Разработка модели радара с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата для дистанционного зондирования лесных массивов

Development of a synthetic aperture radar model for an unmanned aerial vehicle for remote sensing of woodlands

Карманова / Karmanova N.
Наталия Андреевна
(natali.karmanova@gmail.com)
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,
инженер научно-технического отдела.
г. Санкт-Петербург

Карманов / Karmanov A.
Андрей Геннадиевич
(karmanov.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»,
доцент кафедры информационных систем и технологий.
г. Санкт-Петербург

Петров / Petrov A.
Артем Александрович
(petrov@itain.ru)
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий инженер.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: мониторинг лесных массивов – forest monitoring; радиолокатор с синтезированной аппертурой – synthetic aperture radar; радиовидение – radio imaging; беспилотный авиационный комплекс – unmanned aerial vehicle; обработка радиолокационных изображений – radar image processing; теплоотвод антенных фазированных решеток – phased array antenna heat removal.

В работе исследована и обоснована возможность размещения на борту БЛА малого класса, с наилучшими летными характеристиками, радиолокатора с синтезированной апертурой раскрыва антенны. Радиолокационные станции высокого разрешения, обеспечивающие режим радиовидения имеют большую перспективу использования в лесном хозяйстве и научных экспериментах. Подтверждена возможность размещения радиолокационной станции с синтезированной апертурой на борту беспилотной авиационной системы малого класса («Диам-20») взлетной массой до 30 кг и тем самым обеспечения дистанционного зондирования в режиме радиовидения с разрешением 0,3 м.

The paper investigated and substantiated the possibility of placing an antenna aperture synthetic aperture radar on a small class UAV with the best flight characteristics. High-resolution radar stations provide radio imaging mode and have great prospects for use in forestry and scientific experiments. The possibility of placing a synthetic aperture radar station on a small class UAV ("Diam-20") with a takeoff weight of up to 30 kg and thereby providing remote sensing in radio vision mode with a resolution of 0.3 m has been confirmed.

Беспилотные авиационные системы и комплексы, способные решать в автоматическом режиме народнохозяйственные, научно-исследовательские и специальные задачи, являются приоритетным направлением в прорывных мультиплатформенных технологиях. В гражданском секторе беспилотные авиационные системы большого радиуса действия российского производства занимают лидирующие позиции на мировом рынке.

Эффективность использования беспилотного летательного аппарата (БЛА) в лесной отрасли напрямую зависит от уровня программно-аппаратных и технических средств полезной нагрузки, предназначенных для решения поставленных задач. Использование БЛА в качестве носителя накладывает определенные требования на разрабатываемую бортовую аппаратуру. В первую очередь, ограничения касаются массогабаритных характеристик бортового оборудования и потребляемой мощности.

Сегодня существует достаточно большой спектр устройств, основанных на различных физических принципах, которые можно использовать в качестве бортовой аппаратуры БЛА. Некоторые из них требуют проведения научных исследований для оценки эффективности их использования в составе конкретного типа беспилотного авиационного комплекса (БАК).

Предпочтение для использования в лесном хозяйстве отдается радийным системам, в частности в условиях плохой видимости, а использование сложных

сигналов, различных диапазонов радиоволн, позволяет проводить работы и научные исследования, начиная от геолокации до исследования растительного покрова.

В работе исследована и обоснована возможность размещения на борту БЛА малого класса, с наилучшими летными характеристиками, радиолокатора с синтезированной апертурой раскрыва антенны. Радиолокационные станции высокого разрешения, обеспечивающие режим радиовидения, имеют большую перспективу использования в лесном хозяйстве и научных экспериментах. Однако существующие экспериментальные изделия подобного класса имеют разрешение более 1 м. Такие низкие показатели существенно снижают круг задач, возложенных на БАС.

Целью работы является повышение разрешающей способности радиолокационной станции беспилотной авиационной системы малого класса (взлетной массой до 30 кг) за счёт применения синтезированной апертуры [1].

