

УДК 621.396.96

## КРАТКИЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ С БОРТА МУЛЬТИКОПТЕРА

И.Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.

**Аннотация.** Приведено краткое описание опыта разработки линейки малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой антенны и основных сопутствовавших при этом трудностей. Представлены результаты съемки в различных частотных диапазонах (в том числе и поляриметрической) при установке РЛС на беспилотных летательных аппаратах малого класса самолетного типа, а также первые результаты радиолокационной съемки поверхности с борта мультикоптера.

**Ключевые слова:** РЛС с синтезированной апертурой, непрерывное излучение, обработка сигналов, радиолокационные изображения высокого разрешения, мультикоптер.

**Abstract.** The paper presents a brief summary of the authors' experience of design and practical work with small-sized high-resolution SARs placed on small aircraft-type UAVs, and demonstration of the first results of practical radar survey of the earth and sea surface from board of a multicopter. The capabilities, composition and specifications of the SAR family are considered, the results of detailed survey of the parcels in L-, C - and X-wavelength ranges, including full polarimetric ones, are presented. The main difficulties of both scientific and engineering-practical nature, which the authors had to face during the creation of small-sized SARs, as well as the approaches used to overcome them, are considered. It is shown that the developed and improved algorithms of signal processing and radar imaging, and technology

provided the possibility of creating a small-sized software SAR on a multicopter type UAV. The presented results of the experiments in the earth and sea surface surveying from the board of the DJIMatrice 600 multicopter confirm the SAR possibility of radar imaging with a resolution of up to 30 centimeters at a maximum range of up to six kilometers. The main direction of further reducing the weight-size parameters of the SAR is the design of its own antenna system, taking into account the design features of the carrier. According to forward estimates, it will reduce the total weight of the kit from two to one-one and a half kilograms, and, as a result, will provide an expansion of the list of potential SAR carriers. The obtained results allow us to consider as successful the first experiments of plane surveying with the use of multicopter as a carrier of SAR in our country and to conclude not only about the lack of lag in this respect from foreign developers, but also about some advance of them.

**Keywords:** Synthetic aperture radar, continuous waveform radiation, radar signal processing, High-resolution imaging, multicopter.

## 1. Введение

Радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (РСА) занимают особое место среди средств дистанционного мониторинга земной поверхности благодаря возможности получения изображений участков съемки с разрешением лучше метра независимо от состояния их естественной освещенности и погодных условий.

Стремительное развитие науки и техники в области радиоэлектроники и вычислительной техники позволило снизить массу РСА до двух-пяти килограмм [1, 2], что, в свою очередь, обусловило повышенный интерес к таким системам с точки зрения их размещения на малых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), массовое производство и широкое практическое использование которых является характерной особенностью сегодняшних дней.

И если к настоящему моменту разработано достаточно большое количество РЛС, предназначенных для размещения на БПЛА самолетного типа [1, 3-6], то только относительно недавно, в последние год-два, их массогабаритные характеристики достигли уровня, позволяющего рассматривать их в качестве полезной нагрузки мультикоптеров.

Целью настоящей работы является краткое изложение накопленного опыта проектирования и практической работы с малогабаритными РСА, размещаемыми на малых БПЛА самолетного типа, а также демонстрация первых результатов практической радиолокационной съемки земной и морской поверхности с борта мультикоптера.

## **2. Опыт создания малогабаритных РСА и практические результаты**

В большинстве современных малогабаритных РСА для БПЛА в качестве зондирующего используется непрерывный сигнал с периодической линейной частотной модуляцией [7]. Преимущества таких систем по сравнению с импульсными состоят:

в существенно большей (в сотни раз) длительности излучения сигнала за период зондирования, что позволяет снизить его пиковую мощность до единиц ватт и за счет этого исключить необходимость применения мощных импульсных выходных усилителей и высоковольтных источников питания, а также существенно снизить требования по скорости перестройки частоты устройств формирования широкополосных сигналов;

в простоте демодуляции принимаемого сигнала, что позволяет использовать зондирующие сигналы с полосой до одного гигагерц и более при сохранении относительно невысоких требований к аналого-цифровым преобразователям (АЦП) по частоте дискретизации (десятки мегагерц);

в отсутствии ближней «мертвой зоны», характерной для импульсных систем и обусловленной бланкированием приемного устройства на время излучения зондирующего сигнала.

Недостатком РСА с непрерывным излучением является их относительно небольшая дальность действия (обычно до 10-15 км), что в основном

обусловлено сложностью развязки приемного и передающего трактов. Тем не менее, эти дальности обычно являются достаточными для решения основного круга задач съемки земной поверхности, возлагаемых на малые БПЛА, а перечисленные преимущества делают РСА с непрерывным излучением фактически безальтернативным средством радиолокационного мониторинга для такого класса носителей, как недорогие массовые мультикоптеры.

Радиолокаторы с непрерывным частотно-модулированным излучением обычно строятся по гомодинной схеме (супергетеродинной с нулевой промежуточной частотой, прямого преобразования), в которой демодуляция принятого сигнала осуществляется путем его умножения на опорный сигнал с выхода передающего тракта (рис. 1).

