

УДК [534/322/3+621/376.4]:654.16

ШУМОПОДОБНЫЕ СИГНАЛЫ С ДИСКРЕТНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (ДФМ) В ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

НГУЕН К. Д., КАРПУШКИН Э. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены шумоподобные сигналы с дискретной фазовой модуляцией в широкополосных радиосистемах передачи цифровой информации. Рассматриваются два класса бинарных ПСП: М-последовательность и четверично-кодированные последовательности.

Abstract. Noise-like signals with discrete phase modulation in broadband radio systems for digital information transmission are considered. Two classes of binary PRSs are considered: M-sequence and quaternary-coded sequences.

Введение

В современных радиосистемах передачи информации всё большей акцент делается на широкополосные радиосистемы (ШПРС). ШПРС позволяет существенно улучшить такие показатели качества как помехозащищенность, скрытность действия возможность борьбы с многолучевостью и замираниями, возможность работы в одной и той же полосе частот множеству других радиосистем в том числе и узкополосных. Из всех сложных сигналов с ДФМ наибольший интерес для ШПРС представляют шумоподобные или псевдослучайные сигналы (ПС-сигналы), у которых фаза несущего колебания изменяется по закону дискретной псевдослучайной видеопоследовательности (ПСП).

Анализация ПС-сигналов с ДФМ

Статистические характеристики ПСП и случайной видеопоследовательности похожи, что и определило название детерминированной видеопоследовательности. Аналитически ПС-сигнал с ДФМ длительности T записывается в виде:

$$S(t) = A_0 \sum_{n=1}^{\infty} \text{rect}[t - (i-1)\tau_0] \exp[j(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_0)],$$

где $0 \leq t \leq N\tau_0$; τ_0 – длительность элементарного символа ПСП; N – количество элементарных символов на длительности T ; φ_i – дискретные значения фазы, привязанные к соответствующим дискретным значениям модулирующей ПСП; а функция

$$\text{rect}[t - (i-1)\tau_0] = \begin{cases} 1, & \text{при } (i-1)\tau_0 \leq t \leq i\tau_0 \\ 0, & \text{при } (i-1)\tau_0 > t > i\tau_0 \end{cases}$$

Комплексная огибающая сигнала и закон фазовой манипуляции определяются соответственно следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{A}(t) &= A_0 \sum_{n=1}^{\infty} \text{rect}[t - (i-1)\tau_0] \exp[j\varphi_i], \\ A(t) &= \text{Re}\{\dot{A}(t)\} = \dot{A}_0 \sum_{n=1}^{\infty} \text{rect}[t - (i-1)\tau_0] \cos \varphi_i. \end{aligned}$$

Функцию $\cos \varphi_i$ удобно выразить через символ a_i длительности τ_0 ($\cos \varphi_i = a_i$), а ПСП – как ансамбль символов $\{a_i\}$, где $i = 1, 2, \dots, N$. Если $a_i \in \{1, -1\}$ ($\varphi_i \in \{0, \pi\}$), то ПСП будет двухуровневой или бинарной. При больших значениях a_i ПСП – многоуровневая или многофазная. Очевидно, что спектрально-корреляционное свойство ПС-сигнала с ДФМ полностью будут определяться модулирующей ПСП.

Существующие классы ПСП можно разбить на две группы: бинарные и небинарные.

К числу небинарных ПСП относятся линейные рекуррентные последовательности (ЛРП) с основанием $\rho > 2$, последовательности Цырлера [3,7], последовательности символов Лежандра, многофазные коды Фрэнка [6], последовательности Де Лонга, E – коды Велти [8] и др. Отличительной особенностью небинарных ПСП является низкий уровень боковых остатков АКФ, модуль которых для одиночной последовательности не превышает $\frac{1}{N}$ (АКФ нормированная), а для периодической стремится к нулю. Однако большие аппаратные затраты, которые требуют многоуровневые ПСП при их формировании и обработке, привели к ограниченному их применению в РТС.

