

УДК 621.396.4

А.А. Бритов, С.В. Козелков, А.Н. Макеенок, А.М. Подгурский

ГП «Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления», Киев

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассматриваются возможности снижения уровня боковых лепестков импульсных, линейно-частотно модулированных (ЛЧМ) сигналов и импульсных фазо-кодированных (ФКМ) сигналов как на основе кодов Баркера, так и на основе M -последовательностей.

Ключевые слова: навигационная РЛС, сложные сигналы, боковые лепестки отклика согласованного фильтра, код Баркера, M -последовательность, линейно-частотная модуляция, фазо-кодированная модуляция, быстрая свертка.

Введение

Анализ современного состояния. Одной из проблем использования сложных сигналов в радиолокации является наличие в реакции согласованного фильтра (в корреляционной функции сигнала) боковых лепестков достаточно большого уровня [1].

Наличие боковых лепестков приводит к тому, что при облучении крупных целей, дающих мощный отраженный сигнал, возможно появление множества ложных целей в соседних элементах дальности. Фиксация ложных целей в навигационных РЛС может приводить к неправильной оценке окружающей обстановки и, соответственно, к принятию неверных решений при управлении судном. Поэтому при разработке системы формирования и обработки сложных сигналов в навигационных РЛС необходимо предусмотреть средства уменьшения уровня боковых лепестков отклика согласованного фильтра.

В настоящее время наиболее широко используются сложные сигналы с линейной частотной модуляцией и с фазо-кодированной модуляцией. В последнем случае для модуляции сигнала используются псевдослучайные последовательности, включающие коды Баркера или M -последовательности.

Постановка задачи. В статье рассматриваются возможности снижения уровня боковых лепестков импульсных ЛЧМ сигналов и импульсных ФКМ сигналов как на основе кодов Баркера, так и на основе M -последовательностей, и применение для этого линейных автокорреляционных функций (АКФ).

Основной материал

1. Снижение уровня боковых лепестков ЛЧМ сигнала. Отклик согласованного фильтра для ЛЧМ сигнала приведен на рис. 1.

Способ понижения боковых лепестков функций такого вида давно известен в цифровой обработке сигналов и широко применяется для проектирования КИХ-фильтров так называемым методом окон, или методом рядов Фурье [2, 3]. Состоит он в сглаживании АЧХ фильтра, которая имеет вид, подобный корреляционной функции на рис. 1, и состоит из основного лепестка и ряда боковых с помощью некоторого фильтра с короткой импульсной характеристикой (КИХ-фильтра). Прямая реализация такого фильтра в частотной области требует выполнения достаточно большого объема операций для вычисления свертки.

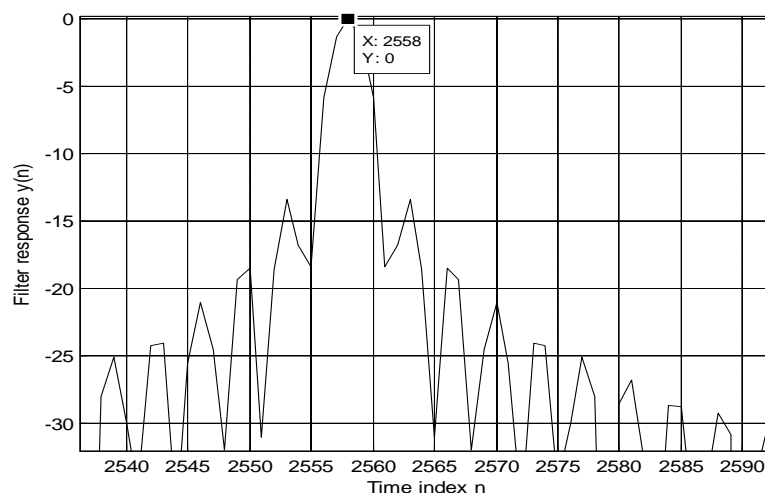


Рис. 1. Отклик согласованного фильтра импульса с ЛЧМ. Координаты первых боковых лепестков составляют (2553, -13,44 дБ), (2563, -13,44 дБ), ширина главного лепестка 6 отсчетов

Свертку в частотній області по теореме о свертке [2] можно заменить поэлементным перемножением последовательностей, представляющих собой обратные преобразования Фурье частотной характеристики проектируемого фильтра и импульсной характеристики (ИХ) сглаживающего фильтра, во временной области. При этом, обратное преобразование Фурье импульсной характеристики сглаживающего фильтра, определенной в частотной области, во временной области представляет собой функцию, которая называется весовой функцией, или окном.