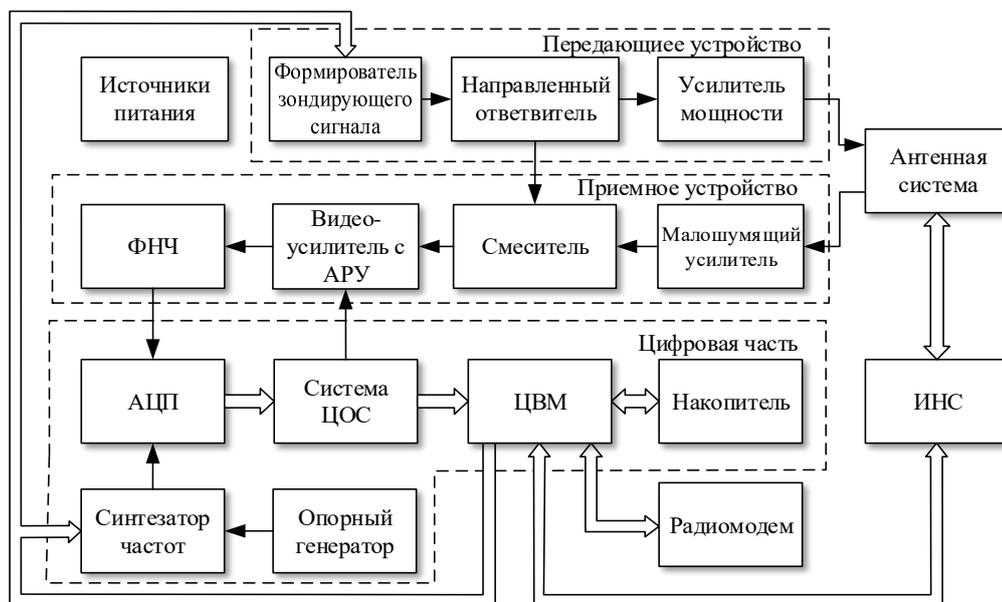


Рис.1. Структурная схема РСА с непрерывным излучением

Антенная система включает одинаковые приемную и передающую антенны, как правило, микрополоскового типа [8]. В случае РСА, реализующих полную поляризационную съемку [9], антенная система включает две приемные и две передающие вертикально и горизонтально поляризованные антенны.

В качестве формирователя зондирующего сигнала используются как генераторы, управляемые напряжением, так и схемы прямого цифрового

синтеза. Преимуществом первых является «чистота» спектра формируемого сигнала, то есть отсутствие спектральных составляющих, обусловленных особенностями цифрового синтеза. В свою очередь, преимущество схем прямого цифрового синтеза состоит в лучшей «линейности» закона изменения частоты сигнала.

Система цифровой обработки (ЦОС) в простейшем случае включает АЦП, ПЛИС, реализующую запись отсчетов сигнала на бортовой накопитель, ЦВМ на базе универсального процессора с операционной системой Linux и специальным программным обеспечением, решающим задачи синтеза радиолокационных изображений (РЛИ) с их последующей передачей с помощью радиомодема на наземный пункт управления. Во многих случаях ПЛИС системы ЦОС реализует не только запись сигналов, но и некоторые предварительные операции их обработки (фильтрацию, сжатие по дальности путем вычисления ДПФ над выборками отсчетов сигнала, принимаемого в отдельных периодах зондирования, и др.).

В период 2012-2016 гг. (рис.2) авторским коллективом (ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) при тесном взаимодействии с промышленностью наработан значительный научно-технический задел в области создания малогабаритных РСА с непрерывным излучением. Так, в рамках ОКР «Пазанка» совместно с АО «НТЦ РЭБ» (г. Москва) и АО «НИИ СТТ» (г. Смоленск) в 2016 г. [10] создан опытный образец аппаратно-программного комплекса контроля радиолокационной заметности вооружения и военной техники, включающий в себя линейку малогабаритных РСА, функционирующих в L, C и X диапазонах. В дальнейшем АО «НИИ СТТ» было проведено усовершенствование аппаратуры и реализация режима полной поляризационной съемки в L- и C-диапазонах (таблица 1).



Рис.2. Первые испытания малогабаритной РЛС на самолете Ан-2 (апрель 2013 г.)

Таблица 1 – Основные характеристики РСА

Параметр	L-диапазон	C-диапазон	X-диапазон
Длина волны	23 см	5,5 см	3 см
Мощность излучаемого сигнала	200 мВт	1 Вт	
Максимальная дальность действия	5 км	4 км	4 км
Разрешающая способность (реальная)	1,2 м	0,5 м	0,4 м (0,15 м)
Время формирования на борту кадра изображения с площадью 0,3 кв. км с реальным разрешением, не более	1 с	4 с	9 с
Масса комплекта (с антеннами)	4 кг	3 кг	
Максимальная длительность записи	2 часа	1 час	
Скорость полета носителя	80...150 км/ч		
Поляризация	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ		ГГ, ВВ

РСА построены по модульному принципу и включают: бортовую ЭВМ, модуль цифровой обработки сигналов, аналоговый приемопередающий модуль и антенную систему [6]. Бортовая ЭВМ и модуль цифровой обработки сигналов являются унифицированными для всех диапазонов. Смена рабочего диапазона осуществляется путем установки соответствующей антенной системы и аналогового приемопередающего модуля. На рис. 3 показан вид аппаратуры, а на рис. 4,*а* и 4,*б* – внешний вид носителя (БПЛА «Мерлин-21Б» производства АО «НИИ СТТ») с установленными комплектами L- и С-диапазонов соответственно. Комплекты X- и С-диапазонов внешне не отличаются.



Рис. 3. Внешний вид РСА, созданной в рамках ОКР «Пазанка»



Рис. 4. БПЛА «Мерлин-21Б» с РСА L- (*а*) и С- (*б*) диапазонов длин волн

В аппаратуре реализована возможность формирования РЛИ в процессе выполнения полетного задания непосредственно на борту БПЛА с их последующей передачей по радиолинии на наземный пункт управления в масштабе времени, близком к реальному.

Примеры изображений различных диапазонов приведены на рис. 5-7.

