

УДК 005; 621.396.9

Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия

Кузнецов В. А., Гончаров С. А.

Актуальность. Одним из перспективных направлений развития беспилотной авиации является разработка беспилотных летательных аппаратов (БЛА) ближнего действия, используемые на больших и средних высотах при большой продолжительности полета. Размещаемые на таких БЛА сенсоры в сложных условиях съемки малоэффективны, что ведет к невозможности обеспечения непрерывности мониторинга. Для исключения зависимости от времени суток и погодных условий необходимо использовать радиолокационный модуль полезной нагрузки БЛА. Однако, в связи с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению оборудования для БЛА, размещение существующих на сегодняшний день образцов радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) невозможно, что обуславливает актуальность данной работы. Поскольку разработка РСА носит междисциплинарный характер, единственно возможным способом решения задач такого класса является системный анализ. **Постановка задачи:** при проектировании универсального радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия необходимо разработать такую схему построения РСА, которая обеспечит возможность ее технической реализации с минимальными массогабаритными характеристиками, при этом должна достигаться максимальная разрешающая способность. **Целью работы** является создание малогабаритного радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия с эффективной вторичной обработкой траекторного сигнала в условиях высокой априорной неопределенности. **Используемые методы:** решение задачи разработки малогабаритной РСА основано на структурном синтезе схемы ее построения по мини-максному критерию «массогабаритные характеристики – разрешающая способность», при этом высокое разрешение радиолокационного изображения (РЛИ) достигается, в том числе, применением полученных в результате параметрического синтеза квазиоптимальных по критериям минимальной ошибки оценки фазы и минимальной энтропии изображения алгоритмов формирования и автофокусировки РЛИ. **Новизна:** элементами новизны в работе является оптимальная структура РСА, которая дополнительно включает в себя фильтр компенсации дальностей, контроллер управления и бортовую микро ЭВМ, позволяющие повысить отношение сигнал/шум отраженного от целей на больших дальностях сигнала, повысить стабильность модуляции частоты зондирующего сигнала при нерегулярных искажениях модуляционной характеристики формирователя ЛЧМ сигнала вследствие изменения диапазона рабочих температуры и напряжения, а также формировать РЛИ высокого разрешения непосредственно на борту БЛА и удаленно управлять режимами работы РСА. **Результат.** Использование синтезированных на основе системного подхода и представленных структуры малогабаритной РСА и квазиоптимальных алгоритмов формирования и автофокусировки РЛИ позволяет реализовать универсальный радиолокационный модуль на БЛА ближнего действия с массой полезной нагрузки до 5 кг с обработкой траекторного сигнала непосредственно на борту, что существенно сокращает стоимость аппаратуры потребителей. Предлагаемая структурная схема РСА реализована в виде цифровой и радиочастотной плат. Радиочастотная часть осуществляет передачу зондирующего сигнала в полосе рабочих частот 5100–6000 МГц, прием и первичную обработку траекторного сигнала. Цифровая часть предназначена для формирования питающих

Библиографическая ссылка на статью:

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. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf>

Reference for citation:

Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Structural-parametric synthesis of short-range unmanned aerial vehicle small-sized SAR. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 28-72. Available at: <http://scs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf> (in Russian).

напряжений и управления элементами структурной схемы. В бортовой микро ЭВМ осуществляется вторичная обработка принятого сигнала, в том числе формирование и автофокусировка РЛИ решением до 0,19 м. **Практическая значимость.** Комплекс представленных решений предлагается реализовать в виде универсального радиолокационного модуля БЛА ближнего действия, позволяющего обеспечить реальную непрерывность мониторинга и, в конечном счете, занять преимущественные позиции на мировом рынке дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сегменте радиолокационных данных, полученных с помощью БЛА типа HALE/MALE.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, системный анализ, радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны, линейно частотно-модулированный сигнал, радиолокационное изображение, автофокусировка, беспилотный летательный аппарат.

Введение

В течение последнего десятилетия разработка и производство беспилотных летательных аппаратов (БЛА) являются наиболее динамичным сегментом мировой авиационной отрасли и стабильно обеспечивают совокупный среднегодовой темп роста не менее 10%. Даже в периоды общего спада отрасли сегмент БЛА демонстрирует положительную динамику. В настоящее время основные объемы этого рынка обеспечиваются потребителями из силового сектора, решающими задачи военных и специальных применений, охраны границ и общественного порядка. Однако рынок гражданских и коммерческих применений имеет наибольший потенциал роста и, как ожидается, уже к 2020 году обгонит по объему рынок обеспечения безопасности.

В существующих условиях Россия занимает менее 1% мирового рынка в сегменте «Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и мониторинг» и, без заметной государственной поддержки, может не сохранить свои позиции к 2035 году [1]. Для дальнейшего усиления позиций России, в условиях быстрых технологических изменений и высокой конкуренции на международных рынках, требуется реализация мер по развитию БЛА, новых типов полезной нагрузки, комплексных решений и услуг на их основе.

По сравнению с пилотируемыми воздушными судами, БЛА обладают следующими преимуществами:

- БЛА можно применять на сверхмалых высотах, что позволяет получить недостижимую для пилотируемых аппаратов геодезическую точность (до 2–3 см против 15–20 см);
- в силу значительно меньшего веса самого БЛА для съемки требуется намного меньше энергии и, соответственно, затрат;
- БЛА можно доставить к месту выполнения работ дешевыми наземными видами транспорта или регулярным авиарейсом, пилотируемый аппарат доставить к месту работ намного дороже;
- БЛА эффективнее при съемке линейных объектов (тяжелому пилотируемому летательному аппарату трудно выдерживать строгую линейность этого объекта) и при съемке небольших объектов;
- БЛА может обеспечить значительно большую точность прохождения заданного маршрута вследствие меньшей массы и автоматического управления;

- беспилотным аппаратом может владеть непосредственно потребитель данных, нет необходимости заказывать съемку и дожидаться выполнения работ;
- БЛА может летать на сверхмалых высотах практически в любую погоду, над облаками.

Исходя из решаемых с помощью БЛА задач, одним из возможных путей расширения этого сегмента рынка является создание радиолокационных сенсоров для комплексов с БЛА ближнего действия с максимальной массой полезной нагрузки до 5 кг, позволяющих получать принципиально новые характеристики земной (водной) поверхности и объектов, а также программно-алгоритмического обеспечения тематической обработки (дешифрирования) радиолокационных изображений (РЛИ). К таким сенсорам можно отнести многодиапазонные, поляриметрические радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) с возможностью интерференционной обработки сигналов и ММО (Multiple In Multiple Out) радиолокаторы.

Основными научно-техническими проблемами, связанными с внедрением перспективных РСА на БЛА ближнего действия, являются снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления радиолокатора, обеспечение коррекции нестабильной траектории полета БЛА. Решение задачи такого класса сводится к синтезу оптимальной (рациональной) структуры малогабаритной РСА без промежуточных преобразований частоты с использованием линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Реализация подобных схем возможна на основе многослойных печатных плат, высокоинтегрированной компоновки радиоэлектронных элементов, применения микрополосковых (печатных) антенн и быстродействующих процессоров для синтеза и автофокусировки РЛИ непосредственно на борту БЛА. Это позволит значительно снизить массу и габариты РСА, существенно уменьшить энергопотребление (повысить энергоэффективность) радиолокатора и создать унифицированный радиоэлектронный модуль полезной нагрузки для БЛА ближнего действия.

Цель статьи – создание малогабаритного радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия с эффективной вторичной обработкой траекторного сигнала в условиях высокой априорной неопределенности.

Анализ рынка данных дистанционного зондирования Земли

Для достижения поставленной цели, согласно известных методик классического системного подхода к синтезу сложных технических систем [2], помимо определения конечного результата, необходимо рассмотреть роль, место и перспективы как радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, так и малогабаритных РСА для БЛА. В [3] подробно рассмотрены результаты анализа рынков ДЗЗ и БЛА. В рамках данной статьи следует обратить внимание на основные выводы, касающиеся БЛА ближнего действия и радиолокационных данных ДЗЗ, полученных с их помощью.

Оценка мирового рынка ДЗЗ неоднозначна, поскольку индустрия ДЗЗ в большинстве случаев завязана на государственное финансирование в рамках гражданских программ и финансирование из оборонных бюджетов, которые

обычно закрыты для публикации уже на уровне планов и проектов. Тем более это относится и к России – нормативные положения, устанавливающие правила распространения пространственных данных, формируются госструктурами и определяют темпы и объем этого рынка. Сервисы ДЗЗ следует классифицировать по типам используемых для получения информации носителей – космические, авиационные, наземные и другие (рис. 1), при этом космическая технология ДЗЗ является наиболее востребованной – сегодня и в ближайшей перспективе объемы сервисов ДЗЗ из космоса на рынке геопространственной информации устойчиво оценивались в 43%.

