# Имитация и анализ сигналов различных радиотехнических систем средствами аппаратно-программного комплекса экспериментальной отработки

## А.М. Тарасенко

AO «Концерн «Вега», г. Москва, asianna@list.ru

Аннотация — В работе приведены и проанализированы сигналы современных и перспективных радиоэлектронных средств с различными видами модуляции. Предложены новые способы составления двумерных зондирующих сигналов для радиолокаторов с синтезированной апертурой, обеспечивающие уменьшение уровней боковых лепестков по сравнению с традиционными. Сформулированы критерии предварительной оценки свойств таких сигналов при их использовании в радиовидении, показано, что для их анализа целесообразно использовать двумерную функцию отклика. Представлен аппаратно-программный комплекс, формирующий сигналы на несущей частоте из цифровых моделей, осуществляющий их запись и анализ. Комплекс используется для отработки и тестирования радиотехнических систем различного назначения.

Ключевые слова — цифровая обработка сигналов, автокорреляция, уровень боковых лепестков, двумерная функция отклика, радиотехнические системы.

## I. Введение

Формирование и исследование сигналов является важной задачей радиотехники. Современные сложные радиотехнические системы содержат значительное количество радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения [1], к которым предъявляются повышенные требования по качеству выходной информации.

Существует несколько путей удовлетворения предъявляемых требований. Первый – экстенсивный: увеличение мощности сигнала, коэффициентов усиления антенн. Возможности применения этих мер ограничены габаритами и схемотехническим решением стации, характеристиками ретранслятора, требованиями к скрытности, санитарными ограничениями мощности излучения и др. Второй способ – выбор закона модуляции излучаемого сигнала при его формировании, разработка более совершенных сигнальнокодовых конструкций и алгоритмов, повышающих качество обработки. Если в прошлом возможность выбора способа модуляции определялась схемотехнической реализацией, то современное развитие цифровой техники предоставляет широкие возможности для генерации сигнала с различной модуляцией, что целесообразно использовать при разработке радиотехнических средств.

Системный подход к разработке сложных радиотехнических средств подразумевает согласованный выбор аппаратных и программных решений на ранних стадиях разработки. Так, например, существует возможность оптимизации алгоритмов обработки сигналов под конкретный процессор или выбора процессора в соответствии с существующим алгоритмом, однако не всегда удаётся модифицировать уже разработанные схемотехнические решения. Таким образом, новые сигналы должны создаваться совместно с разработкой приемо-передающей аппаратуры сложных радиотехнических систем и заложенными в них алгоритмами обработки информации.

Аппаратно-программные средства комплекса экспериментальной отработки (АПКЭО) позволяют имитировать различные радиоэлектронные средства благодаря наличию новых режимов работы, а также обладают возможностями анализа сигналов.

В данной работе сформированы требования к излучаемым сигналам, средствам их анализа, а также представлены модели сигналов, которые воспроизводились комплексом экспериментальной отработки на несущих частотах для тестирования радиотехнических систем.

### II. СТРУКТУРА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

АПКЭО представляет собой многофункциональное устройство, позволяющее моделировать и излучать на несущей частоте сигналы с шириной спектра до 1 ГГц с произвольной векторной модуляцией, имитирующие широкий ряд существующих и перспективных РЭС.

В значительной мере возможности устройства по реализации режимов генерации и обработки широкополосных сигналов обеспечиваются характеристиками цифрового приёмопередатчика.

Приём широкополосных радиосигналов обеспечивается путём 14-разрядного аналого-цифрового преобразования демодулированного сигнала в двух каналах (синфазном и квадратурном) с последующей передачей полученного цифрового потока, достигающего скорости 5 ГБ/с, на твердотельный RAID-массив, соединённый с приёмопередатчиком высокоскоростными информационными интерфейсами. Во избежание задержек при передаче данных предусмотрен режим прямого доступа к памяти между приёмопередатчиком и накопителем. Генерация сигналов выполняется путём преобразования данных в сигнал в обратном порядке. Из массива, предварительно записанного на накопитель (это может быть цифровая запись принятого ранее высокочастотного сигнала или модель, построенная программным способом), данные в режиме прямого доступа к памяти поступают в передающий канал модуля, где преобразование выполняется в обратном порядке: ЦАП – комплексный видеосигнал – модуляция сигнала на несущей частоте.

