

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ СИНТЕЗИРОВАНИЕ АПЕРТУРЫ X/L-ДИАПАЗОНА
ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И.Н.Жукова, Н.Е.Быстров, С.Д.Чеботарёв, А.М.Трофимов, А.Н.Михайлов

COMPACT UAV BASED X/L-BAND SAR

I.N.Zhukova, N.E.Bystrov, S.D.Chebotarev, A.M.Trofimov, A.N.Mikhaylov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, irina.zhukova@novsu.ru

Статья посвящена практической реализации радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) X/L-диапазона для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. В ней представлена структурная схема разработанного прототипа радиолокационной системы и дано описание структурных схем основных функциональных блоков: блока формирования и обработки сигналов, блока обработки координат, блока формирования радиолокационного изображения. Дана оценка требуемых для реализации обработки сигналов ресурсов программируемой логической интегральной микросхемы. В конце статьи приведены примеры радиолокационных изображений, полученных в ходе натурных испытаний прототипа РЛС. Новизна разработки обуславливается применением шумоподобных квазинепрерывных сигналов и возможностью получения радиолокационного изображения земной поверхности в режиме реального времени. Использование квазинепрерывных сигналов позволяет повысить скрытность и помехоустойчивость системы, а также снизить пиковую мощность передатчика. Данные особенности являются необходимыми для размещения радиолокационной системы с РСА на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах.

Ключевые слова: радиолокация, РСА, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), квазинепрерывные сигналы (КНС)

Для цитирования: Жукова И.Н., Быстров Н.Е., Чеботарёв С.Д., Трофимов А.М., Михайлов А.Н. Радиолокационное синтезирование апертуры X/L-диапазона для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.44–51. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).44-51](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).44-51)

The article describes technical realization of compact UAV based X/L-band SAR. It presents a block diagram of the developed radar prototype and describes the structural diagrams of the main functional blocks: the signal generation and processing unit, the coordinate processing unit, the radar image generation unit. The estimation of the resources required for the implementation of signal processing of a programmable logic integrated circuit (FPGA) is given. Examples of radar images obtained during full-scale tests of the radar prototype are given at the end of the article. Novelty of design based on two main factors: broadband quasi-continuous signals (QCS) and the real-time land surface imaging. The usage of QCS leads to the higher stealthiness and noise-immunity. The peak power of transmitter is decreased also. This features are highly demanded while designing RSA systems that can be used on compact UAV.

Keywords: radar, SAR, unmanned aerial vehicle (UAV), quasicontinuous signals (QCS)

For citation: Zhukova I.N., Bystrov N.E., Chebotarev S.D., Trofimov A.M., Mikhaylov A.N. Compact UAV based X/L-Band SAR // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.44–51. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).44-51](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).44-51)

Введение

В настоящее время использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных сферах становится всё более распространённым и востребованным. Особую эффективность БПЛА демонстрируют в области наблюдения и сбора информации о состоянии объектов на земной поверхности, например:

- картографирование;
- гидрометеорология, ледовая разведка;
- контроль и управление водным трафиком;
- мониторинг промышленных объектов, мостов и дамб;
- мониторинг лесных объектов;
- съёмка территории чрезвычайных ситуаций.

Наиболее распространённым средством наблюдения на БПЛА являются специализированные оптические фото/видеокамеры. Их использование обусловлено хорошей разрешающей способностью данных систем, простотой обработки получаемого фотоизображения. Стоит отметить ряд недостатков

оптических систем: сильная зависимость от погодных условий, затруднённая работа в условиях плохой видимости, необходимость наличия гиростабилизированной платформы, высокая стоимость.

Альтернативным вариантом, позволяющим устранить указанные недостатки, является использование радиолокационных устройств для получения изображения земной поверхности. Высокая разрешающая способность в азимутальной плоскости может быть получена при большой апертуре антенны, что неприемлемо для использования на малогабаритных БПЛА. Технологии и алгоритмы синтезирования апертуры антенны позволяют получить высокое разрешение при малых габаритах антенной системы.

В настоящее время на рынке представлен ряд радиолокационных систем (РЛС) с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1–8]. Анализ показал, что большинство из них не могут быть задействованы на малогабаритных БПЛА по нескольким причинам, таким как высокие массогабаритные показатели, применение ЛЧМ-подобных зонди-

рующих сигналов с высокой пиковой мощностью излучения, а также постобработка записанной в полёте информации.

Альтернативным подходом может быть использование квазипрерывных сигналов (КНС) в РСА и выполнение обработки информации в реальном времени.

Применение КНС позволяет снизить массогабаритные показатели РЛС и пиковую потребляемую мощность устройства, что очень важно в связи с малыми размерами и грузоподъёмностью носителя, а также с жёсткими требованиями по энергопотреблению устройств, входящих в состав бортовой аппаратуры БпЛА.

РСА картографирования земной поверхности позволяет при малых габаритах и весе получить разрешение формируемого радиолокационного изображения, сравнимое с оптическими системами и РЛС с антенной системой гораздо большего размера.

