

## АНАЛИЗ $M$ -ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МНОГОЗНАЧНЫХ СИМВОЛОВ

Ю.И. Сазонов, Е.А. Храбров, В.О. Старостенко, Д.Е. Храбров

Проанализированы периодические функции корреляции псевдослучайных сигналов на основе  $M$ -последовательностей символов с основанием не равном 2 и показана полезность использования этих сигналов при передаче информации в условиях сильных помех при их корреляционной обработке.

Сигналы на основе двоичных  $M$ -последовательностей [1] имеют отличающуюся от других сигналов идеальную периодическую функцию автокорреляции – помимо короткого центрального всплеска в графике этой функции нет боковых всплесков, так называемых «хвостов». Такое свойство позволило применить эти последовательности в условиях сильных помех, при которых другие сигналы использовать нецелесообразно. Ведь при корреляционном приеме у других сигналов имеются боковые всплески функции корреляции, которые суммируются с внешними помехами и ухудшают соотношение сигнал/шум, что снижает надежность приема.

Для расширения возможностей использования цифровых сигналов в настоящее время [2] все более широкое применение получают не двузначные (двоичные), а многозначные (троичные, пятеричные и т.д.) последовательности.

Чтобы провести анализ корреляционных свойств многозначных  $M$ -последовательностей требуется иметь достаточно обширный ансамбль этих последовательностей, однако невозможность аналитического определения порождающих их полиномов [1] приводит к необходимости нахождения этих полиномов другим путем. Для двоичных  $M$ -последовательностей в [3] дана таблица порождающих полиномов для значительной части разрядности полиномов, определенная эмпирическим путем. Аналогично для многозначных  $M$ -последовательностей в [4] приведена небольшая таблица порождающих полиномов, недостаточная для получения большого ансамбля сигналов.

В целях детального анализа корреляционных свойств многозначных  $M$ -последовательностей следует найти возможность определять порождающие их полиномы в достаточно большом числе символов и в широком диапазоне значений каждого символа. Кроме нахождения порождающих полиномов надо провести анализ периодической функции автокорреляции многозначных  $M$ -последовательностей и отличий ее от периодической функции автокорреляции двоичных  $M$ -последовательностей.

В результате такого исследования, можно сделать вывод о целесообразности использования многозначных  $M$ -последовательностей в передаче информации в условиях сильных помех при их корреляционной обработке.

В сейсмической разведке полезных ископаемых, чтобы получить достаточно качественный результат, вибраторы собирают в группы, а сейсмические воздействия неоднократно повторяют – накапливают. При этом возникает необходимость одновременного срабатывания всех вибраторов в группе и синхронного с этими срабатываниями началом записи отраженных сигналов на регистрирующем оборудовании – сейсмостанции.

Чаще всего для синхронизации сейсмостанции с отрядом вибраторов используют системы дистанционного пуска на основе шумоподобных сигналов с большой избыточностью [5 – 7]. До настоящего времени такие системы синхронизации работали только с двоичными сигналами, но если использовать многозначные сигналы, то надежность их работы может повыситься.

Для нахождения ансамбля многозначных  $M$ -последовательностей, достаточного большого для анализа их корреляционных свойств, в MATHCAD была написана программа [8], позволяю-

шая найти порождающие их неприводимые полиномы. Так все неприводимые троичные полиномы с числом  $m$  членов, равном 7, данная программа на среднем компьютере (с тактовой частотой 2 ГГц) вычисляет примерно за 20 мин работы. Число неприводимых полиномов при этом равно 156. Число символов в  $M$ -последовательности с числом  $p$  возможных значений каждого символа и с числом  $m$  членов порождающего полинома определяется выражением

$$n = p^m - 1. \quad (1)$$

Таким образом, были определены 156 различных квазиортогональных троичных  $M$ -последовательностей с числом символов  $n = 2186$ .

При необходимости определения еще больших многозначных  $M$ -последовательностей можно воспользоваться программой [8], написанной на языке С, позволившей вычислить, например, все неприводимые троичные полиномы с числом  $m$  членов, равном  $m = 10$  на среднем компьютере примерно за 18 мин работы. Число найденных неприводимых полиномов при этом составило 2640, а число символов каждой  $M$ -последовательности  $n = 59048$ .

Анализ периодической функции корреляции троичных и пятеричных  $M$ -последовательностей показал, что также как и в случае двоичных последовательностей, здесь по обе стороны от центрального главного всплеска функции нет мешающих боковых всплесков – «хвостов».