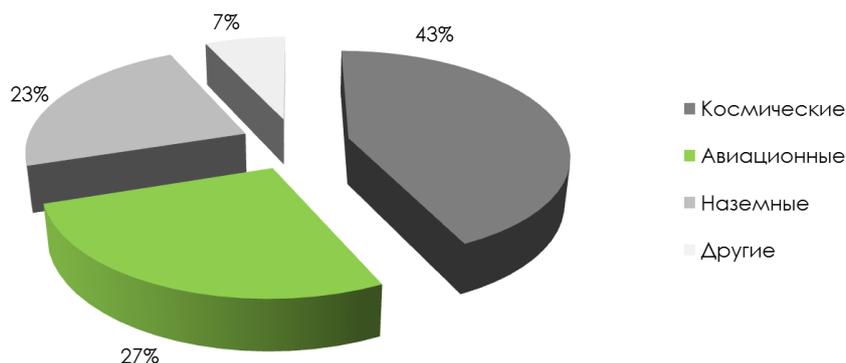


Рис. 1. Распределение рынка сервисов ДЗЗ между конкурирующими технологиями в 2011–2016 гг.

К сожалению, в России индустрия ДЗЗ развивается без учета общемировых тенденций, а решения о проектируемых системах ДЗЗ принимаются без внешней независимой экспертизы. Положительные сдвиги в приближении российской нормативно-правой базы в области ДЗЗ начали просматриваться в конце 2014 году, но действительно ли они приведут к расширению российского рынка ДЗЗ и тем более российской составляющей на мировом рынке ДЗЗ, пока уверенности нет, в том числе и по причине неоднозначности ряда нормативных положений [4].

Появление на рынке ДЗЗ снимков высокого разрешения (менее 1 м для черно-белых и 2,5 м для многоспектральных) с коммерческих спутников открыло новые горизонты использования данных ДЗЗ и способствовало разработке новых методов подготовки продуктов по требованиям заказчика. В ответ на этот вызов в области аэросъемки были разработаны новые технологии получения пространственных данных в цифровом виде. По ранним оценкам некоторых аналитиков рынка [5] предполагалось, что космические снимки серьезно потеснят авиационные. По современным данным, оба эти рыночных сегмента продолжают свой рост и успешно дополняют друг друга (рис. 2).

В ряде случаев поставщики данных космической и авиационной съемки создали стратегические коалиции для расширения бизнеса каждого из них. В рамках данной работы выявлены вполне достаточные потенциальные возможности для роста рынка данных ДЗЗ в различных его сегментах. Несмотря на то, что в настоящее время приложения в области цифровой картографии, систем

электронной администрации, а также для целей национальной обороны и защиты пространственных данных являются доминирующими на рынке ДЗЗ, все больше ощущаются потребности в разработке геоинформационных систем для органов местного самоуправления, полиции, служб чрезвычайных ситуаций, экологического контроля и т. п.



Рис. 2. Динамика роста продаж материалов авиационной и космической съемки

В сегменте авиационных систем ДЗЗ переход к технологиям, использующим данные, полученные с помощью обладающих возможностями непосредственной географической привязки и получения альтиметрической информации сенсоров, открыла новые рынки для составления крупномасштабных планов городов и анализа инфраструктур. Особенно бурное развитие в разработке таких сенсоров и технологий их использования происходит последние 20 лет [6]. Цифровые аэросъемочные камеры в сочетании с бортовыми инерциальными и GPS системами представляют собой достаточно экономичное решение для сбора географически привязанной информации, использование которой способно открыть новые рынки, особенно в случаях, когда стоимость данных ДЗЗ является решающим фактором (рис. 3).

В настоящее время пользователи данных ДЗЗ рассматривают возможность перехода от использования цифровых цветных и монохромных снимков к применению мультиспектральных, гиперспектральных и многочастотных радиолокационных данных, поэтому ожидается повышение спроса на них, особенно с учетом того, что сенсорные технологии развиваются очень динамично и обеспечивают все более низкую стоимость работ при более обширном покрытии и повышении точности. Из всего состава радиолокационных средств ДЗЗ к системам авиационного базирования относят лишь 23%, из них размещаемых на БЛА лишь 7%, так как основными носителями РСА являются космические аппараты, затем самолеты и вертолеты. Среди радиолокационных средств ДЗЗ выделяют одночастотные РСА (10% – в основном, на авиационных носителях), многодиапазонные РСА (50% – в большей степени это космические системы), поляриметрические РСА (5%), инверсные РСА (5%) и многопозиционные РСА (30%). При этом следует учитывать, что современные космические РСА являются многомерными – то есть объединяющими все типы приведенных радиолока-

торов, из чего можно сделать вывод о перспективности развития многодиапазонных и поляриметрических РСА с интерференционной обработкой траекторных сигналов (рис. 4).

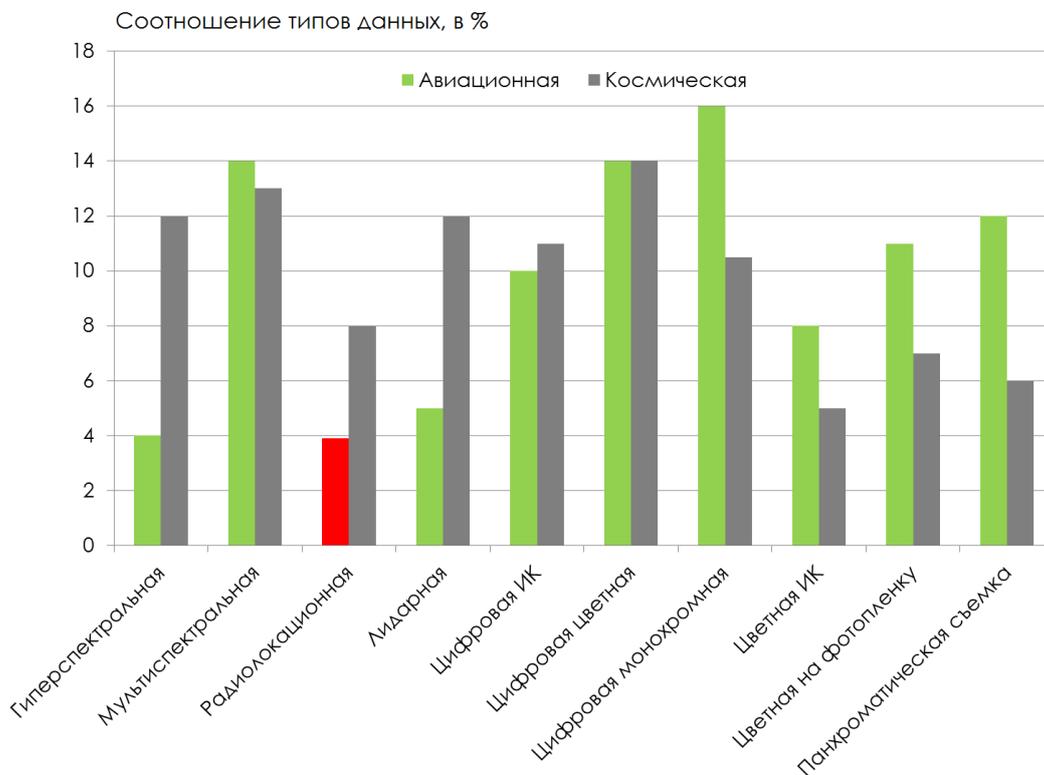


Рис. 3. Оценка спроса на различные типы данных авиационной и космической съемки

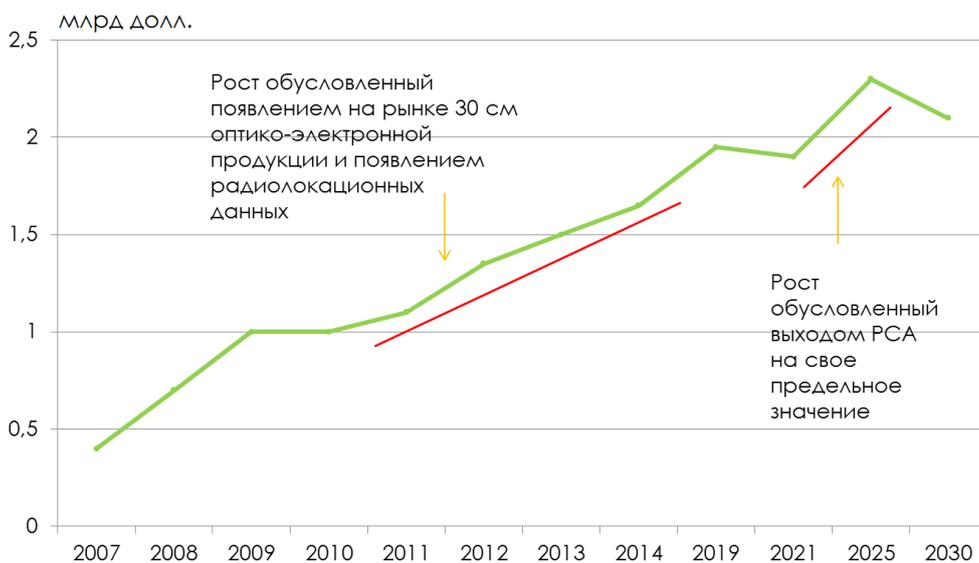


Рис. 4. Прогноз объема выручки на мировом рынке ДЗЗ

В ближайшем будущем многодиапазонные РСА позволят выполнять автоматизированное или, в частных случаях, автоматическое обнаружение объектов, их идентификацию и классификацию [7, 8]. Благодаря этому такие секторы рынка, как национальная оборона, экология, сельское и лесное хозяйство смо-

гут воспользоваться преимуществами современных методов мониторинга [9]. Дальнейшее расширение возможностей и повышение разрешающей способности РСА обеспечит хороший рыночный потенциал, обусловленный реальной на сегодняшний день востребованностью данных сверхвысокого разрешения, чаще всего используемых для создания высокоточных цифровых карт (на рис. 5 красным цветом показана высокая востребованность данных с разрешением менее 0,9 м).