Для достижения цели работы решены следующие задачи:

– обоснован выбор вида дистанционного зондирования;

– выполнен функциональный анализ бортовых систем дистанционного зондирования;

– выполнен системный анализ и обоснование выбора беспилотной авиационной системы (БАС);

– разработана техническая архитектура беспилотного авиационного комплекса (БАК) дистанционного зондирования с системой радиовидения;

– обосновано решение по адаптация активной фазированной антенной решетки (АФАР) радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) для БАК;

– разработана модель РСА БАК для определения необходимых параметров бортовых устройств, обеспечивающих формирование режима радиовидения.

Обоснованное решение использовать БАС малого класса было принято ввиду эксплуатационных характеристик, экономических показателей. Также стоит учесть, что для управления БЛА 30 кг необходимо удостоверение оператора БЛА, свыше – требуется квалификация внешнего пилота и присвоение БЛА бортового номера.

Анализ характеристик беспилотных авиационных систем малого класса (таблица 1) позволил нам выдвинуть требования к радиолокационной станции.

Требования к радиолокационной станции:

– вес до 5 кг;

– объем до 6000 см^2;

– размер антенного устройства 900 см^2;

– потребляемая мощность – до 200 Вт;

– напряжение до 12 В.

Представленная техническая архитектура (рис. 1) включает в себя наземную станцию системы управления, бортовую аппаратуру системы правления, бортовую радиолокационную станцию. Радиолокатор имеет активную фазированную решетку с возможностью синтезирования апертуры антенны и цифровой обработке сигнала.

Радар с антенной фазированной решеткой отличается высокой степенью надежности и способен

Таблица 1

Анализ характеристик беспилотных авиационных систем малого класса

Характеристики	**Geoscan 201**	**Дозор-85**	**ZALA 421-16E5 HD**	**Орлан-10**	**«ДИАМ 20»**
Максимальная взлетная масса	8,5 кг	8,5 кг	29,5 кг	14 кг	29 кг
Размах крыла	2, 3 м	4,5 м	5,3 м	3,1 м	4 м
Масса полезной нагрузки	1,5 кг	2,5	5 кг	3 кг	5 кг
Максимальная скорость полета	130 км/ч	130 км/ч	110 км/ч	150 км/ч	160 км/ч
Максимальная продолжительность полета	До 3 ч	До 5 ч	До 6 ч	До 10 ч	До 14 ч
Максимальная высота полета	До 4000 м	До 4000 м	До 5000 м	До 5000 м	До 4000 м
Максимальная протяженность маршрута	210 км	900 км	600 км	600 км	1000 км

обеспечить намного большую передаваемую мощность. Из-за недостатков микроволновых транзисторных усилителей и монолитных интегральных схем эффективность передатчика модуля обычно меньше 45% [2]. В результате АФАР выделяет большое количество теплоты, которую необходимо рассеивать, чтобы предохранить чипы передатчика от расплавления. Воздушное охлаждение не может применяться из-за малой скорости и небольшой высоты движения БЛА, а водное из-за массогабаритных характеристик.

Решение было найдено в новых материалах, а именно в алмаз-карбидокремниевом композите «Скелетон». Анализ по показателям по плотности, теплопроводности, коэффициенту линейного расширения, сопротивлению показал, что «Скелетон» превосходит многие материалы [3].

Далее представлены результаты моделирования теплопередачи пластин со вставками с разной теплопроводностью (рис. 2).

Из приведенного рисунка видно (рис. 3), что применение АКК «Скелетон» в качестве теплоразгрузочного элемента существенно снижает установившуюся температуру электронныхкомпонент (в данном случае транзистора).

Из рис. 4 следует, что детальность радиолокационного изображения тем выше, чем меньше тангенциальная и радиальная разрешающая способности.

