

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТРАЖЕННОГО РАДИОСИГНАЛА

В. К. Слизкой¹, А. С. Боков², Д. Ж. Нагашibaев³, А. А. Иофин⁴

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
^{3,4} Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Каменск-Уральский, Свердловская обл., Россия
¹ kavalerskiy@gmail.com, ² a.s.bokov@urfu.ru, ³ dmitriy.nagashibaev@gmail.com, ⁴ upkb@nexcom.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выполнен анализ методов получения сигналов, форма спектра которых может быть описана моделью доплеровского рассеяния – спектра Джейкса, характерного для многолучевого распространения и отражения электромагнитных волн при относительном движении источника и/или приемника радиосигнала над земной поверхностью. *Материалы и методы.* Представлены модификации теоретической модели спектра Джейкса и метода суммирования синусоид для реализации на их основе цифрового генератора сигнала доплеровского смещения, предназначенного для воспроизведения эффекта доплеровского рассеяния в программно-аппаратном комплексе полунатурного моделирования работы локационных систем летательных аппаратов. *Результаты и выводы.* Предложена реализация данного генератора на базе программируемой интегральной схемы, оптимизированная по уменьшению степени перекрестной и автокорреляции формируемого сигнала и количеству использованных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: доплеровское рассеяние, спектр Джейкса, полунатурное моделирование, программируемая логическая интегральная схема, сумма синусоид, цифровой генератор с низкой автокорреляцией

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-03-2022-011).

Для цитирования: Слизкой В. К., Боков А. С., Нагашibaев Д. Ж., Иофин А. А. Оптимизация алгоритма имитации доплеровского рассеяния отраженного радиосигнала // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 24–32. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-3

OPTIMIZATION OF THE DOPPLER SCATTERING SIMULATION ALGORITHM OF THE REFLECTED RADIO SIGNAL

V.K. Slizkoy¹, A.S. Bokov², D.Zh. Nagashibaev³, A.A. Iofin⁴

^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia
^{3,4} Ural Design Bureau "Detal", Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk region, Russia
¹ kavalerskiy@gmail.com, ² a.s.bokov@urfu.ru, ³ dmitriy.nagashibaev@gmail.com, ⁴ upkb@nexcom.ru

Abstract. *Background.* An analysis was made of methods for obtaining signals whose spectrum shape can be described by the Doppler scattering model – the Jakes spectrum, which is characteristic of multipath propagation and reflection of electromagnetic waves during the relative motion of the source and / or receiver of the radio signal above the earth's surface. *Materials and methods.* Modifications of the theoretical Jakes spectrum model and the sinusoid summation method are presented for the implementation on their basis of a digital Doppler shift signal generator designed to reproduce the Doppler scattering effect in a software and hardware complex for semi-natural simulation of the operation of aircraft location systems. *Results and conclusions.* An implementation of this generator based on a programmable integrated circuit is proposed, which is optimized to reduce the degree of cross and autocorrelation of the generated signal and the amount of computing resources used.

Keywords: doppler scattering, Jakes spectrum, HIL simulation, programmable logic integrated circuit, sum of sinusoids, low autocorrelation digital oscillator

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2022-011).

For citation: Slizkoy V.K., Bokov A.S., Nagashibaev D.Zh., Iofin A.A. Optimization of the doppler scattering simulation algorithm of the reflected radio signal. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):24–32. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-3

Введение

В составе летательных аппаратов (ЛА) применяются несколько типов бортовых локационных систем: радиовысотомеры (РВ) различных высот, радиолокационные системы (РЛС) и радиовысотомерные системы (РВС) для зондирования земной поверхности и построения безопасной траектории движения над подстилающей поверхностью земли или моря [1–3]. В процессе разработки и тестирования данных систем возникает необходимость их проверки в широком диапазоне параметров полета. Крайних (маловысотных, сверхскоростных и т.п.) значений параметров сложно добиться при натурных испытаниях, особенно если устройство и/или ЛА находится в процессе разработки.

