

Исследование внутриимпульсной модуляции зондирующих сигналов различными модулирующими функциями для расширения возможностей РСА

А.М. Тарасенко¹, О.Е. Цветков²

¹ АО «Концерн «Вега», 121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, e-mail: asianna@list.ru

² ЗАО «АЭРОКОН», г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, 1, e-mail: al.vetckov@yandex.ru

В работе рассмотрена внутриимпульсная модуляция зондирующего сигнала M-последовательностями, кодами Голда и последовательностями Лежандра, Якоби. Также исследовались различные способы построения зондирующего сигнала на базе их комбинаций и возможности применения для модуляции стохастических функций.

This paper deals with multiple methods of sounding signal phase-code modulation: by M-sequences, Gold's codes, Legendre and Jacobi sequences. Suitability and reasonability of noise-type signal application as SAR sounding signals is also analyzed.

Выбор зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) определяется рядом требований, предъявляемым к целевым характеристикам РСА: максимальной дальностью действия, пространственной разрешающей способностью, динамическим диапазоном радиолокационного изображения (РЛИ), радиометрической чувствительностью, подавлением ложных изображений, помехоустойчивостью.

Для получения высокой разрешающей способности необходимо применять сигналы с широкой полосой, что эквивалентно использованию очень коротких зондирующих импульсов, но при этом частота повторения импульсов не может превышать максимальной величины, при которой обеспечивается условие однозначности формирования РЛИ по дальности. Эти два условия приводят к тому, что скважность излучаемых импульсов РСА должна быть очень высокой. В то же время требования к максимальной дальности действия и максимальной радиометрической чувствительности РСА определяют использование зондирующих сигналов с высоким уровнем средней излучаемой мощности (сотни ватт), что для передатчиков с ограниченной пиковой мощностью означает применение сигналов с малым значением скважности. Указанное противоречие снимается с помощью метода внутриимпульсной модуляции зондирующего сигнала, который позволяет излучать относительно протяженные импульсы с большой шириной спектра [1].

В качестве системного критерия оценки характеристик РСА выбран вид двумерной функции отклика (ФО) на одиночную точечную цель (ОТЦ). Для оценки качества радиолокационного изображения анализировались следующие параметры: вид боковых лепестков (БЛ), их распределение, относительный и интегральный уровень, ширина главного максимума, по которой определяется пространственное разрешение, а также его уровень, по которому определяются энергетические характеристики радиолокатора.

Целью работы является выявление зависимости этих параметров от способа формирования зондирующего сигнала (ЗС) и поиск такого способа, который бы обеспечил высокое качество РЛИ. Также учитывалась сложность обнаружения сигнала и его устойчивость к распознаванию.

Обычно в РСА в качестве широкополосного сигнала используют сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Однако при большом коэффициенте сжатия, т. е. при больших значениях девиации частоты ЛЧМ-сигнала, формирование и обработка такого сигнала вызывают большие сложности. Технически более простым решением является применение в РСА внутриимпульсной фазовой кодовой манипуляции (ФКМ) [2].

Среди последовательностей, используемых для внутриимпульсной фазовой модуляции, часто применяется код Баркера. Он имеет идеальную автокорреляционную функцию для конечного сигнала, однако максимальный известный код Баркера имеет только 13 элементов. Поэтому при необходимости излучения более продолжительных сигналов приходится прибегать к искусственному удлинению кода путем перемножения двух последовательностей, что приводит к потере основных преимуществ кода.

M-последовательность (МП), в отличие от кода Баркера, имеет идеальную автокорреляционную функцию только для бесконечного сигнала, а при использовании конечного сигнала на автокорреляционной функции появляются весьма значительные боковые пики. Зато для M-последовательности определена методика генерирования сколь угодно больших последовательностей, при этом их генерация легко реализуется схемотехнически. Также одним из преимуществ M-последовательностей является наличие множества различных реализаций последовательности одной длины, которые не коррелируют между собой. При использовании M-последовательности для радиолокаторов с синтезированной апертурой, за счет использования различных кодов в процессе синтеза апертуры боковые пики автокорреляционных функций сглаживаются. Это происходит из-за того, что у разных M-последовательностей одной и той же длины боковые пики не совпадают. Различные варианты построения зондирующего сигнала на базе M-последовательностей подробно рассматривались в [3, 4].

