

УДК 621.391

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА ТРОИЧНЫХ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СПУТНИКОВЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

Ю. В. Петелин,

канд. техн. наук, доцент

М. А. Ковалев,

канд. техн. наук

А. А. Макаров

адъюнкт

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Приведены некоторые результаты исследования корреляционных и спектральных свойств троичных последовательностей максимальной длины. Представлена структурная схема устройства формирования. Показан локально-оптимальный характер автокорреляционной функции, проиллюстрированы особенности спектра троичных М-последовательностей.

This article studies the correlation and spectral characteristics of the ternary sequences of maximum length. A structural scheme of the shaping device is presented. The local optimality of autocorrelation functions is shown. Some special spectral features of ternary M-sequences are illustrated.

Жизнь современного общества немислима без широкого использования разнообразных средств передачи информации, которые непрерывно совершенствуются и развиваются. Объемы информации с каждым годом возрастают, увеличивается дальность связи, более высокими становятся требования к качеству передачи.

В этом отношении быстро развиваются системы спутниковой и космической связи. Передача информации по таким каналам связи существенно усложняется наличием помех и искажений в канале. Поэтому задача повышения помехоустойчивости передачи сообщений становится одной из важнейших при построении современных систем передачи информации.

В настоящее время основное направление развития радиоэлектронных средств в целях удовлетворения требований по ограничению доступа и повышения помехозащищенности в спутниковых каналах связи состоит в применении сигналов сложной структуры и специальных методов кодирования. Для этого широко используются сложные сигналы, основанные на фазовой манипуляции гармонического несущего колебания псевдослучайными последовательностями (ПСП).

Среди таких последовательностей особое место занимают двоичные последовательности максимальной длины (М-последовательности), которые формируются цифровым автоматом, содержащим регистр сдвига и сумматоры по модулю два. Двоичные М-последовательности обладают следующими основными свойствами.

1. М-последовательность имеет период, наибольший по сравнению с периодами любых других последовательностей, которые можно сформировать на основе регистра сдвига с фиксированным числом разрядов. Период двоичной М-последовательности $N = 2^k - 1$, где k – разрядность (память) последовательности.

2. В М-последовательности длиной N , т. е. на одном ее периоде, содержатся все k -значные комбинации двоичных символов, кроме запрещенной нулевой.

3. В каждом периоде М-последовательности общее число единичных символов отличается от общего числа нулевых символов на единицу.

4. Сумма М-последовательности с циклически сдвинутой М-последовательностью того же класса является М-последовательностью, отличающейся от порождающих только сдвигом.

5. Нормированные боковые пики периодической автокорреляционной функции (АКФ) фазоманипулированных сигналов, модулированных M -последовательностью, равны $-1/N$.

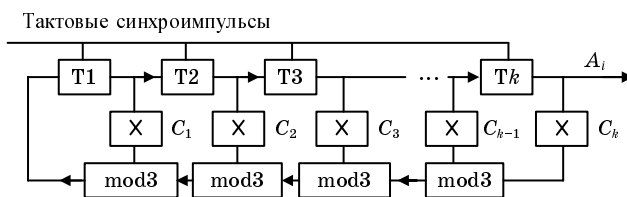
Поскольку M -последовательности достаточно просто формируются и обладают такими малыми боковыми пиками в периодическом режиме, до настоящего времени они находят широкое применение в радиотехнических системах.

Разработчики радиотехнических систем непрерывно занимаются усовершенствованием методов формирования сигналов в целях повышения скрытности функционирования и помехоустойчивости радиолиний. Одновременно специалистами в области радиоэлектронной борьбы проводятся исследования по вскрытию структур новых сигналов и созданию все более эффективных помех.

К настоящему времени из полного двоичного кода выбраны все последовательности, обладающие теми или иными полезными свойствами.

Дальнейшее повышение помехозащищенности радиолиний можно было бы обеспечить за счет увеличения периода двоичной последовательности. Однако это ограничено технологическими пределами. Дело в том, что применение сложных сигналов имеет смысл лишь тогда, когда их прием осуществляется оптимальными методами — с помощью коррелятора или согласованного фильтра. Сложность реализации согласованного фильтра возрастает по мере роста длины обрабатываемого сигнала. Для сигналов с базой порядка 10 000 становится неприемлемо большой инструментальная погрешность, из-за которой сводятся на нет преимущества, определяющиеся особыми корреляционными свойствами сложных сигналов. Использование коррелятора обуславливает необходимость предварительного поиска сигнала по частоте и задержке. С увеличением базы сигнала время поиска сигнала резко возрастает. Таким образом, дальнейшее увеличение длины обрабатываемого сигнала нецелесообразно. Кроме того, количество двоичных M -последовательностей при заданном числе разрядов регистра сдвига ограничено. В связи с этим актуальна задача выявления новых сигналов, обладающих хорошими (имеющими малые боковые пики) АКФ. Представляется разумным исследование путей усложнения структуры сигнала не за счет увеличения числа символов в его периоде, а за счет увеличения количества значений, которые может принимать числовая последовательность, т. е. исследование многоуровневых M -последовательностей. При этом желательно, чтобы не происходило существенного усложнения аппаратуры их формирования и обработки. С этой точки зрения, наиболее перспективными можно считать троичные M -последовательности.