Применение квазипрерывного режима излучения и приёма увеличивает энергонасыщенность излучаемого и принимаемого сигнала при заданной пиковой мощности по сравнению с импульсной РЛС. При обработке не возникает неоднозначности измерения дальности и доплеровской частоты, в связи с чем отсутствует необходимость согласовывать режим излучения с параметрами обозреваемого объекта [9]. КНС обладает высокой помехозащищённостью и помехоустойчивостью [10], а его шумоподобная форма спектра оказывает минимальное влияние на другие устройства, работающие в том же диапазоне частот. Псевдослучайная структура зондирующего сигнала исключает возможность постановки имитационной помехи. Исследование и разработка новых типов сигналов на основе КНС продолжается с целью уменьшения уровня боковых лепестков функции неопределённости, доплеровской фильтрации и повышения помехоустойчивости [11].

Этапы разработки

На первом этапе была разработана математическая модель формирования отражённого сигнала. Исходными данными для модели является графический файл спутниковой съёмки местности или аэрофотосъёмки либо специально сформированный

графический файл. С помощью модели формируется файл с данными, аналогичными поступающему на вход приёмника сигналу.

На втором этапе была разработана математическая модель обработки принятого сигнала. Совместно эти две модели позволяют задавать высоту и скорость движения носителя, требуемое разрешение, параметры излучаемого сигнала, параметры обработки и т.д. Математическая модель обработки сигнала послужила базой для разработки алгоритмов формирования и обработки зондирующих сигналов и их параметров, используемых в действующем прототипе РЛС.

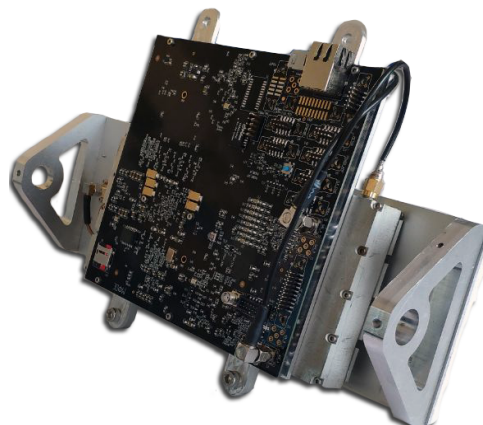


Рис.1. Разработанный прототип РЛС

На основе математических моделей был разработан и изготовлен прототип устройства, состоящий из антенны бокового обзора, СВЧ-конвертора и устройства формирования и обработки сигналов (УФОС). УФОС построен на основе системы на кристалле Xilinx Zynq XC7Z035, АЦП Analog Devices AD9680 и ЦАП Texas Instruments DAC38RF84. При обработке сигналов используются разработанные в лаборатории НИЛ ЦОС НовГУ алгоритмы формирования и обработки КНС с большой базой. Прототип РЛС без верхней крышки корпуса показан на рис.1. Габариты УФОС составляют $160 \times 160 \times 20$ мм, СВЧ-конвертора — $180 \times 100 \times 15$ мм, антенны — $250 \times 100 \times 10$ мм. Масса прототипа РЛС в сборе составляет 1500 г.

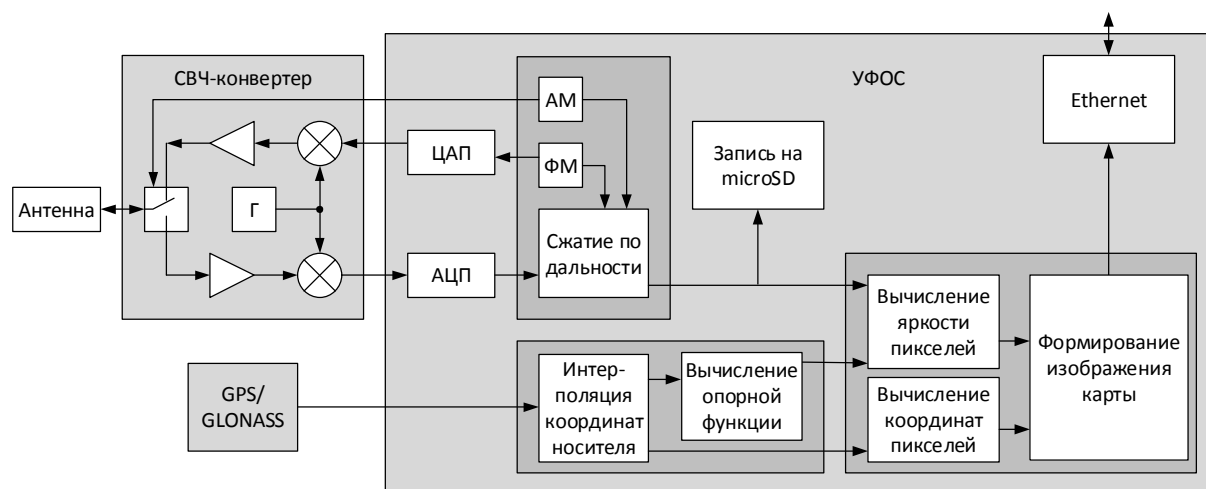


Рис.2. Схема РЛС

Общая структура РЛС

На рис.2 представлена структурная схема разработанного прототипа РЛС, состоящего из следующих основных блоков: 1) GPS/GLONASS-приёмник; 2) антенна; 3) СВЧ-конвертер; 4) УФОС.

GPS/GLONASS-приёмник передаёт в УФОС координаты носителя в сообщениях формата NMEA-0183 по последовательному порту один раз в секунду, что позволяет производить синтезирование апертуры антенны при полёте по нестрогой прямолинейной траектории [12].