Известно большое количество окон, их свойства подробно изучены [4 – 6]. Одним из наиболее популярных окон является окно Хемминга. Популярность его объясняется тем, что дискретное преобразование Фурье от него содержит только 3 ненулевых отсчета, равных минус 0,23, 0,54 и минус 0,23. Во временной области это окно обычно записывают в виде

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(\left(2 \pi / N\right) \cdot n\right), 0 \leq n < N. \quad (1)$$

Для сглаживания во временной области АКФ сложного сигнала последовательно с согласованным включают сглаживающий фильтр. При использовании окна Хемминга сглаживающий фильтр будет представлять собой КИХ-фильтр с тремя отличными от 0 коэффициентами, значения которых приведены выше. Соответственно, его частотная характеристика будет описываться выражением (1), так как эти характеристики связаны двумя преобразованиями Фурье.

Реализация согласованного фильтра в виде быстрой свертки существенно облегчает и сглаживание, так как нет необходимости в реализации сглаживающего фильтра во временной области. Вместо этого в алгоритме быстрой свертки в качестве частотной характеристики используется произведение частотной характеристики согласованного фильтра на частотную характеристику сглаживающего фильтра, которая в данном случае описывается выражением (1).

Снижение уровня боковых лепестков с помощью окон достигается ценой расширения главного лепестка, что приводит к уменьшению разрешающей способности по дальности. Этим ограничивается возможность уменьшения боковых лепестков.

Рассмотрим результаты сглаживания отклика согласованного фильтра с помощью некоторых окон. На рис. 2 – 4 по горизонтальной оси отложены номера отсчетов сигнала, по вертикальной – соответствующие значения выходного сигнала согласованного фильтра в децибелах. Соотношение между уровнем боковых лепестков и шириной основного лепестка можно изменять, меняя длину окна. Окно Чебышева, кроме того, содержит параметр, который позволяет регулировать уровень боковых лепестков [4].

Снижение уровня боковых лепестков ФКМ сигнала. Известны несколько последовательностей Баркера различной длины (табл. 1) [7]. Множество других последовательностей Баркера можно получить с помощью инверсии знака, циклического сдвига и сложения по модулю 2, но эти производные

последовательности обладают теми же свойствами, что и приведенные в табл. 1, поэтому в дальнейшем мы их не рассматриваем.

Как показывают рис. 5 и 6, линейные АКФ последовательностей, содержащих 11 и 13 элементов, имеют боковые лепестки, близкие по абсолютной величине и отличающиеся знаком.

Отклик от точечной цели на выходе согласованного фильтра представляет собой именно АКФ кодовой последовательности. Следовательно, понижения боковых лепестков можно добиться, если использовать для модуляции следующий алгоритм:

1 шаг. Последовательно излучаются импульсы, модулированные 11-ти и 13-ти элементными последовательностями.

2 шаг. Отраженные сигналы, соответствующие каждой модулирующей последовательности, подаются на свой согласованный фильтр.

3 шаг. Выходы согласованных фильтров складываются с учетом задержек фильтров.

В результате суммарный сигнал будет иметь главный лепесток, равный сумме главных лепестков частных откликов, а его боковые лепестки будут равны алгебраической сумме боковых лепестков двух последовательностей.

В случае использования 11-элементной и 13-элементной последовательностей остаточные боковые лепестки составят

$$\frac{1}{11} - \frac{1}{13} = \frac{2}{143} = 0,014. \quad (2)$$

Но последний, 12-й боковой лепесток 13-элементной последовательности останется некомпенсированным. Некоторый выигрыш будет и в этом случае, обусловленный увеличением главного лепестка почти в 2 раза.

Реализация описанной выше возможности компенсации боковых лепестков АКФ кода Баркера осложняется чередованием частот при частотно-зависимой антенне. Должен быть разработан алгоритм совместного чередования частот и последовательностей, который обеспечит получение двух откликов с разными модулирующими последовательностями от одного элемента дальности за небольшое время, в течение которого состояние цели не может существенно измениться. Существование такого алгоритма пока неочевидно.

Возможность уменьшения боковых лепестков М-последовательностей путем комбинации М-последовательностей не так очевидна, как это было в случае кодов Баркера. Это обусловлено тем, что структура боковых лепестков линейной АКФ М-последовательностей не так регулярна. Поэтому задача решалась путем прямого перебора пар последовательностей одинаковой длины. Комбинировать последовательности разной длины нет смысла, т.к. длины М-последовательностей отличаются в 2 раза. При этом половина боковых лепестков более длинной последовательности в любом случае останется некомпенсированной.

