

Формирование сигналов с различными видами модуляции радиотехнических средств на несущих частотах

А.М. Тарасенко

АО «Концерн «Вега»: 121170, Москва, Кутузовский проспект, д.34; asianna@list.ru.

В докладе представлены современные подходы к выбору и синтезу модулирующих функций, используемых при формировании сигналов радиотехническими средствами различного назначения. Сформулированы критерии для анализа сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также описаны возможности формирования сигналов различных радиотехнических средств на несущей частоте.

The article describes modern approaches to the choice and synthesis of modulating functions used for various purpose radio system signal generation. SAR sounding signal preliminary analysis criteria are stated. Capabilities of various radio systems to generate arbitrary waveform signals at carrier frequencies are described.

Радиотехнические средства (РТС) можно разделить на два класса. Одни создаются с целью получения и передачи информации, к ним можно отнести связные станции, дозорные и метеорологические радиолокаторы и др. [1]-[3]. Второй класс предназначен для отработки и проверок РТС первого класса. К нему относятся различного рода генераторы испытательных сигналов, ретрансляторы сигналов – активные имитаторы радиомишеней и фоно-целевых обстановок для проверок приёмного тракта и систем обработки, а также проверки качества работы проверяемых устройств в условиях наложения искажений и шумов. Такие имитаторы используются на всех этапах разработки, от полунатурного моделирования при отработке макетов до тестирования радиотехнических средств в процессе эксплуатации. Вопросы формирования сигналов являются актуальными для РТС обоих классов.

В первую очередь должен быть проведён анализ возможности применения рассматриваемых модулирующих функций для формирования сигналов с точки зрения достижения целевых характеристик проектируемого РТС. В настоящее время многие исследователи заняты поиском модулирующих функций с хорошими автокорреляционными свойствами: главный максимум, стремящийся к дельта-функции и низкие максимальный и интегральный уровень боковых лепестков, также оценивается взаимная корреляция [4]-[8]. Некоторые ученые идут по пути составления комбинаций и ансамблей последовательностей для обеспечения заданного уровня корреляции в связных и радиолокационных системах [9].

С целью расширения набора модулирующих кодовых последовательностей как основа для формирования других последовательностей, таких как Голда, Касами, бент-последовательностей и многочисленных ансамблей используются М-последовательности (МП). Отдельным преимуществом МП является самая низкая эквивалентная линейная сложность $I_s=n$ среди рекуррентных псевдослучайных последовательностей.

Последовательности Голда с периодом 2^n-1 формируются на основе двух М-последовательностей с отбором так называемых «предпочтительных пар», имеющих трехзначную функцию автокорреляции (АКФ). Они формируются путем посимвольного сложения по модулю 2 двух М-последовательностей и позволяют получить не только большой набор модулирующих функций, но и однородные и ограниченные значения взаимнокорреляционной функции. Однако эквивалентная линейная сложность последовательностей Голда вдвое больше, чем у МП, что

усложняет процесс генерации. Существуют алгоритмы поиска таких отводов сдвиговых регистров, генерирующих М-последовательности, чтобы любая комбинация, состоящая из двух отводов, формировала код Голда. Предложенный в [10] алгоритм позволяет получить псевдослучайные последовательности с такими же свойствами АКФ, как у М-последовательностей, и гарантированным ограничением относительных уровней боковых лепестков взаимнокорреляционной функции, как у кодов Голда.

Последовательности Касами так же, как и коды Голда, относятся к линейным рекуррентным последовательностям. Их значимость обусловлена их очень низкой взаимной корреляцией. Код Касами длины $N=2^m-1$, где m — четное целое число, может быть получен путем периодических выборок из М-последовательности и их суммирования по модулю 2 на циклически сдвигаемых последовательностях.

Сигналы с модуляцией вышеописанными кодами могут быть применены в системах связи с кодовым разделением каналов.

В задачах дистанционного зондирования Земли все более значительное место занимают РСА, несомненными преимуществами которых являются всепогодность, независимость от условий освещённости и 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. При правильных схемотехнических решениях, выборе зондирующих сигналов, алгоритмов и средств обработки (сигнальных процессоров) можно добиться разрешающей способности, сравнимой с оптическими системами. Поэтому вопросами выбора сигнально-кодовых конструкций для радиолокаторов также активно занимаются ученые.