Примеры изображений, сформированных в результате полной поляризационной съемки, приведены на рис. 8, 9 в псевдоцветовом RGB-кодировании (Red – HH, Green – HV+VH, Blue – VV). Характерной особенностью поляриметрических изображений является более выраженный вклад составляющих на согласованной поляризации для искусственных объектов и сооружений, и на кроссовой – для естественных участков, покрытых растительностью вследствие их выраженных деполяризующих свойств.



Рис. 5. Радиолокационное изображение в L- диапазоне торгового центра «Сити-парк Град» (г. Воронеж)

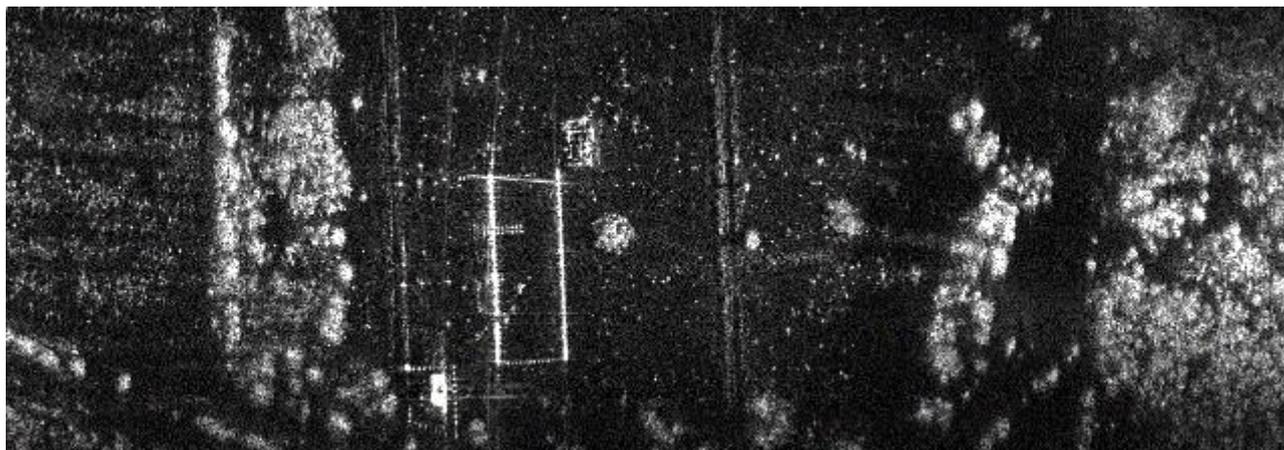


Рис. 6. Радиолокационное изображение автозаправочной станции в С-диапазоне



Рис. 7. Радиолокационное изображение в X- диапазоне

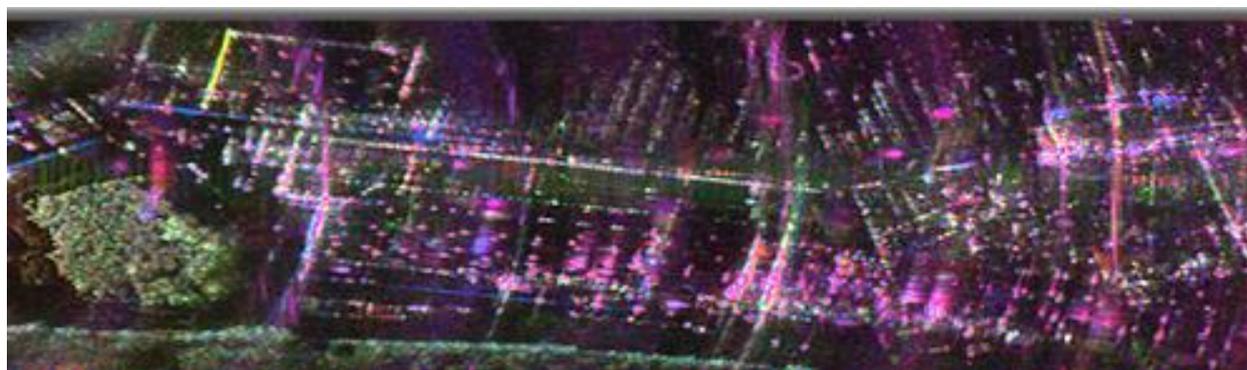


Рис. 8. Поляриметрическое изображение, полученное в L- диапазоне

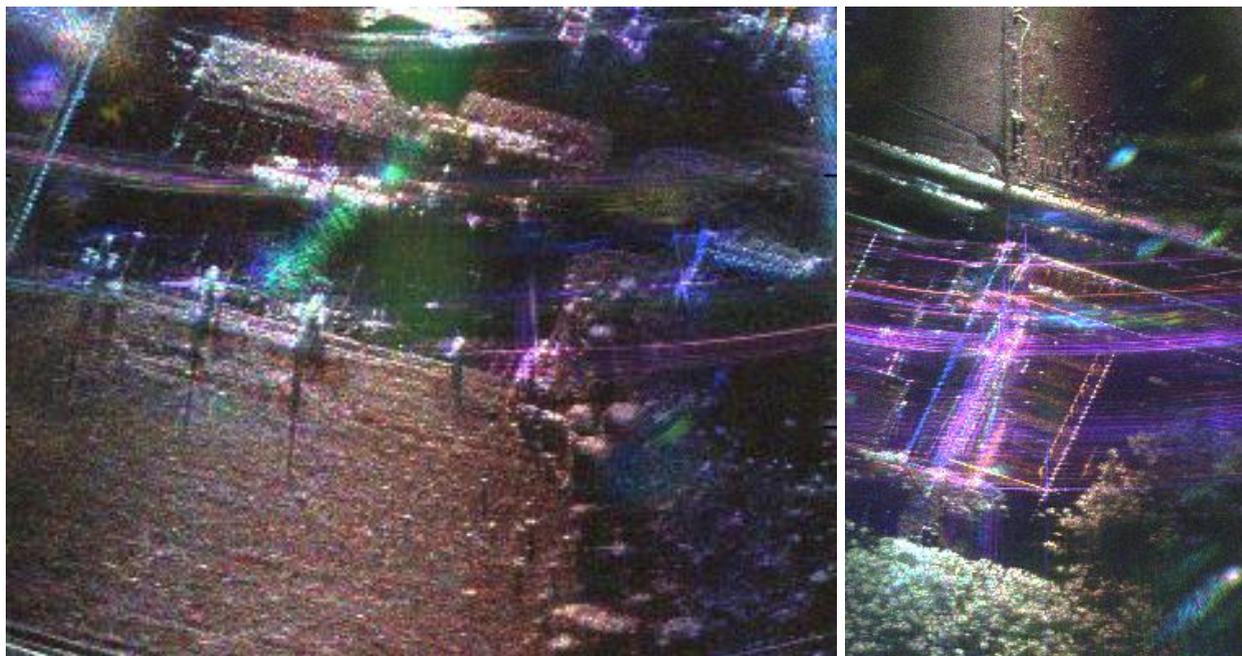


Рис. 9. Поляриметрические изображения, полученные в С-диапазоне

В ходе создания РСА основными проблемами явились:

сложность обеспечения достаточной развязки приемного и передающего трактов, обусловленная одновременной работой РСА на передачу и прием при существенных ограничениях на пространственный разнос антенн и невозможности принятия эффективных конструкторских решений, направленных на снижение уровня боковых лепестков их диаграмм направленности;

значительный разброс уровней эхо-сигналов отражателей в зоне обзора РСА при невозможности расширения динамического диапазона приемного устройства с помощью схем временной автоматической регулировки усиления (АРУ);

большая скорость поступления данных, предъявляющая повышенные требования быстродействию системы ЦОС и объему памяти бортового накопителя;

синтез радиолокационных изображений с детальностью порядка 0,3-0,5 м в реальном масштабе времени при невозможности использования традиционных быстрых алгоритмов из-за существенных различий законов

изменения расстояния между РСА и каждым из отражателей, одновременно находящихся в зоне обзора;

невозможность размещения на борту носителя высокоточной навигационной системы и дополнительных датчиков (радиовысотомеров) вследствие массогабаритных ограничений.

Преодоление перечисленных сложностей потребовало поиска дополнительных схемотехнических и алгоритмических решений, а также развития научно-методического аппарата обоснования требований к основным функциональным устройствам малогабаритных РСА.

Так, в части конструкции антенной системы разработана методика проектирования двухслойных микрополосковых антенн с заданными диапазонными свойствами [8].

В качестве меры по расширению динамического диапазона приемного устройства предложено использовать цепи коррекции частотной характеристики ФНЧ (рис. 1), обеспечивающие квадратичное нарастание коэффициента усиления эхо-сигналов отражателей по мере их удаления в пределах зоны обзора [11].