Антенна X-диапазона представляет собой микрорешетчатую панель из 16 элементов. Диаграмма направленности антенны (ДНА) в азимутальной и угломестной плоскостях представлена на рис.3а и 3б соответственно. Габариты антенны X-диапазона составляют 250×100 мм и во многом определяют общие габариты макета РЛС (см. рис.1).

Дополнительный интерес представляет работа в двух диапазонах, например при решении задач поиска человека. Совмещенная антенна X/L-диапазонов в данный момент находится в разработке.

СВЧ-конвертер содержит:

- усилитель мощности передаваемого сигнала;
- малощумящий приёмный усилитель;
- коммутатор приёма-передачи;
- генератор;
- гетеродин для переноса спектра излучаемого сигнала вверх;
- гетеродин для переноса спектра принимаемого сигнала вниз.

Устройство формирования и обработки сигналов (УФОС) включает в состав ЦАП, АЦП, систему

на кристалле Xilinx Zynq XC7Z035, интерфейсы ввода-вывода. На ПЛИС реализовано выполнение следующих операций:

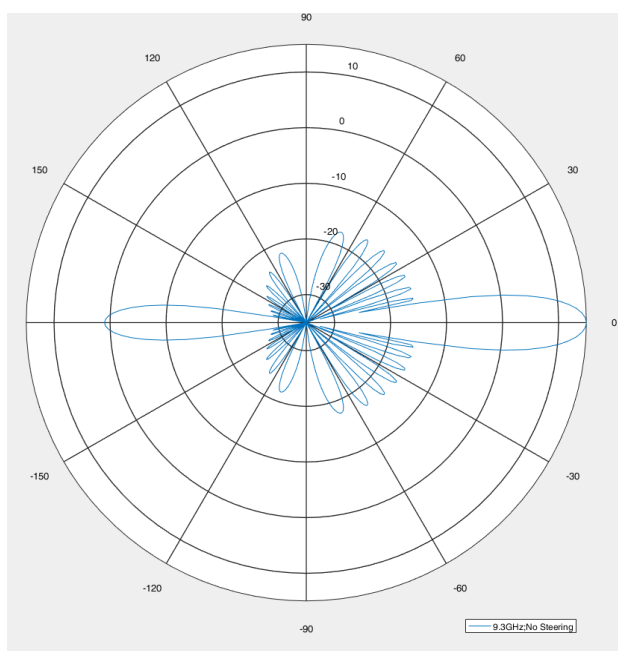
- формирование псевдослучайного амплитудно-фазоманипулированного зондирующего сигнала;
- приём и обработка принятого сигнала, включающая сжатие сигнала по дальности с формированием массива комплексных амплитуд для каждой дальности в каждом цикле когерентного накопления (зондирования);
- приём координат от GPS/GLONASS-приёмника, формирование массивов координат носителя и координат точек на земной поверхности, вычисление опорной функции для синтеза апертуры антенны;
- синтезирование апертуры антенны по опорной функции и данным из массива комплексных амплитуд сжатого сигнала. Формирование пикселей изображения и построение карты;
- операции ввода-вывода: управление, передача сформированного изображения, запись данных на карту памяти.

Формирование и обработка сигнала

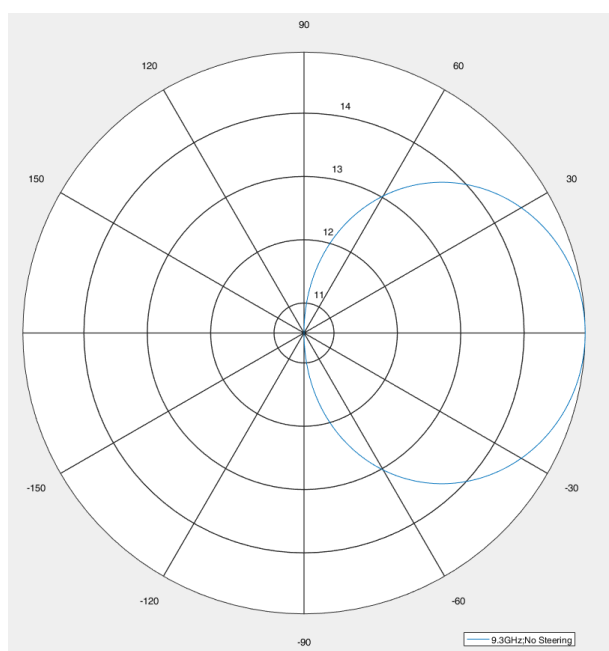
Структурная схема блока формирования и обработки сигнала показана на рис.4.

