

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.7>

УДК: 621.396.967

## **ТЕСТИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ ПРИ ПОМОЩИ DRFM**

**Ю.Н. Горбунов<sup>1,2</sup>, А.П. Сонин<sup>3</sup>, А.В. Хромцев<sup>3</sup>, Д.М. Свиринов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, д. 1

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. акад. А.И. Берга, 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9

<sup>3</sup> Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1

Статья поступила в редакцию 6 июня 2021 г.

**Аннотация.** Целью данной работы является практическая отработка технологии тестирования радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) при помощи цифровой радиочастотной памяти (Digital Radio-Frequency Memory - DRFM). Использовались методы численного математического моделирования взаимодействующих друг с другом радиочастотных систем в MATLAB, методы прототипирования указанных систем при помощи модульного оборудования компании Keysight Technologies, а также применялись реальные изготовленные устройства (модуль DRFM). В работе рассмотрена технология тестирования РСА при помощи DRFM. Описан макет РСА, построенный на основе модульного оборудования компании Keysight Technologies, работающего под управлением программного пакета MATLAB. Рассмотрены структурная и функциональная схемы макета РСА, перечислены режимы его функционирования. Описано устройство DRFM, изготовленное на основе VPX-модуля с ПЛИС и создающее на радиолокационном изображении (РЛИ) РСА несколько произвольно расположенных точечных имитационных отметок. Приведена структура данной DRFM. В результате работы получено тестовое РЛИ, сформированное макетом

РСА в результате обработки синтезированной в DRFM цифровой радиоголограммы (ЦРГ).

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, цифровая радиочастотная память.

**Abstract.** The aim of this work is the practical development of the technology for synthetic aperture radars (SAR) testing using Digital Radio-Frequency Memory (DRFM). In this work, the methods of numerical mathematical modeling of interacting radio frequency systems in MATLAB and the methods for prototyping these systems using modular equipment from Keysight Technologies were used. And also, real manufactured devices (DRFM module) were used. In this work, the technology of SAR testing using DRFM are discussed. The SAR prototype, built on the basis of modular equipment from Keysight Technologies and running under the MATLAB control is described. The structural and functional diagrams of the SAR model are considered, its operating modes are listed. A DRFM device, made on the basis of a VPX module with an FPGA and creating several arbitrary located simulated point targets on the SAR image is described. The structure of this DRFM is given. As a result of the work, a test radar image, formed by the SAR model as a result of processing synthesized in DRFM a digital radio-hologram (DRH), was obtained.

**Key words:** synthetic aperture radar, digital radio frequency memory.

## **Введение.**

При разработке, отладке и испытаниях РСА требуется многократное проведение радиолокационной съемки различных типов участков местности с неподвижными и движущимися объектами в различных режимах. Проведение летных экспериментов для отработки каждого типа режима съемки либо требует расходования больших финансовых средств и значительного времени, либо вовсе нереализуемо. Поэтому актуальной задачей является тестирование РСА методами моделирования и макетирования. При моделировании расчет отсчетов зондирующего радиосигнала и ЦРГ, а также синтез РЛИ производятся на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) в какой-либо программной среде

(например, в MATLAB) [1-5]. Для этого в данной программной среде создаются соответствующие модели:

- формирователя зондирующего радиосигнала;
- антенной системы;
- отражающей подстилающей поверхности и объектов;
- приемника РСА;
- алгоритма обработки ЦРГ и формирования РЛИ.

При макетировании формирование зондирующего радиосигнала и приём отражённой радиоголограммы производятся макетом РСА, собранным из какого-либо специального модульного оборудования (например, производимого компаниями Keysight, National Instruments и др.), обработка ЦРГ и синтез РЛИ – вычислительной системой, а синтез ЦРГ – при помощи DRFM, использующей сформированный зондирующий радиосигнал.

### **1. Макет РСА**

Для решения рассматриваемой задачи была использована программно-аппаратная радиочастотная система, собранная из оборудования компании Keysight Technologies, работающего под управлением программного пакета MATLAB, в составе:

- 5-слотовое AXIe-шасси M9505A;
- генератор сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator - AWG) M8190A;
- дигитайзер M9703A;
- PCIe-адаптер M9048A;
- вычислительный комплекс Forsite-6340 с графическими ускорителями (GPU) NVIDIA Tesla K40c, использующими технологию «Compute Unified Device Architecture» (CUDA);
- осциллограф DSO90804A.

На базе данной системы был создан макет РСА, позволяющий:

- формировать сверхширокополосные (СШП) зондирующие радиосигналы различной, в том числе произвольной формы: фазо-кодо-модулированные

(ФКМ), линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ), нелинейно-частотно-модулированные (НлЧМ), шумоподобные, шумовые и другие;

- рассчитывать и формировать ЦРГ радиосигнала, отраженного от земной поверхности, с заданным рисунком радиолокационного контраста;

- принимать отраженные радиосигналы, несущие радиоголограмму изображения, сформированную при помощи DRFM, либо иного имитатора земной поверхности;

- производить первичную и вторичную цифровую обработку принятых сигналов в MATLAB, в том числе на CUDA GPU, аналогичную обработке сигнала, используемой в PCA, получая при этом РЛИ заданного рисунка радиолокационного контраста (либо РЛИ, формируемое DRFM).

Фотомакета PCA, включая шасси M9505A с генератором M8190A и дигитайзером M9703A и вычислительный комплекс Forsite-6340, показано на рисунке 1. Структурная схема макета PCA изображена на рисунке 2.

Расчет отсчетов зондирующего радиосигнала, обработка отсчетов принятого радиосигнала и управление параметрами работы макета осуществляются в программном пакете MATLAB, при помощи которого реализованы:

- память параметров моделирования (Modeling Patameters Memory);

- синтезатор зондирующего сигнала (Tr Sig Synthesizer), представляющий собой квадратурный (IQ) прямой цифровой синтезатор (DDS);

- многоточечная модель снимаемой поверхности (Multipoint Surface Model);

- подсистема обработки принятого сигнала (Rec Sig Processing Subsystem).