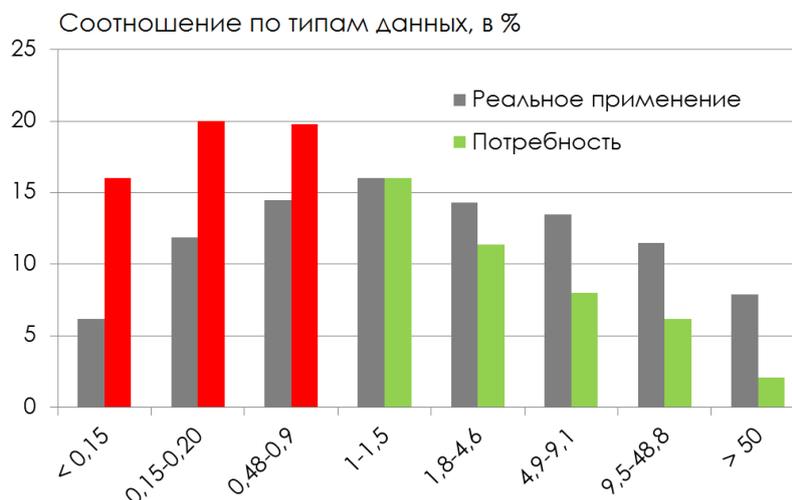


Рис. 5. Оценка реального применения и потребности данных ДЗЗ по критерию необходимой точности (в метрах)

Следует отметить, что не все потребители успевают за бурным ростом компьютерных технологий, особенно в области работы с пространственными данными высокого разрешения и точности. Использование такой информации часто требует достаточно крупных инвестиций в модернизацию оборудования. Кроме того, проблемы высокой стоимости данных ДЗЗ, задержки в их поставке, а также лицензирования и ограничений их продаж весьма часто отпугивают потенциальных потребителей.

Устойчивое развитие отрасли может происходить только при условии постоянного совершенствования технологий и благоприятной государственной политики в отношении сбора и использования данных ДЗЗ, а также исследований и разработок в этой области.

Можно сделать вывод, что современный рынок данных ДЗЗ пока не отвечает запросам научных организаций и государственных заказчиков данных с точки зрения необходимой им точности. В целом индустрия данных ДЗЗ имеет хорошую рыночную динамику, хотя ее дальнейшее успешное развитие будет зависеть от того, насколько законодательство будет тому способствовать. По результатам маркетингового анализа выявлена тесная деловая связь между частными фирмами, государственными предприятиями и научными учреждениями в этом весьма фрагментированном секторе рынка. Новые технологии, новые типы данных ДЗЗ и многомерных сенсоров для аэрокосмической съемки будут, безусловно, способствовать этому росту.

Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов

Наряду с традиционными методами космической и авиационной съемки все более востребованной становится съемка с помощью БЛА (рис. 6).

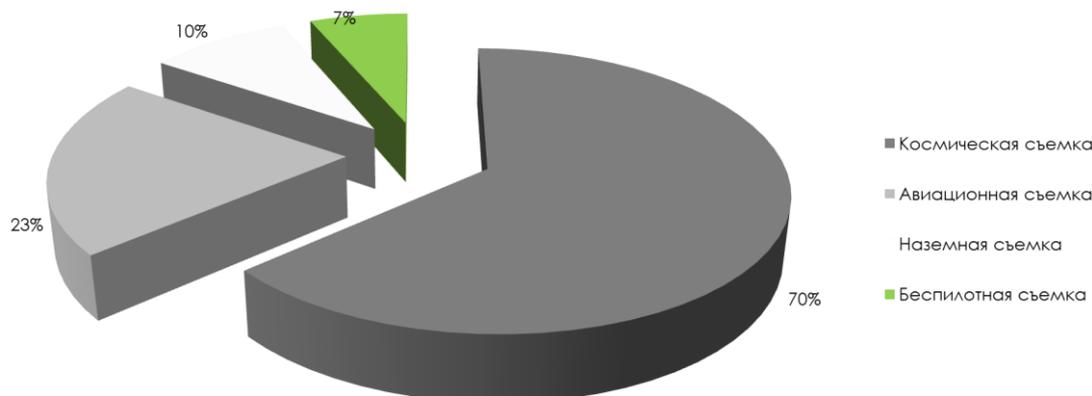


Рис. 6. Соотношение средств получения пространственных данных

Рост потребности применения БЛА особенно проявился в последние годы – на фоне экспоненциального тренда популярности (рис. 7 и 8) БЛА самолетного и вертолетного типов в коммерческой деятельности. У этой тенденции есть положительная и отрицательная стороны. Положительная заключается в том, что общество глубже задумалось о роли БЛА в получении пространственных данных, и это дало ощутимый толчок развитию отрасли в целом. Лидером в этой области являются США, а Россия занимает, по различным данным, 0,6%...3% мирового рынка БЛА (рис. 9).

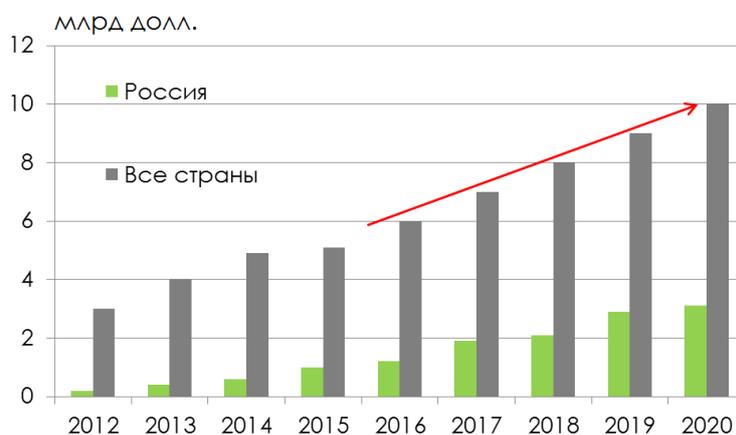


Рис. 7. Объемы и прогноз мирового и российского рынков БЛА

Отрицательная сторона выражается, опять же, в несовершенстве текущего законодательства в отношении БЛА во многих странах и острой необходимости контроля полетной деятельности в связи с общим увеличением численности действующих устройств и опасностью столкновений в зоне действия гражданской авиации. В этом направлении уже ведутся работы по созданию систем автоматического наблюдения за БЛА. В настоящее время наиболее распространены легкие БЛА среднего (MALE) и ближнего действия (тактические) (рис. 10).

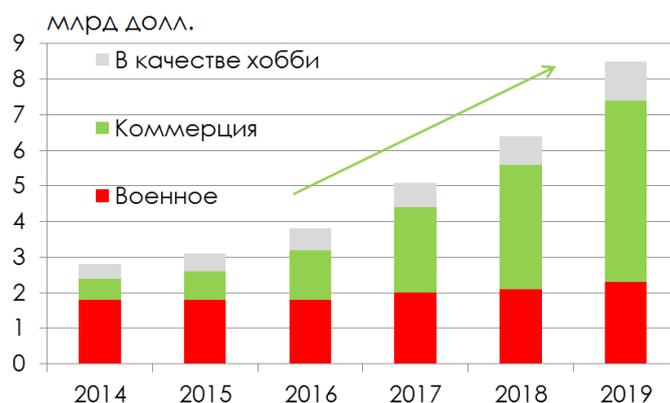


Рис. 8 Общий доход мирового рынка БЛА в 2014–2019 гг.