Для генерации и записи сигналов используются два режима АПКЭО: непрерывный (стриминг) и импульсный (сегментированный). Эти режимы организуются аппаратными и программными средствами.

В непрерывном режиме принимаемый сигнал преобразуется в поток цифровых данных, который записывается в цифровое хранилище. Начало приема и передачи осуществляется по внешней команде. Для передачи в непрерывном режиме в память загружается подготовленный массив комплексных данных генерируемого модулирующего видеосигнала, воспроизводимого с заданной частотой дискретизации. Передача прекращается по команде или по окончании данных.

Импульсный режим предполагает преобразование входного сигнала в поток цифровых данных определенной длительности, которые размещаются в памяти как массив сегментов с метками номера сегмента и времени записи первого отсчета в сегменте. Воспроизведение сигнала также происходит из цифрового хранилища. Отключение выхода передатчика происходит по окончании воспроизведения сегмента или по команде.

В составе устройства имеется контроллер на базе процессора Xeon E5-2618L, решающий как задачи управления режимами работы АПКЭО, так и прикладные задачи по анализу цифровых моделей и записей сигналов, синтезу и исследованию характеристик функций отклика, формированию и использованию библиотеки моделей и образцов сигналов.

#### III. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИЗЛУЧАЕМЫХ СИГНАЛОВ

В системах связи при передаче информации на вход приемного тракта одновременно поступают сигналы различной амплитуды от нескольких станций. Таким образом, в результате обработки высокие боковые лепестки (БЛ) сжатых сигналов с большой амплитудой могут подавлять главные лепестки низкоуровневых сигналов, что приводит к снижению скорости передачи данных и потерям информации. В радиолокационных системах дистанционного зондирования Земли на вход приемного тракта радиолокатора также поступает композиция сложных сигналов, отраженных от близкорасположенных целей. Как следствие, высокие БЛ от объектов с большой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) скрывают отклики от объектов с малой ЭПР. Также высокие боковые лепестки могут создавать «фантомы» (ложные цели), которые искажают итоговое изображение (рис. 1). Высокий интегральный уровень боковых лепестков обуславливает «засветку» фона и затрудняет обнаружение поверхностно распределённых целей с низким коэффициентом обратного рассеяния и распознавание объектов с незначительно различающимися удельными ЭПР.

В настоящее время многие исследователи заняты поиском модулирующих функций с хорошими автокорреляционными свойствами, приближающимися к свойствам дельта-функции: «острый» главный максимум, низкие максимальный и интегральный уровни боковых лепестков [2]-[4], что важно как для связных, так и для радиолокационных систем.



Рис. 1. Радиофизическое изображение с «фантомами»

При анализе автокорреляционной функции сигнала учитывается её зависимость от факторов, оказывающих влияние на работу радиотехнической системы. В частности, межимпульсная корреляция анализируется при наличии условий возникновения неоднозначности по дальности при радиолокационной съёмке. Двумерность функции неопределённости, характеризующей импульсно-доплеровский радиолокатор, обусловлена возможным смещением частоты принимаемого одиночного импульса, отражённого от движущейся точечной цели, в то время как корреляционная обработка импульса остаётся одномерной.

В задачах дистанционного зондирования Земли все более значительное место занимают радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые при правильных схемотехнических решениях, выборе зондирующих сигналов, алгоритмов и средств обработки (сигнальных процессоров) позволяют добиться разрешающей способности, сравнимой с оптическими системами, что позволяет говорить о радиовидении [5]. Несомненными преимуществами РСА являются всепогодность, независимость от условий освещённости, возможность съёмки замаскированных объектов. Тем не менее, для борьбы с обнаружением и распознаванием сохраняется актуальной необходимость снижения мощности зондирующего сигнала, применения широкополосных сигналов со сложной модуляцией.