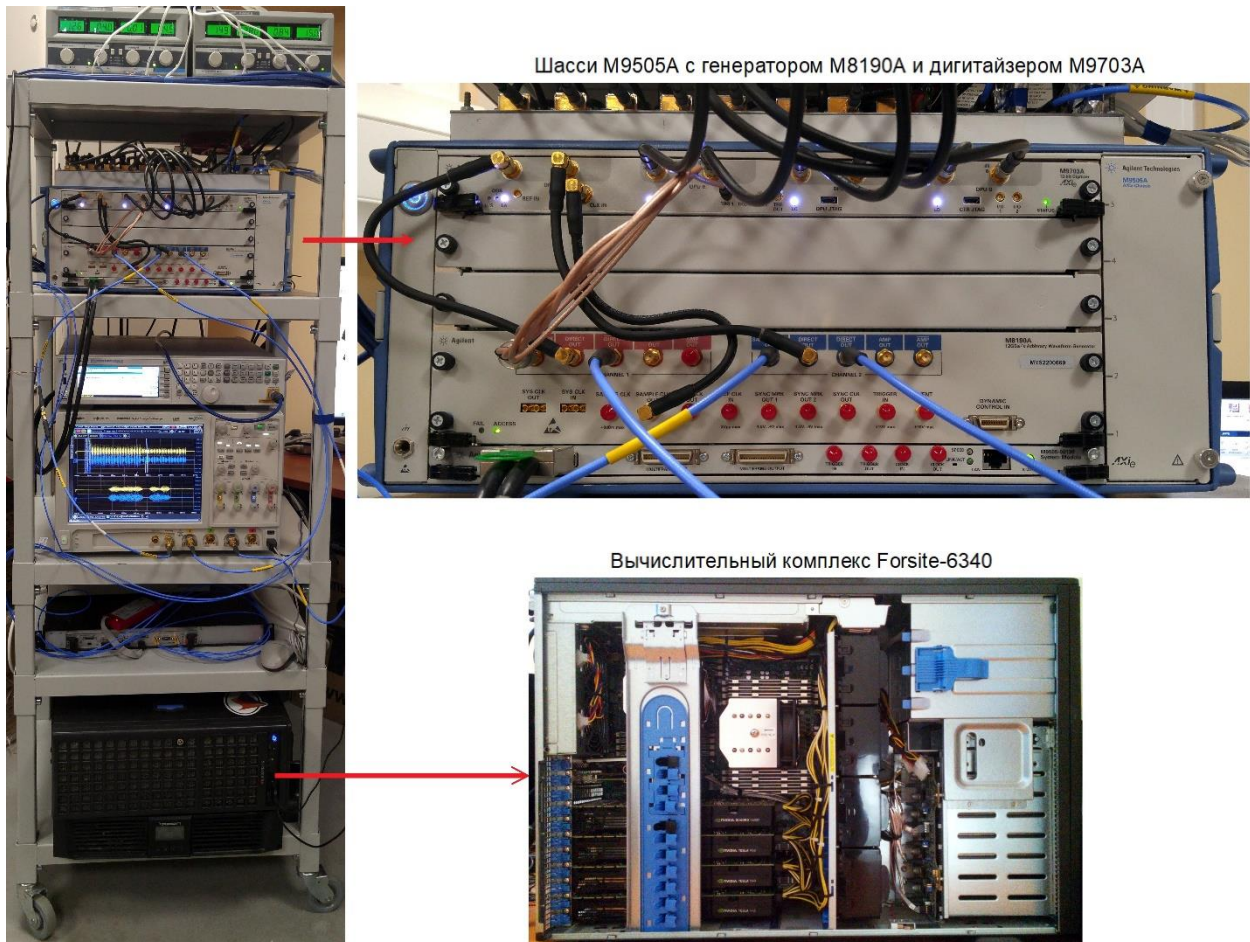


Рис. 1. Макет PCA, шасси M9505A с генератором M8190A и дигитайзером M9703A, вычислительный комплекс Forsite-6340

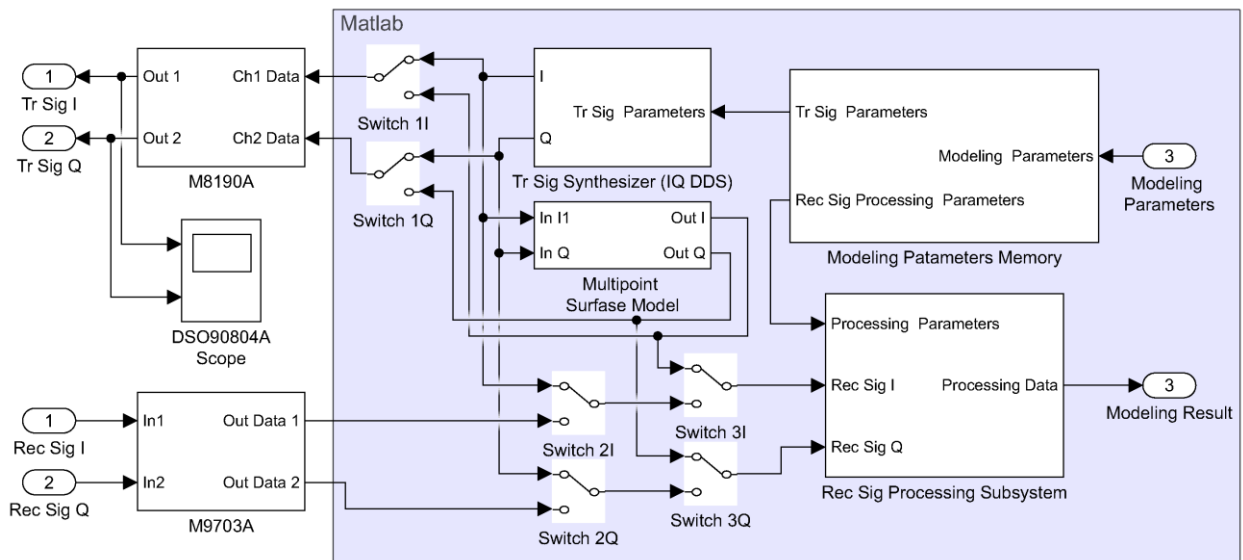


Рис. 2. Структурная схема макета PCA

Сформированные в MATLAB отсчеты зондирующего радиосигнала PCA (рисунок 2) могут подаваться как на генератор сигналов произвольной формы M8190A и с его выходов в электрическом виде поступать на другое

радиочастотное оборудование или излучаться в эфир, так и в математическом виде в многоточечную модель снимаемой поверхности, реализованную здесь же, в MATLAB, и представляющую собой, по сути, цифровой программный синтезатор многоточечной радиоголограммы. Принятый (отраженный от снимаемой поверхности) сигнал на вход подсистемы обработки принятого сигнала (Rec Sig Processing Subsystem) может поступать с трех источников:

- с дигитайзера M9703A;
- с синтезатора зондирующего сигнала;
- с многоточечной модели снимаемой поверхности.