Таким образом, приобретают актуальность системы имитации условий полета ЛА с воспроизведением отраженных радиолокационных сигналов. Нужны системы, позволяющие производить тестирование и верификацию РВ/РЛС с различными техническими характеристиками, в различных режимах работы радиосистем, в широком диапазоне значений высоты, скорости полета, угловых эволюций ЛА. При этом необходим учет физических явлений прохождения зондирующего сигнала через среду между излучателем и приемником системы: задержка, затухание, многолучевое распространение, переотражение и доплеровское смещение частоты [4–8]. Совокупность данных параметров может являться характеристикой фоноцелевой обстановки. Системы, способные обеспечивать воспроизведение сигнала на входе работающих радиосистем путем имитации наличия радиоканала и заданных фоноцелевых обстановок, в том числе в крайних, критических и запредельных, в лабораторных условиях, называют комплексами полунатурного моделирования (КПНМ).

Перед КПНМ стоит задача имитации различных параметров с определенной степенью точности, динамическим диапазоном и разрешением, причем имитация должна происходить в режиме реального времени. В качестве алгоритма имитации явления доплеровского смещения в предыдущих версиях программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования [8] было реализовано умножение радиолокационного сигнала на квадратурный гармонический сигнал с возможностью управления значениями частоты и фазы. Данный метод удобен и подходит для точечных и фазетных моделей сосредоточенных (локальных) целей, но при модификации алгоритма на основе данного метода для имитации отражения от облучаемой земной поверхности требует очень много ресурсов. При этом, по сути, каждый отражатель должен быть промоделирован независимо, что невозможно из-за ограничения пропускной способности интерфейса передачи данных между ПЛИС и управляющим процессором, который и обеспечивал обновление параметров доплеровского смещения [9].

Для более адекватного воспроизведения характеристик отражения от земных поверхностей было принято решение реализовать доплеровское рассеяние на основе модели сигнала, имеющего спектр Джейкса [10]. Известным методом генерации произвольного и выбранного спектров является метод суммы синусоид [11–16], однако у данного метода есть существенные недостатки. Один из них – перекрестная корреляция генерируемого сигнала [16]. Предлагаемая модель и ее реализация призваны сгладить этот недостаток, внося элемент случайности в генерацию в процессе работы.

Цель данной работы – разработка алгоритма имитации доплеровского рассеяния формируемого отраженного сигнала в соответствии с моделью Джейкса, реализуемой на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с циклом аппаратной генерации, уменьшающем перекрестную и автокорреляцию выходного сигнала. Для этого будут рассмотрены принципы построения генератора методом суммы синусоид, предложены модификации теоретической модели Джейкса и проведен анализ возможности ее реализации на базе ПЛИС.

Обзор модели доплеровского рассеяния Джейкса

Принцип работы КПНМ заключается в цифровой обработке радиолокационного сигнала, принятого от РВ/РЛС так, чтобы он стал эквивалентен отраженному от подстилающей поверхности для заданной фоноцелевой обстановки с учетом различных физических эффектов прохождения сигнала в реальных условиях и передаче сформированного сигнала на приемный вход РВ/РВС. К таким имитируемым эффектам относится среди прочих доплеровское смещение частоты радиолокационного сигнала при наличии движения РВ/РВС относительно подстилающей поверхности [7, 10, 11].

Выражение (1) описывает теоретический спектр генерируемого сигнала [4, 10]:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{f_{\max}^2 - f^2}}, f \in (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \\ 0, f \notin (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \end{cases} \quad (1)$$

где $S(f)$ – гармоники сигнала на оси частот, $f \in (1 \dots N)$; N – количество гармоник; $f_{\max} = kV_{ri}/\lambda$ – частота среза, т.е. граничная частота спектра Джейкса, соответствующая значению радиальной скорости V_{ri} (для фрагмента – i -го кольца равных дальностей в пятне облучения РВ/РЛС) при длине волны λ , $k = 2$ для активной радиолокации.

Таким образом, задача разрабатываемого сегмента алгоритма имитации – генерация сигнала, спектр которого будет соответствовать данному выражению, причем должна быть возможность управления граничной частотой спектра Джейкса. Диапазон возможных значений частоты среза лежит от 0 Гц – значения, при котором генерируемый спектр вырождается в единственную гармонику – до 10 кГц – значения, являющегося достаточным для имитации движения РВ/РЛС относительно цели. Сигнал должен иметь рэлеевское распределение амплитуд [11]. Теоретическая гистограмма выборок во временной области продемонстрирована на рис. 1.