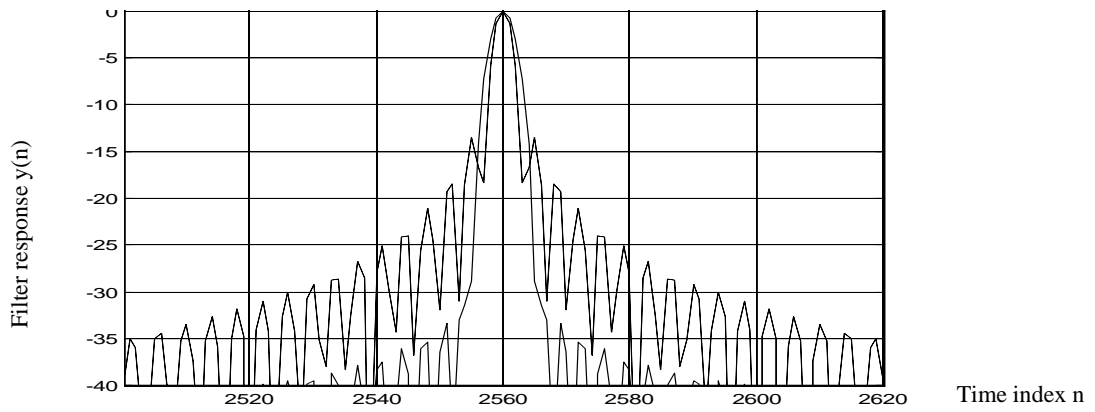


Рис. 2. Отклик согласованного фильтра при использовании окна Хемминга.
 Уровень первых боковых лепестков равен минус 33 дБ (в моменты времени 2551, 2569),
 ширина главного лепестка по уровню 13 дБ – 8 отсчетов.
 Для сравнения штриховой линией показан отклик без использования окна

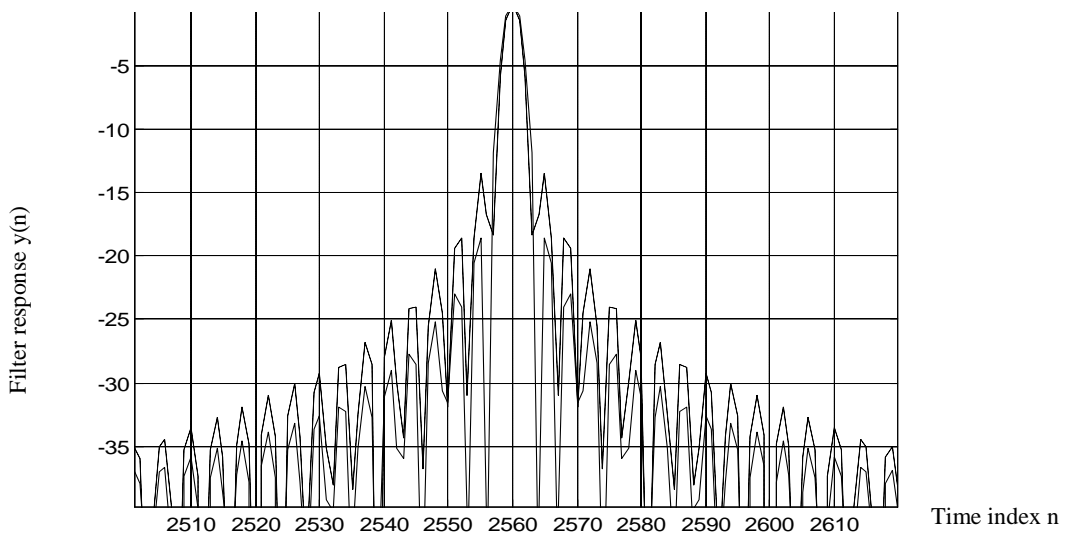


Рис. 3. Отклик согласованного фильтра при использовании окна Чебышева (параметр 40).
 Уровень первых боковых лепестков равен -18 дБ (в моменты времени 2555, 2565),
 ширина главного лепестка по уровню 13 дБ – 6 отсчетов.
 Для сравнения штриховой линией показан отклик без использования окна