Выбор источника сигнала осуществляется программными переключателями Switch в MATLAB. Такая структура позволяет применять макет PCA в нескольких режимах работы, как с использованием приборов M8190A/M9703A и формированием/приемом реальных электрических сигналов, так и без, оперируя с «виртуальными» сигналами только внутри MATLAB, рисунок 2:

**Режимы 1 и 2.** Так, при включении в контур приборов M8190A/M9703A (ключи 1 в верхнем положении, 2 и 3 - в нижнем положении) макет PCA может быть использован непосредственно для радиолокационной съемки (при наличии квадратурных преобразователей частоты, выходного усилителя мощности, приемного маломощного усилителя и приемо-передающей антенны), либо совместно с имитатором отраженного от снимаемой поверхности радиосигнала, например, построенным на основе DRFM.

**Режим 3.** Если ключи 1 переключить в нижнее положение, то генератор M8190A будет воспроизводить отсчеты сигнала с выхода синтезатора радиоголограмм (Multipoint Surface Model). Дигитайзер так же, как и в предыдущих режимах, будет оцифровывать радиосигнал со входов Rec Sig, а подсистема обработки будет их обрабатывать. В данном режиме предполагается, что выходы Tr Sig соединены с соответствующими входами Rec Sig либо напрямую, либо через некоторую квадратурную цепь с небольшой задержкой. Данный режим может быть использован для тестирования исправности приборов M8190A/M9703A,

либо некоторой квадратурной цепи, включенной между ними (например, DRFM или иного имитатора отраженного сигнала в режиме простой ретрансляции).

**Режим 4.** Приборы М8190А/М9703А не используются. На вход подсистемы обработки принятого сигнала поступают отсчеты зондирующего сигнала с выхода синтезатора зондирующего сигнала (ключи 2 – в верхнем положении, 3 – в нижнем). Макет РСА используется для контроля корректности расчета отсчетов зондирующего сигнала и обработки принятого одноточечного сигнала. Подсистема обработки в данном режиме формирует одну размытую тестовую отметку на плоскости азимут-дальность.

**Режим 5.** Приборы М8190А/М9703А также не используются. На вход подсистемы обработки принятого сигнала поступают отсчёты сигнала с выхода многоточечной модели поверхности (ключ 3 - в верхнем положении). Макет РСА применяется в режиме программного синтеза радиоголограмм заданных изображений и проверки алгоритмов подсистемы обработки принятого сигнала.

На рисунке 3 приведена функциональная схема формирования зондирующего и обработки принятого радиосигналов РСА для режима ScanSAR. Зондирующий радиосигнал формируется в цифровом формирователе зондирующего сигнала (ЦФЗС). В приемной части схема содержит два согласованных фильтра (СФ): дальностный СФ, осуществляющий временное сжатие принимаемых сложных радиоимпульсов, и азимутальный СФ, выполняющий синтез апертуры. Дальностный СФ реализован в IP-ядре быстрой свертки Fast Conv Core 1, которое забирает отсчеты принятого радиосигнала из двухпортовой сигнальной памяти DPSM1 и записывает результат обработки в двухпортовую сигнальную память DPSM2, со второго порта которой отсчеты сжатого по дальности принятого сигнала подаются в азимутальный СФ, выполненный в IP-ядре Fast Conv Core 2. Результаты обработки азимутального СФ записываются в двухпортовую сигнальную память DPSM3, со второго порта которой через высокоскоростную радиолинию передаются в систему обработки. Параметры радиолокационной съемки задаются центральным процессором РСА

в оперативном запоминающем устройстве дескрипторов зондирующих радиопульсов (ОЗУ ДЗРИ) и ОЗУ парциальных полос (ПП).

