

## Радиолокационный комплекс для беспилотных летательных аппаратов

В.Р. Скрынский

МИРЭА – Российский технологический университет  
119454, Россия, г. Москва,  
пр. Вернадского, 78

**Аннотация – Обоснование.** Разработка радиолокационного комплекса для обнаружения воздушных, морских, и наземных объектов, а также определение их расстояния, скорости и геометрических параметров с автоматизированной обработкой. **Цель.** Создание бортового радиолокационного комплекса бокового обзора с синтезированной апертурой, установленного на беспилотном летательном аппарате. **Методы.** Применение методов цифровой обработки сигналов для формирования радиолограмм и извлечения информации об объектах. Использование алгоритмов для автоматической обработки и анализа полученных данных в реальном времени. **Результаты.** Описана структурно-функциональная схема радиолокационной аппаратуры бортового радиолокационного комплекса бокового обзора X-диапазона, состоящего из антенны, приемо-передающего блока, контейнера с цифровым ядром и микронавигационной системы. В режиме высокого разрешения формируемая на борту радиолограмма, сбрасываемая по каналу связи на пункт управления и обработки. Формирование радиолокационного изображения и вторичная обработка выполняются на наземном пункте в автоматическом режиме. **Заключение.** По результатам исследований показана возможность реализации получения радиолокационного излучения в режиме реального времени на борту носителя, а также установка рассмотренного бортового радиолокационного комплекса на беспилотном летательном аппарате совместно с автоматизированным пунктом обработки и анализа информации.

**Ключевые слова** – радиолокация; радиолокационная станция с синтезированной апертурой; радиолограмма; радиолокационное изображение; цифровая обработка сигналов; автоматизация технологического процесса обработки информации.

### Введение

В данной работе рассматривается создание бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) бокового обзора с синтезированной апертурой, установленного на беспилотном летательном аппарате (БЛА), а также автоматизированная обработка полученной информации на наземном комплексе. Возможность установки такого БРЛК на БЛА позволяет реализовать следующие характеристики интересующих потенциальных потребителей целей при ведении радиолокационного наблюдения:

- обеспечить возможность обнаружения и распознавания круглосуточно в любых погодных условиях как движущихся, так и стационарных наземных и надводных целей на дальности до 100 км с высоким разрешением (до 0,3 м) при обеспечении широкой полосы захвата (до 40 км);
- сформировать радиолокационные изображения как на борту БЛА (с разрешением в единицы метров), так и на наземном пункте обработки;
- обеспечить передачу информации о параметрах обнаруженных целей в сопряженные системы бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) БЛА или наземный пункт обработки информации.

### 1. Состав и основные характеристики радиолокационной системы

Радиолокационная система состоит из следующих элементов:

- Бортовая аппаратура РЛК, включающая в свой состав следующие элементы:
  - антенная система;
  - приемо-передающее устройство;
  - аппаратура формирования и обработки сигналов;
  - вычислительный комплекс.
- Наземный автоматизированный пункт обработки и анализа информации, который может быть интегрирован в наземный мобильный пункт управления, состоящий из:
  - аппаратных и общепрограммных средств;
  - программных компонентов первичной обработки информации;
  - программных компонентов вторичной обработки информации;
  - средств диспетчеризации и управления технологическими процессами обработки и анализа информации.
- Высокоскоростная радиопередача (ВРП) со скоростью передачи информации 1,2 Гбит/с.

Таблица 1. Основные характеристики РЛК в составе БЛА  
 Table 1. The main characteristics of the RLC as part of the UAV

Параметр	Значение
Импульсная мощность	1440 Вт
Рабочая частота	9600 МГц
Полоса частот	600 МГц
Максимальная рабочая дальность	до 100 км
Полоса захвата	40 км
Предельное пространственное разрешение по азимуту	0,3 м
Предельное пространственное разрешение по дальности	0,3 м
Вероятность обнаружения объекта не хуже	0,96
Габаритные размеры АФАР	500 × 250 × 100 мм
Габаритные размеры приемо-передающей и вычислительной аппаратуры	350 × 400 × 120 мм
Энергопотребление	не более 1500 Вт
Масса (в зависимости от конфигурации)	35–80 кг

Основные технические характеристики рассматриваемой бортовой аппаратуры приведены в таблице 1.

При работе РЛК возможны формирование радиолокационного излучения (РЛИ) в реальном времени на борту БЛА и сброс РЛИ по каналам связи БЛА на пункт обработки и анализа информации, где она подвергается различным этапам автоматизированной обработки и анализа в соответствии с заложенными технологическими процессами. В процессе обработки проводится обнаружение и распознавание интересующих потребителя объектов. На основе полученных результатов обработки оператор принимает решение о формировании и выдаче целеуказаний или проведении дополнительного мониторинга в режиме высокого разрешения [1].

