагая  $H_1=1$  получим, матрицу Адамара второго порядка

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Матрицы Адамара 4 и 8 порядка получаются путем умножения соответственно матриц 2 и 4 порядка на элементы матрицы 2 порядка.



$$H4:=\text{kroncker}(H2,H2), \quad H8:=\text{kroncker}(H4,H2) \quad (3)$$

$$H8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Матрица функций Уолша восьмого порядка формируется путем следующей перестановки строк матрицы Адамара

$$\begin{aligned} \widehat{W}^0 &:= H8^0, & \widehat{W}^1 &:= H8^4, & \widehat{W}^2 &:= H8^6, & \widehat{W}^3 &:= H8^2, \\ \widehat{W}^4 &:= H8^3, & \widehat{W}^5 &:= H8^7, & \widehat{W}^6 &:= H8^5, & \widehat{W}^7 &:= H8^1. \end{aligned}$$

Сформированная матрица функций Уолша восьмого порядка имеет вид

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Сигнал, поступающий на вход демультиплексора, сформируем с помощью датчика случайных чисел. Для определенности положим:

количество байт входного сигнала  $n:=3$ ;

номер байта на входе демультиплексора  $i:=0..n-1$ ;

номер байта на выходе демультиплексора  $k:=0..n$ ;

номер бита в байте  $j:=0..7$ ;

количество бит входного сигнала  $nx:=8 \cdot n$ ;

номер бита входного сигнала  $jx:=0..nx-1$ .

Бинарный сигнал продолжительностью  $nx$  бит примем равным

$$Vx_{jx} := \text{round}(\text{rnd}(1)). \quad (6)$$

Для отображения сигнала на выходе демультиплексора преобразуем вектор входного сигнала в матрицу, каждая строка которой содержит 1 байт

$$X_{\text{floor}(\frac{jx}{8}), \text{mod}(jx,8)} := Vx_{jx}. \quad (7)$$

Допустим, что матрица входного сигнала равна

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Входной сигнал, преобразованной для удобства к уровням [1, -1], может быть представлен в виде осциллограммы (рисунок 1) с помощью выражения



$$x(t) := 2 \cdot (Vx_{\text{floor}(8 \cdot t)} - 0.5). \quad (9)$$

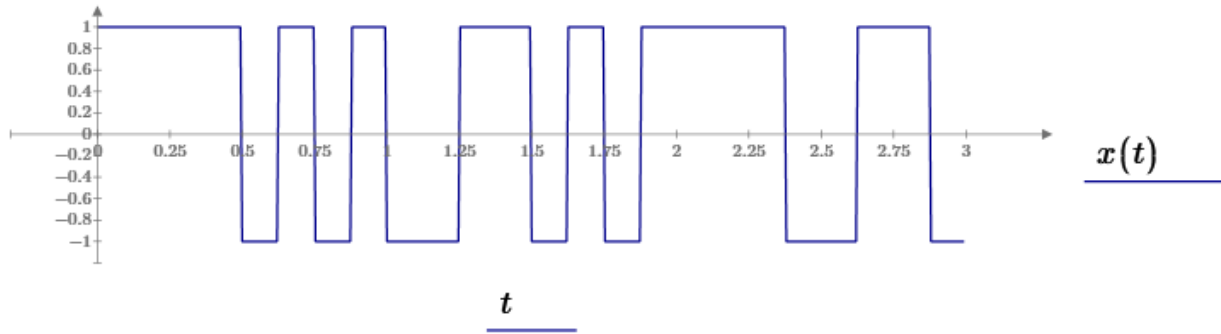


Рис. 1 - Сигнал на входе демультиплексора

На выходе демультиплексора формируются  $N$  (для определенности  $N$  принято равным 8) сигналов, задержанных на время  $N \cdot t_{\text{и}}$ , необходимое для запоминания  $N$  бит. Значение сигнала на  $j$ -м выходе демультиплексора в течение  $N \cdot t_{\text{и}}$  равно значению  $j$ -го бита в запомненном байте.

Из сигналов на выходе демультиплексора формируется матрица сигналов, в которой номер строки соответствует номеру бита, номер столбца соответствует номеру бита в байте.

$$b_{0,j} := 0, \quad b_{i+1,j} := 2 \cdot (X_{i,j} - 0,5), \quad i = 0 \dots 2, \quad j = 0 \dots 7, \quad (10)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Появление нулевой строки в матрице сигналов на выходе демультиплексора обусловлено задержкой в восемь тактов на анализ и запоминание отдельных бит в байте.