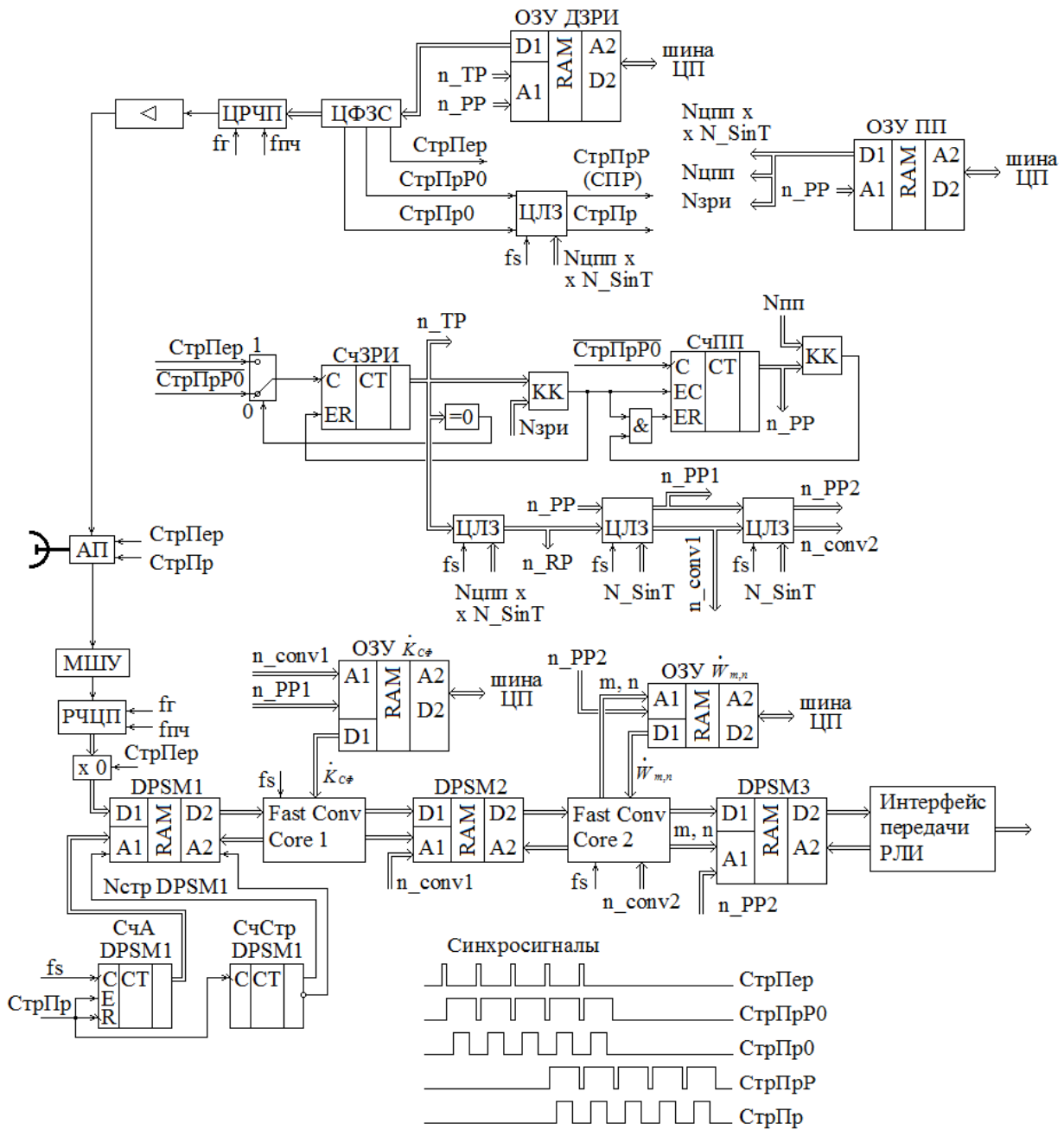


Рис. 3. Функциональная схема формирования зондирующего и обработки принятого радиосигналов РСА для режима ScanSAR, реализованная в макете

Описываемый макет РСА был использован для отработки методов и алгоритмов синтеза РЛИ. В ходе данной работы задавались различные точечные тестовые изображения, для которых синтезировались ЦРГ. Полученные радиоголограммы подавались на подсистему обработки, которая строила соответствующие радиолокационные изображения. Кроме этого,



анализировались осциллограммы и спектры сигналов в различных точках схемы формирования зондирующего и обработки принятого радиосигналов (рисунок 3), что позволило оценить корректность работы РСА.

Применение в зондирующем сигнале нескольких чередующихся модулирующих М-последовательностей позволило существенно снизить наложение на полезный отраженный радиосигнал паразитных радиосигналов, принятых по боковым и альтиметровому лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны РСА, тем самым повысив качество снимаемого РЛИ.

## **2. DRFM**

Для имитации отражения зондирующего радиосигнала радиолокатора от подстилающей поверхности в классической радиолокации (без синтезирования апертуры) как правило используется DRFM, которая в общем случае применяется в широком спектре приложений [6-8]:

- в «Electronic Warfare» (EW) - и «Electronic Attack» (EA) - системах для формирования ответных радиосигналов;
- в «Electronic Support» (ES) - системах для приема и запоминания радиосигналов с целью их последующего анализа;
- в AWG для генерации сигналов произвольной формы;
- в тренажерах для обучения операторов радаров;
- в различного рода имитаторах фоноцелевой обстановки для испытания радаров;
- в самих радарах для их встроенного тестирования и проверки режимов работы;
- в составе радиолокационных целей;
- в различных системах для решения технических задач задержки сигнала по времени, сдвига по частоте, размножения и синтеза сложных сигналов.

DRFM преобразовывает вниз по частоте (в базовую полосу частот, «baseband») и оцифровывает поступающий на ее вход зондирующий радиосигнал РЛС, формируя цифровые квадратурные составляющие (I- и Q-), которые записываются через порт записи в двухпортовую сигнальную память. Через порт чтения данной памяти запомненный сигнал может быть многократно считан с

варьируемой задержкой относительно записанного, наделен цифровыми способами частотной, фазовой и амплитудной модуляцией, восстановлен в аналоговую форму, преобразован по частоте в рабочий диапазон частот и переизлучен обратно в направлении РЛС. Поскольку переизлученный DRFM радиосигнал представляет собой точную копию зондирующего радиосигнала, в приемнике РЛС невозможно отличить переизлученный радиосигнал от отраженного от реальных объектов (подстилающей поверхности, целей и т.д.). Таким образом, DRFM формирует на выходе приемника РЛС множество имитационных отметок, похожих на отметки от реальных точечных целей [6-8].

Однако классическая DRFM для формирования ЦРГ для РСА в большинстве случаев непригодна по причине постоянных (в течение пачки радиоимпульсов) формируемых доплеровских сдвигов и запоминании лишь одного радиоимпульса.

DRFM, специально предназначенные для формирования радиоголограмм отраженного радиосигнала для РСА, имеют существенные отличия [9-11] и могут быть разделены на два класса: формирующие на синтезируемом РЛИ точечные имитационные отметки и создающие заданные изображения (карты местности). Первый класс DRFM наиболее предпочтителен при технологической оценке характеристик РСА, таких, как:

- развал отклика двумерного СФ на точечный отражатель (ТО) при различных его положениях на РЛИ;
- уровень боковых лепестков отклика двумерного СФ на ТО;
- разрешающая способность двух ТО;
- обнаружение ТО с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) на фоне яркого ТО.

Для этих целей в DRFM достаточно формировать 2-3 точечных имитационных отметки. Второй класс DRFM необходим для проверки функциональных характеристик РСА, определяющих качество синтезируемого РЛИ при съемке участков земной поверхности различных типов, а также применяется в EW-системах, предназначенных для борьбы с РСА, для формирования

искусственных карт [12, 13]. В настоящей статье рассматривается DRFM первого класса, предназначенная для тестирования РСА.

Для решения поставленной задачи авторами данной статьи было создано устройство DRFM. В качестве платформы цифровой обработки сигналов (ЦОС) были использованы VPX модуль SVP-721 с мезонинными субмодулями SFM-2A1000-2D1000 и SFM-4F10S, изготовленные компанией ЗАО «Скан Инжиниринг Телеком». Для преобразования входных радиосигналов из рабочего диапазона частот в базовую полосу и выходных сигналов из базовой полосы в рабочий диапазон частот был использован модуль преобразования частоты.

Фото VPX модуля SVP-721 в сборе с субмодулями SFM-2A1000-2D1000 и SFM-4F10S показано на рисунке 4. Внешний вид устройства DRFM изображен на рисунке 5.