Широкое применение в современных РТС с ПС-сигналами нашли бинарные ПСП. Из множества классов бинарных ПСП ниже рассматриваются два класса, имеющие хорошие спектрально-корреляционные характеристики и отличающиеся прототипом формирования.

М-последовательности

М-последовательности – это класс ЛРП максимального периода (отсюда и название М-максимальное) с основанием $\rho = 2$ удовлетворяющий рекуррентному правилу:

$$a_i = c_1 a_{i-1} + c_2 a_{i-2} + \dots + c_n a_{i-n}, \quad (1)$$

где $c_i \in \{0, 1\}$; n – порядок, определяющий память последовательности; при $a_i \in \{0, 1\}$ – умножение логическое, а сложение – по модуль 2.

Задаваясь начальной комбинацией из n символов по правилу (1), можно формировать М-последовательность. ЛРП описываются полиномами n – й степени вида:

$$c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_n x^n = 0. \quad (2)$$

М-последовательность порядка n как последовательность максимального периода, описывается неприводимым и примитивным полиномом степени n из всех заданных выражением (2). Количество ненулевых коэффициентов c_i в полиноме (2) за исключением $c_0 = 1$ определяют количество символов n – значной комбинации, участвующих в формировании по правилу (1), причем число их всегда четное. Например, неприводимый и примитивный полином $x^3 + x^2 + 1 = 0$ описывает М-последовательность порядка $n = 3$ и рекуррентное правило формирования символов имеет вид:

$$a_i = a_{i-2} + a_{i-3} \quad (3)$$

На рисунке 1 приведена структура генератора М-последовательности порядка 3 по правилам (3). В качестве n – разрядной памяти используются регистры сдвига, управляемые генераторами тактовых импульсов (ГТИ):

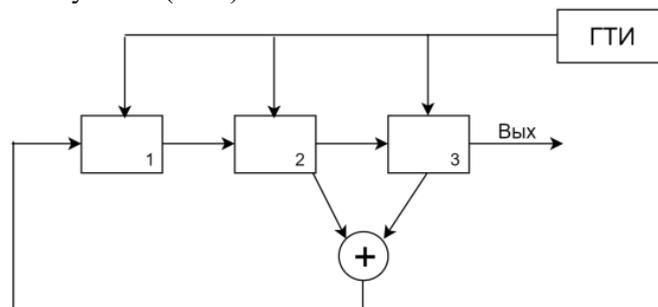


Рис. 1. Структура генератора М-последовательности порядка 3 по правилам (3)

Значность N (количество символов a_i в одном периоде) M -последовательности зависит от порядка n и определяется формулой:

$$N = 2^n - 1.$$

На рисунке 2 демонстрируется формирование M -последовательности значности $N = 7$. Двоичные символы, расположенные столбцами справа от линии, являются символами M -последовательности, сформированными на выходе генератора при начальной комбинации 111.

0 такт	1	1	1	
1 такт	0	1	1	1
2 такт	0	0	1	1
3 такт	1	0	0	1
4 такт	0	1	0	0
5 такт	1	0	1	0
6 такт	1	1	0	1
7 такт	1	1	1	0

Рис. 2. Таблица состояний ячеек регистра при начальной комбинации 111

Полученная АКФ показана на рисунке 3:

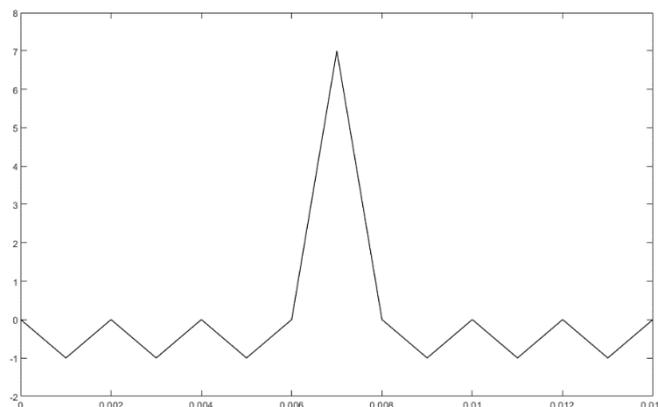


Рис. 3. График АКФ одиночных M -последовательностей значности 7 при начальной комбинации 111