Проанализированы различные варианты построения схемы медленной временной АРУ, обеспечивающей стабилизацию уровня суммарного эхо-сигнала зоны обзора на входе АЦП в процессе непрерывной съемки в режиме полосового обзора.

Разработана методика оценки требований к динамическому диапазону приемного устройства и уровню развязки между приемным и передающим устройствами для обеспечения заданной дальности действия РЛС [12].

В качестве меры снижения объема регистрируемой информации использовано уменьшение разрядности выходных данных АЦП до одного-двух бит, так как в ходе исследований было установлено, что благодаря эффекту сверхдискретизации [13] это практически не приводит к ухудшению качества формируемых РЛИ.

Проведено детальное изучение влияния уровня фазового шума опорного

генератора на качество изображений, разработана соответствующая методика обоснования требований к опорному генератору [14].

Предложен и практически реализован новый способ определения начала зондирования, состоящий во введении синхروпауз в принимаемый непрерывный сигнал и использовании специального алгоритма для определения их смещения [15, 16].

Установлено, что особенности съемки, характерные для малогабаритных РСА (широкие диаграммы направленности антенн вследствие их малых размеров, небольшое удаление ближней границы зоны обзора) и обуславливающие существенные различия законов изменения расстояния между РСА и отражателями, расположенными в пределах одного кадра РЛИ, приводят к тому, что синтез детальных изображений возможен только с использованием алгоритмов класса Backprojection [17]. Особенностью этих алгоритмов являются существенно более жесткие требования к производительности системы обработки по сравнению с известными и традиционно применяемыми на практике алгоритмами гармонического анализа, Range-Doppler, Chirp-Scaling, Omega-K и их модификациями. С целью реализации возможности синтеза изображений на борту БПЛА в реальном масштабе времени предложена модифицированная версия алгоритма Backprojection, реализованная в составе специального программного обеспечения РСА БПЛА «Мерлин-21Б» и удовлетворяющая требованиям по времени выполнения процедуры синтеза РЛИ при сохранении их высокого качества. В таблице 2 представлены временные затраты на формирование РЛИ РСА С-диапазона для различных значений детализации (шага между отдельными пикселями РЛИ по горизонтальной и путевой дальности). Размеры шага по обоим координатам имеет равные значения, размер кадра по поперечной дальности – 4 км, по путевой – 400 м. Формирование РЛИ осуществлялось модифицированным алгоритмом Backprojection [18], реализованном на языке С++ с применением библиотек OpenMP и fftw (процессор Intel Core-i7-3770 3,4 ГГц, 4 ядра).