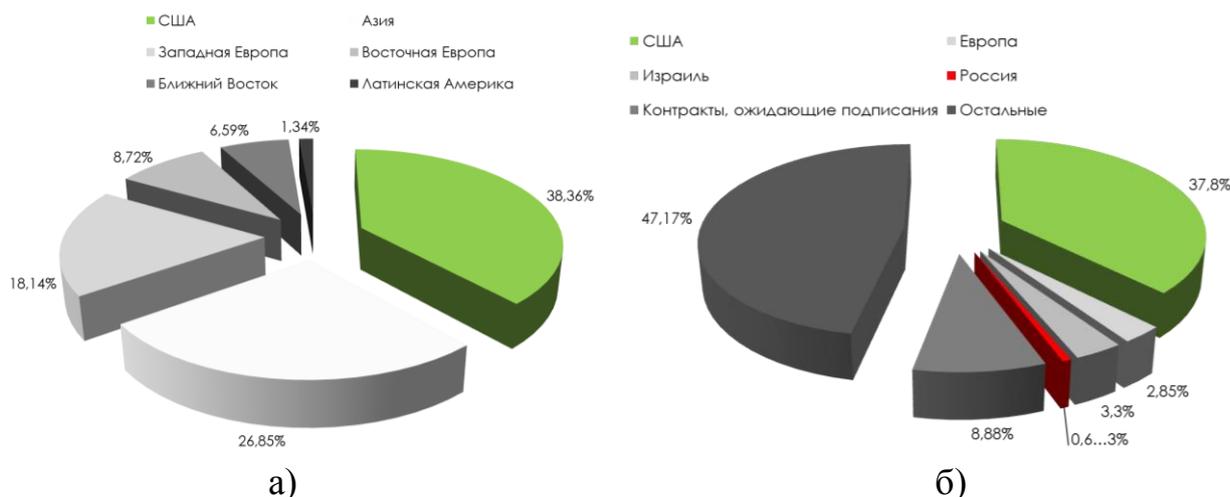


Рис. 9. Прогноз на 2018 год вложения средств в развитие БЛА (а) и доли региональных рынков БЛА (б)



Рис. 10. Прогноз развития рынка БЛА на 2016–2018 годы по производству БЛА по типам

В России в области создания комплексов БЛА работает полтора десятка крупных и небольших фирм. Все разработчики идут в направлении создания номенклатуры многофункциональных комплексов, способных выполнять разнообразные задачи. В итоге потенциальным заказчикам предлагается множество однотипных образцов БЛА, решающих схожие задачи [10].

Таким образом, результаты анализа рынка БЛА в интересах ДЗЗ показали перспективность развития комплексов с БЛА ближнего действия как наиболее целесообразных по экономическим соображениям сегментов всего рынка БЛА.

Результаты исследования рынка БЛА в России выявили наличие успешно используемых в широком спектре задач образцов БЛА с требуемыми характеристиками.

Если соотношение использования в России радиолокационной съемки ДЗЗ с помощью космических и авиационных носителей в целом повторяет мировые тенденции, то рынок применения РСА на БЛА по сравнению с мировым уровнем максимально востребован. Кроме того, рынка многомерных радиолокационных данных в космическом и авиационном сегменте вообще пока не существует. Этим обусловлена полная свобода действий разработчиков и высокая перспективность рынка радиолокационных данных ДЗЗ, полученных с помощью БЛА.

Анализ схемотехнических решений и характеристик существующих РСА

На сегодняшний день существует и успешно функционирует в качестве целевой нагрузки БЛА ближнего действия весьма небольшое число образцов малогабаритных РСА (таблица 1) [11]. Отличительными их особенностями являются упрощенная структура, низкие массогабаритные показатели и энергопотребление, малая мощность излучения и работа со сверхширокополосными ЛЧМ сигналами в режиме непрерывного излучения.

При рассмотрении существующих образцов РСА, устанавливаемых на авиационные носители или разрабатываемых для них в качестве целевой нагрузки, основными критериями отбора являются вышеуказанные особенности. На данный момент известно около сорока действующих малогабаритных РСА, устанавливаемых на БЛА, однако определение их малогабаритности весьма относительное. Так, некоторые разработчики заявляют о создании малогабаритной РСА весом в 10–60 кг, хотя, например, для БЛА ближнего действия этот вес неприемлем. Вследствие того, что общепринятая масса полезной нагрузки таких БЛА варьируется в пределах 1–5 кг, основным критерием при выборе РСА БЛА ближнего действия являются массогабаритные ограничения [12].

Одним из самых успешных проектов по созданию малогабаритной РСА является NanoSAR (ImSAR, США) [13], представленная на рис. 11, а. Радиолокатор работает на частотах UHF, UWB, X, Ku диапазонов, обеспечивает обнаружение, целеуказание и распознавание объектов днем и ночью, в дождь, снег, туман, в условиях запыленности и задымленности района разведки. Боковой обзор в обе стороны производится в маршрутном (StripMap), прожекторном или телескопическом (SpotLight), широкозахватном (Circular или ScanSAR) и селекции движущихся целей (MTI) режимах. Антенная система состоит из четырех микрополосковых антенных решеток, две из которых передающие, а две – приемные. Кроме того, радиолокатор сопряжен с наземной аппаратурой обработки данных, позволяющей в реальном масштабе времени (Lisa Image) получать РЛИ и видео с возможностью приближения и панорамной съемки одновременно в нескольких частотных диапазонах (рис. 11, б), обнаруживать изменения положения объектов (Lisa Change), а также планировать, контролиро-

вать и управлять полетом с помощью курсора (Lisa 3D и Lisa Dashboard). Передача данных осуществляется аппаратурой Viper по помехозащищенным каналам стандартов RS232, Serial TTL и Ethernet.

Таблица 1 – Существующие РСА и их производители

Название	Разработчик	Масса (кг)	Диапазон (ГГц)	Разрешение, (м)
1	2	3	4	5
AIRSAR	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, США	47	0,439 (P) 1,26 (L) 5,3 (C)	1
ARTINO	Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften, Германия	52	Ka	0,2
ASAR	NASA/ Jet Propulsion Laboratory, США	31	C,L,P	2,5
CARABAS-II	Swedish Defence Research Agency (FOI), Швеция	8/200	0,021-0,085 (VHF)	2,5
CP-SAR	Microwave Remote Sensing Laboratory, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, США	< 25	1,27 (L)	1
DMSAR	ISRO	18	C	1
DO-SAR	EADS	22	S,C,X,Ka	< 0,5
E-SAR	DLR	43	P,L,C,X	2
EMISAR	DCRS	14	C,L	2
F-SAR	DLR	59	P,L,S,C,X	0,3
GeoSAR	EarthData	53	P,X	1
IMARC	НПО ВЕГА-М, Россия	98	VHF,P,L,X	1,5
Ingara	DSTO	77	X	0,3
KOMSAR	Agency for Defense Development	37	X	1,5
Компакт	НИИ ТП, Россия	5-13	X,L,P,VHF (8.6,1.3,0.43,0.14)	0,5
LORA	FOI	8	0.2-0.8 (VHF,UHF)	< 1
Lynx	Sandia National Laboratories, США	50	15,2-18,2	0,3
Lynx II	Sandia National Laboratories, США	38	15,2-18,2	0,1
MicroSAR (μSAR)	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	2 (2,67)	1,75 (L) 5,56 (C)	< 1 1,8
MiniSAR	Sandia National Laboratories, США	11	16,8	0,1
MiSAR	EADS, Multimedia University, Малайзия	< 4	C	0,5x0,4
MMW SAR	Italy, Salenia Corporation, Италия	60	35	5
NanoSAR B	ImSAR, США	1,6	Ku, X, UHF	< 0,3
NanoSAR C	ImSAR, США	0,9	Ku, X, UWB, UHF	< 0,3
NuSAR	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	8,6	1,75 9,75	0,3
OrbiSAR	OrbiSAT	48	P,X	0,5
PAMIR	FGAN	65	X	0,1
Pi-SAR	JAXA	21	X, L	1,5
RAMSES	ONERA	66	0.4-0.47(P), 1.2-1.4(L), S,C, 9.31-9.61(X), Ka,Ku,W	0,13
SlimSAR	Brigham Young University, США	3,6	UHF, C, L, X	< 1
Star-3,4,5,6	Intermap Technologies	37	X	0,75
TopoSAR	Intermap Technologies	14	X, P	1,5
Twin-Otter SAR	Sandia National Laboratories	16	VHF,UHF,X,Ku,Ka	0,3
YINSAR	Brigham Young University, США	1,1	X	1
UAVSAR	Multimedia University, Agency Remote Sensing of Malaysia, Малайзия	< 20	5,3	5

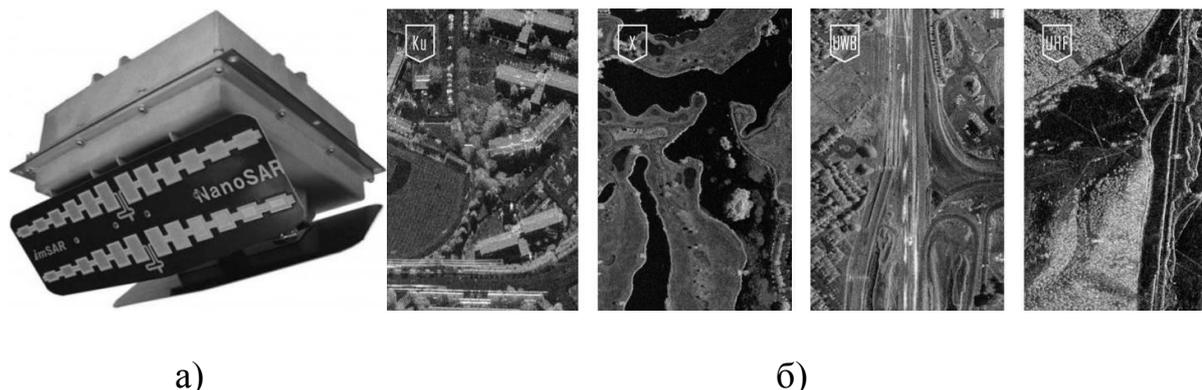


Рис. 11. Внешний вид PCA NanoSAR (а) и РЛИ, полученные в Ku, X, UWB и UHF диапазонах частот (б)

Разрешающая способность по дальности зависит от режимов работы и достигает значений менее 0,3 м на дальностях 1–16 км. Общий вес радиолокатора составляет всего 0,9 кг, при этом выходная мощность передатчика достигает 15 Вт с питанием 12–28 В и потребляемой мощностью 25–70 Вт. К сожалению, архитектура NanoSAR и применяемые сигналы разработчиком не раскрываются, однако анализ зарубежных публикаций, косвенно касающихся рассматриваемого образца, позволяет говорить об используемом непрерывном линейном частотно-модулированном и сверхширополосном (СШП) сигналах со схемой построения без использования промежуточных частот.