Анализ проводился с помощью пакета MATHCAD по программе [8], не использующей штатных операций корреляции пакета, основанных на внутренних подпрограммах, снижающих точность вычислений. С помощью этой программы определение периодической функции автокорреляции 6-разрядной троичной  $M$ -последовательности с числом символов  $n = 728$  средний компьютер производит примерно за 10 мин. Чтобы ускорить процесс компьютерного моделирования была разработана программа [8] на языке С, с помощью которой определение периодической функции корреляции 9-разрядной троичной  $M$ -последовательности с числом символов  $n = 19682$  средний компьютер производит примерно за 4 мин.

Как известно, если величины принимаемого и опорного сигналов принять равными 1, то величина  $N_i$  этих «хвостов» в зависимости от числа  $n$  символов  $M$ -последовательности составляет примерно

$$N_i = \sqrt{n}, \quad (2)$$

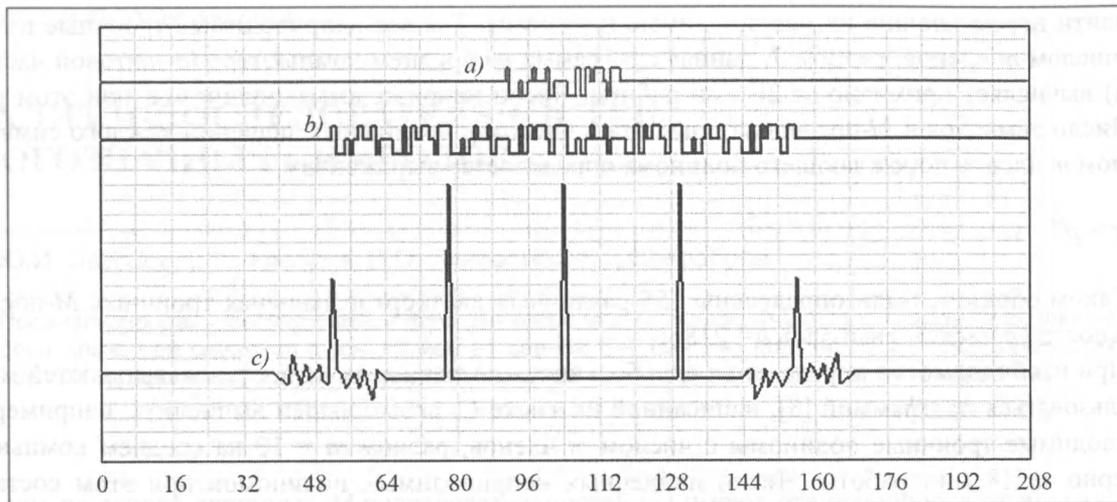
тогда как величина  $R_c$  центрального главного всплеска равна

$$R_c = n. \quad (3)$$

При корреляционном приеме  $M$ -последовательности, если принимаемую последовательность коррелируют с одиночной опорной последовательностью, то получают аperiodическую функцию корреляции, в которой по обе стороны от центрального главного всплеска функции имеются «хвосты», которые, суммируясь с помехами, приходящими из канала связи, существенно уменьшают результирующее соотношение сигнал/шум корреляционного приемника и, соответственно, снижают надежность приема.

Если принимаемую последовательность коррелировать с повторяемой несколько раз подряд опорной последовательностью, то получается периодическая функция корреляции, в которой по обе стороны от центрального главного всплеска функции нет «хвостов». В этом случае результирующее соотношение сигнал/шум корреляционного приемника повышается и, соответственно, возрастает надежность канала связи.

На рисунке показаны проекции на плоскость принимаемой и опорной последовательностей, а также периодической функции корреляции.



Проекция на плоскость сигналов: *a* – принимаемая троичная  $M$ -последовательность с числом символов  $n$  равным 26, отсчитываемых по горизонтальной оси; *b* – опорная последовательность, совпадающая по форме с принимаемой, повторенной несколько раз; *c* – периодическая функция корреляции

Из рисунка видно, что если после корреляционного приема сигнала использовать только центральный главный всплеск функции корреляции, то отсутствие около него инструментальных помех – «хвостов» – позволяет получить соотношение сигнал/шум, максимально возможное для сигналов с таким числом символов.

При вычислениях периодических функций корреляции троичных и пятеричных  $M$ -последовательностей выяснилось, что в отличие от двоичных  $M$ -последовательностей, с которыми для получения гладкого пьедестала около центрального главного всплеска функции требуется опорную последовательность повторять подряд три раза, для троичных и пятеричных – четыре раза и при этом центральный главный всплеск сдвигается назад на половину продолжительности одиночной  $M$ -последовательности.