Блок формирования и обработки выполняет:

- формирование псевдослучайной последовательности амплитудной манипуляции (ПСП АМ);
- формирование псевдослучайной последовательности фазовой манипуляции (ПСП ФМ);
- корреляционную фильтрацию по алгоритму сегментной свёртки в частотной области;



а)



б)

Рис.3. ДНА в азимутальной (а) и угломестной (б) плоскостях

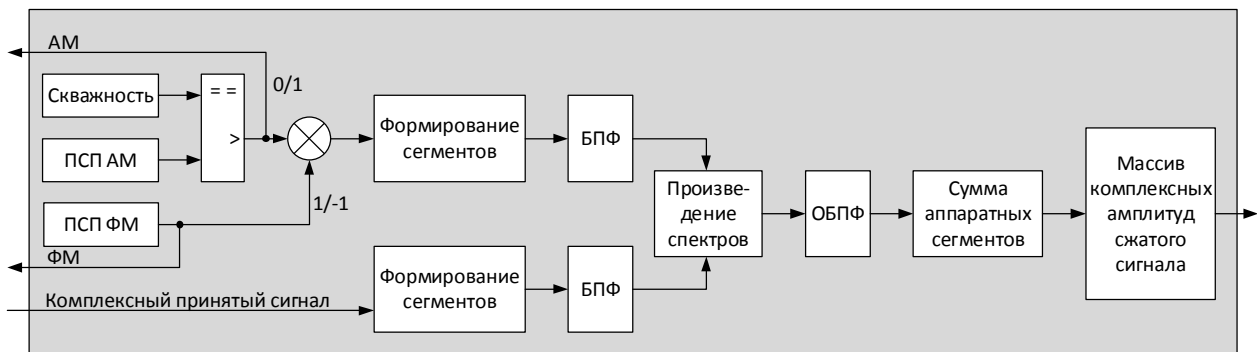


Рис.4. Схема формирования и обработки сигнала

— суммирование аппаратных сегментов для получения амплитуд сжатого по дальности сигнала с заданной полосой доплеровских частот;

— заполнение массива комплексных амплитуд сжатого сигнала.

Генератор ПСП АМ формирует сигнал огибающей для передатчика с заданной средней скважностью. Значение 1 соответствует работе передатчика, 0 — приёмника. Длительность передачи и приёма — псевдослучайная в заданном диапазоне, кратная нескольким символом псевдослучайной последовательности ФМ.

Генератор ПСП ФМ формирует сигнал фазовой манипуляции со значениями 1 и -1 , соответствующими 0 и 180 градусам поворота фазы несущей. Сигнал ПСП ФМ переносится с помощью ЦАП на промежуточную частоту 1300 МГц.

Принятый сигнал на промежуточной частоте подаётся на АЦП, в котором переносится на нулевую частоту, формируется комплексный принятый сигнал.

Произведение последовательностей АМ и ФМ служит опорным сигналом для корреляционной фильтрации принятого сигнала. Фильтрация производится с разбивкой принятого и опорного сигналов на сегменты [13], размер которых выбран оптимальным для использования аппаратной операции БПФ. В результате свёртки аппаратных сегментов получается вектор комплексных амплитуд, соответствующих кольцам дискретной наклонной дальности от носителя до земной поверхности (сжатие по дальности). Векторы далее суммируются для понижения частоты до частоты зондирования, согласованной с физической шириной полосы частот в раскрые ДНА. Результаты записываются в массив комплексных амплитуд сжатого сигнала.

Обработка координат

Структурная схема блока обработки координат показана на рис.5.

Блок обработки координат производит:

— обработку сообщений формата NMEA-0183, поступающих от GPS/GLONASS приёмника;

— интерполяцию координат носителя до частоты зондирования, запись траектории движения в массив;

— вычисление положения проекции главного луча ДНА на земную поверхность;

— вычисление в каждом зондировании координат точек земной поверхности, соответствующих кольцам дискретной наклонной дальности и проекции главного луча, запись координат в массив;

— вычисление расстояний от носителя до каждой точки на протяжении периода синтеза антенны;

— вычисление комплексной опорной функции по соотношению вычисленного расстояния и длины волны излучаемого сигнала.

Обработка сообщений NMEA-0183 включает в себя проверку корректности сообщения, выделение сообщений, содержащих координаты носителя, подсчёт координат носителя в плоскую прямоугольную систему координат с фиксацией начальной точки траектории.

Интерполяция потока прямоугольных координат — локальная, сплайновая. Темп выдачи координат повышается с одного отсчёта в секунду до частоты зондирования (около 250 Гц). Координаты носителя сохраняются в массиве.

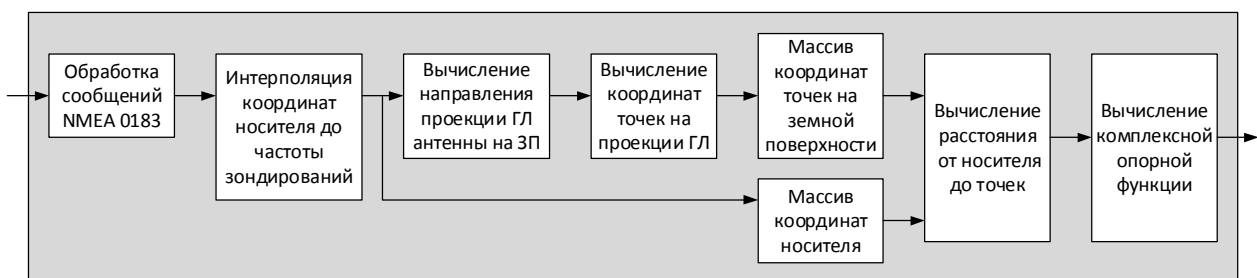


Рис.5. Схема обработки координат

В каждом зондировании выбирается направление проекции главного луча диаграммы направленности антенны на земную поверхность. Моделирование показало, что с большой точностью этим направлением является перпендикуляр к длине проекции участка траектории носителя на земную поверхность, соответствующего времени синтеза апертуры антенны, который составляет 128 зондирований (рис.6).