Основным требованием к РСА является получение качественного радиолокационного изображения земной (водной) поверхности. Комплексное РЛИ несёт большой набор информации, которая может быть проанализирована различным образом в зависимости от поставленных задач. Целесообразно анализировать несколько основных параметров, которые необходимы для решения большинства задач. При верификации РСА выдвигаются требования к измерению пространственной разрешающей способности, динамического диапазона, радиометрической калибровке.

Согласно теории радиолокации, для улучшения разрешающей способности радиолокатора по дальности при сохранении длительности импульса, необходимой для обеспечения его требуемой энергией при имеющейся мощности передатчика, используется внутриимпульсная фазовая модуляция некоторой функцией, обладающей хорошими корреляционными свойствами: АКФ модулирующей функции также должна иметь один узкий главный максимум, что позволяет выделить парциальный отражённый сигнал с задержкой, соответствующей расстоянию до отражающего объекта в минимально возможных пределах (обеспечить наилучшую разрешающую способность по дальности). Необходимым условием для обеспечения разрешающей способности по дальности (ρ) является минимальная ширина спектра модулирующей функции B , определяемая по формуле $B=c/2\rho$. Однако это условие не является достаточным: не всякая модулирующая функция с шириной спектра, удовлетворяющей условию, обладает корреляционными свойствами, позволяющими выделить парциальный отражённый сигнал (отклик на точечную цель) требуемого качества.

Зондирующий сигнал РСА представляет собой серию модулированных импульсов. Комплексные модулирующие функции могут быть одинаковыми или различными, но с одинаковыми свойствами: импульсы имеют одинаковую длительность и ширину спектра, следовательно, одинаковую базу, одинаковый вид модуляции (непрерывная или дискретная с одинаковой позиционностью), они строятся одинаковыми способами

– например, М-последовательности одной длины, ЛЧМ с разным направлением перестройки частоты.

При выборе модулирующей функции большинство исследователей анализирует их одномерные АКФ, функции неопределённости в координатах дальность-доплер, а также взаимные корреляционные функции модулирующих функций смежных импульсов. Эти критерии соответствуют параметрам качества выходной информации импульсно-доплеровских радиолокаторов, измеряющих расстояние до движущегося объекта и его радиальную скорость по данным отражённого одиночного импульса.

Иначе должна быть поставлена задача анализа зондирующего сигнала для РСА, где выходным продуктом является двумерное изображение земной поверхности. Синтез изображения выполняется путём двумерного сжатия серии отражённых импульсов, для чего существуют различные алгоритмы. Комбинация физического процесса съёмки (отражение, распространение, приём и запись радиолокационного сигнала) и любого используемого алгоритма синтеза первичного комплексного радиолокационного изображения является линейной операцией: радиолокационное изображение фоно-целевой обстановки на участке земной поверхности, содержащем множество отражающих элементов i , описываемой комплексной функцией коэффициента обратного рассеяния $\dot{s}(x_i, y_i)$, является векторной суперпозицией парциальных изображений всех элементов: $\dot{J}(x, y) = \sum_i \dot{j}_i(x, y)$, где i – условный номер точечного элемента фоно-целевой обстановки, $\dot{j}_i(x, y)$ – его комплексное изображение в радиолокационных координатах (x, y) , которое было бы получено при устранении всех остальных элементов. Таким образом, двумерная функция отклика на одиночную точечную цель $\dot{j}(x, y)$ является адекватным критерием качества РСА, что используется на практике в методиках испытаний самолётных и космических систем под названием «метода импульсного отклика» [11]. Учитывая, что $\dot{j}(x, y)$ непосредственным образом зависит от используемой комбинации модулирующих функций зондирующего сигнала и от применяемого алгоритма синтеза, анализ характеристик двумерной функции отклика взят за основу представленного в данной работе исследования.

Оценка применимости сигналов в РСА проводится по следующим параметрам двумерной функции отклика на ОТЦ:

- ширина главного максимума по уровню -3дБ;
- относительный уровень максимального бокового лепестка;
- интегральный уровень боковых лепестков;
- распределение боковых лепестков по площади изображения.