Еще одним успешным проектом считается многодиапазонная поляриметрическая PCA SlimSAR (ARTEMIS, США) [14], работающая в диапазонах: UHF, С, L и X, с шириной спектра 660 МГц и весом 3,6 кг (рис. 12).

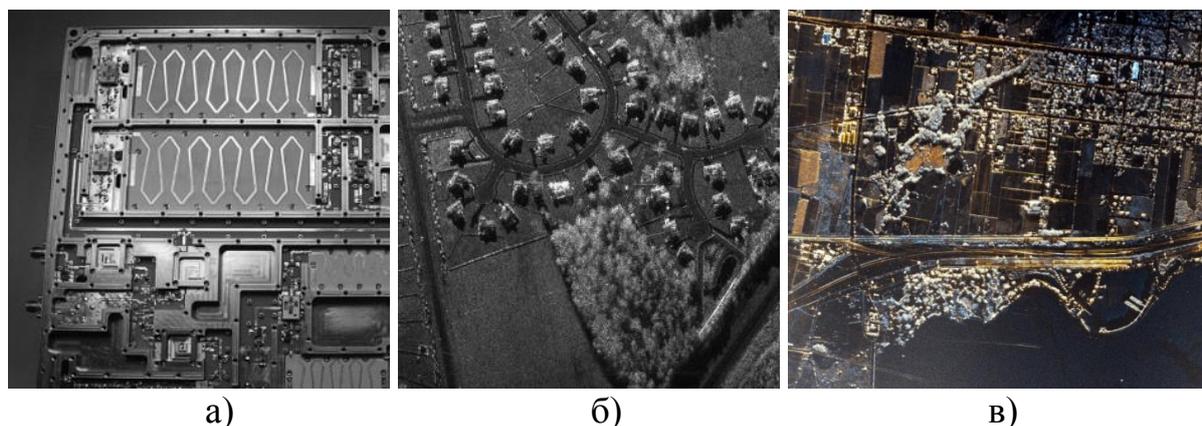


Рис. 12. Внешний вид PCA SlimSAR (а), РЛИ, полученное в X диапазоне (б) и поляриметрическое РЛИ (в)

Мощность передатчика 4 Вт, разрешающая способность в С диапазоне 0,88 м, в L – 1,76 м. Заявляемая дальность обнаружения 1,5–2,5 км. PCA обеспечивает широкополосный обзор, воспроизведение видеопотока, полную поляризацию, интерферометрические 3D-изображения с точной геопривязкой (цифровые карты местности), индикацию движущихся объектов с вычислением параметров движения и интеграцию в геоинформационные системы.

Самая известная студенческая разработка – μ SAR (microSAR) (Brigham Young University, США) [15]. Радиолокатор, представленный на рис. 13, а, предназначен для систем БЛА типа «пустил-забыл» на высотах 100–900 м и скоростях 20–50 м/с. Разрешение по дальности при полосе рабочих частот 80 МГц составляет 1,875 м, при 160 МГц – 0,94 м, разрешение по азимуту 0,15 м (рис. 13, б).

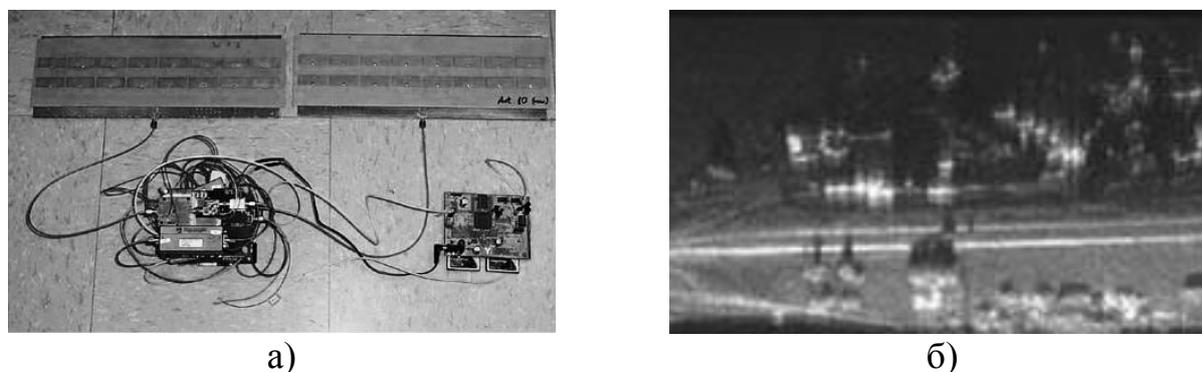


Рис. 13. Внешний вид PCA microSAR (а) и РЛИ С-диапазона (б)

Радиолокатор весит всего около 0,84 кг (по другим данным, менее 2 кг), при этом выходная мощность достигает 1 Вт при потребляемой мощности 16 Вт. Первая microSAR работала в С-диапазоне (5,56 ГГц), последующие образцы работают в С- (5,4 ГГц) и L- (1,75 ГГц) диапазонах. Особенностью архитектуры microSAR является применение высокостабильного задающего генератора 100 МГц STALO (stable local oscillator) и цифрового генератора, управляемого напряжением. Питание схемы обеспечивается бортовой сетью БЛА +12/18 В. В качестве передатчика выступают полосовой фильтр и усилитель мощности 3 Вт, в состав приемника входят малошумящий усилитель и также полосовой фильтр. Первичная обработка сигнала производится без перехода на промежуточные частоты. Антенная система включает в себя две фазированные микрополосковые антенные решетки размером 0,1×0,3 м (2×8 элементов).

Студенты денверского университета (University of Denver, США) [16] также занимаются разработкой малогабаритной PCA. Преимущественной особенностью радиолокатора является рекордно низкий вес – всего 0,23 кг. Планируется и отработывается технология установки и применения PCA на БЛА вертолетного типа (рис. 14). Рабочая частота составляет 5,6 ГГц, полоса частот – 180 МГц. Питание устройства осуществляется от бортовой сети БЛА и составляет 5 и 8 В, потребляемая мощность 4,5 Вт. Запись непрерывного ЛЧМ-сигнала осуществляется платой обработки через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) последовательно каждый час на два флеш-накопителя. Кроме того, возможны обработка и передача сигналов в реальном масштабе времени. Наземная обработка сигналов включает в себя компенсацию траекторных искажений на основе записанных в полете навигационных параметров. Съемка земной поверхности осуществляется на БЛА ближнего действия Dakota в маршрутном (Stripmode) режиме.

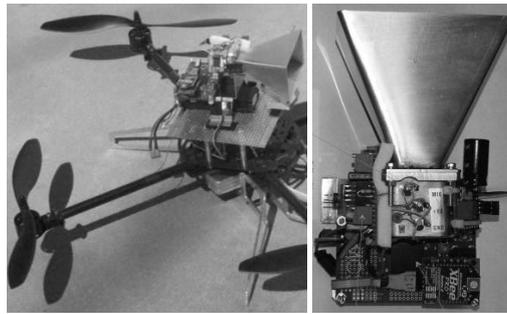


Рис. 14. Внешний вид PCA денверского университета

Структурно PCA состоит из одной рупорной приемо-передающей антенны, высокочастотного блока, АЦП, синхронизатора и линии беспроводной передачи данных. Помимо режима синтезирования апертуры, радиолокатор способен обнаруживать низколетящие маневренные объекты, и может быть установлен на воздушных судах в качестве дополнительного датчика. В настоящее время обработка отраженного радиолокационного сигнала осуществляется после приземления БЛА.

Одной из перспективных многофункциональных малогабаритных PCA является ARBRES (Universitat Politecnica de Catalunya, Испания) [17]. Применяется для проведения интерференционной и поляриметрической съемки подстилающей поверхности в диапазонах С (5,3 ГГц) и Х (9,65 ГГц) (рис. 15, б, в). При этом достигается разрешающая способность 3 и 1,5 м на максимальных дальностях 7,5 и 3,75 км соответственно. Вес радиолокатора без антенн составляет 2,3 кг. В настоящее время реализован промышленный образец в микроэлектронном интегрированном исполнении (рис. 15, а). Структурно ARBRES состоит из блока генератора, передатчика, приемника и блока цифровой обработки. Особенностью схемы является наличие четырех антенн, при этом одна из них (передающая) устанавливается опционально с применением переключателя.