На практике в линиях связи для передачи информации обычно используют сигналы, фаза которых изменяется скачком в соответствии с передаваемой последовательностью (фазоманипулированные), и исследование корреляционных свойств таких сигналов позволит в наибольшей мере получить достоверную информацию о возможностях надежной передачи данных многоуровневым шумоподобным сигналом.

Время вычисления функции корреляции для фазоманипулированного сигнала примерно на два порядка больше, чем для сигнала, модулирующего его фазу. В периодической функции корреляции фазоманипулированного сигнала плоский пьедестал около центрального главного всплеска превращается в гармоническую функцию постоянной величины примерно в  $n$  раз меньше величины центрального главного всплеска, и которая достаточно простыми средствами может быть сглажена. Анализ трехмерного графика функции корреляции по сравнению с двухмерным менее удобен из-за обилия посторонней информации. По этим трем причинам в статье было решено ограничиться демонстрацией проекций на плоскость сигналов, модулирующих принимаемую и опорную последовательности, а также огибающей периодическую функцию корреляции.

- Разработаны программы нахождения псевдослучайных сигналов, построенных на  $M$ -последовательностях символов с основанием, не равном 2. Эти программы позволяют расширить ансамбль известных  $M$ -последовательностей и дают дополнительные возможности разработчикам каналов связи с корреляционным приемом информации. Найдены две особенности в порядке получения периодических функций корреляции для троичных и пятеричных  $M$ -последовательностей в отличие от двоичных  $M$ -последовательностей.

Проведен анализ периодических функций корреляции псевдослучайных сигналов, построенных на  $M$ -последовательностях символов с основанием, не равном 2, и подтверждены воз-

возможности этих функций иметь максимально возможное соотношение сигнал/шум, которое ранее было известно для двоичных символов (двухуровневых ФМн-сигналов). Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования многозначных  $M$ -последовательностей в передаче информации в условиях сильных помех при их корреляционной обработке.

## Литература

1. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. Радио, 1970.
2. Петров Е.П., Прозоров Д.Е. Быстрый поиск псевдослучайных сигналов, построенных на рекуррентных последовательностях символов с произвольным основанием. // Труды V МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М.: 2003, т. 1, с. 221–223.
3. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1964.
4. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. В 2-х т: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.
5. Пат. 3 891 963 США; МКИ G 01 v 1 / 14 .Кодовое устройство взрывания по радио. / Herbert C. В. (США); Еххон Production Research Co. – № 407531; Заявл. 23. 10. 1973; Оpubл. 24. 06. 1975; НКИ 340 / 15,5. – 4 с.
6. А.с. 913 298 СССР. МКИ<sup>3</sup> G 01 v 1 / 04. Устройство синхронизации источников сейсмических сигналов. / В.А. Пантелеев, Е.А. Храбров, А.Г. Слободов, А.С. Быков и Н.М. Кобин (СССР).– № 2949867/18–25 02; Заявлено 07. 80; Оpubл. 15. 03. 82, Бюл. № 10 // Открытия. Изобретения, 1982, № 10, с. 106.
7. Храбров Е.А., Сазонов Ю.И. Математическая оценка достоверности синхронного запуска источников сейсмических сигналов. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2006, №8, т. 11, с. 55–70.
8. Старостенко В.О., Храбров Д.Е. Программный анализ свойств  $M$ -последовательностей импульсов, имеющих три и пять значений <http://dexprix.net/multi-value-mpos/>

Поступила 16 июля 2008 г.

## THE ANALYSIS OF $M$ -SEQUENCES OF MULTIPLE-VALUED SYMBOLS

Yu.I. Sazonov, E.A. Khrabrov, V.O. Starostenko, D.E. Khrabrov

In clause the references to the programs, developed by the authors, of a finding of pseudo-casual signals constructed on  $M$ -sequences of symbols with the basis, not equal 2 are given. These programs allow to expand ensemble of known  $M$ -sequences and give additional opportunities to the developers of channels of communication with correlation reception of the information. Two features are found by way of reception of periodic functions of correlation for figurative and пятеричных of  $M$ -sequences as against binary  $M$ -sequences.

The analysis of periodic functions of correlation of pseudo-casual signals constructed on  $M$ -sequences of symbols with the basis, not equal 2 is spent, and the opportunities of these functions are confirmed to have the greatest possible ratio signal/noise, which was earlier known for binary symbols. It allows to make a conclusion about expediency of use of multiple-valued  $M$ -sequences in transfer of the information in conditions of strong handicaps at their correlation processing.