В случае РСА двумерная функция отклика на одиночную точечную цель является результатом сжатия

по дальности и азимуту радиоголограммы, полученной при зондировании двумерным сигналом – серией импульсов, модулированных, в общем случае, различными функциями. Если одномерные функции отклика одиночных импульсов зондирующего сигнала РСА, получаемые при их сжатии по дальности, идентичны и обладают, как правило, предсказуемыми характеристиками – максимальным и интегральным уровнями боковых лепестков, то сжатие промежуточной радиоголограммы по азимуту, при правильном выборе серии модулирующих функций позволяет улучшить характеристики двумерной функции отклика по сравнению с одномерной, анализируемой по тем же критериям. В частности, чередование модулирующих М-последовательностей в зондирующем сигнале приводит к снижению уровня максимального бокового лепестка [6], а перестройка несущей частоты импульсов и сжатие отражённого сигнала по методу межпериодного расширения спектра [7] позволяет многократно уменьшить ширину по дальности главного лепестка двумерной функции отклика (ФО) по сравнению с одномерными и, тем самым, улучшить разрешающую способность радиолокатора по дальности. Как показано в [8] при выборе закона перестройки частоты необходимо опираться на вид двумерной ФО.

В связи с вышесказанным для анализа сигналов РСА будет проводиться анализ вида двумерной ФО на одиночную точечную цель.

## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА

Зондирующий сигнал (3С) моделируется в виде матрицы комплексных отсчётов (I, Q), в которой строка соответствует одному импульсу, а количество строк равно количеству импульсов в радиолокационном сигнале. Матрица сохраняется в файл формата \*.mat и затем используется для моделирования отражённого сигнала, а также для анализа функции отклика.

Для формирования модели ЗС требуется задать следующие входные параметры: длину регистра; количество импульсов; набор признаков для определения порядка чередования последовательностей и циклических сдвигов; количество выборок имитируемого сигнала на элемент двоичной последовательности.

Для заданной длины импульса можно синтезировать разнообразные семейства двоичных модулирующих последовательностей путём комбинирования выбора номера последовательности и количества шагов циклического сдвига для каждого импульса в серии. Данные закона бинарной модуляции представляют собой пару векторов m(j) и k(j), где m - номер полинома обратной связи по таблице, к – количество шагов циклического сдвига для і-го импульса. Для формирования цифровой модели комплексной огибающей двоичная модулирующая последовательность вначале преобразуется в последовательность отсчётов «идеального» модулирующего сигнала единичной амплитуды с требуемой частотой дискретизации путём кратного повторения отсчётов. Завершающей операцией является применение формирующего фильтра для подавления боковых лепестков огибающей спектра ФМ сигнала вида sin x/x, находящихся за пределами полосы пропускания испытуемой или моделируемой системы. Полученная в результате матрица используется как в качестве модели огибающей зондирующего сигнала при моделировании отражённых сигналов, так и в качестве набора опорных функций для сжатия по дальности. Моделирование сигналов, отраженных от различных поверхностей, выходит за рамки данной статьи и описано в [9].

Для подсчета уровня боковых лепестков выбирается окрестность главного лепестка  $\Theta rx$ , имеющая размеры  $2.8\delta r \times 2.8\delta x$ , где  $\delta r, \delta x$  – ширина главного лепестка на уровне -3 дБ. Размеры этой окрестности, округлённые до целых значений – 5×5 точек.

Интегральный относительный уровень боковых лепестков рассчитывается по формуле:

ISLR = 
$$10 \cdot \log_{10} \left( 1 - \sum_{\substack{-2 \le r \le 2 \\ -2 \le x \le 2}} \left| z_{rx} \right|^2 / \sum \left| z_{rx} \right|^2 \right),$$

где x, r – координаты пиксела первичного комплексного изображения  $\dot{z}_{rr}$ .

Максимальный относительный уровень бокового лепестка определяется по формуле:

$$\mathbf{PSLR} = 20 \cdot \log_{10} \left( \left| z_{xr} \right|_{\max(x,r) \notin \Theta} / \left| z_{0,0} \right| \right).$$

Полученные относительные уровни боковых лепестков сохраняются в базу данных вместе с параметрами зондирующего сигнала для дальнейшего анализа.