В связи с разнообразием как применяемых, так и перспективных способов модуляции радиотехнических средств, различными подходами к их анализу в зависимости от целевого назначения РТС, а также необходимостью проведения их тестирования и экспериментальной отработки, был разработан аппаратно-программный комплекс [12], который обладает широкими возможностями по генерации сигналов и исследованию их свойств.

Подготовка массивов исходных данных для генерации тестовых сигналов и анализ качества принятого сигнала выполняется с помощью специального программного обеспечения. Построенные математические модели сигналов сохраняются в библиотеке данных аппаратно-программного комплекса, где также хранятся сигналы реальных радиоэлектронных средств (РЭС), принятые и записанные аппаратными средствами устройства. Массив данных каждого сигнала содержит вектор или матрицу комплексных отсчётов принятого и демодулированного сигнала, а также набор констант программных настроек аппаратных средств, включая несущую частоту, на

которой осуществлялся приём сигнала. При необходимости эти два набора данных могут записываться в отдельные файлы на различные носители.

Хранение массивов данных для генерации тестовых сигналов осуществляется на твердотельном накопителе информации типа RAID, связанном высокоскоростным информационным интерфейсом с модулями генерации и регистрации. Специализированный контроллер этих модулей обеспечивает передачу данных между накопителем и ЦАП, между АЦП и накопителем с максимальной скоростью, обеспечиваемой информационным интерфейсом, в режиме прямого доступа к памяти.

В тракте генератора сигналов данные преобразуются в парный видеосигнал с помощью двух идентичных ЦАП. Этими сигналами, используемыми в качестве управляющих, модулируется синусоидальный сигнал промежуточной частоты, формируемый синтезатором частоты гетеродина из опорной частоты. Модулированный сигнал затем поступает на вход приёмника испытуемого образца или макета РТС непосредственно с выхода модулятора, если несущая частота не превышает 6 ГГц, или через повышающий конвертер.

Для создания библиотеки сигналов на базе разработанного аппаратно-программного комплекса были построены модели сигналов, применение которых возможно различными радиотехническими средствами.

Линейная частотная модуляция широко применяется в зарубежных и отечественных радиолокаторах, в связи с этим был создан ряд моделей сигналов с различной длиной импульса и шириной спектра, некоторые из которых представлены на рисунках 1 и 2. Для каждого сигнала построена модель комплексной огибающей одиночного импульса.

При воспроизведении модельных сигналов аппаратно-программным комплексом проводился контроль спектров их комплексных огибающих с помощью виртуального анализатора сигналов, входящего в состав программного обеспечения комплекса. Спектрограммы сигналов на несущей частоте контролировались на экране анализатора спектра, подключённого к выходу передающего канала комплекса.

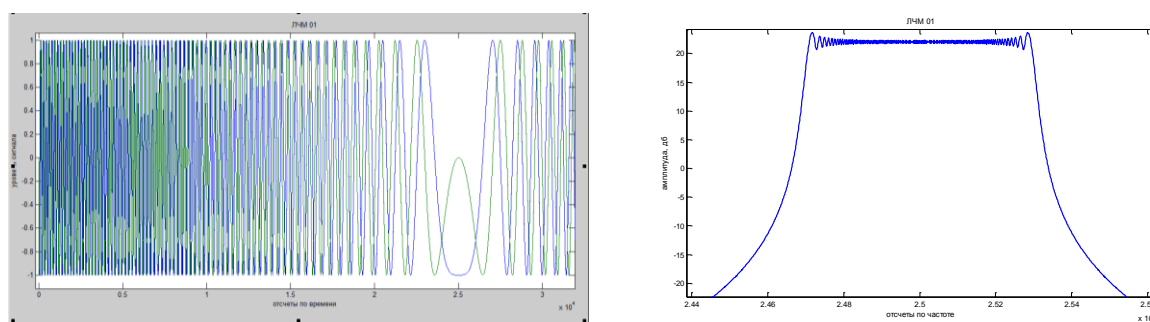


Рис. 1. Модель ЛЧМ сигнала (синий – синфазный, зеленый – квадратурный каналы) длиной 100 мкс и шириной полосы 6,1 МГц при частоте дискретизации 250 МГц (слева) и его спектр (справа).