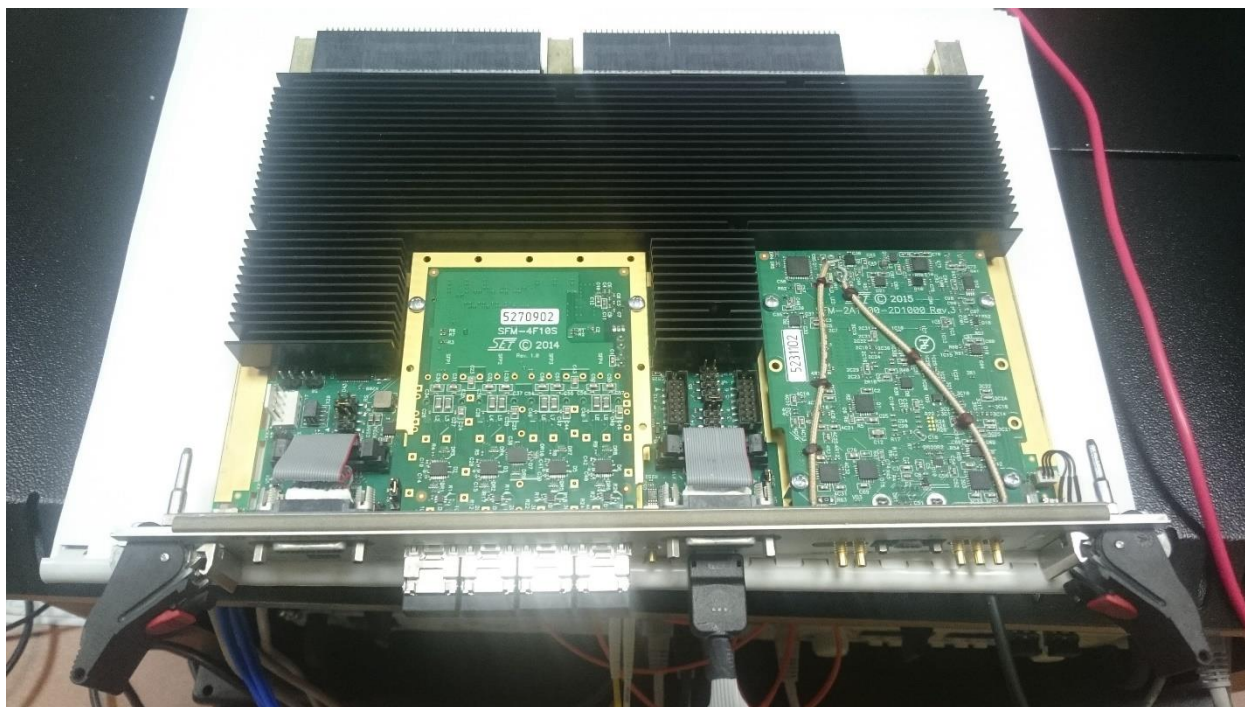


Рис. 4. VPX модуль SVP-721 в сборе с субмодулями SFM-2A1000-2D1000 и SFM-4F10S

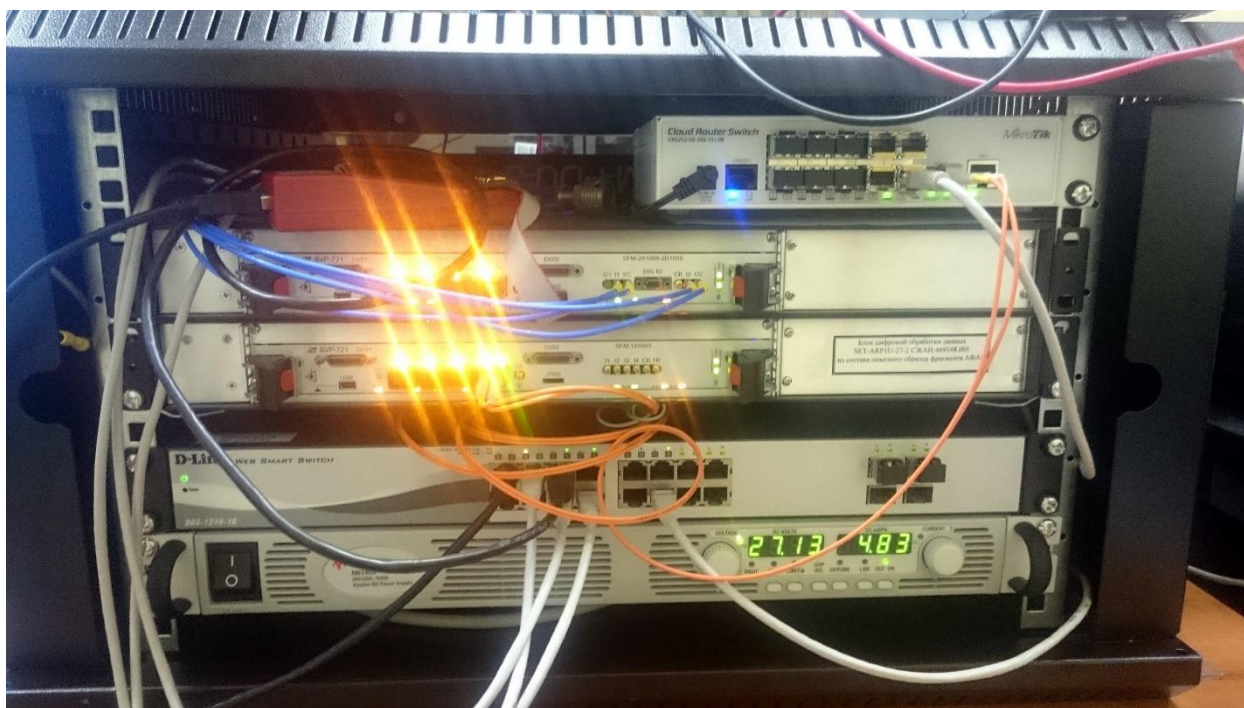


Рис. 5. Устройство DRFM

Для синтеза и отладки IP-ядра ПЛИС устройства DRFM использовалась среда VIVADO. Для управления устройством DRFM была написана программа управления, представляющая собой графический интерфейс пользователя (GUI), позволяющий задавать режимы работы DRFM и положения имитируемых ТО в кадре РЛИ. На рисунке 6 представлена схема испытания устройства DRFM совместно с макетом РСА, а на рисунке 7 - функциональная схема устройства. Основные характеристики устройства DRFM перечислены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики устройства DRFM