## V. ФОРМИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИМИТАЦИИ СИГНАЛОВ

Внутриимпульсная модуляция зондирующих сигналов функциями, позволяющими расширить спектр сигнала для улучшения разрешающей способности по дальности, используется в различных отраслях и приложениях радиолокации. Элементной базой и схемотехническими решениями модуляторов определились два наиболее распространённых способа модуляции – линейная частотная модуляция и фазовое кодирование.

Выбор сигналов для построения математических моделей основан на анализе научных работ, посвященных поиску модулирующих функций и выбору зондирующего сигнала, а также на информации о сигналах, применяемых в современных радиотехнических системах различного назначения.

## Линейная частотная модуляция

Сигналы на базе ЛЧМ появились одними из первых и широко используются в зарубежных и отечественных радиолокаторах, что определило создание следующих моделей сигналов с различной длиной импульса и шириной спектра. Было проведено моделирование сигналов нескольких известных типов зарубеж-

Α.

ных радиолокационных станций (РЛС). Для каждого сигнала построена модель комплексной огибающей одиночного импульса. При воспроизведении АПКЭО данных модельных сигналов на анализаторе спектра, подключённом к выходу, отображались их спектры. Модель спектров сигналов также можно увидеть с помощью виртуального анализатора сигналов, реализованного программными средствами АПКЭО.

#### Коды Баркера

В.

Вторым из наиболее распространённых способов получения зондирующих сигналов является фазовая модуляция различными кодами, из которых в первую очередь можно отметить коды Баркера. Они до сих пор успешно применяются в авиационной радиолокации.

Код Баркера имеет идеальную автокорреляционную функцию для конечного сигнала, однако максимальный известный код Баркера имеет только 13 элементов. Поэтому приходится прибегать к искусственному увеличению кода путем перемножения двух последовательностей. Для имитации РЭС, использующих фазовую модуляцию кодами Баркера, средствами АПКЭО были сгенерированы следующие сигналы для кодов длиной 7,13 и 5 по 13.

Широкое практическое применение фазоманипулированных сигналов в системах обнаружения обусловлено относительно равномерным распределением боковых лепестков корреляционной функции при большом числе дискретов на всей плоскости изображения, постоянством амплитуды сигнала, а также простотой его генерирования.

У фазоманипулированных сигналов минимально достижимый уровень боковых лепестков обратно пропорционален числу дискретов (базе сигнала). Поэтому большее распространение получили фазоманипулированные сигналы с повышенным числом элементов, т.е. промодулированные более длинными кодами, некоторые из которых представлены ниже.

#### С. М-последовательности

Увеличение базы сигнала в случае с М-последовательностью легко реализуется. Длина такой последовательности описывается соотношением 2<sup>n</sup>-1, а их генерация с помощью сдвигового регистра требует незначительных вычислительных затрат.

Применительно к задаче РСА, двухпозиционная модуляция М-последовательностью (МП) обладает тем преимуществом, что позволяет модулировать серию зондирующих импульсов множеством некоррелированных между собой функций. Ниже приведены модели и спектр перспективных зондирующих сигналов (рис. 2-5).



Рис. 2. Модель ЗС с ФКМ различными МП длины 511



Рис. 3. Модель зондирующего сигнала с ФКМ одной циклически сдвинутой М-последовательностью



Рис. 4. Модель спектра зондирующего сигнала с ФКМ М-последовательностями

## Последовательности Лежандра

Хотя последовательности Лежандра не получили широкого практического применения в качестве модулирующих функций, известно, что они применяются в некоторых РЭС. Возможность и целесообразность применения последовательностей Лежандра в радиолокаторах вытекает из их свойств [10] и подтверждается исследованиями, описанными в [11], [12], поэтому для включения в сравнительный анализ были построены модели сигналов с такой модуляцией.

Последовательности Лежандра, как и МП, являются минимаксными, однако существует лишь одна последовательность Лежандра конкретной длины, а 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 близких по длине последовательностей, дополненных нулями, для модуляции зондирующих импульсов.



Рис. 5. Модель спектра зондирующего сигнала с ФКМ последовательностью Лежандра

## Е. Последовательности Якоби

Последовательности Якоби, также являются минимаксными. Свойства последовательностей Якоби, описанные в [13], обуславливают возможность их применения для модуляции сигналов в различных РЭС.