Сформированные сигналы умножаются на соответствующие функции Уолша

$$y_{p,8 \cdot k + j} := b_{k,p} \cdot W_{p,j}, \quad p, j = 0 \dots 7, \quad k = 0 \dots 3 \quad (11)$$

Полученные сигналы подаются на вход сумматора, на выходе которого образуется сложный сигнал с параллельной структурой (рисунок 2), подаваемый в линию передачи (на модулятор передатчика).

$$S_l := \sum_{j=0}^7 y_{j,l}, \quad (12)$$

где  $l := 0..8 \cdot (n+1) - 1$  - номер бита в сформированной последовательности.

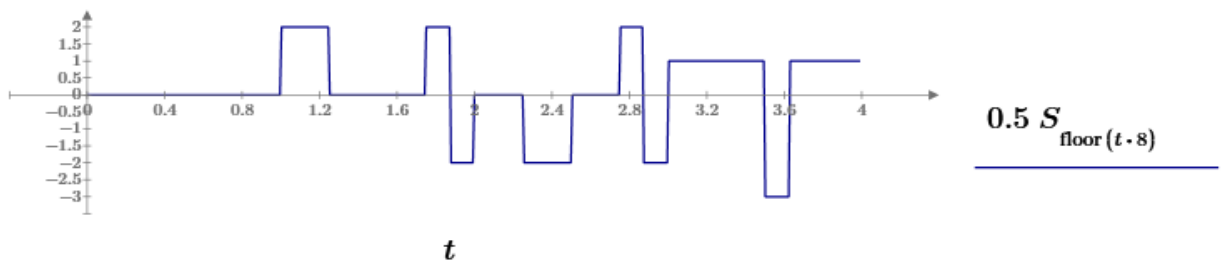


Рис. 2 - Групповой сигнал с параллельной структурой на выходе сумматора



Для восстановления исходного сообщения принятый сигнал подается на  $N$  модуляторов, на второй вход которых подаются соответствующие функции Уолша. После побайтного перемножения результаты всех произведений суммируются мультиплексором. Данную операцию можно рассматривать как результат произведения матрицы исходного сигнала, каждая строка которой равна амплитуде сигнала на  $j$ -м такте, на матрицу функций Уолша (прямая и обратная матрицы функций Уолша совпадают с точностью до линейного коэффициента). Матрицы сигналов на входе приемного устройства и выходе мультиплексора представлены на рисунке 3.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -4 \\ 0 & 0 & -4 & -4 & 0 & 1 & 4 & -4 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad \frac{X}{8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рис. 3 - Матрицы сигналов на входе приемного устройства ( $S$ ) и выходе мультиплексора ( $X$ )

Путем сравнения нетрудно убедиться, что сигнал, сформированный на выходе мультиплексора приемника полностью соответствует сигналу, поданному на вход демультиплексора передатчика.

В реальных условиях на входе приемного устройства наряду с сигналом присутствует шум. Промоделировать прием и обработку смеси сигнала и шума можно подавая на вход модуляторов сумму сигнала  $S$  и шума с амплитудой  $A_s$ . На выходе модуляторов формируются произведения суммы сигнала и шума на элементы матрицы Уолша (аналог интегрирования), которые суммируются мультиплексором.

Изменяя амплитуду шума  $A_s$  можно оценить величину снижения влияния шума на сигнал с параллельно-составной структурой, сравнивая полученный на выходе мультиплексора сигнал с суммой сигнала и шума (рисунки 4-6).