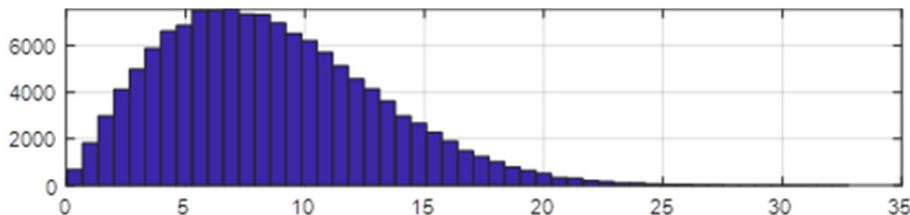


Рис. 1. Теоретическое распределение амплитуд формируемого сигнала

Кроме того, алгоритм должен иметь достаточное быстродействие либо небольшое потребление ресурсов кристалла для обеспечения возможности генерации по множеству каналов, так как для имитации отражения от большого участка поверхности необходимо воспроизвести разную ширину спектральной плотности доплеровского рассеяния в разных «бинах» дальности импульсной характеристики имитируемой радиолокационной сцены (земной/морской поверхности) [7, 9].

Проблемы, решаемые при оптимизации и адаптации данного алгоритма к аппаратной платформе [7]:

- обеспечение баланса соответствия формы спектра выходного сигнала генератора эталонному спектру Джейкса и расхода ресурсов ПЛИС;
- обеспечение соответствия характеристик быстродействия генератора требованиям систем реального времени;
- снижение степени перекрестной корреляции формируемого выходного сигнала.

Описание применения метода обратного преобразования Фурье

В качестве базы для генератора был выбран принцип прямого цифрового синтеза (DDS), который, как и при генерации одной или множества гармоник, заключается в хранении предварительно сформированных выборок сигнала в памяти и выдачу этих выборок на выход с определенной частотой, которая либо равна частоте цифровой обработки, либо ниже ее. Для этого память должна содержать предварительно сформированные квадратурные отсчеты значений сигнала. Последовательная выдача этих отсчетов позволит сгенерировать сигнал со спектром Джейкса на выходе генератора.

Такие отсчеты в виде циклической последовательности могут быть получены обратным быстрым преобразованием Фурье (ОБПФ) желаемых значений спектра после добавления к ним случайной фазы, а также дополнения нулевыми гармониками спектра в областях положительных и отрицательных частот. Теоретический спектр, полученный по формуле (1) в среде MATLAB для $f_{\max} \approx 5$ кГц, продемонстрирован на рис. 2.

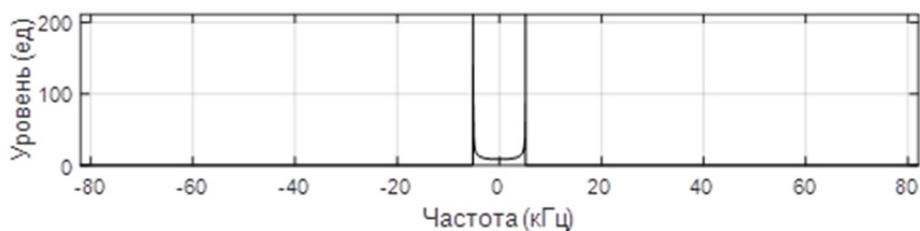


Рис. 2. Теоретическая форма спектра Джейкса

У выбранной модели есть ограничения для использования выбранного метода.

Первое – в функции, описывающей спектр, есть точки, в которых при расчете функции возможно деление на нуль за счет округления малой разности в целочисленной арифметике. Подход, выбранный для решения данной проблемы, заключается в замене гармоник в точках деления на нуль на значения равные нулю.

Второе – для приближения модели к реальности все гармоники спектра (в том числе нулевые) прошли операцию скользящего среднего (функция `smooth` в среде MATLAB) с шириной окна 8. Ширина окна выбрана кратной степени двойки для упрощения операции деления при аппаратной реализации – в этом случае деление сводится к отбрасыванию разрядов справа, количество которых равно степени двух (в нашем случае – 3).

Третье – для работы ОБПФ на вход необходимо подавать несинфазные гармоники. При несоблюдении данного условия на выходе ОБПФ будет сигнал, гистограмма которого не имеет распределения Рэля. Пример такого сигнала во временной области приведен на рис. 3. Зеленым цветом показана реальная часть сигнала, синим – мнимая. Рисунок 4 демонстрирует распределение некорректного сигнала.