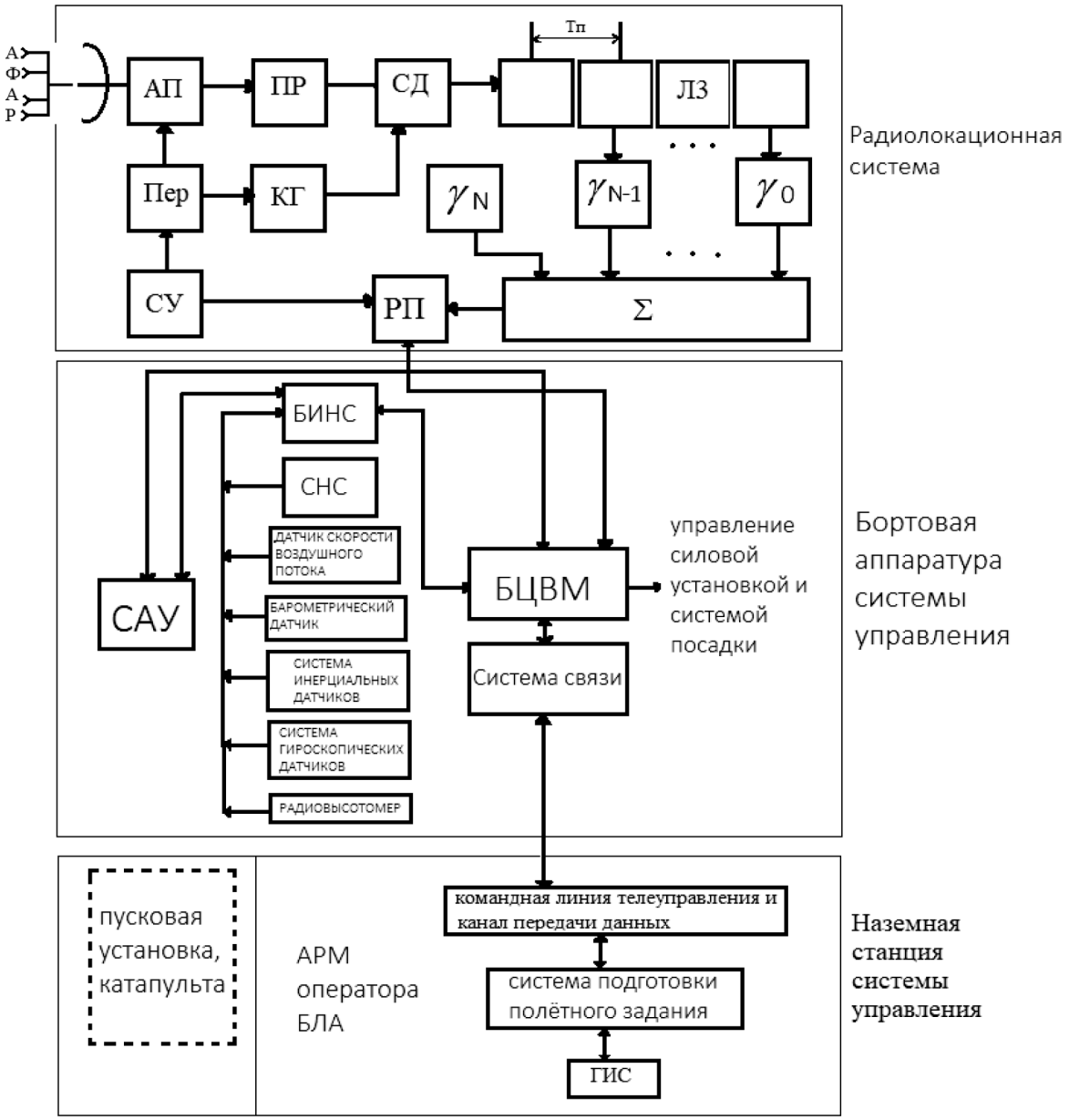


Рис. 1. Техническая архитектура беспилотного авиационного комплекса

Таблица 2

Свойства «Скелетона»