Таблица 2 – Время формирования РЛИ при различном шаге пикселя

Шаг пикселя РЛИ, м	5,0	3,0	2,0	1,0	0,5	0,25
Время формирования РЛИ, с	2,0	4,5	8	30,8	120	454

Как отмечалось выше, дополнительная трудность состояла в невозможности размещения на борту носителя высокоточной системы автономной навигации, и, отсюда, недостаточной для формирования качественных РЛИ точности навигационной информации в условиях выраженных траекторных нестабильностей полета и отсутствия априорных сведений о высоте картографируемой поверхности. Фактически, единственным источником информации являлись данные GPS-датчика с частотой поступления 10 Гц и включавшие сведения о текущих географических координатах, средней скорости, абсолютной высоте и курсе полета носителя.

Так как эти сведения являлись недостаточными для точной коррекции фазовых искажений траекторного сигнала, были проведены исследования эффективности различных алгоритмов автофокусировки, а также алгоритмов оценки средней скорости и высоты полета над картографируемой поверхностью.

Анализ практических результатов показал, что прямое использование известных алгоритмов автофокусировки [19] не позволяет обеспечить компенсацию фазовых искажений траекторных сигналов всех отражателей в зоне обзора в связи с особенностями геометрии съемки, отмеченными выше. Тем не менее, практически во всех случаях, когда уточнение значения скорости полета осуществлялось с использованием алгоритма автофокусировки по минимуму энтропии [20], достигалось заметное улучшение качества РЛИ. Также был разработан новый алгоритм оценки средней скорости полета на основе определения пространственного смещения двух кадров РЛИ, сформированных с небольшим временным интервалом с предварительной геометрической коррекцией на основе сопоставления с эталонным оптическим снимком [21]. Использование алгоритма обеспечило достижение хороших

практических результатов при полигонных съемках, проводившихся с целью исследования радиолокационной заметности наземных объектов.

Предложено два подхода к решению задачи определения высоты полета над картографируемой поверхностью. Первый из них основан на обнаружении альтиметровых отражений, имеющих в случае РСА БпЛА достаточно выраженный характер [22]. Это обусловлено тем, что из-за малых размеров антенн их угломестные диаграммы направленности характеризуются шириной порядка нескольких десятков градусов, что, в свою очередь, обуславливает их высокий уровень в направлении подстилающей поверхности. Другой подход состоит в определении высоты полета как разности между абсолютной высотой, определенной с помощью GPS-датчика, и абсолютной высотой точки с текущей широтой и долготой носителя, определяемой по предварительно запомненной цифровой матрице рельефа (ЦМР) района съемки. Погрешность высот ЦМР, находящихся в открытом доступе, обычно не превышает 6...8 м для большинства районов земной поверхности, что является достаточным для синтеза высококачественных РЛИ.

Накопленный опыт проектирования и практического применения РСА БпЛА «Мерлин-21Б», а также полученное на его основе представление об основных проблемах и рациональных путях их решения позволили перейти к следующему этапу разработки малогабаритных РСА, в ходе которого они рассматривались уже как программно-определяемые (SDR – Software Defined Radio) системы [23]. Достоинством таких систем является возможность изменения режимов работы, параметров формируемых сигналов и алгоритмов их обработки только за счет конфигурирования программного обеспечения без изменения аппаратной части.

Основные характеристики опытного образца программно-определяемой РСА, созданной ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) совместно с АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург), приведены в табл. 3. Внешний вид аппаратуры показан на рис. 10. Приемная и передающая антенны изготовлены ООО

«Дельта Сателайт» (г. Зеленоград) и проектировались без учета возможности их использования в составе малогабаритной РСА.

Таблица 3 – Основные характеристики программно-определяемой РСА

Параметр	Значение
Длина волны	5,5 см
Мощность излучаемого сигнала	1 Вт
Максимальная дальность действия	6 км
Разрешающая способность (реальная)	0,5 м
Масса комплекта (с антеннами)	менее 2 кг
Максимальная длительность записи	1 час
Поляризация	ГГ, ВВ