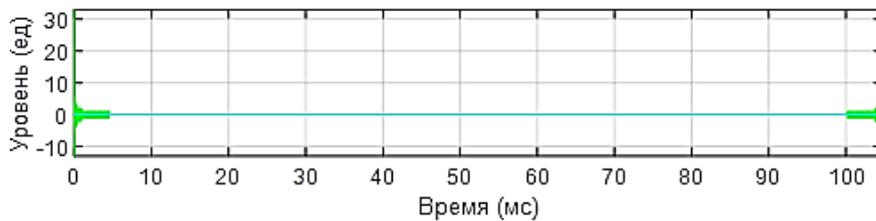


Рис. 3. Некорректная форма сигнала во временной области



Рис. 4. Распределение некорректного сигнала

Для решения этой проблемы каждой гармонике была добавлена случайная фаза путем умножения уровня на $e^{j2\pi rnd()}$, где `rnd()` – функция генерации случайного числа от 0 до 1. С учетом трех предложенных операций, примененных к теоретическому спектру, его форму можно описать выражением

$$S(f) = \text{smooth} \left(\left(\left(\begin{cases} d \frac{e^{j2\pi rnd()}}{\sqrt{f_{\max}^2 - f^2}}, & f \in (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \\ 0, & f \notin (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \end{cases} \right), 8 \right) \right), \quad (2)$$

где `smooth()` – функция скользящего среднего с шириной окна 8; d – коэффициент пропорциональности, подбираемый для удобства нормировки (к максимальному по модулю комплексному значению) при переходе к целочисленной арифметике.

На рис. 5 в масштабе показана форма спектра, соответствующая этому выражению.

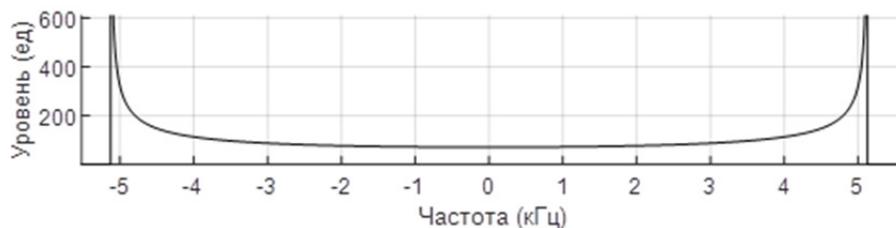


Рис. 5. Спектр сигнала после оптимизаций в масштабе

Четвертое – при математическом моделировании в среде MATLAB основные вычисления проводятся в формате знаковых чисел с плавающей запятой длиной 64 бит (double). Данный формат сложен и избыточен для обработки на ПЛИС и недопустим для передачи на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), поэтому массив выборок для блочной памяти был нормирован по значению к диапазону целочисленных знаковых чисел длиной 16 бит (int16), т.е. от минус 32 768 до плюс 32 767 и переведен в этот тип данных. Таким образом, при подготовке сохраняется повышенный диапазон значений в вычислениях, а в процессе работы акцент смещается на скорость вычислений.

Выборки сигнала во временной области рассчитываются согласно выражению

$$P(t) = \text{int16}(\text{ОБПФ}(S(f))), \tag{3}$$

где $P(t)$ – выборки сигнала на оси времени; ОБПФ() – функция обратного быстрого преобразования Фурье; int16() – функция нормировки – преобразования к формату int16.

Примеры выборок сигнала во временной области показаны на рис. 6, а распределение сигнала соответствует рис. 1 и является распределением Рэлея.

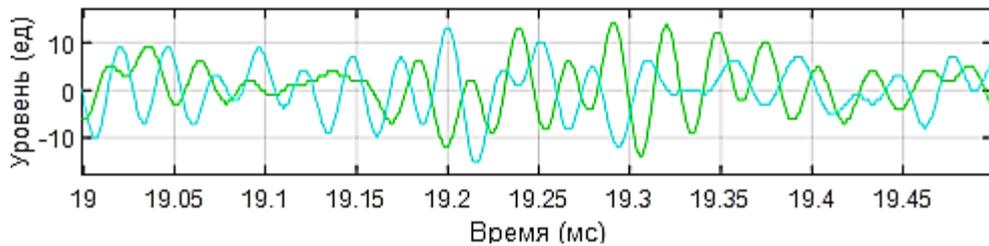


Рис. 6. Выборки сигнала на выходе ОБПФ

Резюмируя, для получения набора выборок во временной области для генерации сигнала спектра Джейкса с переменной частотой среза необходимо:

- 1) рассчитать уровни гармоник в спектре согласно (1) (кроме частот среза);
- 2) провести усреднение уровней гармоник;
- 3) добавить уровням случайную фазу, сформировав комплексные отсчеты гармоник;
- 4) добавить точки нулевых уровней гармоник;
- 5) провести ОБПФ над уровнями гармоник;
- 6) преобразовать результат в формат int16.