Материал	ρ, г/см^3	λ, Вт/м*К	*a*, см^2/с	ТКЛР.10^{-6}, 1/Кя	*R*, мкОм*м
АКК «Скелетон»	3,3	300–600	1,8–3,2	2,0–2,3	10^5

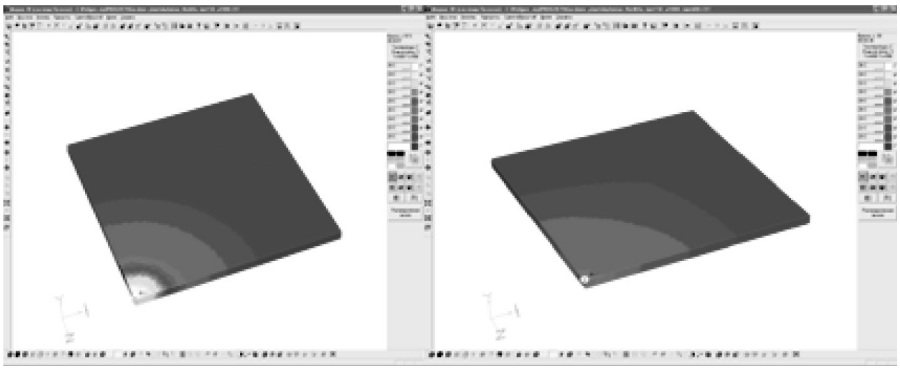
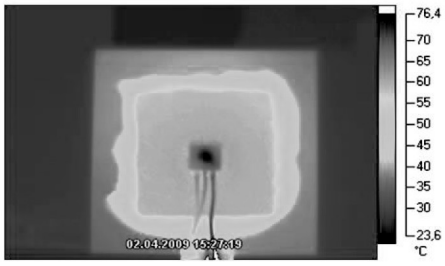


Рис. 2. Результаты моделирования теплопередачи пластин со вставками с разной теплопроводностью

Алюминиевая пластина (85x85 мм) + тепловыделяющий элемент (транзистор)



Алюминиевая пластина (85x85 мм) + пластина АКК (44x44x3 мм) + тепловыделяющий элемент (транзистор)

Рис. 3. Изменение теплового поля при использовании АКК «Скелетон»

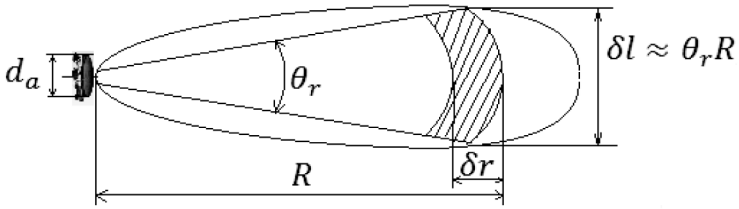


Рис. 4. Параметры, характеризующие детальность радиолокационного изображения

Решение проблемы повышения разрешающей способности в боковом направлении заключается, очевидно, в сужении ДНА. При этом возможны два пути.

Один путь подразумевает физическое увеличение размеров антенны [4]. В этом случае размер антенны может достигать величин 30 м и уже нельзя говорить о возможности его размещения на БЛА малого класса.

Задача получения высокой разрешающей способности кардинально решается методом синтезирования апертурного раскрыва антенны. Он заключается в специальной обработке принятых сигналов при поступательном движении носителя РЛС. В процессе синтезирования апертуры производится запоминание амплитуды и фазы всех принимаемых сигналов. Затем все эти сигналы когерентно суммируются. За счет этого формируется синтезированная антенна, апертура которой может многократно превышать ее физический размер [5]. По качеству и детальности такие радиолокационные изображения сравнимы с черно-белой фотографией в видимом спектре на большом удалении (рис. 5).