D.



Рис. 6. Модель спектра зондирующего сигнала с ФКМ последовательностью Якоби

#### F. Коды Голда

Коды Голда – тип псевдослучайных последовательностей, которые могут быть сгенерированы путем суммирования по модулю 2 двух МП одинаковой длины. Модель зондирующего сигнала с 48 кодами Голда представлена на рисунке 7. Значимость этих последовательностей обусловлена их очень низкой взаимной корреляцией. Коды Голда используются в спутниковой навигационной системе GPS для разделения сигналов различных аппаратов, в 3G системе связи стандарта WCDMA для скремблирования CDMA кодов и т.п.



Рис. 8. Модель спектра ЗС с ФКМ кодами Голда

Оптимальные автокорреляционные свойства могут быть получены и для МП, однако, для реализации принципа коллективного доступа необходим большой набор кодов одинаковой длины с хорошими взаимнокорреляционными свойствами, поэтому в цифровой связи широко используются коды Голда. Они позволяют получить большой набор модулирующих последовательностей, обеспечивающих однородные и ограниченные значения взаимнокорреляционной функции.

## *G. Стохастические функции*

Квадратурная амплитудная и фазовая модуляции находят широкое применение в системах связи. Были построены модели двух видов дискретной модуляции радиосигналов, используемых в современных системах связи: фазовой и квадратурной (рис. 9, 10). Использование шумоподобных сигналов в РЛС [14] целесообразно для решения задач обнаружения и распознавания объектов благодаря низкому уровню максимальных боковых лепестков.



Рис. 9. Модель спектра ЗС со случайной квадратурной амплитудной модуляцией по 16 точкам



Рис. 10. Модель спектра зондирующего сигнала со случайной фазовой модуляцией

Предложенные модели различных существующих и перспективных сигналов, применяемых различными радиоэлектронными средствами, были воспроизведены на несущей частоте средствами АПКЭО. Этот набор тестовых сигналов использовался для отработки систем радиотехнической разведки, решающих задачи быстрого и качественного распознавания РЭС, излучающих такие сигналы. По мере проведения дополнительных исследований перечень модельных сигналов пополняется, создается библиотека модельных и записанных реальных сигналов РЭС, что позволит системам радиотехнической разведки оперативно обнаруживать новейшие радиоэлектронные средства.

### VI. Анализ функций отклика излучаемых сигналов

Поиск новых способов формирования зондирующих сигналов на базе М-последовательностей привел к идее совмещения чередования образующих полиномов и циклического сдвига. Сравнение производится по виду функции отклика, а именно, по относительному и интегральному уровню боковых лепестков, а также равномерности их распределения. Сигнал формировался следующим образом: первый зондирующий импульс был промодулирован МП, соответствующей первому образующему полиному, второй - второму, а затем циклически сдвинут на 8 элементов последовательности, третий импульс – третьей М-последовательностью, циклически сдвинутой на 16 элементов, и т. д. до 10 импульса. Одиннадцатый импульс повторял первый, но циклически сдвинутый на 80 элементов. Таким образом, зондирующий сигнал промодулирован 10

периодически повторяющимися МП, каждая i-ая из которых циклически сдвигалась на i\*k\*80 отсчетов в каждом k-ом периоде. Добавление циклического сдвига по линейному закону к периодическому чередованию МП привело к снижению относительного уровня БЛ с –36 дБ до –42,5 дБ (табл.1). Однако наличие регулярности в законе формирования отображается на функции отклика в виде периодически концентрирующихся по дальности боковых лепестков.



## Рис. 11. Вид функции отклика при периодическом чередовании и линейном сдвиге

В случае, когда каждый і-ый импульс из 128 модулировался случайно выбранной МП длиной 1023, циклически сдвинутой на 8•і элементов, боковые лепестки более равномерно распределились по изображению и относительный уровень максимального из них составил -42,6 дБ. При этом наблюдается снижение БЛ в главном сечении по дальности, которого не наблюдается в других случаях. Так, при сдвиге МП на случайное число видна яркая полоса на нулевой дальности.