Реализация генератора

Все операции, приведенные выше, включая ОБПФ, возможно реализовать на базе ПЛИС [17–21]. Рисунок 7 показывает схему реализации генератора с данной математикой.

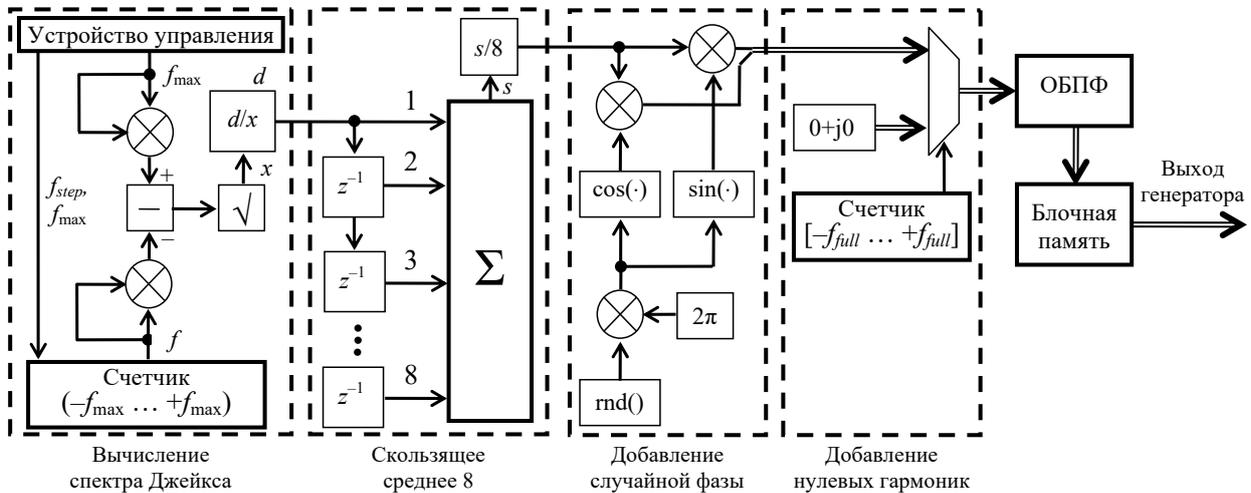


Рис. 7. Схема реализации генератора спектра Джейкса

Первая группа блоков «Вычисление спектра Джейкса» выполняет вычисление согласно формуле (1). При этом со стороны управляющего устройства поступает частота среза f_{\max} и шаг частоты f_{step} – расстояние между гармониками в частотной области, рассчитанное исходя из диапазона $-f_{\max} \dots +f_{\max}$ и количества гармоник, которые необходимо сгенерировать. Данный расчет проще производить на управляющем устройстве – процессоре, так как он включает в себя сложное деление и не требует частого обновления – данное значение необходимо обновлять не чаще, чем f_{\max} . Переменную частоту f обеспечивает счетчик, который пробегает диапазон значений $-f_{\max} \dots +f_{\max}$. Для его построения следует иметь в виду максимально возможное число гармоник и умножать значение на выходе на шаг частоты. Хотя симметричная форма спектра дает возможность сделать расчет лишь половины гармоник, выбор полного диапазона частот позволит впоследствии реализовать несимметричные формы спектров. Умножители и вычитатели могут быть реализованы на базе *DSP* ячеек, не требуя больших затрат ресурсов [18]. Несколько иначе обстоит дело с операциями извлечения квадратного корня и деления. Данные операции могут быть реализованы на базе *IP* блоков, однако это потребует сравнительно большого количества ресурсов [19, 20].

Группа вычисления скользящего среднего 8 представляет собой восемь регистров, которые хранят выборки для текущего окна в режиме *FIFO*, где выборка движется от первого регистра к последнему. При попадании первой выборки в первый регистр во всех остальных содержится значение 0, а когда ненулевые выборки заканчиваются, регистры заполняются значением 0 (на схеме не продемонстрировано). Это приводит к небольшому (несущественному по сравнению с разрешающей способностью РВ/РЛС) сглаживанию и расширению спектра за счет распределения первой и последней гармоники по восьми отсчетам справа и слева от ненулевых, которые до прохождения через скользящее среднее были нулевыми. Восьмивходовый сумматор состоит из нескольких двухвходовых суммирующих *DSP* ячеек [18]. Количество таких сумматоров равно ширине окна минус один, а глубина конвейера – логарифму по основанию 2 от ширины окна (в нашем случае 3). Деление на 8 осуществляется посредством простого отбрасывания трех правых разрядов без округления.