При проведении теоретических и экспериментальных исследований РСА широкое применение находит метод математического моделирования таких РЛС. Рассмотрим модель РСА, в которой реализуется обработка сигнала методом прямой свертки. Вся модель разбита на отдельные блоки, каждый из которых представлен на рис. 6 в виде прямоугольника. Следует сразу заметить, что реализация каждого блока может осуществляться как в форме части единой программы РСА, так и в форме самостоятельных программ (обычно подпрограмм). При проведении широкого круга исследований второй способ является более удобным, так как позволяет компоновать из подпрограмм модели РСА различной сложности при минимальных перестройках программы.

В качестве исходных данных используем следующие параметры РЛС:

– параметры полета ЛА (скорость $V_п$ и высота $h_о$, протяженность моделируемого участка полета $L_п$);

– протяженность интервала синтезирования;

– количество и координаты целей, находящихся в зоне обзора;

– наклонную дальность γ_0 до центра полосы обзора.

Геометрия РСА, используемая при создании математической модели, изображена на рис. 7.

Рассмотрим конкретную математическую модель, программа которой составлена на языке *C*. Часть параметров вводится с терминала в процессе выполнения программы. Полученный в результате вычислений в соответствии двумерный массив чисел является радиолокационным изображением моделируемой местности. Для визуальной оценки результатов моделирования можно использовать следующее представление РЛИ. Нормированный выходной сигнал $I_0\,(m, q)$ делится на 10 уровней. Значениям сигнала, лежащим между 0 и 0,1, присваивается значение «+», лежащим между 0,1 и 0,2 – значение «1», между 0,2 и 0,3 – значение «2» и т. д. Отсутствие сигнала обозначается знаком «–», максимальное значение сигнала обозначается символом «М». На рис. 8 приведены РЛИ, полученные при работе РСА по одиночной цели для двух углов наблюдения ($\beta_н = \pi/2$ и $\beta_н = \pi/4$).

Далее выполнялась обработка РЛИ в Matlab (рис. 9, 10). В нашем случае три статических точечных цели настроены в местах, указанных ниже. Все цели имеют среднее значение радиолокационного разреза 1 метр в квадрате.

При следующих параметрах было достигнуто разрешение 0,3 метра (рис. 10):

– скорость полета – 45 м/с,

Рис. 5. Пример радиолокационного изображения. Справа снимок местности в видимом спектре