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Диапазон рабочих частот   | Х                                  |
| Мгновенная полоса частот  | до 1 ГГц                           |
| Длительность запоминаемого радиосигнала   | до 700 мкс                         |
| Длительность обрабатываемой пачки зондирующих радиоимпульсов  | 17 мс                              |
| Динамический диапазон ретранслируемых сигналов  | не менее 60 дБ                     |
| Уровень вносимых паразитных составляющих<br>- с учетом модуля преобразования частоты<br>- без учета модуля преобразования частоты | не более -35 дБ<br>не более -60 дБ |
| Число имитируемых ТО  | 3                                  |
| Размер кадра имитируемого тестового изображения   | 2250x25000 м                       |

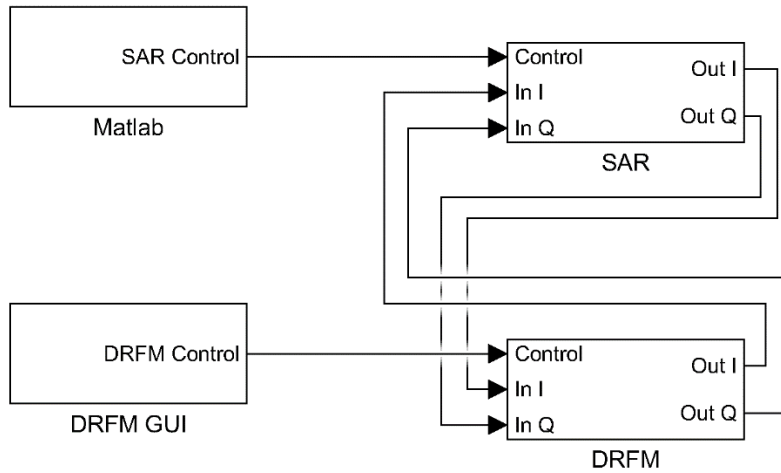


Рис. 6. Схема испытания устройства DRFM совместно с макетом PCA

При синтезе функционального построения и IP-ядра разработанного устройства DRFM потребовалось решение ряда новых задач, обусловленных отличием принципов обработки принятых радиосигналов в PCA и в обычных радарах.

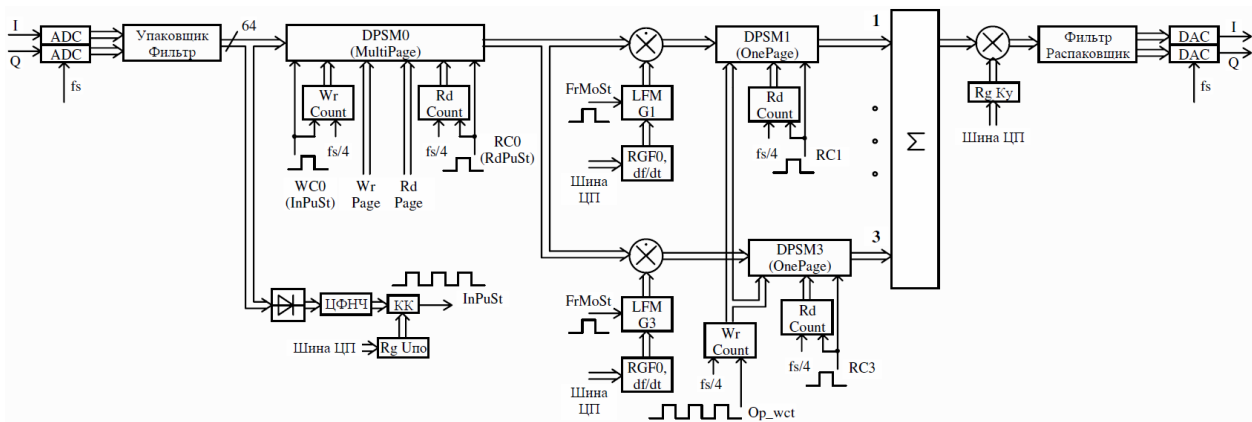


Рис. 7. Функциональная схема устройства DRFM

Во-первых, для PCA космического базирования, в силу большой наклонной дальности (порядка 1000 км) съемка поверхности Земли производится в неоднозначном интервале дальностей. Поэтому ответный сигнал DRFM на временной оси должен формироваться исключительно в определенном приемном строге, соответствующем участку дальности, в котором расположен снимаемый кадр подстилающей поверхности Земли. Для этого приходится записывать в DRFM некоторое, достаточно большое количество

радиоимпульсов, прежде чем на ее выходе появится первый ответный радиоимпульс. Это приводит к необходимости хранения в сигнальной памяти указанного числа импульсов (в отличие от классической DRFM, запоминающей лишь один радиоимпульс). Данный фактор приводит к увеличению требуемого объема сигнальной памяти DRFM и необходимости построения других, отличных от традиционных, схем синхронизации записи-считывания радиоимпульсов.

Во-вторых, потребовалось изобретение нового метода формирования имитационных отметок. Так, принцип формирования отраженного радиосигнала для РСА существенно отличается от соответствующего принципа для обычного радара. Если в обычной DRFM при формировании точечной имитационной отметки используется постоянный доплеровский сдвиг, неизменный в течение ответа на одно когерентное зондирование, то при формировании точечной отметки для неподвижного РСА (тестируемого на Земле) такой метод непригоден: сформированная отметка будет размазана по азимутальной координате кадра. Чтобы формируемые отметки были точечными, необходима реализация других, не постоянных, а изменяющихся в течение когерентного зондирования доплеровских сдвигов, которые бы обеспечивали на выходе азимутального СФ когерентное сложение всех участков принимаемого (сформированного DRFM) сигнала в течение всего интервала синтеза апертуры. Такие доплеровские сдвиги были найдены в ходе проведенных исследований, и для их формирования были разработаны соответствующие цифровые формирователи модулирующего сигнала, функциональная схема, одного из которых представлена на рисунке 8.