В известных работах, посвященных сложным сигналам, троичным M -последовательностям уделяется мало внимания. Если для двоичных последовательностей неоднократно публиковались таб-



■ Рис. 1. Обобщенная структурная схема генератора M -последовательности

лицы коэффициентов, определяющие структуру генераторов, то для троичных последовательностей такой информации в обобщенном виде не существует. По-прежнему представляет определенную трудность формирование конкретных структур M -последовательностей для больших баз. Отсутствуют сведения о спектральных и корреляционных свойствах троичных M -последовательностей.

В данной статье приведены основные результаты исследований M -последовательностей, проведенных авторами.

Формирование M -последовательности с основанием 3 происходит с помощью устройства (рис. 1), основу которого составляют:

- регистр сдвига с триггерами $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$, которые осуществляют задержку входного сигнала на один такт длительностью t_0 ;
- умножители, осуществляющие умножение символов, поступающих на его вход, на коэффициент C_i по модулю 3;
- сумматоры по модулю 3.

При этом, если применяется регистр сдвига с k разрядами, то $N = 3^k - 1$, где N – число элементарных символов в периоде троичной M -последовательности.

Сумматор по модулю 3 реализует алгоритм, заданный табл. 1.

Умножение двух чисел по модулю 3 определяется табл. 2.

Необходимо отметить, что при заданном k период последовательности определяется схемой включения отводов сдвигающего регистра в цепях обрат-

■ Таблица 1

+	0	1	2
0	0	1	2
1	1	2	0
2	2	0	1

■ Таблица 2

×	0	1	2
0	0	0	0
1	0	1	2
2	0	2	1

ной связи, а именно коэффициентами C_i . Период последовательности может быть получен и меньше максимально возможного. Выбор схемы соединения отводов для получения максимального периода последовательности при заданных числе разрядов регистра сдвига и основании системы счисления к настоящему моменту полностью определен и обеспечивается с помощью таблиц неприводимых многочленов. Например, для троичных последовательностей возможны следующие сочетания коэффициентов:

- для $k = 3$ 012, 102, 122, 212;
- для $k = 4$ 0011, 1221, 0021, 2001, 1001, 2111, 1121, 2211.

Анализ структурных свойств двоичных и троичных M -последовательностей позволяет выявить общие закономерности их формирования и обобщить полученные результаты для M -последовательностей с основанием n .

1. Период M -последовательности равен $n^k - 1$, где n – основание последовательности, а k – степень образующего многочлена.

2. M -последовательность имеет наибольший период среди линейных рекуррентных последовательностей с равными степенями их характеристических многочленов.

3. В M -последовательности порядка k содержатся все k -значные комбинации, кроме нулей.

4. Количество нулей в M -последовательности с основанием n равно $n^{k-1} - 1$, количество остальных чисел одинаково и определяется как n^{k-1} .

5. Если $\{a_i\}$ – M -последовательность с основанием n , а $\{a_{i+m}\}$ – та же M -последовательность, но сдвинутая на m символов относительно первой, то сумма по модулю n этих двух M -последовательностей будет M -последовательностью, но с другим сдвигом.

6. M -последовательность в общем случае состоит из $n-1$ частей. Каждая последующая часть получается из предыдущей умножением на L по модулю n , где $L = 2$ для троичных M -последовательностей.

Примеры троичных M -последовательностей.

- 1. $k=3, C_1 = 2, C_2 = 1, C_3 = 2$
1 1 1 2 1 0 2 0 2 2 0 0 1 2 2 2 1 2 0 1 0 1 1 0 0 2
- 2. $k=3, C_1 = 0, C_2 = 1, C_3 = 2$
1 1 1 0 0 2 0 2 1 2 2 1 0 2 2 2 0 0 1 0 1 2 1 1 2 0
- 3. $k=4, C_1 = 0, C_2 = 0, C_3 = 2, C_4 = 1$
1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 2 1 0 1 1 1 2 0 0 2 2 0 1 0 2 2
1 1 0 1 0 1 2 1 2 2 1 2 0 1
2 2 2 2 0 0 0 2 0 0 1 2 0 2 2 2 1 0 0 1 1 0 2 0 1 1
2 2 0 2 0 2 1 2 1 1 2 1 0 2

Авторами разработан программный комплекс, позволяющий моделировать устройства формирования и обработки M -последовательностей с различными основаниями. Получены результаты, которые представляют определенный интерес.

В качестве примера рассмотрим двоичную (рис. 2) и троичную (рис. 3) M -последовательности с периодами в 7 и 8 символов соответственно. На рис. 4 и 5 представлены графики их АКФ.

