

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ. МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КОДЫ БАРКЕРА И M – ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОДИНАКОВОЙ ДЛИНЫ

Роман БЕЛИВАК

Технический Университет Молдовы, Факультет Электроники и Телекоммуникаций,
Департамент телекоммуникаций и электронных систем, гр. SSET-172, Кишинев, Республика Молдова

Автор-корреспондент: Belivac, Roman, roman.belivac@sde.utm.md

Abstract: The paper discusses the correlation properties of pseudo-random sequences (PRS) used to form noise-like signals in high-speed data transmission systems. The most frequently used pseudo-random sequences are considered: modified Barker codes, M-sequences having the same length. In the MatLab a comparative analysis of the correlation properties of the PRS. It is shown, that modified Barker codes have unsatisfactory correlation properties. It is shown, that the use of M - sequences allows to obtain signals with the required correlation properties for communication systems, including for systems with code division of channels. The directions of further research are determined.

Keywords: noise-like signal, pseudo-random sequences, modified Barker codes, M-sequences, autocorrelation function, cross-correlation function

Введение

В настоящее время в радиотехнических системах (РТИ) все больше находят применение широкополосные, или как их еще называют шумоподобные сигналы (ШПС), основу которых составляют псевдослучайные последовательности (ПСП) [1-4].

Для решения задач оптимальным образом при обработке ПСП следует применять корреляционный прием.

Наилучшими ПСП являются те, у которых отношение N главного пика функции автокорреляции (АКФ) к боковым – наибольшее.

Однако большая часть ПСП, нашедших практическое применение в широкополосных системах, не свободна от ряда недостатков, в частности, структурная сложность их невелика. Эти и другие факторы побуждают не только искать пути оптимизации ансамблей последовательностей с приемлемыми корреляционными свойствами, но и исследовать новые классы ПСП с требуемыми корреляционными свойствами.

Основная часть

Важным параметром системы, использующей шумоподобные сигналы, является выигрыш при обработке (processing gain). Выигрыш при обработке (ВО) показывает степень улучшения отношения сигнал/шум при преобразовании полученного приемником шумоподобного сигнала в требуемый информационный сигнал.

Согласно классическому определению, ВО равен:

$$VO = 10 \log (C_{ch}/C_{inf}), \quad (1.1)$$

где C_{ch} - частота следования чипов псевдослучайной последовательности, чип/секунду,

C_{inf} - скорость передачи информации, бит/секунду.

По этому определению система, которая имеет скорость передачи информации 1 Мбит/сек. и частоту следования чипов 13 Мчип/сек. (каждый бит информации кодируется ПСП кода Баркера из 13 битов), будет иметь ВО, равный 11,14 дБ. Этот результат означает,

что работоспособность системы передачи информации сохранится с тем же коэффициентом BER, если полезный сигнал на входе уменьшится на 11,14 дБ.

Автокорреляционная функция дискретных сигналов вычисляется по формуле:

$$R_u(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j u_{j-n}, \quad (1.2)$$

где n – целое число, положительное, отрицательное или нуль.

Взаимная корреляционная функция между двумя дискретными сигналами вычисляется по формуле, аналогичной (1.2):

$$R_{uv}(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j v_{j-n}, \quad (1.3)$$

Корреляционные свойства кодовых последовательностей, используемых в ШПС системах, зависят от типа кодовой последовательности, ее длины L , частоты следования ее символов и от ее посимвольной структуры [3, 4, 7].

Выполним сравнительный анализ корреляционных характеристик ПСП, которые используются для получения шумоподобных сигналов. Характеристиками ПСП являются функции автокорреляции (АКФ) и взаимной корреляции (ВКФ), которые подразделяются на периодические и аperiodические. Исследуем ПСП, которые имеют длину $L \approx 63$.

Коды Баркера. К дискретным сигналам с наилучшей структурой АКФ можно отнести сигналы (коды) Баркера. Кодовая последовательность сигнала Баркера состоит из N символов ± 1 и характеризуется нормированной АКФ вида:

$$R_u(n) = \begin{cases} 1, & \text{для } n = 0, \\ 0, & \text{для } n = 2l + 1, \\ \pm 1/N, & \text{для } n = 2l, \end{cases} \quad (1.4)$$

где $l = 0, 1, \dots, (N-1)/2$.

Знак в последней строчке зависит от величины N . Эти сигналы обладают уникальным свойством: независимо от числа позиций N в кодовой комбинации значения АКФ, вычисляемые по формуле (1.2), при всех $n \neq 0$ не превышают единицы. В то же время энергия этих сигналов, т.е. величина $R_u(0)$, численно равна N .