На перпендикуляре вычисляются координаты точек, соответствующих кольцам дискретной наклонной дальности. Координаты сохраняются в массиве.

Для каждой точки рассчитываются расстояния от неё до всех 128 положений носителя, участвующих в синтезировании апертуры для данной точки, как показано на рис.7.

Отношение полученного расстояния к длине волны соответствует набегу фазы принятого сигнала относительно излучённого. Опорная функция для синтеза апертуры вычисляется как комплексная синусоида от этого набега фазы.

Формирование изображения

Структурная схема блока формирования изображения показана на рис.8.

Блок формирования изображения выполняет:

- синтезирование апертуры для каждой точки
- вычисление амплитуды точки;
- определение координат пикселя, в который попадает точка;
- расчет средней амплитуды пикселя усреднением амплитуд попавших в него точек;
- вычисление границ карты, нарезка на участки;
- заполнение участков карты пикселями.

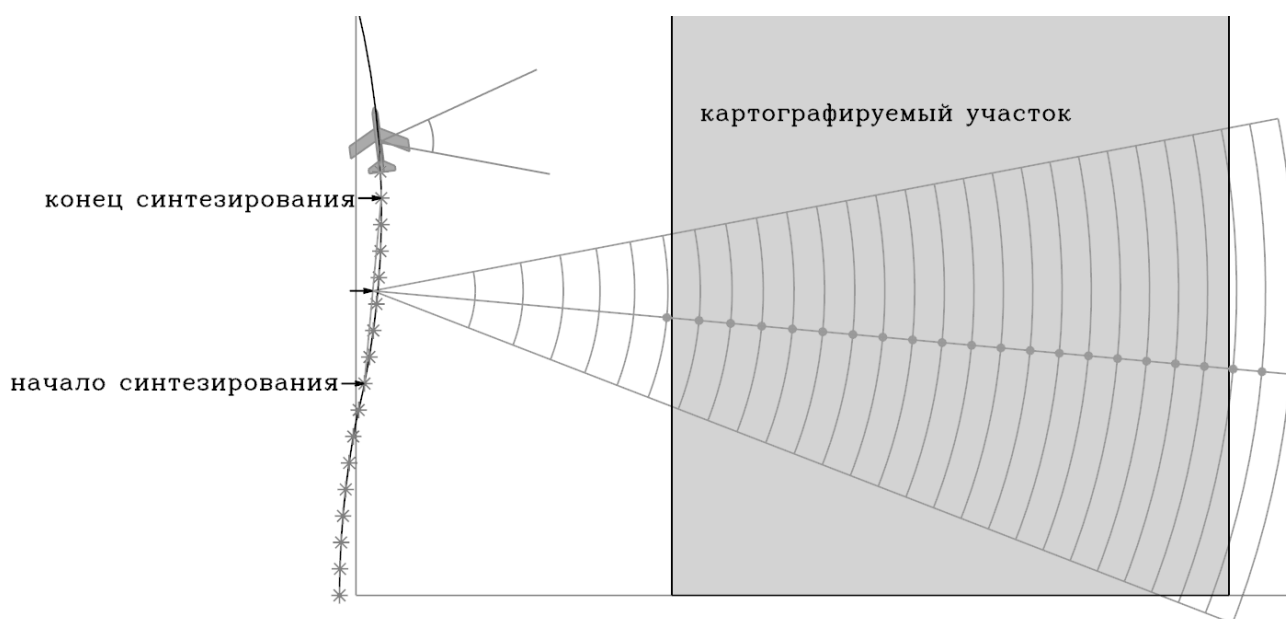


Рис.6. Положение проекции главного луча

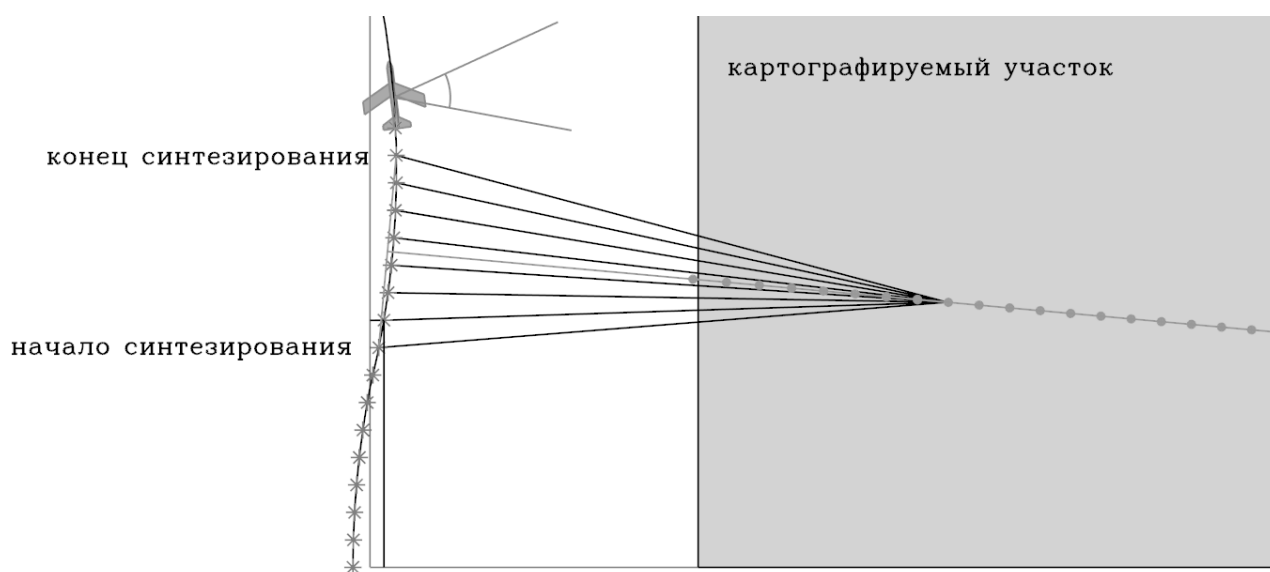


Рис.7. Синтезирование апертуры антенны

Синтезирование апертury антенны осуществляется путём суммирования произведений комплексных амплитуд сжатого сигнала на соответствующие значения комплексной опорной функции в каждом из 128 зондирований данного синтеза апертury. Модуль этой суммы является яркостью точки.

Карта строится с заданным разрешением (рис.9). Оно определяет метрический размер и положение прямоугольных пикселей формируемого изображения. По координатам точки вычисляется пиксель, в который попадает данная точка. Её ам-

плитуда накапливается в этом пикселе, а количество точек в пикселе подсчитывается.

После завершения каждого цикла формирования участка карты, яркости попавших в каждый пиксель точек усредняются. Участок карты накладывается на формируемую полную карту. В том случае, если участок попадает на ещё не заполненную область, границы карты модифицируются.

Результат отправляется по интерфейсу Ethernet в модем штатного беспроводного канала связи БпЛА с пунктом управления. Возможно отображение карты на экране ПК в режиме реального времени.