В режиме высокого разрешения формируемая на борту радиоголограмма (РГГ) (информация) сбрасывается по каналу связи БЛА на пункт обработки и анализа информации. Формирование РЛИ и автоматизированная обработка и анализ проводятся с применением других технологических процессов обработки и анализа информации.

## 2. Режимы работы БРЛК

Бортовая аппаратура комбинированного РЛК для БЛА предусматривает два режима работы:

1. Боковое визирование;
2. Визирование в передней полусфере.

Боковое визирование – съемка радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА), которая обеспечивает получение двумерного яркостного радиолокационного изображения местности для

контроля местоположения объекта и коррекции его координат по радиолокационной карте выбранного участка.

При боковом визировании радиолокатор осуществляет съемку поверхности с высоким пространственным разрешением, близким к оптическим средствам. Некоторые характеристики радиолокационного изображения существенно зависят от высоты съемки. В частности, рассматриваемая аппаратура обеспечивает получение кадра изображения размером 0,8 × 0,8 км – на высоте БЛА 100 м, до 7 × 7 км – на высоте БЛА 500 м при использовании антенны с косекансной диаграммой направленности в вертикальной плоскости [2].

Пространственное расширение РСА, устанавливаемое программным путем, составляет от 0,4 м до нескольких метров с возможным дополнительным увеличением (укрупнением) элементов разрешения.

Энергетические показатели РСА в рабочем диапазоне дальностей достаточно высокие, так, радиометрическая чувствительность составляет порядка –17 дБ при хорошем разрешении.

Визирование в передней полусфере – импульсно-доплеровский режим (ИДР) радиолокатора со сканированием антенного луча, обеспечивающий получение информации о поверхности и расположенных на ней объектах.

При импульсно-доплеровском режиме радиолокатора предусматривается съемка поверхности по курсу движения БЛА, для чего осуществляется электронное сканирование антенного луча в двух плоскостях. В качестве антенного устройства

Таблица 2. Основные характеристики приемо-передающего блока X-диапазона  
Table 2. Main characteristics of the X-band receiving and transmitting unit

Параметр	Значение
Центральная часть сигнала	9800 МГц
Коэффициент усиления зеркальной антенны в максимуме ДН	20 дБ
Максимальная ширина спектра зондирующего ЛЧМ сигнала	600 МГц
Импульсная мощность передатчика	не менее 320 Вт
Вид модуляции сигнала	ЛЧМ
Сквозность	не менее 16
Длительность импульса	5–60 мкс
Шум-фактор приемного канала	не более 4,5 дБ
Потребление по сети 27 В	не более 70 Вт
Масса	10–14 кг

используется двумерная активная фазированная антенная решетка (АФАР). Диаметр апертуры антенны – 250 мм, коэффициент усиления излучающей системы – 26 дБ, а ширина диаграммы направленности (ДН) в каждой плоскости составляет порядка 5°.

Полоса захвата по дальности в диапазоне рабочих высот РЛС составляет 3–14 км. Величина азимутного следа ДН на дальности 5 км – порядка 600 м. Пространственное разрешение радиолокатора по наклонной дальности – более 0,25 м (устанавливается программным обеспечением).

### 3. Технический облик БРЛК бокового обзора

В локаторе предлагается использовать зеркальную антенну с секторальным рупором в качестве облучателя [3; 5], которая имеет косекансную диаграмму направленности в вертикальной плоскости.

Характеристики зеркальной антенны:

- полоса пропускания: 9,3–10,3 ГГц;
- ширина луча в Е-плоскости (вертикальной): 49° по уровню 8 дБ;
- ширина луча в Н-плоскости (горизонтальной): 7,0–8,4° дБ;
- УБЛ в обеих плоскостях: минус 22 дБ.
- масса антенны: не более 2,5 кг.

Приемо-передающий блок объединяет основные аналоговые компоненты радиолокационной аппаратуры:

- усилитель мощности;
- приемо-передающий модуль.

Усилитель мощности зондирующего сигнала (УМ ЗС), на его выходе формируется мощный сиг-

нал на несущей частоте, который по фидерному тракту передается в зеркальную антенну, размещаемую на боковой части БЛА. В усилитель мощности также конструктивно входит циркулятор [6; 7].