В [5, 6] для увеличения отношения сигнал/помеха и увеличения вероятности правильного обнаружения предлагают использовать модифицированные сигналы Баркера, обладающие лучшими корреляционными свойствами – сигналы Баркера – Волынской.

Способ получения таких сигналов основан на комбинировании сигналов Баркера. В качестве «материнской» последовательности берется последовательность Баркера, а затем каждый символ материнской последовательности заменяется прямой или инверсной «дочерней» последовательностью Баркера, в зависимости от того, ноль или единица в материнской последовательности. В работе исследуются псевдослучайные последовательности, которые имеют длину равную 63.

Корреляционные свойства широкополосных сигналов, которые представлены выше, были исследованы в среде Matlab, результаты которых представлены на рис. 1.

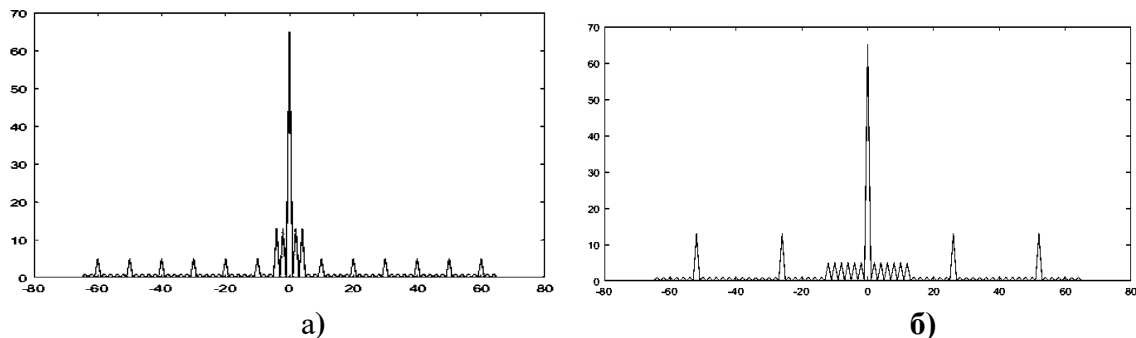


Рис.1 ААКФ модифицированных кодов Баркера а) (13×5) и б) (5×13)

Из рис.1 видно, что использование модифицированных сигналов Баркера приводит к увеличению амплитуды центрального пика АКФ, но появляются боковые выбросы, которые могут привести к ошибкам при обработке входных сигналов.

М – последовательности. Следует отметить, что коды Баркера, в основном, используются для высокоскоростных ШПС систем, предназначенных для передачи информации, но не для кодового разделения абонентов.

Последовательностями максимальной длины или M - последовательностями называются последовательности, формируемые регистрами сдвига с линейной обратной связью и имеющие период $L = 2^n - 1$, где n – длина регистра. Наиболее важная особенность M - последовательностей состоит в том, что их периодическая автокорреляционная функция является оптимальной в классе возможных автокорреляционных функций двоичных последовательностей длиной $L = 2^n - 1$. Именно хорошие автокорреляционные свойства M - последовательностей и простота их формирования обусловили широкое их применение в системах связи [1-4].

В таблице 1 приведены некоторые данные, касающиеся количества и номеров отводов генераторов M -последовательностей, для различного числа разрядов регистра сдвига.

Таблица 1

Номера отводов и количество M - последовательностей			
Количество разрядов, n	Период (длина L) M – последовательности	Количество M – последовательностей	Номера отводов регистра для цепи обратной связи
2	3	1	[2,1]
3	7	2	[3,2]; [3,1]
4	15	2	[4,3], [4,1]
5	31	6	[5,3], [5,2]
6	63	6	[6,5], [6,1]

В среде MatLab были исследованы корреляционные свойства M – последовательностей с полиномами $f_1(x) = x^6 + x + 1$, $f_2(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$, Начальное состояние сдвиговых регистров у всех генераторов ПСП одинаковое и равно [0 0 0 0 0 1]. Графики аperiodических автокорреляционных функций, перечисленных выше M – последовательностей, представлены на рис. 2.