Таким образом, АКФ троичной M -последовательности является локально оптимальной (имеет лишь

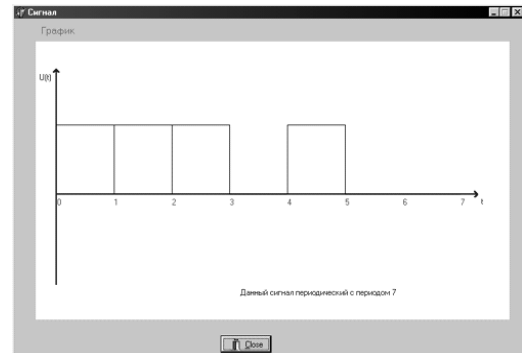


Рис. 2. Двоичная M -последовательность

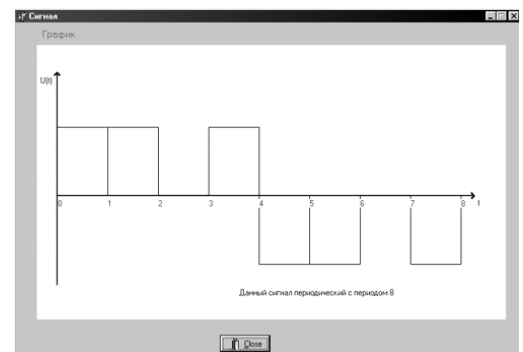


Рис. 3. Троичная M -последовательность

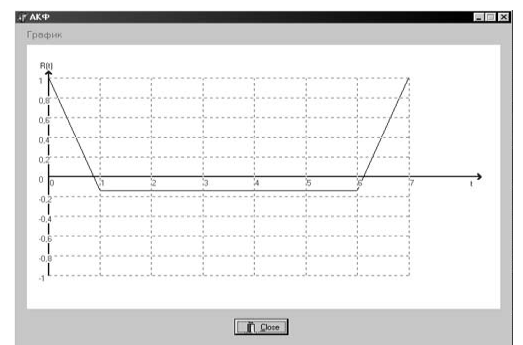


Рис. 4. АКФ двоичной M -последовательности

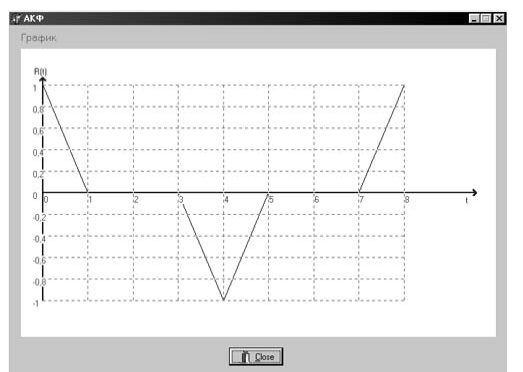
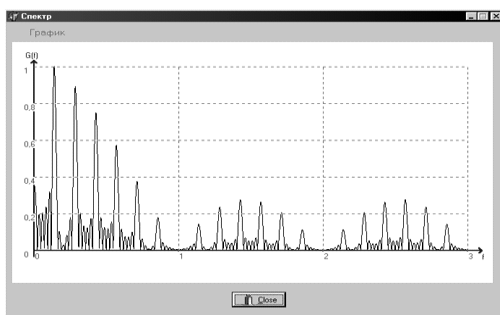
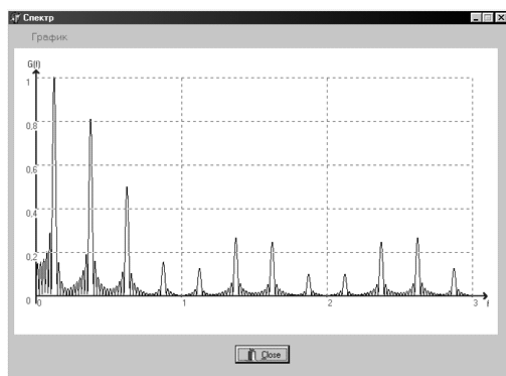


Рис. 5. АКФ троичной M -последовательности



■ Рис. 6. График спектра двоичной M -последовательности



■ Рис. 7. График спектра троичной M -последовательности

один ненулевой боковой пик, равный -1 и расположенный в середине периода). Это свойство позволяет на основе сдвигов троичной M -последовательности сформировать систему ортогональных сигналов.

Спектры M -последовательностей представлены на рис. 6 и 7.

В спектре троичной M -последовательности отсутствует постоянная составляющая. По сравнению со спектром двоичной последовательности спектральные линии располагаются реже. Это свойство спектра троичной M -последовательности позволяет уменьшить степень влияния на радиолинию узкополосных помех.

Таким образом, проведенный анализ автокорреляционных функций и спектров показал определяющее преимущество троичных M -последовательностей над двоичными в плане применения их в радиоканалах, к помехозащищенности которых предъявляются повышенные требования.

Литература

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
3. Диксон Р. К. Широкополосные системы: Пер. с англ. / Под. ред. В. И. Журавлева. М.: Связь, 1979. 302 с.