Генератор случайной фазы основан на генераторе случайных чисел, который можно реализовать на ПЛИС [21, 22]. Тригонометрические функции $\cos()$ и $\sin()$ могут быть реализованы на базе *IP* блоков [20].

Добавление нулевых гармоник реализовано посредством коммутатора под управлением счетчика, который считает диапазон гармоник с учетом нулевых – f_{full} . Если значение счетчика равно ненулевой гармонике – активен верхний вход, на выходе коммутатора – гармоника-результат расчета предыдущих блоков. Если значение счетчика равно нулевой гармонике – активен нижний вход, на выходе блока комплексный нуль.

Таким образом, на вход блока ОБПФ попадает f_{full} гармоник, которые в сумме представляют собой спектр Джейкса. Длина ОБПФ равна f_{full} и на выходе будет такое же число отсчетов, но уже на оси времени. Данные отсчеты необходимо записать в блочную память, так как количество тактов расчета ОБПФ в тысячи раз больше количества отсчетов сгенерированного сигнала – блок ОБПФ не сможет выдавать отсчеты в процессе работы постоянно [17].

Новизна и отличие предлагаемого метода от метода суммы синусоид заключается в возможности динамического перерасчета формы спектра, хранения и выдаче выборок готового сигнала без необходимости коррекции уровня и суммирования различных его гармоник. Динамический перерасчет формы спектра позволяет менять ширину доплеровского спектра, а также впоследствии реализовать несимметричные формы спектров, соответствующие наличию угловых эволюций ЛА.

Заключение

Теоретическое выражение для расчета формы спектра Джейкса не подходит для эффективной аппаратной реализации генератора, однако представленные модификации позволяют добиться поставленной цели.

Аппаратная платформа современных КПНМ на основе ПЛИС позволяет реализовать полный цикл генерации в реальном времени спектра Джейкса с переменными параметрами на уровне ПО, однако решение данной задачи требует большого количества ресурсов кристалла ввиду наличия операций деления, извлечения квадратного корня, тригонометрических функций, ОБПФ. Данное обстоятельство затрудняет использование предложенной схемы генератора по множеству каналов для использования в качестве входа для операции свертки в построении КПНМ [7–9].

Внесение элемента случайности при данной архитектуре генератора несколько уменьшает перекрестную и автокорреляцию выходного сигнала – он будет повторяться, пока не будет произведено вычисление очередного ОБПФ, являющееся наиболее долго выполняемым процессом в структуре генератора. Однако данной меры недостаточно для построения полностью некоррелированного сигнала (полученные при моделировании значения перекрестной корреляции не превышают значений 0,15). Корреляционная обработка считается оптимальной при анализе радиолокационных сигналов в РЛС, поэтому предположительно возможно появление «артефактов» синтезируемых радиолокационных изображений – ложных отметок. Хотя в практической радиолокации земных поверхностей всегда имеется некоторый уровень шума и пятнистость (спекл-шум), такой шум, пройдя стадию обработки (согласованной фильтрации, синтеза изображения), может иметь другие статистические характеристики. Требуется дополнительное имитационное моделирование или экспериментальное исследование в составе РВС/РЛС со сложными методами обработки сигналов для исследования степени эквивалентности характеристик формируемых сигналов.

В силу вычислительной эффективности метода ОБПФ предложенный метод генерации при равном числе ненулевых гармоник требует меньше ресурсов ПЛИС, чем метод непосредственной генерации сигналов во временной области, а также может быть доработан для непрерывного изменения только некоторой доли фаз гармоник сигнала по модели спектра Джейкса.