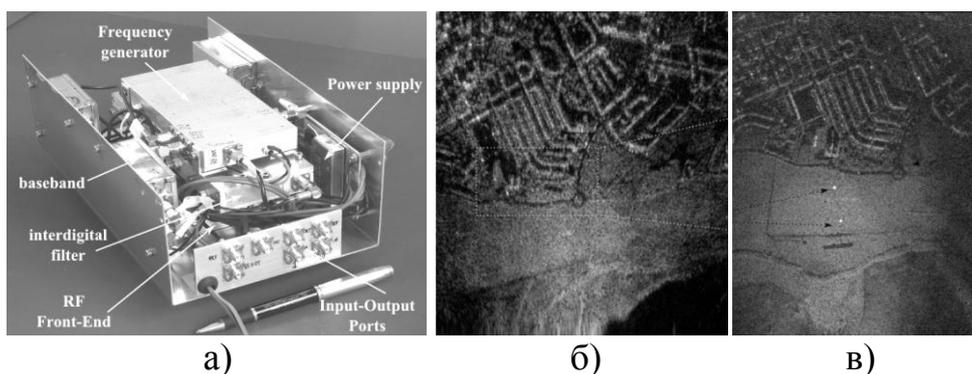


Рис. 15. PCA ARBRES: внешний вид (а), оптическое изображение (б) и РЛИ X-диапазона (в)

Непрерывный ступенчатый ЛЧМ сигнал (SLFM-CW – stepped linear frequency modulated continuous wave) генерируется цифровым синтезатором частот DDS (direct digital synthesizer). В качестве АЦП используется двухканальный, 14-битный преобразователь PCI формата, со скоростью 65 Мб/с в каждом канале и оперативной памятью 512 Мб.

Испанские разработчики политехнического университета Мадрида представили экспериментальную РСА LFM-CW (Universidad Politécnica de Madrid, Испания) (рис. 16) [18]. Радиолокатор работает в Ка-диапазоне (34 ГГц) с полосой частот 2 ГГц в непрерывном режиме с использованием ЛЧМ-сигнала и функционально состоит из двух антенн, цифрового синтезатора частот (DDS), генератора ЛЧМ сигналов с детектором фазы, передатчика, приемника, модулей частотной и цифровой обработки и компьютера. Заявляемая разрешающая способность составляет 0,15–0,3 м, мощность передатчика около 1 Вт, при этом вес устройства без антенн около 2,5 кг. Анализ архитектуры испанского радара LFM-CW показал классическое для таких систем построение с применением цифровых устройств синтеза, преобразования частот и усиления.

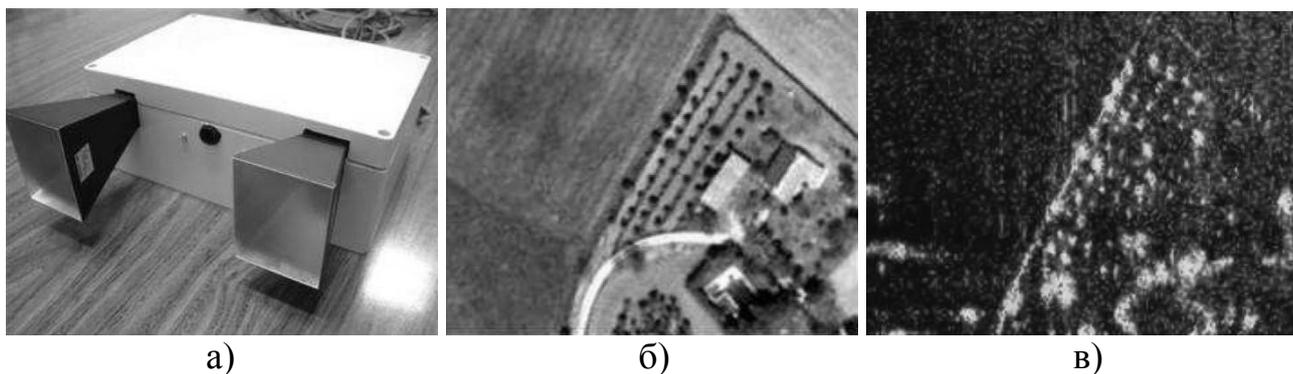


Рис. 16. Внешний вид (а), оптическое изображение (б), РЛИ Ка-диапазона (в) и функциональная схема LFM-CW (г)

Нидерландские ученые и разработчики в 2005 году также представили малогабаритную РСА [19] весом менее 1 кг, работающую в Ка-диапазоне (35 ГГц) (TNO Physics and Electronics laboratory, International Research Centre on Telecommunications-transmission and Radar Delft University of Technology, Netherlands) (рис. 17, а). Применяется для различных задач, требующих обзора земной поверхности на высотах до 800 м. Разрешающая способность РСА достигает 1 м (рис. 17, в). Для оцифровки первичных радиолокационных данных используется 12-битный АЦП с тактовой частотой 5 МГц, для оцифровки траекторных данных – 16-битный АЦП с частотой 100 кГц, для управления частотой ЛЧМ применяется 12-битный ЦАП с частотой 40 МГц.

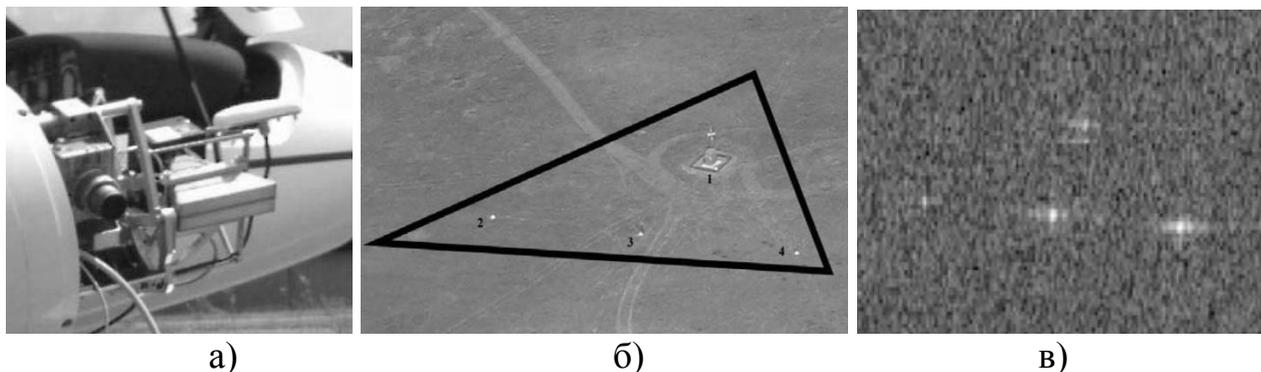


Рис. 17. Внешний вид P-SAR (а), оптическое изображение (б) и РЛИ Ка-диапазона (в)

Вторым этапом развития РСА стал малогабаритный поляриметрический радар с непрерывным излучением и ЛЧМ сигналом P-SAR, работающий в P-диапазоне (450 МГц). РСА разрабатывалась для мониторинга тропических лесов в исследовательских целях, однако, как заявляют разработчики, P-SAR может применяться и для обнаружения объектов, скрытых лесной растительностью (FOPEN – foliage penetration).

Помимо рассмотренных образцов, существует целый ряд известных малогабаритных РСА, не вошедших в данную работу и не удовлетворяющих вышеуказанному критерию установки на БЛА ближнего действия. Это Lynx [20] (General Atomics совместно с Sandia National Laboratories, США) Ku (15,2–18,2 ГГц) диапазона весом 60 кг, MiniSAR [21] (Sandia National Laboratories, США) X диапазона весом 35 кг, NuSAR [22] (Naval Research Laboratory совместно с BYU, США) L (1,75 ГГц), X (9,75 ГГц) диапазонов – 8 кг, CARABAS-II, LORA [23, 24] (Swedish Defence Research Agency, Швеция) VHF (20–86 МГц) диапазона – 11 кг, UAVSAR [25] (Malaysian Remote Sensing Agency, Малайзия) C (5,3 ГГц) диапазона – 20 кг, CP-SAR [26] (Center for Environmental Remote Sensing, Япония) L (1,27 ГГц) диапазона – 13 кг и другие. Анализ их характеристик, архитектуры и принципов функционирования показал более сложную структуру формирования радиолокационных сигналов, импульсный режим с высокой мощностью излучения и многорежимность работы.

Анализ российских публикаций последних лет показал существование работ отечественных разработчиков по созданию малогабаритных РСА. Так, АО «НПП «Радар ММС» заявил о возможности установки своей малогабаритной двухдиапазонной РСА на свой БЛА вертолетного типа, при этом характеристики и состав оборудования не разглашается [27]. Кроме того, с 2005 года АО «НИИ ТП» занимается разработкой и успешным применением многодиапазонной РСА «Компакт» [28], работающий в X, L, P и VHF диапазонах. Одной из самых современных российских малогабаритных РСА является многофункциональная цифровая РЛС двойного назначения «Когитор» (МФ-2) [29] совместной разработки МАИ и ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР». Радиолокатор работает в двух диапазонах: X и Ka, при этом максимальное разрешение составляет 0,5 м и 0,25 м соответственно. Особенно следует отметить большой диапазон дальностей: от 0,2 км до 168 км. Масса двухдиапазонной РСА МФ-2 менее 55 кг, однодиапазонной – 30 кг (Ka-диапазон) и 22 кг (X-диапазон). Особенностью данной РЛС является возможность работы как по воздушным, так и по наземным целям с режимом СДЦ. Кроме того, с помощью МФ-2 возможно получение информации о состоянии поверхности земли, атмосферы, акватории, лесных массивов; о состоянии транспортных, сырьевых и энергетических коммуникаций; о стихийных бедствиях и промышленных авариях, катастрофах; о состоянии сельскохозяйственных угодий, строительстве зданий и сооружений.