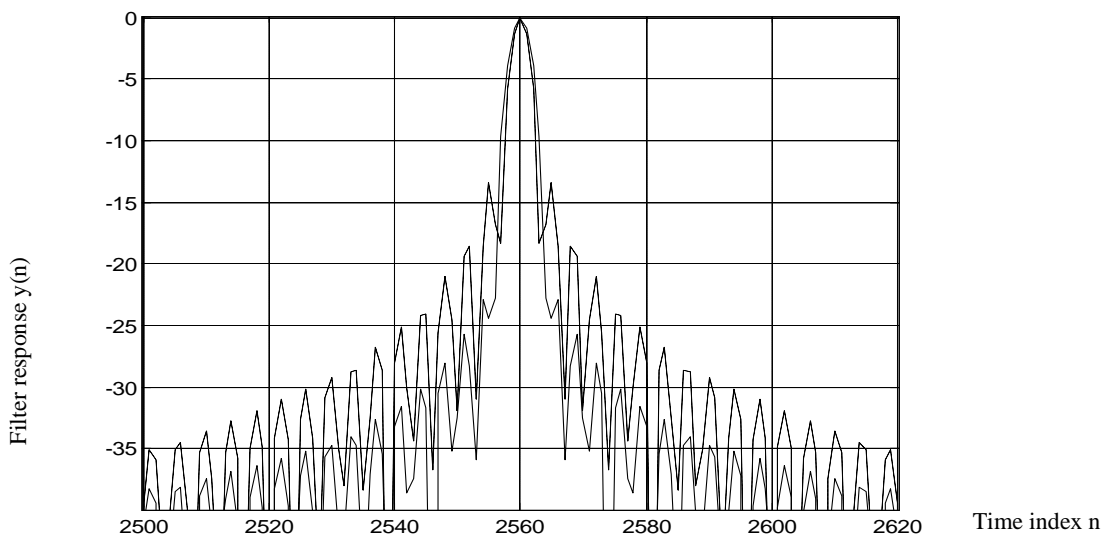


Рис. 4. Отклик согласованного фильтра при использовании окна Чебышева (параметр 60).
 Уровень первых боковых лепестков равен -23 дБ (в моменты времени 2554, 2566),
 ширина главного лепестка по уровню 13 дБ – 6.5 отсчетов.
 Для сравнения штриховой линией показан отклик без использования окна

Последовательности Баркера

Длина последовательности	Отсчеты последовательности												Уровень боковых лепестков АКФ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
3	1	1	-1											-1/3
4	1	1	-1	1										1/4
5	1	1	1	-1	1									1/5
7	1	1	1	-1	-1	1	-1							-1/7
11	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1			-1/11
13	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1/13

Амплитуда (ед.)

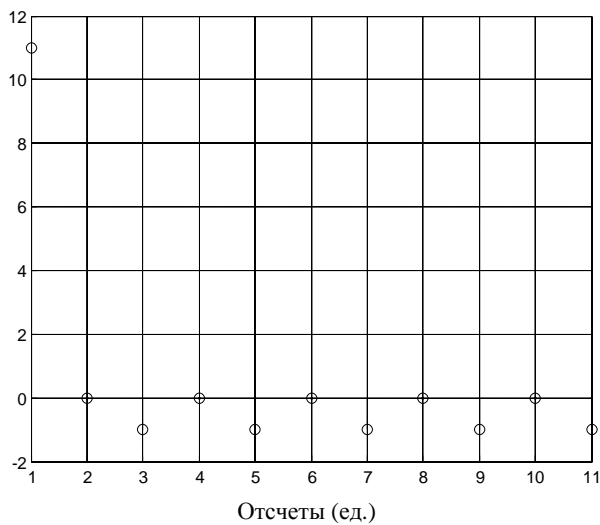


Рис. 5. Линейная АКФ последовательности Баркера длины 11

Амплитуда (ед.)

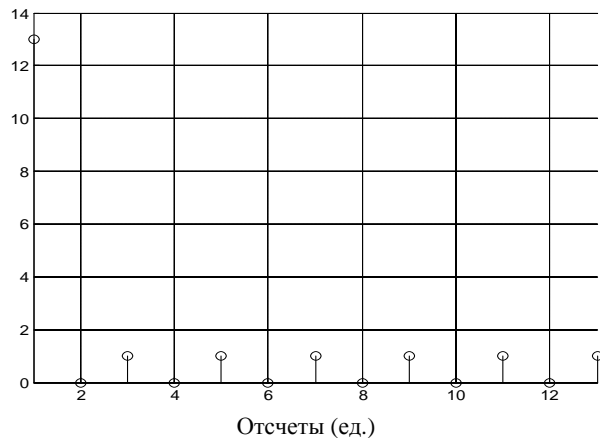


Рис. 6. Линейная АКФ 13-ти элементной последовательности Баркера

Полученные результаты (табл. 2, 3) показывают, что путем суммирования выходов согласованных фильтров для двух последовательностей одинаковой длины можно добиться снижения уровня боковых

лепестков. Однако это снижение незначительно. Перечень возможных M-последовательностей взят из [8] с некоторыми коррекциями, так как в книге имеются опечатки.