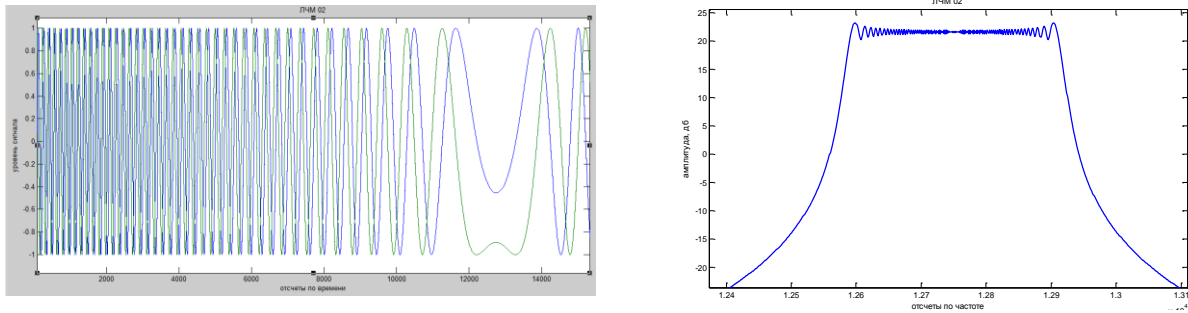


Рис. 2. Модель ЛЧМ сигнала (синий – синфазный, зеленый – квадратурный каналы) длительностью 51 мкс и шириной полосы 6,6 МГц при частоте семплирования 250 МГц (слева) и его спектр (справа).

Несмотря на то, что коды Баркера слишком коротки для модуляции сигналов космических РСА, а отсутствие вариативности в пределах одной длины приводит к возникновению неоднозначностей по дальности, они успешно применяются в авиационных радиолокаторах. С целью увеличения базы сигнала используется перемножение кодов. Модель такого сигнала представлена на рисунках 3 и 4.

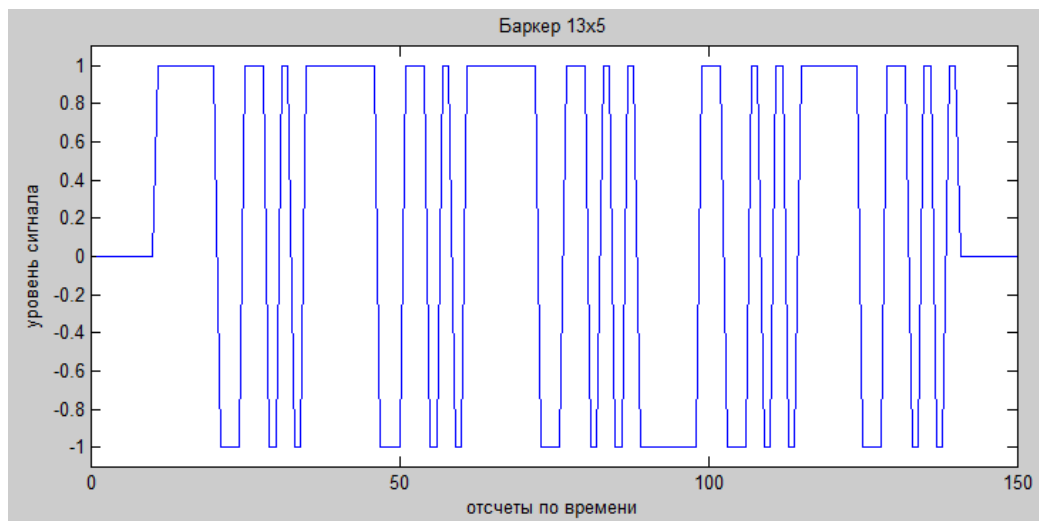


Рис. 3. Модель сигнала с модуляцией кодом Баркера 5x13.

Широкое практическое применение фазоманипулированных сигналов в системах обнаружения обусловлено относительно равномерным распределением боковых лепестков корреляционной функции при большом числе дискретов на всей временной плоскости, постоянством амплитуды сигнала, а также простотой его генерирования. Поэтому в качестве модулирующих функций получили распространение последовательности с большим числом элементов. Модели сигналов с модуляцией стохастическими функциями, M-последовательностями, кодами Голда, Лежандра и Якоби также были построены и воспроизведены на несущей частоте средствами аппаратно-программного комплекса.