# Рис. 12. Вид функции отклика при случайном чередовании последовательностей Лежандра

С фазокодовой модуляцией последовательностями Лежандра была построена модель, где каждый зондирующий импульс из 128 был промодулирован случайной последовательностью Лежандра (одной из 11), сдвинутой на четверть длины, т.к. при таком сдвиге наблюдается снижение интегрального уровня боковых лепестков как автокорреляционной функции, так и функции отклика, построенной для сигналов с модуляцией последовательностями Лежандра. В связи с этим варианты построения сигналов на основе различных значений и законов циклического сдвига последовательностей Лежандра не рассматривались.

## Таблица 1

Способ модуляции	Распределение БЛ	PSL, дБ	ISL, дБ
Случайное чередование МП и случайный циклический сдвиг	Равномерное	-52,4	-5,1
Стохастические функции	Равномерное	-52,2	-2,6
Случайное чередование МП и линейный сдвиг	Равномерное	-47,0	-5,2
Случайный циклический сдвиг одной МП	Локализованы в главном сечении	-53,8	-5,1
Периодическое чередование МП и линейный сдвиг	Периодические полосы	-41,2	-5,2
Случайное чередование МП	Максимальные БЛ в главном сечении	-40,6	-5,3
Линейный сдвиг одной МП	Локализованы вблизи главного сечения	-38,2	-5,2
Периодическое чередование МП	Периодическое полосы	-36,3	-5,4
Без чередования и сдвига (одна МП)	Локализованы в главном сечении	-28,4	-5,4

Зависимость параметров функции отклика от способов модуляции зондирующего сигнала.

На базе случайных функций были промоделированы шумоподобные сигналы с т-позиционной фазовой и m<sup>2</sup>-позиционной квадратурной модуляцией. В ходе исследования было установлено, что способ формирования такого сигнала и значения т не влияют на вид функции отклика, в том числе на распределение и уровни её боковых лепестков. Поэтому при разработке радиоэлектронных средств с таким видом модуляции можно использовать наиболее простую и удобную реализацию, двух- и четырехпозиционную соответственно. И хотя интегральный уровень боковых лепестков ФО таких сигналов довольно высок, они могут быть использованы для решения задач скрытной съемки.

Как видно из рис. 12 боковые лепестки распределены по всей площади изображения, но максимальные их них также сосредоточены в главном сечении по дальности, как и в случае случайного циклического сдвига М-последовательности. Однако интегральный уровень боковых лепестков при использовании последовательностей Лежандра составил -8,3 дБ, что почти на 3 дБ ниже значения, полученного для МП.

По результатам проведенного анализа, виду функций отклика и значениям уровней боковых лепестков, приведенным в таблице 1, можно сделать вывод, что при разработке радиолокатора с модуляцией зондирующих сигналов М-последовательностями целесообразно использовать их случайное чередование от импульса к импульсу в комбинации с циклическим сдвигом. В этом случае боковые лепестки имеют наименьший уровень и наиболее равномерное распределение, что важно при решении задач обнаружения и распознавания. Однако высокий интегральный уровень боковых лепестков МП делает затруднительным их применение для оценки радиометрического фона.

Для решения многих прикладных задач РСА, основанных на поиске границы раздела природных сред или сельскохозяйственных угодий, необходимо применять сигналы, способные обеспечить низкий интегральный уровень ухудшающих радиометрическую чувствительность и динамический диапазон боковых лепестков функции отклика, такие как ЛЧМ, а также ФКМ последовательностями Лежандра. Современный уровень развития элементной базы и алгоритмов цифровой обработки позволяет разрабатывать радиоэлектронные средства, совмещающие несколько способов модуляции сигнала.

Средствами АПКЭО были сгенерированы зондирующие сигналы с различными видами модуляции, проведен их анализ с целью дальнейшей модификации в зависимости от задач, поставленных перед вновь разрабатываемыми радиотехническими системами.

Приведены результаты синтеза зондирующих сигналов на базе М-последовательностей и последовательностей Лежандра, основанные на выборе оптимального закона чередования полиномов и циклического сдвига кодов. Показано, что в результате выбора зондирующего сигнала, соответствующего поставленным задачам, удаётся существенно снизить максимальные уровни боковых лепестков и уменьшить их влияние на качество радиофизического изображения без принципиальных доработок аппаратуры.