Приемо-передающий модуль (маломощная часть приемопередатчика), в который функционально и конструктивно входят следующие устройства:

- предварительный усилитель мощности (ПУМ);
- приемник вместе с устройством управления коэффициентом усиления приемника.

Управление коэффициентом усиления приемника позволяет согласовать динамический диапазон АЦП с уровнем входного сигнала;

- многофункциональный высокочастотный генератор, предназначенный для генерации сетки когерентных сигналов, необходимых для переноса зондирующего сигнала на высокую частоту и обратно.

Основные характеристики приемо-передающего блока X-диапазона представлены в таблице 2.

Контейнер с цифровым ядром объединяет все цифровые компоненты РСА:

- специальный вычислитель – ЭВМ управления, реализующая алгоритм автоматического управления съемкой заданных объектов. Программное обеспечение этого компьютера позволяет управлять радиолокатором во всех режимах функционирования;
- цифровой модуль формирования сигнала – многофункциональный формирователь зондирующего сигнала, который реализует формирование пачки зондирующего сигнала в соответствии с заданием, полученным от управляющего компьютера;

– аналого-цифровой сигнальный процессор с мезонинными модулями ЦАП и АЦП, который производит оцифровку аналогового сигнала, поступающего от приемо-передающего устройства радиолокатора, буферизацию и первичную обработку сигнала. На несущем модуле установлен процессор, реализующий обработку радиолокационной информации в реальном времени [4].

#### 4. Описание автоматизированного пункта обработки и анализа информации

В наземном пункте для автоматизации процесса обработки и анализа информации БРЛК предлагается использовать различные программные компоненты обработки РЛИ в связке со специальным настраиваемым (адаптируемым) программным обеспечением автоматизации технологических процессов обработки и анализа информации. Для каждого режима обработки информации должен быть выстроен отдельный технологический процесс. В зависимости от поступивших исходных данных и требуемого представления результатов обработки информации специальное программное обеспечение в автоматизированном режиме применяет заложенный сценарий обработки информации. Применение специального программного обеспечения автоматизации технологических процессов обработки и анализа информации на наземном пункте БРЛК позволит решить следующие задачи:

– повышение автоматизации выполнения технологических процессов обработки и анализа информации БРЛК на наземном пункте и снижение вероятности ошибки оператора;

– сокращение времени обработки информации БРЛК на наземном пункте;

– автоматизация нештатных процессов обработки информации БРЛК на наземном пункте;

– снижение количества привлекаемого персонала для обработки информации на БРЛК наземного пункта.

#### Заключение

По результатам исследований разработаны предложения по составу и облику БРЛК для БЛА, в том числе обеспечивающего возможность реализации получения РЛИ в режиме реального времени на борту носителя.

Возможность установки рассмотренного БРЛК на БЛА совместно с автоматизированным пунктом обработки и анализа информации позволяют реализовать следующие характеристики интересующих потенциальных потребителей целей при ведении радиолокационного наблюдения:

– обеспечить возможность обнаружения и распознавания круглосуточно в любых погодных условиях как движущихся, так и стационарных наземных и надводных целей на дальности до 100 км с высоким разрешением (до 0,3 м) при обеспечении полосы захвата до 40 км;

– сформировать радиолокационные изображения как на борту БЛА (с разрешением в единицы метров), так и на наземном автоматизированном пункте обработки и анализа информации;

– обеспечить передачу информации о параметрах обнаруженных целей в сопряженные системы бортового радиоэлектронного оборудования БЛА или наземный автоматизированный пункт обработки и анализа информации.

#### Список литературы

1. Воронцова С.А. Улучшение характеристик РСА землеобзора за счет применения двухпозиционного режима их работы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 1. С. 24–30. URL: <https://rts-md.mivlg.ru/journalRTS/article/view/13>
2. Добриков В.А., Авдеев В.А., Гаврилов Д.А. Определение траектории авиационного носителя радиолокатора с синтезированной апертурой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 1. С. 10–14. URL: [https://pribor.ifmo.ru/ru/article/4650/opredelenie\\_traektorii\\_aviacionnogo\\_nositelya\\_radiolokatora\\_s\\_sintezirovannoy\\_aperturoy.htm](https://pribor.ifmo.ru/ru/article/4650/opredelenie_traektorii_aviacionnogo_nositelya_radiolokatora_s_sintezirovannoy_aperturoy.htm)
3. 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.
4. Имитационная математическая модель построения двумерных радиолокационных изображений воздушных объектов в интересах оценки качества распознавания / В.П. Бердышев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. Т. 11, № 7. С. 764–774.
5. Антенна кругового обзора на основе линейно расширяющихся симметричных шелевых линий / В.П. Заярный [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 3. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.10-14>
6. Углов Г.А., Белова Ю.В. Особенности разработки широкополосных смесителей частоты с подавлением зеркального канала в диапазоне частот 9–27 ГГц // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.68-73>
7. Способы частотно-поляризационного разделения сигналов в зеркальных антеннах систем спутниковой связи / Д.Д. Габриэлян [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>

## Информация об авторах

Скрынский Владислав Романович, ведущий инженер инновационно-инжинирингового центра микросенсорики МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, Россия.