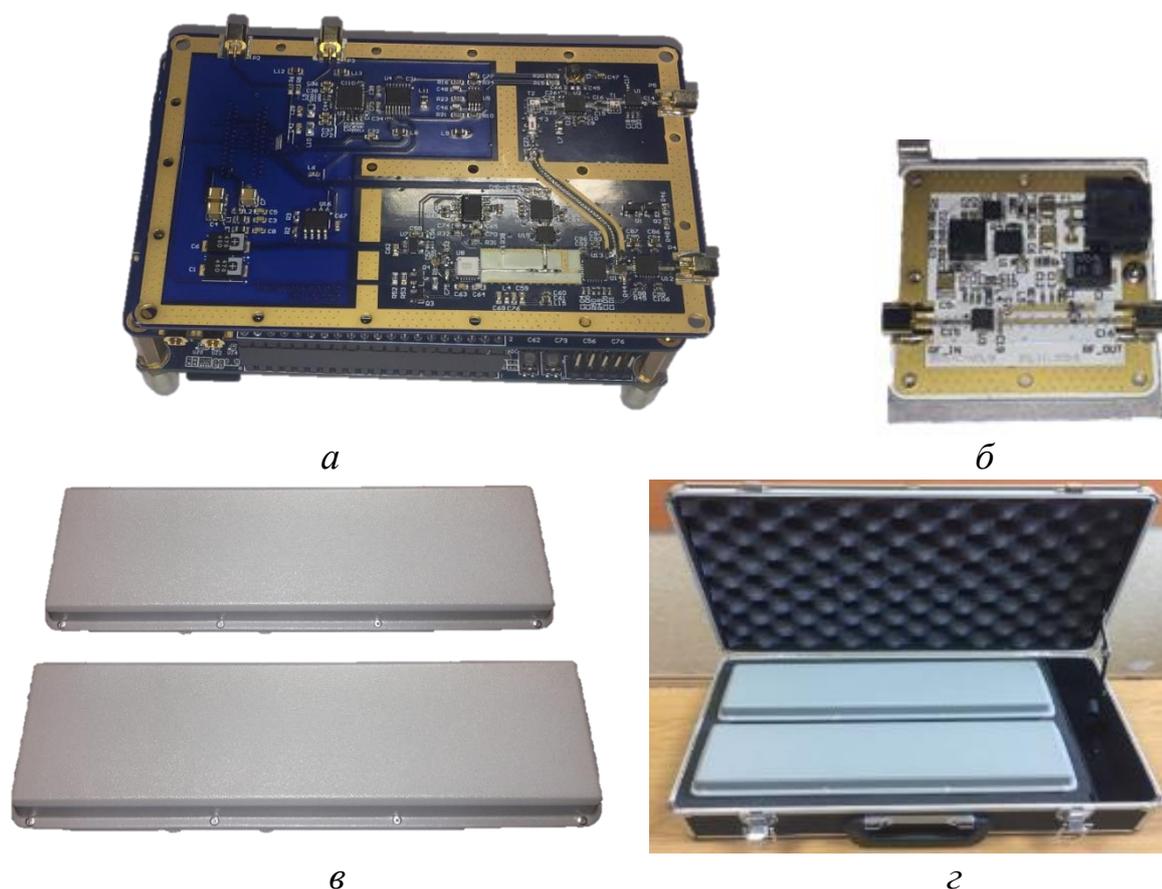


Рис. 10. Внешний вид аппаратуры программно-определяемой РСА: *а* – радиолокационный модуль в составе платы системы ЦОС, платы АЦП, приемопередающего устройства (масса – 140 грамм, размеры 110×65×45 мм); *б* – усилитель мощности С-диапазона (выходная мощность 1 Вт, масса – 30 грамм, размеры 40×40×10 мм); *в* – приемная и передающая антенны (ширина диаграммы направленности 10х60 град, коэффициент усиления – 17 дБ, масса – 2×1 кг, размеры 360×110×30 мм); *г* – внешний вид комплекта в транспортировочном кейсе

С целью исследования возможности применения мультикоптеров в качестве носителей РСА, не оборудованных дополнительной навигационной аппаратурой, опытный образец монтировался на БПЛА DJI Matrice 600 (рис. 11). Размещение основных функциональных устройств аппаратуры на носителе иллюстрирует рис. 12.



Рис. 11. Внешний вид БПЛА DJI Matrice 600 с РСА



Рис. 12. Расположение функциональных устройств РСА на БПЛА мультикоптерного типа

Летные эксперименты проводились 4 и 7 февраля 2019 г. в г. Анапа и в районе пос. Кабардинка Краснодарского края. Управление РСА осуществлялось с наземного пункта управления по радиоканалу с пропускной способностью 57600 бит/с.

В ходе эксперимента 4 февраля 2019 (г. Анапа) полет БПЛА осуществлялся на высоте 200 м над земной поверхностью в районе Военного инновационного технополиса ЭРА (координаты 44°56'16.92"С, 37°18'46.20"В).

Маршрут полета показан на рис. 13, скорость полета на различных участках маршрута составляла от 40 до 70 км/ч.

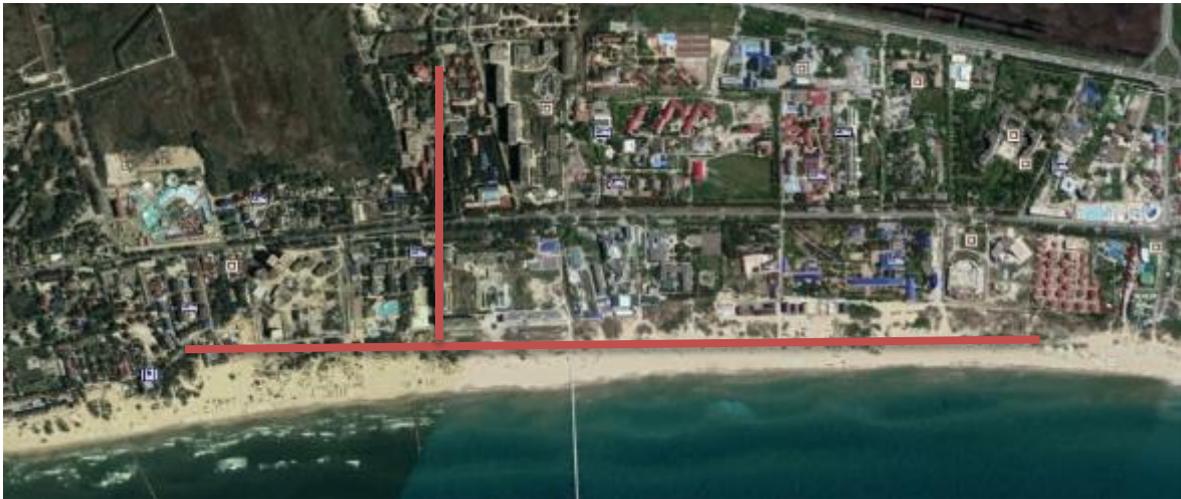


Рис. 13. Маршрут полета БПЛА 4 февраля 2019 г.

Вид района съемки с борта носителя, его радиолокационное и оптическое изображения приведены на рис. 14-16.