#### VII. Выводы

Подтверждены возможности комплекса экспериментальной отработки в части моделирования и воспроизведения на несущей частоте сигналов с различной модуляцией, а также анализа характеристик этих сигналов.

Предложены и использованы в программном обеспечении критерии оценки зондирующих сигналов по характеристикам двумерной функции отклика.

Комплекс экспериментальной отработки позволяет имитировать сигналы различных радиоэлектронных средств для отработки, проверки и тестирования систем связи и радиотехнической разведки, а также радиолокационных станций. При этом могут использоваться записи реальных сигналов с последующим наложением на них моделей шума и помех.

Средства АКПЭО позволяют моделировать и анализировать сигналы с различной модуляцией, синтезировать двумерную функцию отклика и проводить её анализ для оценки применимости исследуемого сигнала для решения конкретных задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.
- [2] J. Jedwab, K. Yoshida, The peak sidelobe level of families of binary sequences // IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, no. 5, pp. 2247–2254, May 2006.
- [3] Кренгель Е.И. Новые идеальные 4-фазные и 8-фазные последовательности с нулями. Сборник докладов 7-ой международной конференции DSPA-2005 т.1 URL: http://autex.spb.su/download/dsp/dspa/dspa2005/t1/3.pdf (дата обрщения 03.05.2018)
- [4] Козлов В.А., Чистюхин В.В. Аналитическое решение для подавления уровня интегральных боковых лепестков АКФ псевдослучайных последовательностей в РСА // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 487–490. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-487-490
- [5] Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С.Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.
- [6] Тарасенко А.М. Исследование влияния способов формирования зондирующего сигнала космического РСА на качество радиолокационного изображения // Успехи современной радиоэлектроники – 2015. – №5. – С. 13-19.
- [7] URL: http://poleznayamodel.ru/model/15/152358.html (дата обращения: 30.04.2018).
- [8] Гусейнов М.Я., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Улучшение разрешающей способности по дальности дозорной РЛС в режимах РСА методом межпериодного расширения спектра // Успехи современной радиоэлектроники – 2015. №5. С.6-12.
- [9] Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с
- [10] Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Алгоритм цифровой имитации траекторных сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». М.: РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013. С. 418-422.
- [11] URL:http://www.mes-conference.ru/data/year2014/pdf/D14 5.pdf (дата обращения 03.05.2018)
- [12] Бирюк А. А. Довгаль Т. А. Максимовская А. И., Орешкин В.И. Импульсный радар ближнего действия // Материалы XV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь –перспективные технологии» М.: Мир науки, 2017. С.34-37
- [13] M. Gresko Autocorrelation property of Jacobi sequences // Journal of Electrical engineering, vol. 53, no. 12/s, 2002, pp. 9–12.
- [14] Lukin K.A. The Principles of Noise Radar Technology // Proc. of NRTW-2002. – Yalta, 2002. pp. 13–22.

## Various Radio System Signal Digital Simulation and Analysis by Means of the Hardware-in-the-loop Experimental Tryout Complex

## A.M. Tarasenko

Joint-Stock Company «Radio Engineering Corporation «Vega», asianna@list.ru

*Keywords* — Digital Signal Processing, autocorrelation, sidelobe level, two-dimensional response function, radio systems.

Abstract – Current grade of digital technology development allows wide capabilities for signal generation using various, more complicated modulation types, that is reasonable to be implied in radio facility design. The system approach to complex radio facility development implies matched choice of hardware and software solutions at the beginning stage of development. The introduced experimental tryout complex provides simulation of various radio facility signals, new and perspective signal simulation and analysis. The article presents simulated signal spectrums generated by means of the hardware-in-the-loop tryout complex, including the chirp, phase-code modulation using M-sequences, Legendre, Jacobi sequences, as well as QAM and stochastic modulating functions. High sidelobe levels of compressed signals hinder the operation of both radar and communication systems. In the case of SAR, proper selection of modulating functions allows to reject sidelobe levels in the output image after azimuth compression. So, the two-dimensional response function provides the most adequate preliminary estimation for the choice of SAR sounding signal.