Список литературы

1. Скрыпник О. Н. Радионавигационные системы воздушных судов : учебник. М. : ИНФРА-М, 2018. 348 с. URL: dx.doi.org/10.12737/1064
2. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии / отв. ред. А. П. Жуковский. М. : Сов. радио, 1979. 320 с.
3. Скольник М. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника ; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы : в 2-х кн. М. : Техносфера, 2014. К. 1. 672 с.
4. Стругов Ю. Ф., Семенов А. М., Добровольский С. М., Батырев И. А. Разработка имитатора многолучевого канала связи с аддитивными и мультипликативными помехами // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 4. С. 27–38. doi:10.33286/2075-8693-2019-43-27-38
5. Хлебников Д. В., Кислицын Ю. Д., Конаныхин Е. С., Лазиков Д. В. Особенности формирования фоноцелевой обстановки на комплексах полунатурного моделирования бортовых радиолокационных систем конечного наведения // Авиационные системы в XXI веке : сб. докл. науч.-техн. конф. М. : Гос. НИИ авиационных систем, 2017. С. 70–80.
6. Герасимов А. Б., Погребной Д. С., Кренев А. Н. Комплекс имитационного моделирования эхо-сигналов динамической радиофизической сцены // Молодежь и наука : материалы I внутривузовского конкурса инновационных проектов. Ярославль : Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, 2009. С. 5–13.
7. Bokov A., Vazhenin V., Zeynalov E. Development and Evaluation of the Universal DRFM-based Simulator of Radar Targets // SIBIRCON 2019 : International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. 2019. P. 182–186. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958398
8. Боков А. С., Вазенин В. Г., Иофин А. А., Мухин В. В. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 40–49.
9. Боков А. С., Слизкой В. К., Нагашибаев Д. Ж. [и др.]. Концепция имитации отраженных сигналов для радиовысотометров в режиме реального времени // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 98–103.
10. Jakes W. C. Microwave mobile communications. Lucent Technologies, 1974.
11. Cilliers J. E., McDonald A. M., Strydom J. J., Wyk van M. A. Hardware in the Loop (HIL) Generation of Airborne Clutter Using a Sum of Complex Sinusoids Technique // IEEE National Radar Conference : proceedings. 2015. P. 1510–1512.
12. Gutierrez C. A., Patzold M. The design of sum-of-cisoids Rayleigh fading channel simulators assuming non-isotropic scattering conditions // IEEE Trans. Wireless Comms. 2010. Vol. 9, № 4. P. 1308–1314.
13. Patzold M., Talha B. On the statistical properties of cisoids-based mobile radio channel simulators // Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'07) : proc. 10th Int. Symp. Jaipur, India. 2007. P. 516–518.
14. Patzold M., Youssef N. Modelling and simulation of directionselective and frequency-selective mobile radio channels // AEU International Journal of Electronics and Communications. 2001. Vol. 55, № 6. P. 433–442.
15. Mc Donald A. M., Olivier J. C. A comparative study of deterministic and stochastic sum-of-sinusoids models of Rayleigh-fading wireless channels // Wireless Communications and Networking Conference. 2007. P. 2027–2031.

16. Pätzold M., Wang Ch.-X., Hogstad B. O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms // *IEEE Transactions on wireless communications*. 2009. Vol. 8, № 6. P. 176–179.
17. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v8.0 Datasheet. URL: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds808_xfft
18. 7 Series DSP48E1. Slice User Guide. URL: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug479_7Series_DSP48E1
19. LogiCORE IP Divider Generator v5.1. Product Guide. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg151-div-gen>
20. LogiCORE IP Cordic v6.0. Product Guide. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg105-cordic>
21. True Random Number Generator (TRNG). URL: <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/1-onj5tx.html#overview>
22. Justin R., Mathew B. K., Abe S. FPGA Implementation of High Quality Random Number Generator using LUT based Shift Registers // *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST 2015)*. 2016. Vol. 24. P. 1155–1162.