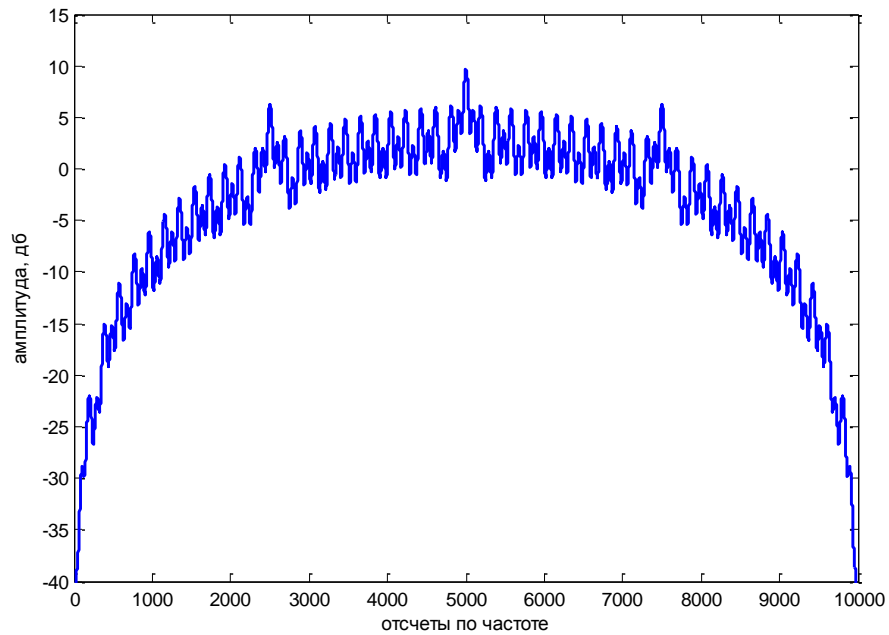


Рис. 4. Модель спектра сигнала с модуляцией кодом Баркера 5x13.

Как было показано в [13], для модуляции зондирующих импульсов в одном сигнале целесообразно использовать чередование и циклический сдвиг МП, в то время как применением такого способа комбинирования к последовательностям Лежандра ожидаемое снижение боковых лепестков двумерной функции отклика не достигается.



Рис. 5. Модель зондирующего сигнала с ФКМ различными М-последовательностями длины 511.

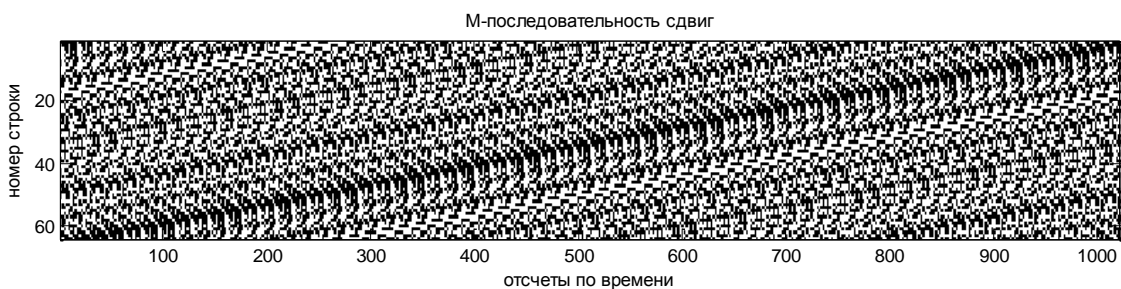


Рис. 6. Модель зондирующего сигнала с ФКМ одной циклически сдвинутой М-последовательностью.