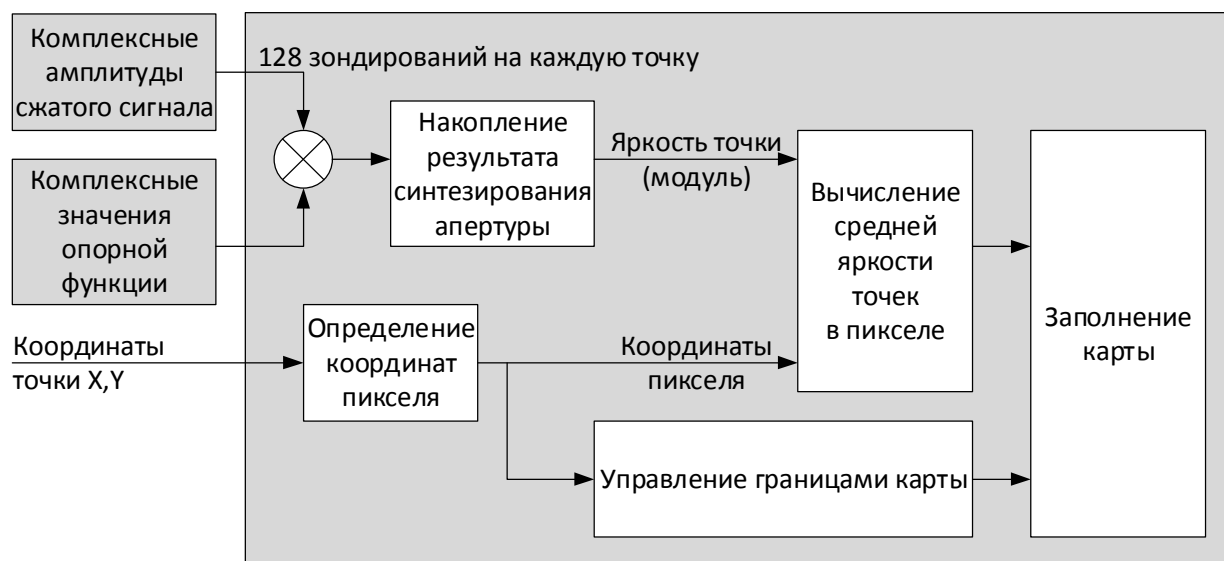


Рис.8. Схема формирования изображения

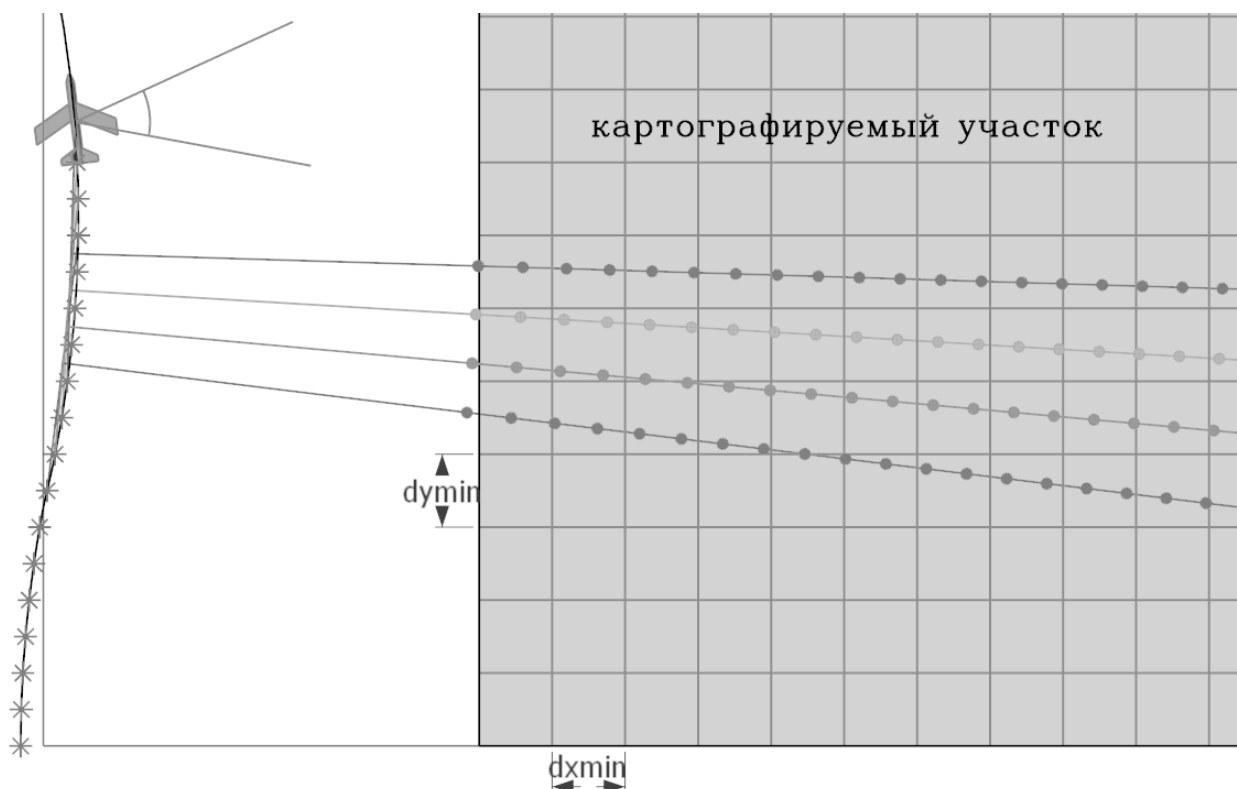


Рис.9. Формирование пикселей по точкам

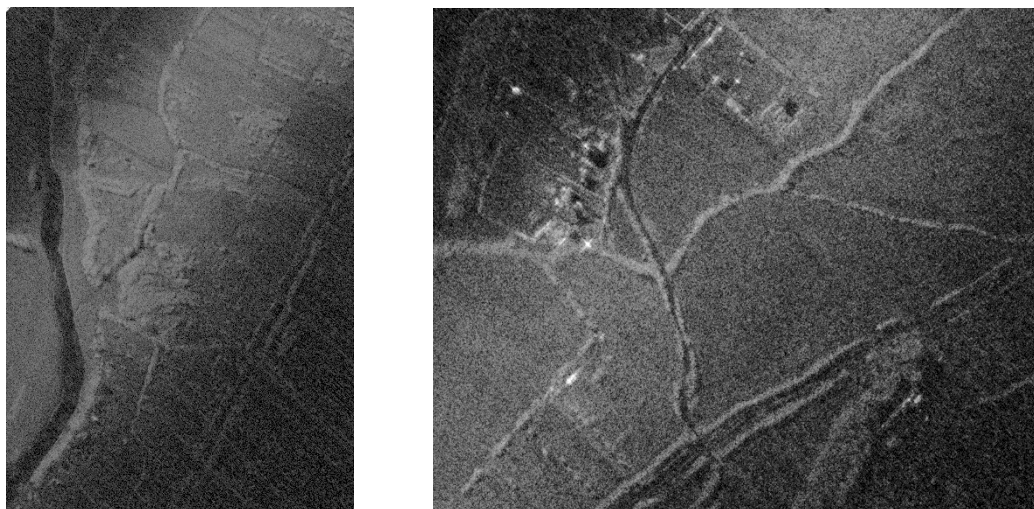


Рис.10. Полученные радиолокационные изображения

Использование ресурсов ПЛИС

В таблице отображены данные о требуемых ресурсах программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Ресурс	Использовано	Доступно	% использования
LUT	91689	171900	53,34
LUTRAM	15374	70400	21,84
FF	154791	343800	45,02
BRAM	390	500	78,00
DSP	597	900	66,33
IO	154	250	61,60
GT	2	8	25,00
BUFG	11	32	34,38
MMCM	5	8	62,50
PLL	1	8	12,50

Представленные данные показывают, что аппаратных ресурсов кристалла Xilinx Zynq XC7Z035 для реализации алгоритмов обработки сигналов и формирования радиолокационных изображений достаточно.

Полученные результаты

В ходе испытаний на ЛА было произведено картографирование местности. Примеры полученных радиолокационных изображений показаны на рис.10.

Результаты испытаний продемонстрировали работоспособность разработанного прототипа РЛС, а также высокую степень совпадения полученных радиолокационных изображений с картами местности зондируемой поверхности.