Рис. 6. Структура модели РСА при прямолинейном полете ЛА

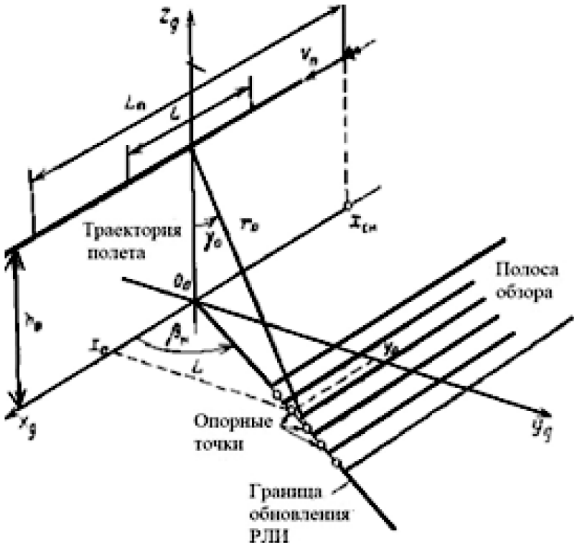


Рис. 7. Геометрия РСА, используемая при создании математической модели

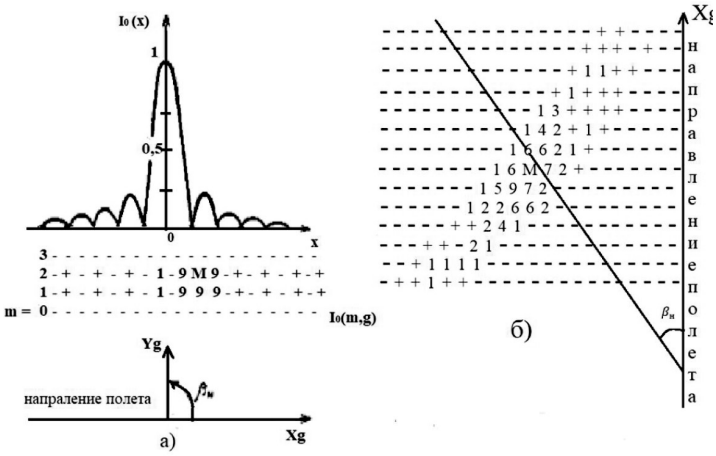


Рис. 8. Условные РЛИ, получаемые в результате моделирования

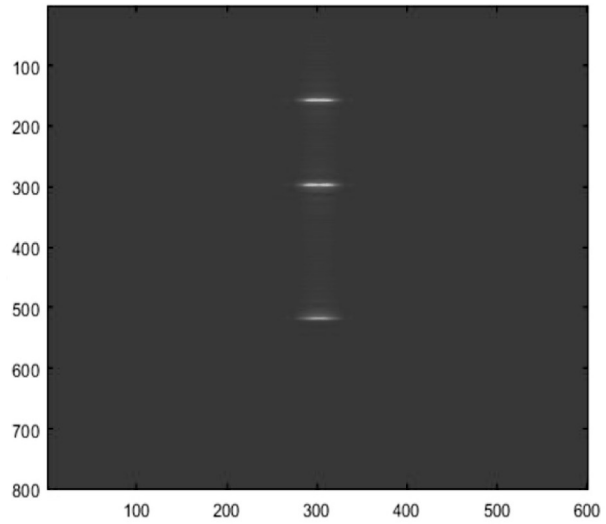


Рис. 9. Вид объектов без обработки (разрешение 1,0 м)

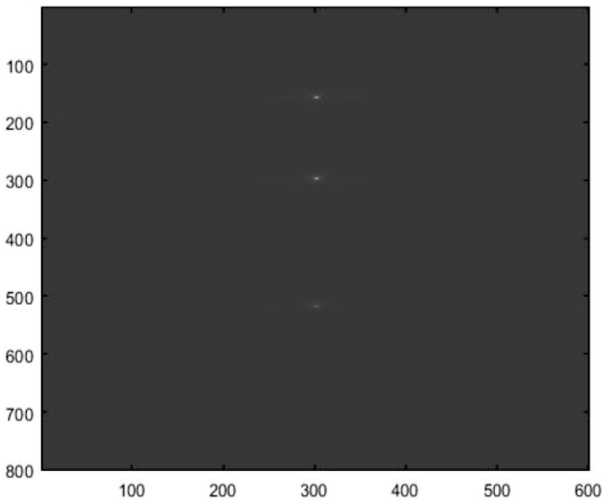


Рис. 10. Вид объектов после обработки (разрешение 0,3 м)

– высота полета – 1500 м;

– время синтезирования – 4 сек;

– количество и координаты целей, находящихся в зоне обзора – 3 цели;

– наклонная дальность до центра полосы обзора – 3000 м;

– мощность импульса – 128 Вт;

– средняя мощность 12–13 Вт;

– скважность – 10–11;

– ширина ДНА 5,7 градусов.

При разрешении 0,3 метра БАС малого класса, оснащенные РСА, смогут выполнять следующие виды работ:

– получение картографической информации;

– обнаружение малоразмерных наземных объектов, в том числе и движущихся;

– мониторинг ледовой обстановки;

– обнаружение скоплений техники, инженерных сооружений, переправ, дорог, плотин, дамб, нефтепроводов;

– оценка состояния аэродромов, железнодорожных узлов, морских портов;

– детальное наблюдение районов ЧС, выдача целеуказания средствам помощи и ликвидации последствий ЧС и оценка результатов последствий.