Область научных интересов: распространение радиоволн, радиопередающие и радиоприемные устройства, радиотехнические системы зондирования, локации и навигации.

E-mail: skrynskiy@mirea.ru

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2024, vol. 27, no. 4, pp. 68–72

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.4.68-72

UDC 621.396.969

Original Research

Received 18 September 2024

Accepted 21 October 2024

Published 28 December 2024

## Radar system for unmanned aerial vehicles

Vladislav R. Skrynskiy

MIREA – Russian Technological University  
78, Vernadsky Avenue,  
Moscow, 119454, Russia

**Abstract – Background.** Development of radar complex for detection of air, sea, and ground objects, as well as determination of their distance, speed and geometric parameters with automated processing. **Aim.** Creation of an airborne side-scan radar complex with synthetic aperture mounted on an unmanned aerial vehicle. **Methods.** Application of digital signal processing methods for formation of radio holograms and extraction of information about objects. Use of algorithms for automatic processing and analysis of the obtained data in real time. **Results.** The structural-functional scheme of the X-band side-scan radar system consisting of an antenna, a receiving and transmitting unit, a container with a digital core and a micronavigation system is described. In high-resolution mode, a radar hologram formed on board and dropped via a communication channel to the control and processing station. Radar image formation and secondary processing is performed at the ground station in automatic mode. **Conclusion.** According to the results of the research it is shown that it is possible to realise real-time radar reception on board the carrier, as well as to install the considered airborne side-scan radar complex on an unmanned aerial vehicle together with an automated point of information processing and analysis.

**Keywords** – radar; synthetic aperture radar; radar hologram; radar image; digital signal processing; automation of technological process of information processing.

✉ skrynskiy@mirea.ru (Vladislav R. Skrynskiy)

 © Vladislav R. Skrynskiy, 2024

## References

1. S. A. Vorontsova, “Improving the characteristics of land survey SAR through the use of a two-position mode of their operation,” *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, no. 1, pp. 24–30, 2017, url: <https://rts-md.mivlgu.ru/journalRTS/article/view/13>. (In Russ.)
2. V. A. Dobrikov, V. A. Avdeev, and D. A. Gavrilov, “Definition of aviation carrier trajectory of synthesised-aperture radar,” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, vol. 52, no. 1, pp. 10–14, 2009, url: [https://pribor.ifmo.ru/ru/article/4650/opredelenie\\_traektorii\\_aviacionnogo\\_nositelya\\_radiolokatora\\_s\\_sintezirovannoy\\_aperturoy.htm](https://pribor.ifmo.ru/ru/article/4650/opredelenie_traektorii_aviacionnogo_nositelya_radiolokatora_s_sintezirovannoy_aperturoy.htm). (In Russ.)
3. V. A. Kuznetsov and S. A. Goncharov, “Structural-parametric synthesis of a small-sized radar station with a synthetic aperture of a short-range unmanned aerial vehicle,” *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 3, pp. 28–72, 2017. (In Russ.)
4. V. P. Berdyshev et al., “Simulation mathematical model for constructing two-dimensional radar images of airborne objects in the interests of assessing the quality of recognition,” *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, vol. 11, no. 7, pp. 764–774, 2018. (In Russ.)
5. V. P. Zayarnyy et al., “All-around looking antenna based on linear expanding symmetric slot lines,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 10–14, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.10-14>. (In Russ.)
6. G. A. Uglov and Yu. V. Belova, “Features of the development of broadband frequency mixers with suppression of the mirror channel in the range frequencies 9–27 GHz,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 68–73, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.68-73>. (In Russ.)
7. D. D. Gabriel'ean et al., “Receiving and transmitting feed of reflector antennas for satellite communication systems,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 83–90, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>. (In Russ.)

## Information about the Authors

Vladislav R. Skrynskiy, leading engineer of the Innovation and Engineering Center of Microsensorics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia.

Research interests: radio wave propagation, radio transmitting and receiving devices, radio systems for sensing, location and navigation.

E-mail: skrynskiy@mirea.ru