Как и МП, последовательности Лежандра, являются минимаксными. В теории чисел символы Лежандра вводятся при рассмотрении уравнений второй степени: $x^2 \equiv n \pmod{N}$, причём общий наибольший делитель $(x, N) = 1$. Решить данное уравнение означает найти такое x , при котором оно превращается в тождество. Уравнение имеет решения не при любых значениях n . Значения n , при которых уравнение имеет решения, называются квадратичными вычетами, а значения n , при которых уравнение не имеет решений, называются квадратичными невычетами. Символ Лежандра определяется следующим образом:

$$n \pmod{N} = 1, \text{ когда } n \text{ - квадратичный вычет по модулю } N ;$$

$$n \pmod{N} = -1, \text{ когда } n \text{ - квадратичный невычет по модулю } N .$$

Он определен для всех n , не делящихся без остатка на N , причём N – простое число, большее двух. В отличие от M-последовательности, существует лишь одна последовательность Лежандра конкретной длины, однако разнообразие значений длин, для которых возможно их построение, гораздо больше. Так, на отрезке от 463 до 523 существует 8 последовательностей Лежандра (их длины 463, 467, 479, 487, 491, 499, 503, 523), что делает возможным применение в РСА нескольких соседних по длине последовательностей, дополненных нулями, для модуляции зондирующих импульсов. Таким образом, последовательности Лежандра являются достаточно мощным классом бинарных кодов с минимаксной периодической автокорреляционной функцией.

Также представляют интерес коды Голда – тип псевдослучайных последовательностей, которые могут быть сгенерированы путем суммирования по модулю 2 двух M-последовательностей одинаковой длины. Результирующие коды Голда имеют ту же самую длину, что и исходные M-последовательности.

Значимость этих последовательностей обусловлена их очень низкой взаимной корреляцией. Коды Голда пользуются популярностью в современных CDMA системах. Они используются в глобальной спутниковой навигационной системе GPS для разделения сигналов космических аппаратов, в 3G системе мобильной связи стандарта WCDMA для скремблирования CDMA кодов.

Кроме широко применяемых радиолокаторов с фазокодовой и линейной частотной модуляцией, существуют проекты шумовых радиолокаторов [5]. В связи с этим были проведены исследования характеристик РСА при замене регулярных модулирующих функций шумоподобными (стохастическими), сформированными с использованием современных цифровых средств. При этом функции, используемые для модуляции импульсов зондирующего сигнала, формировались цифровым генератором случайных чисел и включались в заголовок радиоголограммы для формирования опорных функций сжатия по дальности.

В процессе моделирования были исследованы два вида дискретной модуляции радиосигналов, используемые в современных системах связи: фазовая и квадратурная. В обоих случаях представляла интерес зависимость характеристик боковых лепестков функции отклика от разрядности кода.

Фазоманипулированный m -позиционный сигнал формировался в виде комплексной огибающей, задаваемой вектором из произвольного числа K отсчётов, где номера позиций модуляции $l_k \in \{1, \dots, m\}$ задаются в виде последовательности случайных целых чисел с равномерным распределением

$$\dot{a}_k = \exp\left\{j \cdot 2\pi \cdot \frac{l_k}{m}\right\}, \quad k = 1, \dots, K.$$

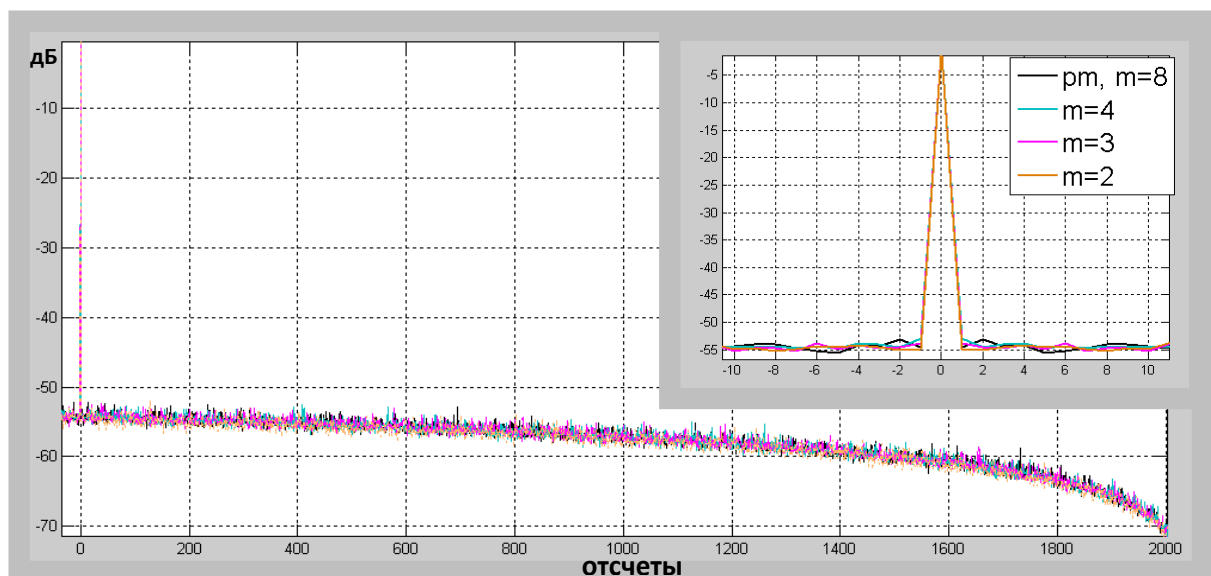


Рис. 1. Проекция двумерных функций отклика на плоскость дальность-уровень при фазовой модуляции зондирующего сигнала по закону случайных чисел для различных m