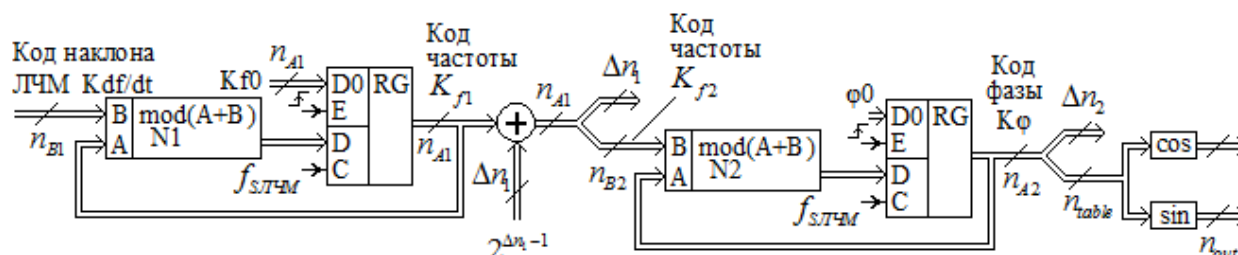


Рис. 8. Функциональная схема формирователя модулирующего сигнала

### 3. Тестирование макета PCA при помощи DRFM

В ходе выполнения проводимых работ были проведены испытания разработанного устройства DRFM совместно с макетом PCA (по схеме, изображенной на рисунке 6), в ходе которых макетом PCA формировался зондирующий радиосигнал, подаваемый далее на вход устройства DRFM. В устройстве DRFM формировалась ЦРГ тестового 3-точечного изображения с размещением точек на плоскости кадра, задаваемым с хост-компьютера через программу управления устройством DRFM. С выхода устройства DRFM сформированная ЦРГ принималась приемной частью макета PCA, где производилась ее цифровая обработка (в дальностном и азимутальном СФ) и строилось РЛИ имитируемого тестового кадра, которое отображалось на дисплее макета PCA.

В процессе тестирования макетом PCA формировался один парциальный кадр РЛИ для обзорного режима ScanSAR с характеристиками, перечисленными в таблице 2. В макете PCA использовался алгоритм обработки ЦРГ с разделимыми быстрыми свертками по наклонной дальности и азимуту, представленный на рисунке 3, - упрощенный «Range-Doppler» алгоритм без блока коррекции миграции по элементам дальности (Range Cell Migration Correction - RCMC), поскольку ввиду грубого разрешения оцениваемого режима съемки (размер пикселя РЛИ - 300x141 м) такая коррекция не требовалась. Однако в библиотеке макета PCA имеются и полные «Range-Doppler» и «Omega-k» алгоритмы, учитывающие RCMC. Их применение оправдано в более детальных режимах съемки, таких, как StripMap и SpotLight. Отражения от подстилающей поверхности Земли в снимаемом кадре в целях обеспечения чистоты эксперимента не учитывались (отношение сигнал/шум достаточно велико).

На рисунке 9 представлены трехточечное тестовое изображение, задаваемое с хост-компьютера через программу управления устройством DRFM (слева), и соответствующее РЛИ (справа), полученное в макете PCA в результате обработки синтезированной в DRFM ЦРГ.

Таблица 2. Основные характеристики режима работы макета РСА

|  |                      |
|--|----------------------|
| Диапазон частот  | X                    |
| Диапазон снимаемых наклонных дальностей, км  | 1099.4 ...<br>1129.3 |
| Длительность пачки зондирующих радиоимпульсов (время синтеза апертуры), мс   | 17                   |
| Длина синтезируемой апертуры, м  | 111                  |
| Число зондирующих радиоимпульсов в пачке   | 80                   |
| Частота повторения зондирующих радиоимпульсов, Гц  | 4640.7               |
| Длительность зондирующего радиоимпульса, мкс   | 8.19                 |
| Тип модуляции зондирующих радиоимпульсов   | ФКМ (М-послед.)      |
| Длина М-последовательности   | 2047                 |
| Число различных чередующихся М-последовательностей в пачке   | 4                    |
| Ширина спектра зондирующего радиосигнала, МГц  | 250                  |
| Размер снимаемого парциального кадра (накл. дальн. x азимут), м  | 25000x2251           |
| Размер снимаемого парциального кадра (накл. дальн. x азимут), пикселей   | 99x16                |
| Разрешение по наклонной дальности и азимуту с учетом некогерентного накопления по наклонной дальности (размер одного пикселя РЛИ), м | 300x141              |

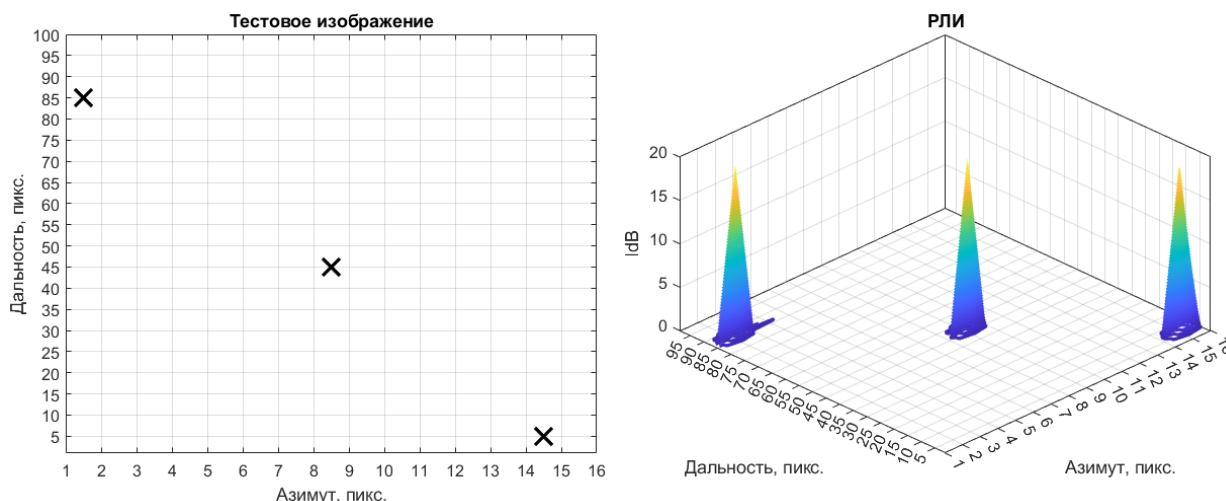


Рис. 9. Тестовое трехточечное изображение (слева) и полученное РЛИ (справа) для времени синтеза апертуры 17 мс

На правом графике вдоль вертикальной оси отображается яркость РЛИ (по мощности, в дБ). Ширина откликов по уровню -3дБ составляет 1 пиксель как по дальности, так и по азимуту, а по уровню -20дБ - три пикселя по азимуту. Таким



образом, из рисунка видно, что DRFM формирует достаточно четкие точечные отметки в любом месте тестового кадра, как в его середине, так и на краях, что подтверждает корректность работы связки PCA - DRFM.