Таблица 2

Максимальные уровни боковых лепестков одиночных неперiodических M-последовательностей

Длина M-последовательности	Обратные связи регистра сдвига, реализующего данную M-последовательность	Максимальный уровень боковых лепестков линейной АКФ данной M-последовательности
127	7, 1	11
	7, 3	11
	7, 3, 2, 1	11
	7, 4, 3, 2	12
	7, 6, 4, 2	12
	7, 6, 3, 1	13
	7, 6, 5, 2	11
	7, 6, 5, 4, 2, 1	11
255	7, 5, 4, 3, 2, 1	12
	8, 4, 3, 2	17
	8, 6, 5, 3	17
	8, 6, 5, 2	18
	8, 5, 3, 1	19
	8, 6, 5, 1	16
	8, 7, 6, 1	18
	8, 7, 6, 5, 2, 1	18
511	8, 6, 4, 3, 2, 1	17
	9, 4	21
	9, 6, 4, 3	23
	9, 8, 5, 4	22
	9, 8, 4, 1	24
	9, 5, 3, 2	23
	9, 8, 6, 5	24
	9, 8, 7, 2	27
	9, 6, 5, 4, 2, 1	21
9, 7, 6, 4, 3, 1	21	
9, 8, 7, 6, 5, 3	29	

Таблиця 3

Минимальные уровни боковых лепестков сумм АКФ двух М-последовательностей одинаковой длины

Длина М-последовательности	Комбинируемые последовательности	Максимальный уровень боковых лепестков (приведенный к длине одиночной последовательности делением на 2)
127	7 1 7 3	7
255	8 5 3 1 8 6 4 3 2 1	11
511	9 8 4 1 9 5 3 2	17

Выводы и предложения по дальнейшему использованию

В навигационных импульсных РЛС для уменьшения уровня боковых лепестков целесообразно применять сглаживание с помощью окон при использовании ЛЧМ импульсов или чередование последовательностей Баркера длины 11 и 13 при использовании ФКМ импульсов.

Комбинирование различных М-последовательностей дает значительно меньший эффект, поэтому его использование нецелесообразно.

Для принятия решения об использовании комбинирования различных последовательностей для понижения боковых лепестков необходимо проана-

лизировать степень усложнение алгоритма обработки и аппаратуры первичной обработки, необходимые для его реализации, особенно при чередовании несущих частот в случае использования дисперсных антенн.

Список литературы

1. Морская радиолокация / Под ред. В.И. Винокурова – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с., ил.
2. Рабинер Л. Теория и применения цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с., ил.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: Изд-во КвіЦ, 2000. – 340 с.
4. Херрис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье / Ф.Дж.Херрис // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 1. – С. 60-96.
5. Зарецкий С.В. Метод подавления боковых лепестков сигнала в виде бинарной фазоманипулированной последовательности [Электронный ресурс] / С.В. Зарецкий, Е.А. Сельменев // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – Режим доступа к документу: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/078.pdf>.
6. "Grand clutter suppression in noise radar" Prac. Radar 2004; October 2004.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с., ил.
8. Диксон Р.К. Широкополосные системы / Р.К. Диксон. – М.: Связь, 1979. – 302 с.

Поступила в редколлегию 22.01.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Ю. Ильин, ГП «Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления», Киев.

ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ БОКОВИХ ПЕЛЮСТОК СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ

О.А. Бритов, С.В. Козелков, О.М. Макеєнок, А.М. Подгурський

В статті розглядаються можливості зниження рівня бокових пелюсток імпульсних лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів та імпульсних фазо-кодово модульованих (ФКМ) сигналів як на основі кодів Баркера, так і на основі М-последовательностей.

Ключові слова: навігаційна РЛС, складні сигнали, бокові пелюстки, відгук погодженого фільтра, код Баркера, М-последовательність, лінійно-частотна модуляція (ЛЧМ), фазо-кодова модуляція (ФКМ), швидка згортка.

REDUCTION OF LEVEL OF LATERAL PETALS OF DIFFICULT SIGNALS

A.A. Brytov, S.V. Kozelkov, A.N. Makeenok, A.M. Podgursky

In article possibilities of fall of level of lateral petals pulse linearly-frequency modulation (LFM) signals and pulse fazo-code modulation (FKM) signals both on the basis of codes Баркера, and on the basis of M - sequences are considered.

Keywords: navigating РЛС, difficult signals, lateral petals of the response of the co-ordinated filter, Barkers code, M-sequence, linearly-frequency modulation (LFM), fazo-code modulation (FKM), fast convolution.