Четверично-кодированные последовательности

Четверично-кодированные последовательности (ЧКП), в [8,9] их называют Д-кодами, относятся, как и M -последовательности, к классу бинарных ПСП. В отличие от M -последовательностей семейство ЧКП формируются нелинейным способом и имеют значность $N = 2^k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$

Наиболее наглядно процесс формирования ЧКП можно проследить, проанализировав порождающее выражение:

$$A_j^k = \overline{\sum_{l=1}^{k-1} B_l^{(k+1)-l} B_{l+1}^{k-l} + \sum_{l=1}^k x_l^j B_l^{(k+1)-l}}, \quad (4)$$

где $A_j^k = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ – условная запись одиночной ЧКП длительности $T = N\tau_0$ порядка k номера j , символы которой $a_i \in \{0, 1\}$; $B_i^{(k+1)-i}$ – функция Радемахера (меандровая функция), определяемая на длительности T с номером j и порядком $[(k + 1) - i]$; $x_i^j \in \{0, 1\}$ – значение j -го разряда номера последовательности A_j^k , представленного в двоичном виде (для ЧКП порядка

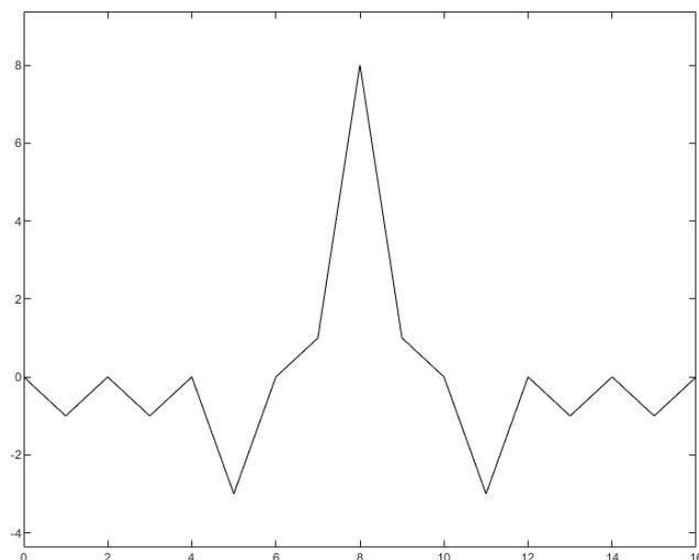


Рис. 5. График АКФ ЧКП A_4^3

Заключение

Рассмотренные два класса ПСП, благодаря простоте генерирования, хорошим спектрально-корреляционным характеристикам, большим ансамблям, нашли наибольшее распространение в ПС-сигналах с ДФМ, обеспечивая возможность реализации ускоренных алгоритмов обработки сигналов при минимальных аппаратных затратах. На базе этих классов ПСП синтезируются системы комбинированных сигналов, повышающих эффективность систем со сложными сигналами. На основании этого, я исследую совершенно новый ансамбль, который обладает лучшими корреляционными свойствами.

Список использованных источников

1. Радиотехнические системы передачи информации / под ред. В. В. Калмыкова. – М.: Радио и связь, 1990.
2. Информационные технологии в радиотехнических системах / под ред. И. Б. Федорова. – М.: МГТУ Им. Н. Э. Баумана, 2003. Иванов А. Б., Петров Б. В., Попов И. И. Способ обработки негармонического сигнала. RU 24**615 С2, заяв. 15.02.2001, опубл. 20.05.2002.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2003.
4. Карпушкин, Э.М. Радиотехнические системы. Минск: БГУИР, 2011.
5. Карпушкин, Э.М. Основы теории радиотехнических систем. Минск: БГУИР, 1993.