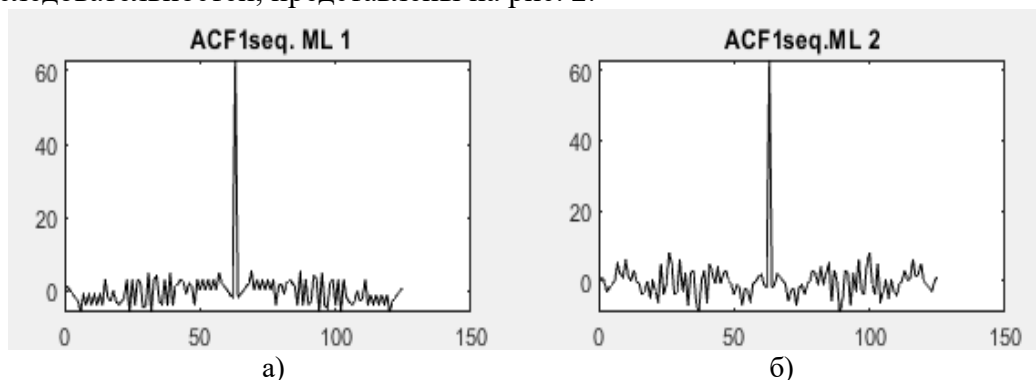


Рис 2. Аperiodические АКФ M – последовательностей с проверочными полиномами $f_1(x) = x^6 + x + 1$ (а) и $f_2(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$ (б)

Заклучение

Анализ корреляционных свойств модифицированных кодов Баркера позволяет сделать следующие выводы:

- Увеличение длины модифицированной последовательности Баркера увеличивает амплитуду центрального пика АКФ, но при этом увеличиваются амплитуды

боковых выбросов АКФ. Это может привести к срыву синхронизации, ошибкам при обработке входных данных.

- Модификация последовательности Баркера приводит к усложнению схемотехнических решений при построении генераторов ПСП, построенных на базе таких кодов Баркера.
- Модифицированные коды Баркера можно использовать в высокоскоростных системах передачи данных при учете влияния боковых выбросов АКФ.

Исследованные M – последовательности, которые имеют такую же длину, как и модифицированные коды Баркера, имеют лучшие автокорреляционные свойства. M – последовательности имеют лучший баланс нулей и единиц, чем модифицированные коды Баркера, а также обладают наименьшей эквивалентной линейной сложностью. Следовательно, M – последовательности предпочтительней использовать в высокоскоростных системах передачи данных.

Увеличение степени полинома приводит к увеличению числа «хороших» последовательностей, однако при этом значительно увеличивается период M – последовательности. А это приводит, в свою очередь, к увеличению чиповой скорости и расширению ширины спектра шумоподобного сигнала больше допустимого.

С целью компромисса между уровнем помехи множественного доступа и полосой пропускания канала связи в ряде случаев используют «усеченные» M – последовательности. Эти последовательности имеют несколько худшие корреляционные свойства, но позволяют достичь требуемого компромисса.

Область применения M – последовательностей широка и разнообразна. Путем подбора соответствующих свойств M – последовательности можно добиться удовлетворительного результата в большинстве случаев работы широкополосных систем. Генерация ансамблей M - последовательностей произвольной длины является актуальной практической задачей.

Следовательно, требуется дальнейшее тщательное изучение свойств M – последовательностей для решения соответствующих прикладных задач.

Библиография

Книги:

1. SOLOMON W. GOLOMB AND GUANG GONG. *Signal Design for Good Correlation*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005, 458 p.
2. ФЕЕР К. *Беспроводная цифровая связь, методы модуляции и расширения спектра*. Перевод с англ. / Под ред. В.И.Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000.
3. ГАНТМАХЕР В.Е., БЫСТРОВ Н.Е., ЧЕБОТАРЕВ Д.В. *Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез и обработка* —Спб.: Наука и техника, 2005. —400 с.
4. УРЯДНИКОВ Ю.Ф., АДЖЕМОВ С.С. *Сверхширокополосная связь. Теория и применение*. —М.: СОЛОНПресс, 2005. —368 с.

Статьи в журналах:

5. ВОЛЫНСКАЯ А.В., КАЛИНИН П.М. Новые помехоустойчивые сигналы для интеллектуального канала телемеханики // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11-4. – С. 922-926;
6. РАХМАТУЛЛИН А.Ф., СПЕРАНСКИЙ В.С. Сравнительный анализ кодовых последовательностей для СШП сигналов // *T – Comm – Телекоммуникации и транспорт*. 2012. № 9.

Труды конференций:

7. Т. ШЕСТАКОВА, Г. СОРОКИН Особенности корреляционных свойств шумоподобных сигналов, *The 6th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics*. – Chisinau: Tehnica – UTM, 2018, pp. 194-199.