On base of simulation results, the random alternating and the circular shift of modulating M-sequences are found to provide relative sidelobe rejection without principal complications of hardware schematic. However, the integral sidelobe level important for the tasks of backscatter measurement and dark object detection remains constant. The chirp provides better radiometric characteristics. The Legendre sequences result in relative sidelobe levels comparable with those of M-sequences, but the sidelobes tend to local minimum at the ¼-length shift. The noise radar signals have some advantages in masked survey because they are indistinguishable from communication signals. The analysis presented in the article helps to provide informed choice of signal modulation functions for radio facilities to be designed. The experimental tryout complex used for signal digital generation, recording and analysis proved to be usable for various radio system tests.

#### REFERENCES

 Verba V.S. Aviatsionnye kompleksy radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya. Monografiya (Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph). M.: Radiotekhnika, 2014. 528 s (in Russian).

- [2] J. Jedwab, K. Yoshida, The peak sidelobe level of families of binary sequences // IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, no. 5, pp. 2247–2254, May 2006.
- [3] Krengel' E.I. Novye ideal'nye 4-faznye i 8-faznye posledovatel'nosti s nulyami (New ideal 4-phase and 8phase sequences with nulls). Sbornik dokladov 7-oj mezhdunarodnoj konferencii DSPA-2005 t.1
- [4] Kozlov V.A., Chistyuhin V.V. An Analytic Solution to Suppress Level of ACF Integral Sidelobes of Pseudo-Random Sequences in SAR // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 487–490. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-487-490 (In Russian)
- [5] Kondratenkov G.S., Frolov A.YU. Radiovidenie. Radiolokacionnye sistemy distancionnogo zondirovaniya zemli (Radiolocation systems of earth remote sensing). Uchebnoe posobie dlya vuzov / Pod red. G.S.Kondratenkova. – M.: Radiotekhnika, 2005.
- [6] Tarasenko A.M. Researching of radar image quality dependence on sounding signal generation mode for spaceborne SAR // Journal Achievements of Modern Radioelectronics №5 - 2015 s. 13-19 (In Russian).
- [7] URL: http://poleznayamodel.ru/model/15/152358.html. (access date: 03.05.2018).
- [8] Gusejnov M.Ya., Lepekhina T.A, Nikolaev V.I., Tarasenko A.M. Uluchshenie razreshayushchej sposobnosti po dal'nosti dozornoj RLS v rezhimah RSA metodom mezhperiodnogo rasshireniya spektra (Warning radar range resolution improvement in SAR modes using Interperiod Spread Spectrum method) // Uspekhi sovremennoj radioelektroniki – 2015. – s. 6-12 (in Russian).
- [9] Varakin L. E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami (Communication systems with noise-like signals). M.: Radio i svyaz', 1985. 384 s
- [10] Lepekhina T.A., Nikolaev V.I. Algoritm tsifrovoj imitatsii traektornyh signalov dlya ispytanij radiolokatorov s sintezirovannoj aperturoj vysokogo razresheniya (Echo signal digital simulation algorithm for high-resolution SAR tests) // 15-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «TSifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie – DSPA-2013». M.: RNTORES im. A.S.Popova, 2013. S. 418-422 (in Russian).
- [11] URL:http://www.mesconference.ru/data/year2014/pdf/D145.pdf (access date: 03.05.2018)
- [12] Biryuk A. A. Dovgal' T. A. Maksimovskaya A. I., Oreshkin V.I. Impul'snyj radar blizhnego dejstviya (Short-range pulsed radar) // Materialy XV Molodezhnoj nauchnotekhnicheskoj konferencii «Radiolokaciya i svyaz' – perspektivnye tekhnologii» M.: Mir nauki 2017. s. 34-37.
- [13] M. Gresko Autocorrelation property of Jacobi sequences Journal of Electrical engineering, vol. 53, no. 12/s, 2002, pp. 9–12.
- [14] Lukin K.A. The Principles of Noise Radar Technology Proc. of NRTW-2002. – Yalta, 2002. – pp. 13–22.