Сигнал с m^2 -позиционной квадратурной модуляцией задавался комплексной огибающей в виде

$$\dot{a}_k = I_k + j \cdot Q_k,$$

где центрированные значения квадратур отсчётов заданы по закону $I_k = X_k - \frac{m+1}{2}$,

$X_k \in \{1, \dots, m\}$ – последовательность случайных целых чисел с равномерным распределением.

Как видно из рис. 1 и 2, боковые лепестки и главный максимум функции отклика для сигналов с модуляцией стохастическими функциями не зависят от количества позиций m и вида дискретной модуляции.

Для сравнения различных способов модуляции зондирующего сигнала построены матрицы ЗС с разными видами модуляции, но с одинаковой базой и одинаковой длиной сеанса, а также двумерные функции отклика для них.

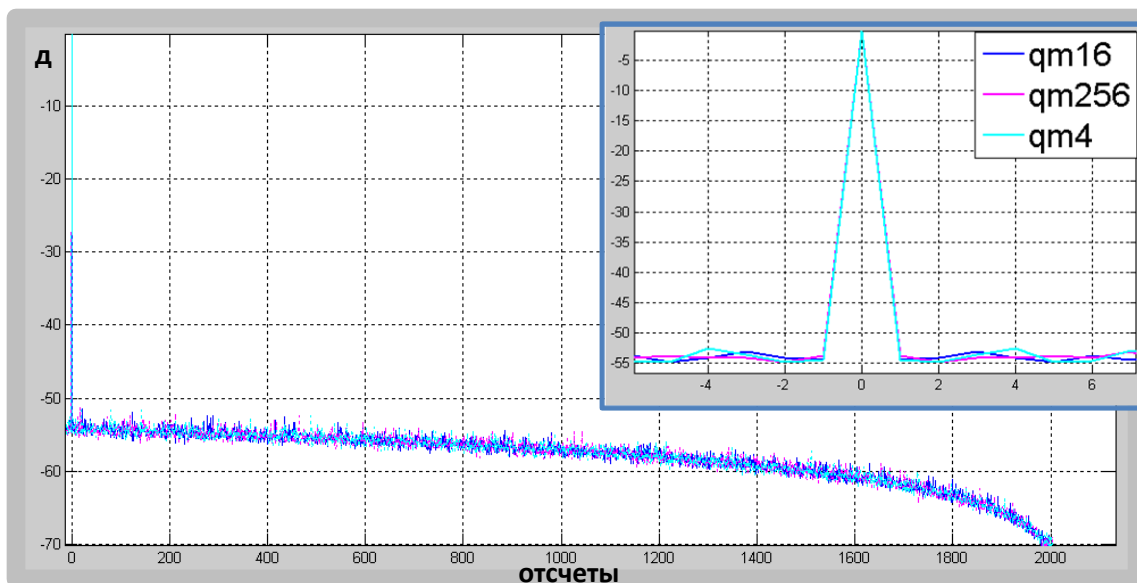


Рис. 2. Проекция двумерных функций отклика на плоскость дальность-уровень при квадратурной амплитудной модуляции зондирующего сигнала по закону случайных чисел для различных m