Вместе с тем, АО «НТЦ РЭБ» совместно с ЗАО «НИИ СТТ» в рамках ОКР «Пазанка» разработан мобильный аппаратно-программный комплекс контроля радиолокационной заметности вооружения и военной техники [30]. Основу комплекса составляет малогабаритная РСА трех диапазонов частот (L, C и X), размещаемая на БЛА (рис. 18).



Рис. 18. БЛА «Мерлин-21Б» с РСА С-диапазона

Модуль РСА L-диапазона предназначен для формирования зондирующего ЛЧМ сигнала, предварительного его усиления, приема отраженного сигнала, выделения сигнала разностной частоты и усиления его до напряжения, необходимого для работы АЦП. Рабочая полоса частот модуля L-диапазона составляет 1215–1400 МГц, период повторения сигнала 1,6 мс. Структурно модуль состоит из источника питания напряжением 5В, управляющего микроконтроллера, предварительного усилителя, приемника и видеоусилителя с АРУ. В составе бортовой цифровой платформы П-01 (производство ЗАО «НИИ СТТ») модуль питается через разъем РСІ-Е. При настройке – через разъем внешнего питания. Модуль РСА С-диапазона структурно аналогичен модулю L-диапазона. Рабочая полоса частот 5250–5725 МГц, период повторения также 1,6 мс. Модуль РСА X-диапазона предназначен для формирования непрерывного ЛЧМ сигнала в диапазоне 9500–9975 МГц, излучения сформированных радиолокационных сигналов и приема отраженных сигналов. Учитывая наиболее эффективные с точки зрения минимальных энергопотребления, массы и габаритов варианты передающего и приемного устройств, принята в качестве конечного варианта функциональная схема РСА X диапазона. Формирователь ЛЧМ сигнала X диапазона построен на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Напряжение питания модулей составляет 9–36 В. Результаты экспериментальных исследований показали максимальную разрешающую способность разработанной РСА 0,3 м.

Приведенные результаты анализа существующих малогабаритных РСА для БЛА ближнего действия показали, что в большинстве случаев радиолокаторы построены по гомодинной схеме с использованием ЛЧМ-сигналов. Применение непрерывного излучения обуславливает малую дальность и низкую мощность излучения, что вполне удовлетворяет условиям применения БЛА ближнего действия. При этом наблюдается тенденция работы таких РСА в нескольких частотных диапазонах, что позволяет обеспечивать обнаружение наземных объектов в зависимости от задач разведки.

Таким образом, относительная простота архитектуры малогабаритных РСА в значительной степени компенсируется алгоритмически сложной цифровой обработкой радиолокационного эхо-сигнала. При этом полученные на выходе данные будут являться существенным дополнением, а в некоторых случаях могут стать единственно достоверной информацией об объектах района непосредственной близости противника [31].

Структурный синтез оптимальной структуры РСА БЛА

При решении сложной задачи разработки оптимальной структуры РСА для БЛА ближнего действия по критерию минимума массогабаритных показателей должна учитываться, в самом общем случае, эффективность решения выполняемых РСА функций. Кроме того, при оптимизации разработки и размещения оборудования дополнительно используют стоимость затрат на его проектирование, разработку, изготовление и стоимость непосредственно радиоэлектронных компонентов, плат и антенн. Поэтому оптимизация разработки и размещения РСА на БЛА приобретает сложный многокритериальный характер. В работе используется только два независимых, по сути, параметра: массогабаритная характеристика и эффективность. Независимость в данном случае обусловлена простой логикой: масса оборудования не является необходимым или достаточным условием его эффективности.

Для оценки массогабаритных показателей авторами предложено использовать условную «плотность» изделия, характеризующую массогабаритные показатели – соотношение массы к объему: то есть, чем меньше масса и объем модулей и антенн РСА, тем меньше «плотность». Расчет объема оборудования производится суммированием объемов модулей и блоков без антенн (в большинстве случаев антенны размещены «за бортом» БЛА), а масса – с учетом антенн, так как они являются важным слагаемым в массе целевой нагрузки БЛА.

При оценке эффективности обычно используется вероятностный подход, однако в таком случае придется многократно проводить эксперимент или моделирование применения РСА, что не входит в перечень поставленных в задач и не соответствует целям. В данной работе принята следующая методика оценки эффективности. Предположим, что РСА выполняет задачи картографирования и обнаружения целей. При картографировании важнейшим параметром РСА является ее разрешающая способность. Вероятность обнаружения целей также зависит, помимо дальности и прочих технических параметров и условий наблюдения, от разрешающей способности РСА. При этом крайне желательным условием является соответствие разрешающих способностей по дальности и азимуту $\delta_D = \delta_{Az}$, что обуславливает выбор единого параметра, характеризующего разрешающую способность δ в целом. При этом естественно полагать, чем меньше значение данного параметра, тем выше (лучше) разрешающая способность.

Таким образом, предлагаемый условный минимаксный двухпараметрический критерий оптимальности схемы РСА при размещении на БЛА ближнего действия будет выглядеть следующим образом:

$$K_{РСА-БЛА}^{opt} = \frac{\min \left(\frac{m}{h \times l \times w} \mid \begin{array}{l} m \leq M_{цн} \\ (h \times l \times w) \leq V_{цн} \end{array} \right)}{\max \left(\delta \mid \begin{array}{l} \delta_D \rightarrow 0 \\ \delta_{Az} \rightarrow 0 \end{array} \right)}, \quad (1)$$

где m – масса оборудования, h , l , w – высота, длина и ширина модулей соответственно, $M_{цн}$ – ограничение по массе полезной нагрузки БЛА, $V_{цн}$ – ограничение по объему контейнера для полезной нагрузки БЛА, δ – разрешающая способность РСА при минимальных $\delta_D = \delta_{Az}$. Комплексное сравнение принципов функционирования и вариантов схем построения позволит выбрать оптимальный вариант компоновки РСА по наименьшему $K_{РСА-БЛА}^{opt}$.

В работе [32] рассмотрено большое количество известных способов формирования частотно-модулированных сигналов – от аналоговых на основе линий задержки до цифровых как с применением кольца ФАПЧ, так и на основе прямого цифрового синтеза. Учитывая высокую стабильность выходного сигнала, возможность микроконтроллерного управления, хорошую промышленную повторяемость, а также ограничения на стоимость, массогабаритные показатели и потребляемую мощность необходимо отдано предпочтение цифровым системам на основе ФАПЧ. При этом положительным фактором является то, что отечественные предприятия выпускают специализированные микросхемы, способные конкурировать с зарубежными аналогами.

Исходя из вышеизложенного, авторами выбран способ построения высокочастотной части радиолокационных станций, используемый для реализации авиационных радиовысотомеров, основанный на использовании непрерывных ЛЧМ сигналов, разнесения приема и передачи сигналов за счет использования двух антенн и гомодинной обработки отраженных сигналов. На рис. 19 приведена оригинальная структурная схема РСА «Три-М» [33] («малогабаритная малой мощности») с системой обработки и технической реализацией принципа синтезирования апертуры, где обозначены: ГПН – генератор пилообразного напряжения, ГУН – генератор, управляемый напряжением, АтГ – аттенюатор, УМ – усилитель мощности, ДМ – делитель мощности, СМ – смеситель, МШУ – маломощный усилитель, ПРД А и ПРМ А – передающая и приемная антенны соответственно.

Главным недостатком такой схемы является относительно небольшая дальность действия вследствие низкого энергетического потенциала РСА. Кроме того, из-за проникающего сигнала, наращивание мощности передатчика не приводит к увеличению дальности действия (с ростом мощности излучения пропорционально растут шумы на входе приемника). Поэтому, как правило, дальность действия РЛС с непрерывным излучением ограничена 10–20 км.

С точки зрения оптимизации затрат на реализацию обработки сложных сигналов с большими базами, гомодинная схема построения с непрерывным ЛЧМ сигналом является целесообразной. В таких приемниках подавление помех и основное усиление сигнала осуществляется на низкой частоте, что реализуется существенно проще и дешевле. Для исследования основных принципов функци-

онирования по такой схеме построения создана лабораторная установка на рельсе с макетом РСА «Три-М», внешний вид которой представлен на рис. 20.