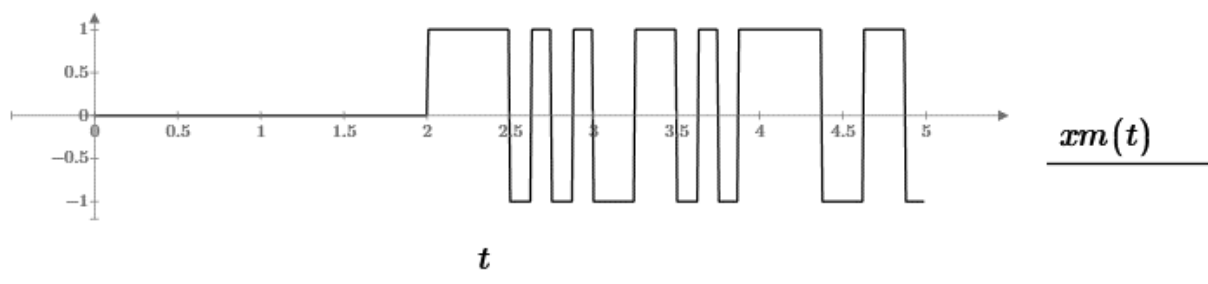


Рис. 4 - Сигнал без шума

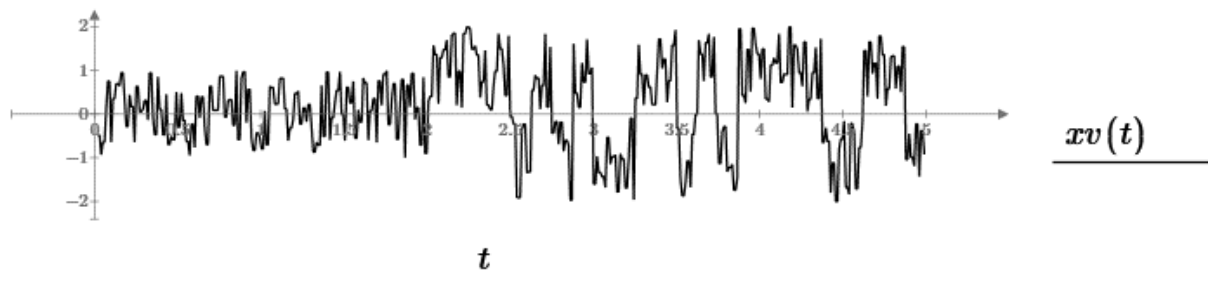


Рис. 5 - Смесь сигнала и шума с равными амплитудами



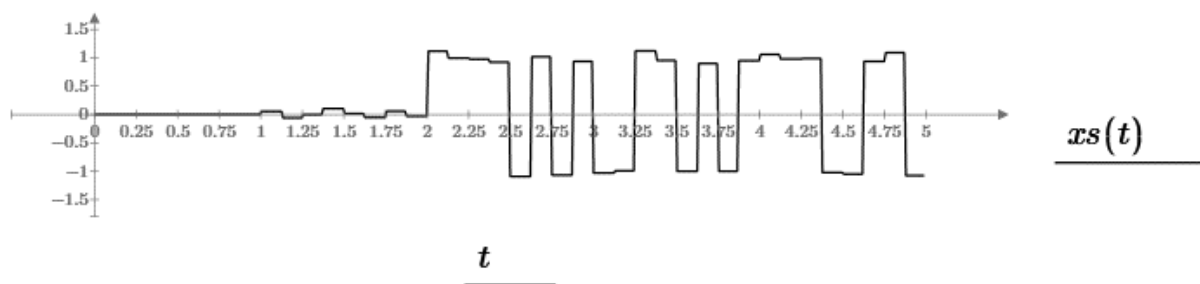


Рис. 6 - Смесь сигнала и шума с равными амплитудами на выходе мультиплексора

Таким образом, использование методов формирования и обработки сигналов с параллельно-составной структурой позволяет уменьшить влияние шума на полезный сигнал. Использование данной модели формирования и обработки сигналов с параллельно-составной структурой, разработанной в среде Mathcad, позволяет оценить величину повышения эффективности системы передачи информации за счет амплитудного уплотнения сигнала последовательностями функций Уолша.

#### Список литературы:

1. Чердынцев В.А. Алгоритмы и устройства формирования и обработки сигналов в цифровой радиосвязи. Лабораторный практикум: пособие / В. А. Чердынцев, А. В. Мартинович. - Минск: БГУИР, 2014. - 144 с.
2. Болтенко Е. П. Разработка модели формирования и обработки сигналов с параллельно-составной структурой системы передачи информации цифровой радиосвязи // Студенческая наука для развития информационного общества: сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции: в 2-х томах: Т. 2. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. – 368 с.
3. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. М.: Сов. радио, 1978, 304 с.