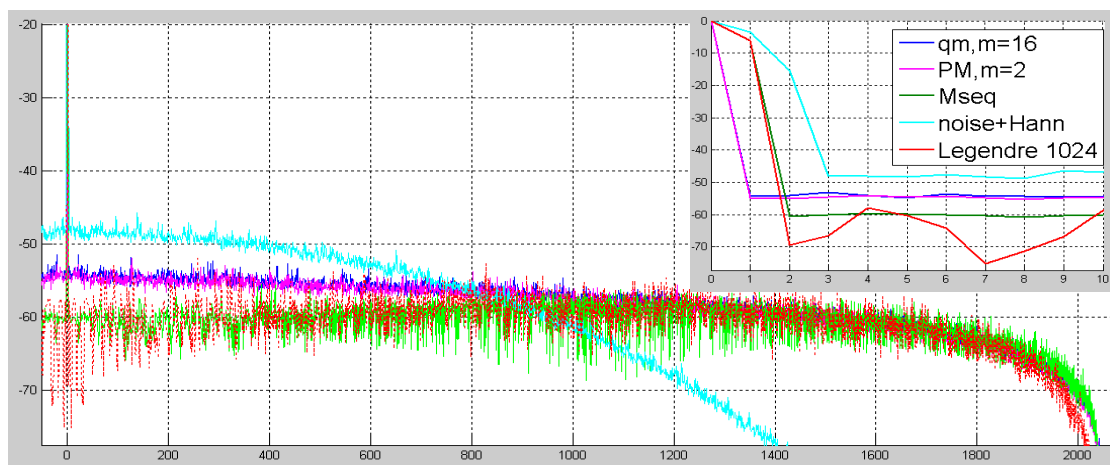


Рис. 3. Проекция двумерных функций отклика на плоскость дальность-уровень (синий график соответствует квадратурной модуляции зондирующего сигнала по закону случайных чисел ($m=16$), розовый – фазовой модуляции по закону случайных чисел ($m=2$), зелёный – фазовая модуляция М-последовательностью 10 порядка, голубой – фазовая модуляции по закону случайных чисел ($m=8$) с наложением окна Ханна, красный – фазовая модуляция последовательностью Лежандра длиной 1024)

При модуляции зондирующего сигнала стохастическими функциями и последовательностями Лежандра получаемая функция отклика РСА на одиночную точечную цель имеет низкий уровень максимальных боковых лепестков, сравнимый с достигаемым при использовании ансамблей М-последовательностей.

Боковые лепестки у шумоподобных сигналов во всей полосе изображения, в которой определена функция отклика, имеют вид нормального шума с мощностью, постоянной по азимуту и убывающей при удалении от максимума по дальности, и не

имеют локальных максимумов, как в случаях ЛЧМ, М-последовательностей и их ансамблей. Вопрос выбора взвешивающих функций требует дальнейшей проработки.

Таблица 1. Показатели качества радиолокационного изображения в зависимости от вида модуляции зондирующего сигнала

	m -позиционная фазовая модуляция				m^2 -позиционная квадратурная модуляция			ФКМ, М-последовательность (10 порядок)	ФКМ, последовательность Лежандра (1024)	ЛЧМ
	$m=2$	$m=4$	$m=8$	$m=8^*$	$m=2$	$m=4$	$m=16$			
Максимальный уровень БЛ, дБ	-51,90	-52,55	-52,22	-45,73	-51,90	-51,47	-51,34	-55,50	-51,9	-13,6/ -42,33**
Интегральный уровень БЛ, дБ	-2,62	-2,61	-2,62	-2,62	-2,62	-2,62	-2,62	-4,93	-4,94	-7,47/ -10,16**
Примечание:	* с окном Ханна				** с окном Хэмминга					

Использование шумоподобных сигналов и сигналов, модулированных МП, целесообразно для задач обнаружения и распознавания объектов в виду низкого уровня максимальных боковых лепестков. Параметры функции отклика для последовательности Лежандра свидетельствуют о том, что этот вид псевдослучайных последовательностей может быть интересен для применения в РСА и заслуживает более подробного изучения.

Для задач определения границ раздела сред и других, требующих высокого радиометрического разрешения, предпочтение следует отдать регулярным функциям, в частности ЛЧМ, т.к. она обеспечивает наиболее низкий интегральный уровень боковых лепестков функции отклика.

Применение стохастических функций для модуляции зондирующих сигналов РСА обеспечивает подавление помех неоднозначности по дальности без необходимости применения специальных алгоритмов.

Шумоподобные сигналы имеют преимущества при проведении скрытой съемки, так как они мало отличимы от сигналов связанных станций.

Исходя из вышеизложенного, целесообразным является применение в одном РСА двух или более способов модуляции зондирующего сигнала, чтобы максимально использовать преимущества, которые дает каждый из них для получения радиолокационного изображения с требуемыми характеристиками.

Предложенные сигналы были сформированы на несущей частоте с использованием одной ПЛИС, что позволяет осуществить в ближайшем будущем разработку радиолокатора, в котором, кроме хорошо изученной ЛЧМ, будет реализована возможность выбора другого закона формирования зондирующего сигнала в соответствии с целями съёмки и требованиями, предъявляемыми заказчиком к радиолокационным изображениям для решения практических задач.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора комического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
2. Радиолокационные станции воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков и др. Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 530 с.
3. Тарасенко А.М. Исследование влияния способов формирования зондирующего сигнала космического РСА на качество радиолокационного изображения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №5. – С. 13-19.
4. Кудря А.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Расширение возможностей использования М-последовательностей в РСА // II Всероссийские Армандовские чтения [Электронные ресурсы]: Радиофизические методы в дистанционном зонировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26-28 июня 2012 г.). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. – С.518-531.
5. Lukin K.A. The Principles of Noise Radar Technology // Proc. of NRTW-2002. – Yalta, 2002. – Pp. 13-22.