Был найден необходимый и достаточный гражданский образец масштабируемого беспилотного воздушного судна, по летным характеристикам и функционалу превосходящий мировые аналоги. Выбранный аппарат «Диам 20» (рис. 11) является лучшим в своем классе по мнению специалистов Газпрома и ведущих производителей БЛА.

В результате работы:

1. Определено актуальное направление активно развивающегося вида технологии дистанционного зондирования, как отраслевой составляющей компоненты ситуационных центров, инфокоммуникационных технологий инфосферы. Это летающие роботизированные комплексы, производящие различные виды работ в плотных слоях атмосферы.

2. Проведен функциональный анализ различных серийных и экспериментальных средств дистанционного зондирования. Предпочтение радийным системам для использования в народном хозяйстве, отдано по причине возможности использования в сложных условиях. Например, в арктической зоне. И второе, использование сложных сигналов, различных диапазонов радиоволн, позволяет проводить работы и научные исследования, начиная от геолокации (15 м сухой песок) до растительного покрова.

3. Несмотря на то, что наилучшими БЛА являются БЛА военного назначения, был найден необходимый и достаточный гражданский образец масштабируемого беспилотного воздушного судна. По летным характеристикам и функционалу превосходящий мировые аналоги. Бортовой стартер-генератор, которого полностью способен обеспечить в полете электроэнергией работу радиолокатора.

4. При проработке технической архитектуры беспилотного авиационного комплекса возникла необходимость доработки терминологии в нормативно-техническом документации ГОСТ Р 57258–2016, где отсутствует понятие беспилотный авиационный комплекс (БАК). БАС и РСА обладают всеми признаками сложной системы. При совместном функционировании при сложных взаимозависимых связях, образуют тем самым комплекс.

5. Одним из важнейших составляющих любого радиолокатора является антенное устройство. Применение АФАР для обеспечения лучших характеристик затруднено низким КПД. Было предложено решение отвода тепла с помощью применения материала «Скелетон», по теплопроводности превышающего алюминий в 3 раза. Проведенное исследование по теплопроводным свойствам «Скелетона» открыло

Рис. 11. Внешний вид «Диам 20». Предполетная подготовка

возможность применения АФАР для РСА в составе малых беспилотных авиационных системах.

6. Для получения радиолокационной картины высокого разрешения проводились исследования зависимостей данных автопилота и радиолокатора. На основе математической модели, был разработан алгоритм и программа на языке С.

7. Проведенные исследования дают основания утверждать о возможности размещения радиолокационной станции с синтезированной апертурой на борту беспилотной авиационной системы взлетной массой до 30 кг. И тем самым обеспечить дистанционное зондирование в режиме радиовидения.

8. Моделирование параметров траекторного сигнала, данных позиционирования фазового центра антенны, вычисление опорной функции, периода следования импульса дают основания говорить о разрешающей способности 0,3 м на удалении 3000 м, при высоте полета 1500 м.

9. Разработанная модель РСА позволяет разрабатывать методические рекомендации для построения технической архитектуры систем радиовидения на летающих робототехнических комплексах.

Литература

1. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. В 3 т. Т.1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационныхсигналов / Под ред. А.И. Канащенкова, В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.

2. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.

3. Особенности получения композиционных материалов на основе алмаза, карбида кремния и кремния при низких давлениях / С.К. Гордеев [и др.] // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 37, № 6. – С. 691–696.

4. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

5. Дудник, П. И. Многофункциональные радиолокационные системы / П. И. Дудник. – М.: Дрофа, 2007. – 288 с.

6. Долженков, Н. Н. Пути повышения автономности крупноразмерных беспилотных авиационных систем двойного назначения / Н.Н. Долженков, А.М. Федулин, Д.М. Дрягин // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2020. – № 9. – С. 3–11.

7. Федулин, А. М. Перспективы применениякрупноразмерных БПЛА при решении задач комплексного обследования территорий / А.М. Федулин, Д.М. Дрягин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 271–281.