References

1. Skrypnik O.N. *Radionavigatsionnye sistemy vozdukhnykh sudov: uchebnik = Aircraft radio navigation systems : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2018:348. (In Russ.). Available at: dx.doi.org/10.12737/1064
2. Zhukovskiy A.P., Onoprienko E.I., Chizhov V.I. *Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii = Theoretical foundations of radio altimetry*. Moscow: Sov. radio, 1979:320. (In Russ.)
3. Skolnik M. (ed.). *Spravochnik po radiolokatsii = Handbook of radar / translated from English by V. S. Verby: in 2 books*. Moscow: Tekhnosfera, 2014;1:672. (In Russ.)
4. Strugov Yu.F., Semenov A.M., Dobrovolskiy S.M., Batyrev I.A. Development of a multipath communication channel simulator with additive and multiplicative interference. *Tekhnika radiosvyazi = Radio communication technology*. 2019;(4):27–38. (In Russ.). doi:10.33286/2075-8693-2019-43-27-38
5. Khlebnikov D.V., Kislitsyn Yu.D., Konanykhin E.S., Lazikov D.V. Features of the formation of the phonological situation on the complexes of semi-natural modeling of airborne radar systems of final guidance. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke: sb. dokl. nauch.-tekhn. konf = Aviation systems in the XXI century: collection of reports of scientific and technical. conf*. Moscow: Gos. NII aviatsionnykh sistem, 2017:70–80. (In Russ.)
6. Gerasimov A.B., Pogrebnoy D.S., Krenev A.N. Complex of simulation modeling of echo signals of dynamic radiophysical scene. *Molodezh' i nauka: materialy I vntrivuzovskogo konkursa innovatsionnykh proektov = Youth and science : materials of the I intra-university competition of innovative projects*. Yaroslavl : Yaroslavskiy gosudarstvennyy universitet im. P. G. Demidova, 2009:5–13. (In Russ.)
7. Bokov A., Vazhenin V., Zeynalov E. Development and Evaluation of the Universal DRFM-based Simulator of Radar Targets. *SIBIRCON 2019: International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 2019:182–186. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958398
8. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Iofin A.A., Mukhin V.V. Relay signal simulator for checking the characteristics of airborne radar systems and devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(3):40–49. (In Russ)
9. Bokov A.S., Slizkoy V.K., Nagashibaev D.Zh. et al. The concept of simulation of reflected signals for radio altimeters in real time. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:98–103. (In Russ.)
10. Jakes W.C. *Microwave mobile communications*. Lucent Technologies, 1974.
11. Cilliers J.E., McDonald A.M., Strydom J.J., Wyk van M.A. Hardware in the Loop (HIL) Generation of Airborne Clutter Using a Sum of Complex Sinusoids Technique. *IEEE National Radar Conference: proceedings*. 2015:1510–1512.
12. Gutierrez C.A., Patzold M. The design of sum-of-cisoids Rayleigh fading channel simulators assuming non-isotropic scattering conditions. *IEEE Trans. Wireless Comms*. 2010;9(4):1308–1314.
13. Patzold M., Talha B. On the statistical properties of cisoids-based mobile radio channel simulators. *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'07): proc. 10th Int. Symp*. Jaipur, India. 2007:516–518.
14. Patzold M., Youssef N. Modelling and simulation of directionselective and frequency-selective mobile radio channels. *AEU International Journal of Electronics and Communications*. 2001;55(6):433–442.
15. Mc Donald A.M., Olivier J.C. A comparative study of deterministic and stochastic sum-of-sinusoids models of Rayleigh-fading wireless channels. *Wireless Communications and Networking Conference*. 2007:2027–2031.
16. Pätzold M., Wang Ch.-X., Hogstad B.O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms. *IEEE Transactions on wireless communications*. 2009;8(6):176–179.
17. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v8.0 Datasheet. Available at: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds808_xfft
18. 7 Series DSP48E1. Slice User Guide. Available at: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug479_7Series_DSP48E1
19. LogiCORE IP Divider Generator v5.1. Product Guide. Available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg151-div-gen>

20. *LogiCORE IP Cordic v6.0. Product Guide*. Available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg105-cordic>
21. *True Random Number Generator (TRNG)*. Available at: <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/1-onj5tx.html#overview>
22. Justin R., Mathew B.K., Abe S. FPGA Implementation of High Quality Random Number Generator using LUT based Shift Registers. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST 2015)*. 2016;24:1155–1162.

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Константинович Слизкой

аспирант, инженер департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: kavalerskiy@gmail.com

Александр Сергеевич Бокон

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Дмитрий Жубатканович Нагашбаев

начальник научно-тематического отдела, Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», (Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: dmitriy.nagashibaev@gmail.com

Александр Аронович Иофин

кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», (Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Valeriy K. Slizkoy

Postgraduate student, engineer of the department of radioelectronics and communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Aleksandr S. Bokov

Candidate of technical sciences, senior researcher, associate professor of the department of radioelectronics and communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Dmitriy Zh. Nagashibaev

Head of the scientific and thematic department, Ural design bureau "Detal" (8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region, Kamensk-Uralsky, Russia)

Aleksandr A. Iofin

Candidate of technical sciences, deputy chief designer, Ural design bureau "Detal" (8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region, Kamensk-Uralsky, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 23.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022