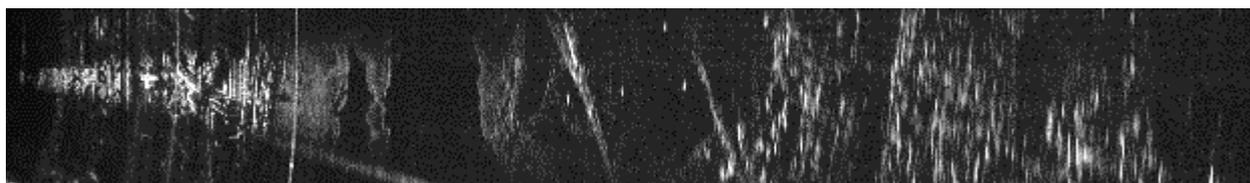
Рис. 14. Вид района съемки с борта носителя

Из анализа изображения на рис. 15 (размер кадра 5000×500 м, удаление ближней границы 200 м) следует, что опытный образец РСА обеспечивает ведение радиолокационного мониторинга на дальности не менее 6 км. При этом

отчетливо наблюдаются как районы с плотной городской застройкой на малых и больших удалениях, так и слабоконтрастная водная поверхность.



*a*



*б*

Рис. 15. Оптическое (а) и радиолокационное (б) изображения района съемки ( $44^{\circ}56'44.86''\text{C}$ ,  $37^{\circ}19'54.67''\text{B}$ )

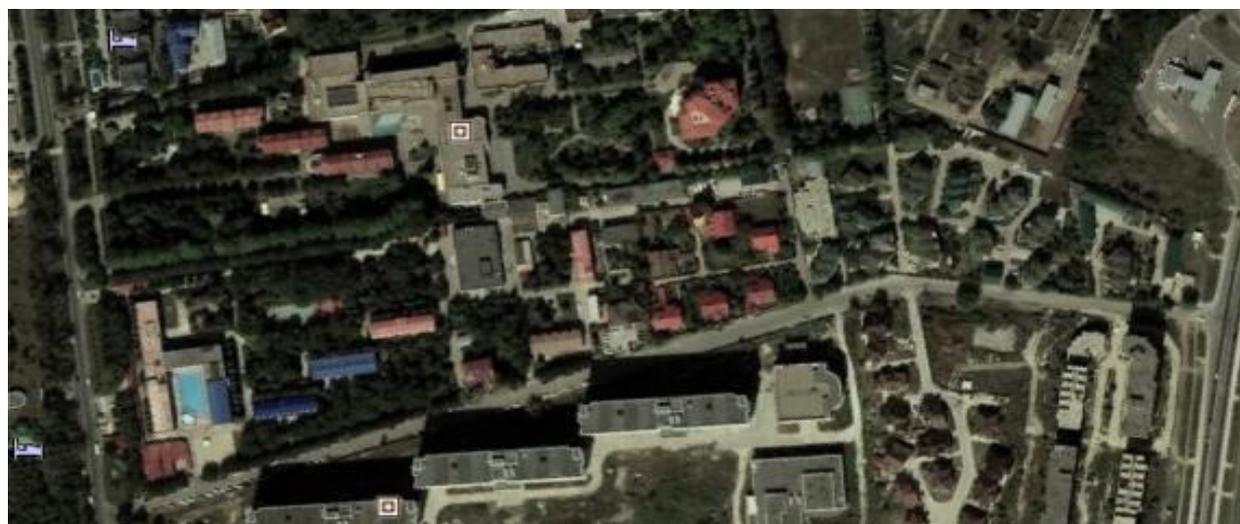
Более детальный кадр РЛИ, приведенный на рис. 16, характеризуется протяженностью 1000 м по путевой и 400 м – по поперечной дальности, а также удалением ближней границы порядка 200 м. Из его анализа следует, что фазовые искажения траекторного сигнала, обусловленные собственными колебаниями носителя, являются незначительными и практически не ухудшают разрешения РСА по координате путевой дальности (азимуту). Отличия оценок разрешающей способности, полученных по отметкам точечных объектов в различных участках кадра РЛИ, от теоретических значений не превысили 10-20% во всех случаях.

В ходе эксперимента 7/02/19 полет БпЛА осуществлялся на высоте 60 м над морем в районе пос. Кабардинка. Условия полета характеризовались порывистым ветром, скорость которого достигала 11 м/с и являлась предельно допустимой для полета БпЛА DJI Matrice 600.

На рис. 17 представлены оптические и радиолокационные изображения морского судна на якорной стоянке, полученные с борта БпЛА. Его удаление от маршрута полета в момент съемки составляло около 700 м.



а



б

Рис. 16. РЛИ участка местности с плотной городской застройкой  
(координаты района съемки  $44^{\circ}56'24.25''\text{С}$ ,  $37^{\circ}18'54.62''\text{В}$ )

Из полученных результатов следует, что малогабаритная РСА, размещенная на мультикоптере, обеспечивает формирование детальных РЛИ земной и морской поверхности на удалении не менее 5...6 км с возможностью увеличения этого показателя до 7...8 км при дополнительной настройке и экранировке элементов приемопередающего тракта.

Несмотря на то, что в состав комплекта не включалась собственная автономная навигационная система, которая позволила бы осуществлять коррекцию фазовых искажений, обусловленных траекторными нестабильностями полета БПЛА, качество изображений является приемлемым.