При попытке использования классической DRFM (с постоянными в течение пачки доплеровскими сдвигами переизлучаемых радиоимпульсов) для формирования точечных отметок на РЛИ сформированные отметки расфокусируются по азимуту. Особенно ярко этот эффект проявляется при больших временах синтезирования апертуры. Так, на рисунке 10 показаны РЛИ, сформированное макетом PCA в результате обработки ЦРГ, синтезированной в разработанной DRFM (слева), и аналогичное РЛИ, полученное при использовании классической DRFM, предназначенной для формирования имитационных отметок обычным радиолокатором без синтеза апертуры антенны (справа).

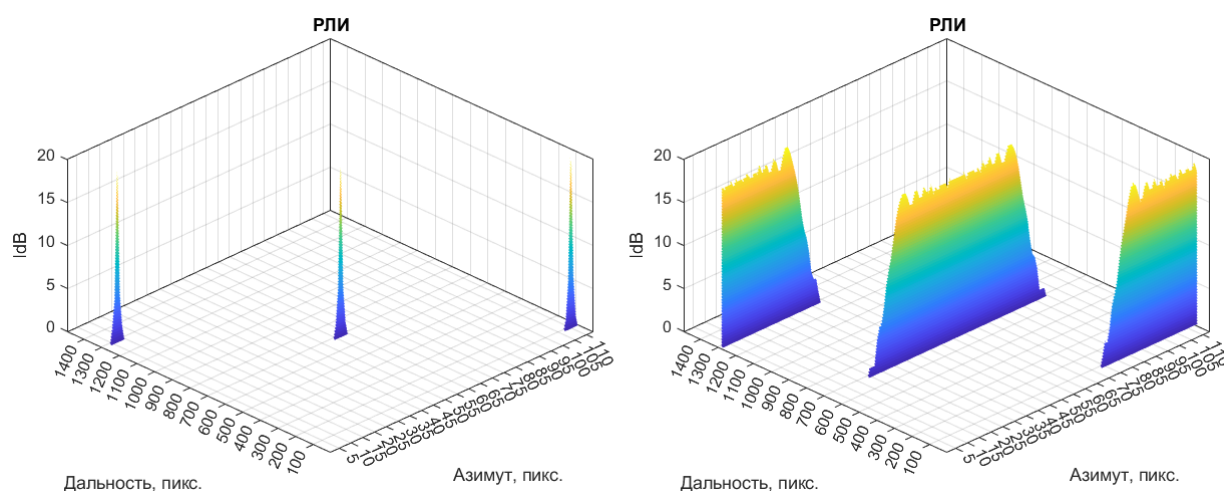


Рис. 10. РЛИ тестового кадра с тремя точечными отражателями при использовании разработанной (слева) и классической (справа) DRFM для времени синтезирования апертуры 172 мс

Время синтезирования увеличено по сравнению с рисунком 9 в 10 раз и составляет 172 мс (800 зондирующих радиоимпульсов), разрешение одного пикселя РЛИ равно 20x20 м, размер снимаемого частичного кадра (по углу места и азимуту) - 1497x113 пикселей, длина синтезированной апертуры – 1126 м, расстановка точечных отражателей и остальные параметры - аналогичны таблице 2. Из рисунка 10 видно, что при использовании классической DRFM сформированные имитационные отметки существенно размазаны по азимуту, -

их азимутальная ширина много больше одного пикселя. Фактически они вырождаются в линии вдоль азимута. Аналогичная картина наблюдается и при попытке тестирования РСА путем простого подключения его выхода на вход (без DRFM), с той лишь разницей, что в этом случае формируется лишь одна размытая отметка. Поэтому классическая DRFM непригодна для тестирования РСА.

## Заключение

Таким образом, был разработан стенд, включающий макет РСА и устройство DRFM, позволяющий моделировать, тестировать и отлаживать новые алгоритмы синтеза РЛИ и формирования ЦРГ. Новизна разработанного устройства DRFM заключается:

- в хранении в сигнальной памяти DRFM значительного числа зондирующих радиоимпульсов до момента ответа на первый поступивший радиоимпульс (в отличие от классической DRFM, запоминающей лишь один радиоимпульс), что приводит к увеличению требуемого объема сигнальной памяти DRFM и необходимости построения других, отличных от традиционных, схем синхронизации записи-считывания радиоимпульсов;

- в формировании новых (отличных от классической DRFM) сложных функций доплеровского сдвига переизлучаемого радиосигнала;

- в когерентной обработке сверхширокополосно-когерентной пачки зондирующих радиоимпульсов с изменяемой от импульса к импульсу структурой.

## Литература

1. Soumekh M. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc. 1999.
2. Mahafza B.R., Elsherbeni A.Z. *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*. CHAPMAN & HALL, CRC Press. 2004.
3. Cumming I.G., Wong F.H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Boston, Artech House. 2005. 436 p.

4. Bassem R. Mahafza. *Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB*. CRC Press. 2009. 500 p.
5. Mahafza B.R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 3-rd Edition. CRC Press. 2013. 772 p.
6. McMillian G. *Digital RF Memory (DRFM)*. Austin, TX: Systems & Processes Engineering Corp. 1996.
7. Schleher D. Curtis. *Electronic Warfare in The Information Age*. Artech House. 1999. 624 p.
8. De Martino A. *Introduction to Modern EW Systems*. 2nd edition. Boston, London, Artech House, 2018. 485 p.
9. Dai D.H., Wu X.F., Wang X.S., Xiao S.P. *SAR Active-Decoys Jamming Based on DRFM*. IET International Conference on Radar Systems. 2007. <https://doi.org/10.1049/cp:20070519>
10. Shoalehvar A. *Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulation*. California Polytechnic State University. 2012 <https://doi.org/10.15368/theses.2012.76>
11. Yinhui X., Dazhi Z., Tao Y., Xiaoheng X. A Real-time SAR Echo Simulator Based on FPGA and Parallel Computing. *TELKOMNIKA*. V.13. №3. 2015. P.806-812. <http://dx.doi.org/10.12928/telkomnika.v13i3.1972>
12. Yan Z., Guoqing Z., Yu Z. *Research on SAR Jamming Technique Based on Man-made Map*. CIE International Conference on Radar. 2006. <https://doi.org/10.1109/ICR.2006.343301>
13. Saeedi J. A New Hybrid Method for Synthetic Aperture Radar Deceptive Jamming. *International Journal of Microwave Engineering (JMICO)*. 2019. V.4. №1. P.1-14.

**Для цитирования:**

Горбунов Ю.Н., Сонин А.П., Хромцев А.В., Свиринов Д.М. Тестирование радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны при помощи DRFM. *Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал]* 2022. № 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.7>