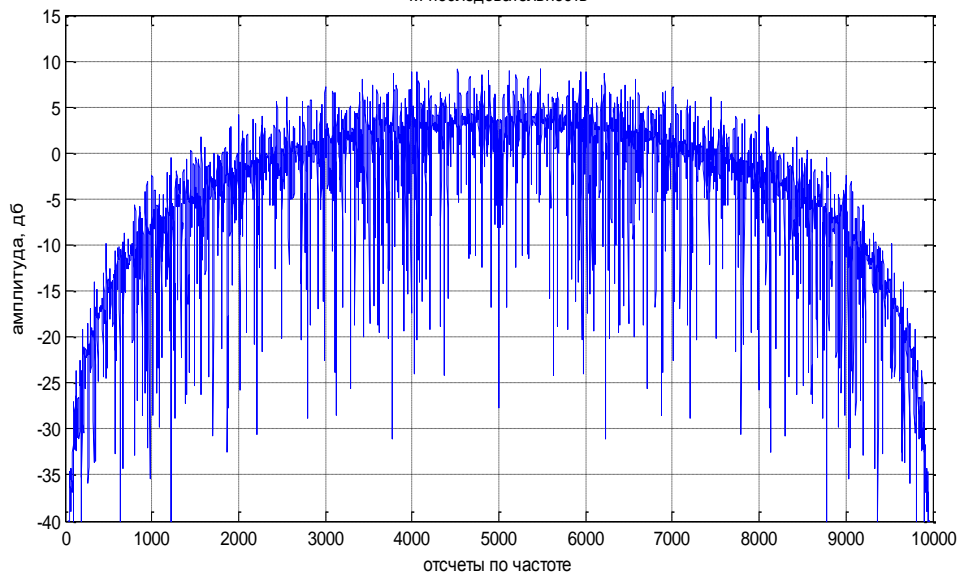


Рис. 7. Модель спектра зондирующего сигнала с ФКМ М-последовательностями.



Рис. 8 Модель зондирующего сигнала с ФКМ последовательностью Лежандра длиной 523.

Основываясь на результатах работ [14] и [15], можно утверждать, что последовательности Лежандра уже нашли свое применение в радиолокации, а пополнение библиотеки сигналов аппаратно-программного комплекса моделями с модуляцией перспективными функциями позволит ускорить работы по тестированию вновь разработанных радиотехнических средств, а также обеспечит средства радиотехнической разведки передовыми данными.

Контроль качества тестовых сигналов осуществляется путём их записи с помощью схемы цифровой регистрации сигналов. Для этого генерируемый ВЧ сигнал с помощью внешнего коаксиального шлейфа подаётся на вход приёмного канала, преобразуется в видеосигнал, а затем в массив цифровой информации, сохраняемый на накопителе.

Для имитации реальных условий приёма нескольких сигналов на близких частотах станций, размещаемой на летательном аппарате, имеется возможность одновременного запуска набора сценариев моделирования с цифровым микшированием потоков данных. Обработка моделей сигналов путём наложения шума, помех, комбинирования сигналов одной или нескольких внешних РЭС с учётом влияния движения самолёта-носителя позволяет проводить полунатурное моделирование входных воздействий, отражающих различные варианты внешних обстановок, для отработки методов селекции и распознавания принимаемых сигналов, а затем для бесполётных испытаний комплекса.

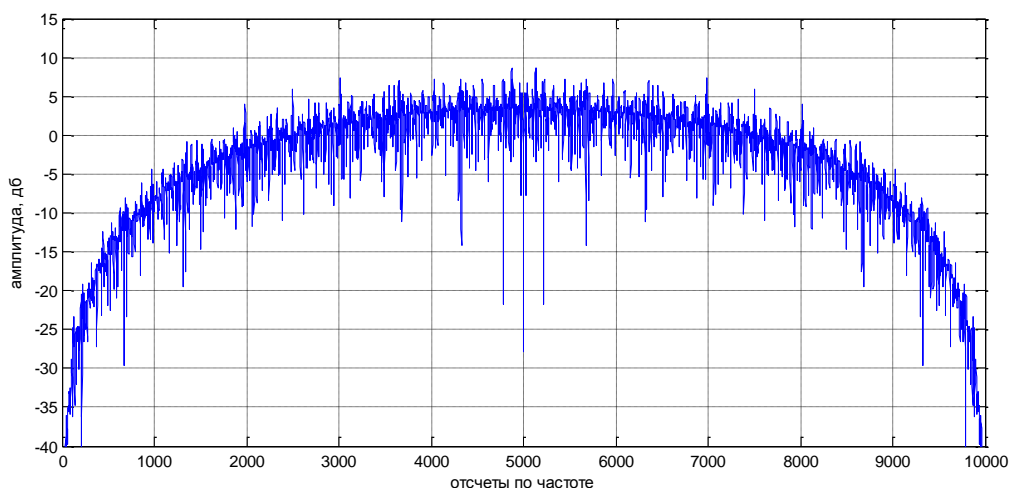


Рис. 9. Модель спектра зондирующего сигнала с ФКМ последовательностью Лежандра.