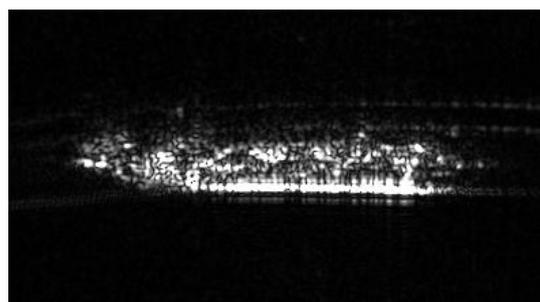
*a**б**в*

Рис. 17. Оптические (*а,б*) и радиолокационное (*в*) изображения морского судна

Основным направлением дальнейшего снижения массогабаритных характеристик РСА является проектирование собственной антенной системы с учетом особенностей конструкции носителя и возможности использования стабилизированного подвеса, что, по предварительным оценкам, позволит уменьшить общую массу комплекта с двух до одного-полутора килограмм. Это, в свою очередь, позволит включить в состав бортовой аппаратуры бесплатформенную инерциальную навигационную систему, учет данных которой обеспечит существенное улучшение детальности формируемых РЛИ.

### 3. Заключение

Полученные результаты позволяют признать успешными первые в нашей стране эксперименты по съемке поверхности с использованием мультикоптера в качестве носителя РСА, и сделать вывод не только об отсутствии отставания в этом отношении от зарубежных разработчиков [1,4], но и об их некотором опережении. В качестве исключения можно отметить хорошие результаты, полученные испанскими специалистами и описанные в [24].

## Литература

1. ImSAR LLC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.imsar.com>. (Дата обращения: 30.03.2019)
2. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Митрофанов Д. Г., Рязанцев Л.Б., Растрюгин Ю.В. Многофункциональный малогабаритный беспилотный авиационный комплекс «Флибустьер» // Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук. №4, 2018, Выпуск (104). С. 102-110.
3. Sandia National Laboratories [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sandia.gov>. (Дата обращения: 30.03.2019)
4. Duersch M. I. BYU micro-SAR: A very small, low-power LFM-CW Synthetic Aperture Radar. Brigham Young University. All Theses and Dissertations, 2004. P. 728.
5. Кузнецов В.А., Гончаров С.А. Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия // Системы управления, связи и безопасности, 2017. №3. С. 28-72.
6. Богомоллов А.В., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритная двухдиапазонная РСА для беспилотного авиационного комплекса // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. Вып. 11. С. 237-242.
7. Рязанцев Л.Б., Лихачев В.П. Оценка дальности и радиальной скорости объектов широкополосной радиолокационной станцией в условиях миграции отметок по каналам дальности // Измерительная техника, 2017. №11. С. 61-64.
8. Рязанцев Л.Б., Бабич О.А. Методика расчета многослойных микрополосковых широкополосных СВЧ антенн для малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой // Сб. науч. ст. по материалам V Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. С.300-306.

9. Купряшкин, И.Ф., Лихачев, В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: Научная книга, 2014.

10. Лихачев В.П., Пашук М.Ф. Многодиапазонная малогабаритная РЛС с синтезированной апертурой антенны. Принципы построения и функционирования, перспективы. Материалы VI общерос. научно-техн. конф. АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; АО «ЦКБА»; ФГБОУ ВО «Омский ГТУ». 2016. С. 261–271.

11. Рязанцев Л.Б. Обоснование требований к системе цифровой обработки сигналов в малогабаритных РСА непрерывного излучения с учетом амплитудночастотной коррекции сигналов и сверхдискретизации // Успехи современной радиоэлектроники, 2017. №7. С. 33-38.

12. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И. Ф., Пеливан М.В. Методика обоснования требований к динамическому диапазону сигналов приемного устройства в РЛС с синтезированной апертурой непрерывного излучения // Сб. науч. ст. по материалам V Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. С 296-300.

13. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л.Б. Методика обоснования требований к аналого-цифровому преобразованию в РЛС с синтезированной апертурой непрерывного излучения // Цифровая обработка сигналов. 2017. №2. С. 49-52.

14. Рязанцев, Л.Б., Купряшкин, И.Ф., Лихачев, В.П. Анализ энергетического спектра фазовых шумов сигнала на выходе приемника радиолокатора с непрерывным частотно-модулированным сигналом // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2018. № 6. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/8/text.pdf>

15. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б., Яковенков В.В. Способ формирования радиолокационного изображения в радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны. Патент на изобретение РФ №2632898. Опубликовано 11.10.2017, бюл. №29.

16. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б., Яковенков В.В. Устройство формирования радиолокационного изображения в радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны. Патент на изобретение РФ №2619771. Опубликовано 18.05.2017, бюл. №14.

17. Doerry A. Basics of Backprojection Algorithm for Processing Synthetic Aperture Radar Images. Sandia National Laboratories, 2016.

18. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Гнездилов М.В. Алгоритм формирования радиолокационных изображений с субметровым разрешением в малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой // Цифровая обработка сигналов, 2018. №2. С. 53-58.

19. Авиационные системы радиовидения. Монография / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. с. 648.

20. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.

21. Асхабов Х.Ш., Купряшкин И.Ф., Рязанцев Л.Б., Сидоренко С.В. Способ определения скорости полета носителя радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны на основе оценки пространственного сдвига пары радиолокационных изображений // Сб. науч. ст. по материалам V Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. С. 20-25.

22. Беляев В. В., Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л.Б., Сидоренко С. В. Способ определения координат летательного аппарата по радиолокационному изображению. Патент на изобретение РФ №2656366. Опубликовано 05.06.2018, бюл. №16.

23. Силин А. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ // Беспроводные технологии, 2007. №7. С. 22-27.

24. Lort M., Aguasca A., Lopez-Martinez C. Initial Evaluation of SAR Capabilities in UAV Multicopter Platforms // IEEE Journal of Selected Topics in

Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, Volume 11, Issue 1, pp. 127-140.

**Для цитирования:**

И.Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев. Краткий опыт создания и первые результаты практической съемки поверхности малогабаритной РЛС с синтезированием апертуры антенны с борта мультикоптера. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.12