1. IAI ELTA Systems Ltd. SAR/GMTI UAV Reconnaissance System. EL/M-2055 [Электронный ресурс]. URL: http://www.iai.co.il/sip_storage/files/3/27493.pdf (дата обращения: 03.12.2017).
2. Tsunoda S.I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar // Sandia [Электронный ресурс]. URL: https://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf (дата обращения: 03.12.2017).
3. THALES. I-Master Ground breaking lightweight surveillance radar [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/i-master> (дата обращения: 03.12.2017).
4. Leonardo Company. PicoSAR compact, lightweight airborne ground surveillance radar [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leonardocompany.com/en/-/picosar-1> (дата обращения: 03.12.2017).
5. Metasensing. MiniSAR — Aerial detection and tracking of moving targets [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metasensinggroup.com/minisar> (дата обращения: 03.12.2017).
6. ARTEMIS. SlimSAR [Электронный ресурс]. URL: <http://www.artemisinc.net> (дата обращения: 03.12.2017).
7. ImSAR. NanoSAR C Data and specification sheet. URL: http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Ju12014.pdf (дата обращения: 19.11.2014).
8. НИЦ СРМ МАИ. Малогабаритная бортовая радиолокационная станция двойного назначения «Когитор» (МФ2). URL: https://mai.ru/science/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319 (дата обращения: 03.12.2017).
9. Bystrov N.E., Zhukova I.N., Reganov V.M., Chebotarev S.D. Range and doppler ambiguity elimination in coherent radar using quasicontinuous signals // Journal of mechanical engineering research and developments. 2017. Vol.40. №4. P.37–46. DOI: <https://doi.org/10.7508/jmerd.2017.04.005>
10. Быстров Н.Е., Жукова И.Н. Модель оценки помехоустойчивости РЛС с квазинепрерывным режимом излучения и приема сигналов с псевдослучайной структурой огибающей // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2011. №65. С.50–55.
11. Bystrov N., Zhukova I., Reganov V., Chebotarev S. Synthesis of wideband signals with irregular bi-level structure of power spectrum // IEJME-Mathematics Education. 2016. Vol.11(9). P.3187–3195.
12. Сазонов Н.А. Особенности синтезирования апертуры антенны при произвольной траектории летательного аппарата // Радиотехника. 1986. №8. С.89–92.
13. Быстров Н.Е., Жукова И.Н., Удальцов А.В. Сравнение методов высокоскоростной сверстки сложных сигналов с большой базой // Вестник НовГУ. 2007. №44. С.8–11.

References

1. IAI ELTA Systems Ltd. SAR/GMTI UAV Reconnaissance System. EL/M-2055. Available at: http://www.iai.co.il/sip_storage/files/3/27493.pdf (accessed: 03.12.2017).
2. Tsunoda S.I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar. Sandia. Available at: https://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf (accessed: 03.12.2017).
3. THALES. I-Master Groundbreaking lightweight surveillance radar. Available at: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/i-master> (accessed: 03.12.2017).
4. Leonardo Company. PicoSAR compact, lightweight airborne ground surveillance radar. Available at: <http://www.leonardocompany.com/en/-/picosar-1> (accessed: 03.12.2017).
5. Metasensing. MiniSAR — Aerial detection and tracking of moving targets. Available at: <https://www.metasensinggroup.com/minisar> (accessed: 03.12.2017).
6. ARTEMIS. SlimSAR. Available at: <http://www.artemisinc.net> (accessed: 03.12.2017).
7. ImSAR. NanoSAR C Data and specification sheet. Available at: http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Jul2014.pdf (accessed: 19.11.2014).
8. Scientific center of special radio-electronic systems and management of MAI. Small-sized airborne dual-purpose radar station "Kogitor" (MF2). Available at: https://mai.ru/science/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319 (accessed: 03.12.2017).
9. Bystrov N.E., Zhukova I.N., Reganov V.M., Chebotarev S.D. Range and doppler ambiguity elimination in coherent radar using quasicontinuous signals. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 2017, vol. 40, no. 4, pp. 37–46. doi: <https://doi.org/10.7508/jmerd.2017.04.005>
10. Bystrov N.E., Zhukova I.N. Model' otsenki pomekhoustoychivosti RLS s kvazine-preryvnym rezhimom izlucheniya i priyema signalov s psevdosluchaynoy strukturoy ogibayushchey [A model for assessing the noise immunity of a radar station with a quasi-continuous mode of emitting and receiving signals with a pseudo-random envelope structure]. Vestnik NovGU. Issue: Engineering Sciences, 2011, no. 65, pp. 50–55.
11. Bystrov N., Zhukova I., Reganov V., Chebotarev S. Synthesis of wideband signals with irregular bi-level structure of power spectrum. IEJME-Mathematics Education, 2016, vol. 11(9), pp. 3187–3195.
12. Sazonov N.A. Osobennosti sintezirovaniya apertury anteny pri proizvol'noy trayektorii letatel'nogo apparata [Features of synthesizing the antenna aperture for an arbitrary trajectory of an aircraft]. Radiotekhnika, 1986, no. 8, pp. 89–92.
13. Bystrov N.E., Zhukova I.N., Udaltsov A.V. Sravneniye metodov vysokoskorostnoy svertki slozhnykh signalov s bol'shoi bazoy [Comparison of high-speed convolution methods for complex signals with a large base]. Vestnik NovGU. Issue: Engineering Sciences, 2007, no. 44, pp. 8–11.