Для воспроизведения и записи импульсных сигналов, характерных для радиолокационных станций и имеющих, как правило, большую скважность, предусмотрен сегментированный режим. Данные для генерации сигнала в этом режиме формируются в виде массива, разделённого на упорядоченные порции (сегменты). Воспроизведение сигнала из каждого сегмента выполняется в заданный момент времени, определяемый по предварительно составленному сценарию. По окончании воспроизведения фрагмента передающий канал выключается до момента начала воспроизведения следующего сегмента. Сценарий представляет собой таблицу, определяющую последовательность воспроизведения сегментов с привязкой каждого сегмента к расчётному моменту времени. Запуск воспроизведения очередного сегмента осуществляется по аппаратной или программной метке времени (триггеру), поступающей в течение заданного интервала. Меткой времени может служить внутренний импульсный сигнал или сигнал от сопрягаемой аппаратуры, обрабатываемой совместно с устройством, а также программный триггер.

Применение твердотельного накопителя данных ёмкостью 5,7 ТБ с высокоскоростным интерфейсом, возможность экономии скорости потока данных за счёт использования импульсного режима и задания оптимальной частоты дискретизации позволяют проводить запись и воспроизведение сигналов в течение длительного времени: от 25 минут до нескольких часов.

Широкий диапазон частот на прием и передачу в полосе от 200 МГц до 40 ГГц с мгновенной шириной спектра до 1 ГГц позволяет осуществлять запись и воспроизведение сложных широкополосных сигналов перспективных РЭС.

Построенные математические модели сигналов легли в основу библиотеки, которая включает в себя записанные сигналы работающих систем и модели сигналов перспективных РЭС.

Обработка сигналов путём наложения шума, помех, имитации приёма сигналов одной или нескольких РЭС при движении самолёта-носителя позволит проводить более качественное тестирование и проверку.

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. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 280 с.
4. Jonathan J. What can be used instead of a Barker sequence? American Mathematical Society.2008.
5. Кренгель Е.И Псевдослучайные двоичные последовательности с нулевой зоной автокорреляции и боковыми выбросами $\pm (p+1)$ // Цифровая обработка сигналов, 2004. №2(12). С. 2-6.
6. Ипатов В.П. Троичные последовательности с идеальными периодическими автокорреляционными свойствами // Радиотехника и электроника, 1979. №10.
7. Варламов Д.Л., Костров В.В. Снижение уровня боковых лепестков корреляционной функции сложных дискретных сигналов при использовании μ -фильтрации // Радиотехника, 2006. № 11. С. 77-79.
8. Горбенко И.Д, Замула А.А., Колованова Е.П., Киянчук Р.И., Ярыгина Т.Е. Синтез фазоманипулированных последовательностей с хорошими автокорреляционными свойствами // Радиоэлектроника и информатика. 2011. №2. С. 31-34.
9. Черняк З. В. Математическое моделирование ансамблей дискретных ортогональных многоуровневых сигналов с требуемыми корреляционными характеристиками // Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.18. – Ставрополь, 2010.
10. Казаин Е.О. Исследование алгоритмов поиска псевдослучайной последовательности с улучшенными автокорреляционными и взаимнокорреляционными свойствами. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s025/s025-009.pdf>
11. Толстов Е. Ф., Яковлев А. М., Карпов О. А. Радиолокационный комплекс аппаратуры наблюдения в программе «Открытое небо» // Радиотехника. № 11. Серия «Радиолокационные системы и системы радиоуправления». 1995. № 2. Вып. 6. С. 54–57.
12. Алексеев С.Б., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Аппаратно-программный комплекс для имитации и записи сигналов существующих и перспективных радиоэлектронных средств // Материалы 27-ой Межд. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь. 2017.
13. Тарасенко А.М. Выбор способа построения зондирующего сигнала РСА и его критерии // Материалы 11-ой Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», – М.: ИРЭ им. Котельникова РАН, 2017. – С. 341-344.
14. 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
15. Хасанов М.С., Курганов В.В. Методы определения коэффициентов квазиоптимального КИХ-фильтра свёртки псевдослучайной бинарной последовательности. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014. Сборник трудов / под общ. ред. Академика РАН А.Л.Стемпковского. Часть IV. -М.: ИППМ РАН, 2014.