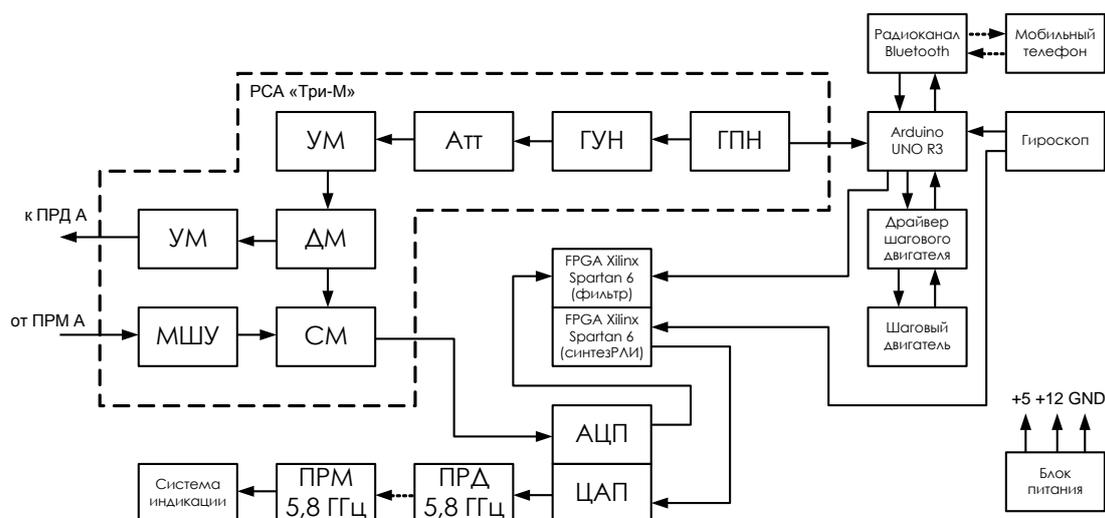


Рис. 19. Структурная схема лабораторной установки с РСА «Три-М»

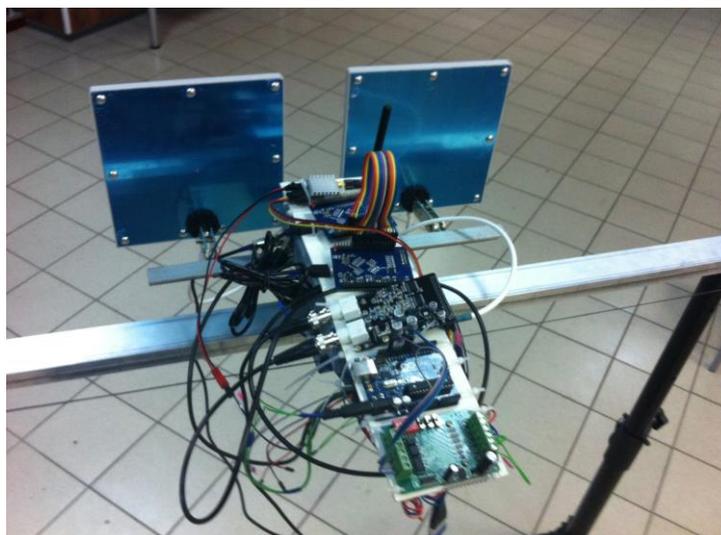


Рис. 20. Внешний вид макета первого варианта РСА

В структуру локатора дополнительно внесены две программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) Xilinx Spartan 6 для проведения исследований эффективности алгоритмов вторичной обработки траекторного сигнала [34, 35]. Вес макета с антеннами составил 1,2 кг, габариты 0,1×0,2×0,03 м (без антенн), а разрешающая способность – около 1,5 м, что является неприемлемым согласно критерию (1). Рабочая полоса частот составляет 2360–2440 МГц, при этом разрешающая способность достигает 1,5 м. Диапазон частот выбирался из соображений безопасности для здоровья человека при проведении исследований, а также относительно низкой стоимости комплектующих. Низкая разрешающая способность РСА обусловлена, прежде всего, выбранным S-диапазоном и недостаточной шириной рабочей полосы частот зондирующего сигнала, формируемой неспециализированным ГУН MiniCircuits ZX95-2536C+. Несмотря на недостатки первого варианта схемы построения РСА, в процессе

исследований получен большой опыт создания алгоритмов синтеза и автофокусировки РЛИ.

Предлагаемый второй вариант построения РСА с непрерывным ЛЧМ излучением в полосе частот 5,2–6,0 ГГц и прямым преобразованием частоты, включающий недостатки первой схемы и удовлетворяющий критерию (1), подробно описан в [36] представлен на рис. 21.

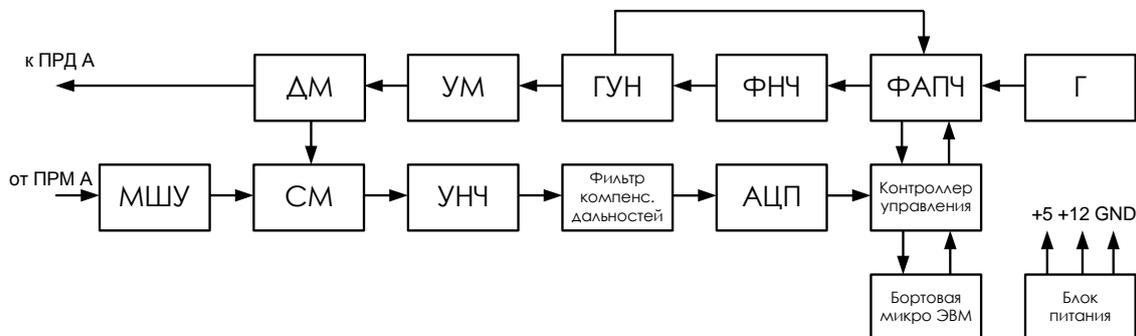


Рис. 21. Структурная схема предлагаемой в работе РСА «Три-М»

Одним из определяющих отличий предлагаемой в работе структуры от известных и рассмотренных вначале, является реализация удаленного цифрового управления параметрами сигнала (вид модуляции, рабочая частота, полоса частот и длительность импульсов). Управление функционированием радиолокатора осуществляется через быстродействующий 32-битный двухъядерный микроконтроллер NXP LPC4320 на базе ARM Cortex M4 204 МГц командами от микро ЭВМ с четырех-ядерным 64-битным микроконтроллером ARM Cortex A53 с тактовой частотой 1,5 ГГц, ОЗУ 2 Гб и операционной системой Linux Ubuntu 16.04 [37]. Напряжение питания элементов структурной схемы составляет 3,3–12 В.

Существующий в большинстве подобных РСА недостаток значительного снижения уровня мощности отраженного от целей на больших удалениях сигнала исключен в предлагаемой РСА включением в схему фильтра компенсации дальностей, представляющего собой LC-фильтр нижних частот, предусилительный каскад и активный фильтр высоких частот 2-го порядка, собранный по схеме Саллена-Ки с большой крутизной амплитудно-частотной характеристики (40 дБ на декаду).

Кроме того, приведенная на рис. 21 структура малогабаритной РСА позволила дополнительно повысить разрешающую способность за счет компенсации с помощью фильтра Калмана нерегулярных нелинейностей модуляционной характеристики ГУН, возникающих вследствие превышения диапазона рабочих температур окружающей среды и напряжения питания [38].

С целью исключения случаев выхода из строя радиочастотных компонентов структуры вследствие неисправности стабилизаторов напряжений, что особенно актуально при тестировании радиолокатора сразу после сборки, схема разделена на две многослойные печатные платы (радиочастотную и цифровую), соединенные 30-контактным разъемом (рис. 22).

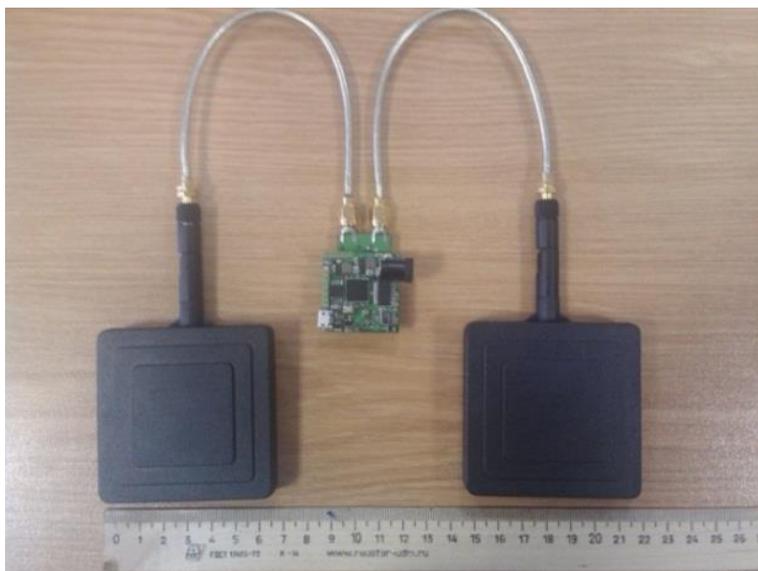


Рис. 22. Внешний вид разработанной РСА с антеннами

Обработка траекторного сигнала производится в микро ЭВМ на борту БЛА и включает в себя квазиоптимальные алгоритмы синтеза и автофокусировки РЛИ, реализованные на языке Python и определяющие итоговое значение разрешения РЛИ по азимуту и дальности.

Параметрический синтез оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов формирования РЛИ с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия

Для синтеза (формирования) РЛИ, полученных с помощью РСА с непрерывным ЛЧМ излучением, удобнее всего применять фильтровый подход, в рамках которого используются современные и достаточно эффективные модификации алгоритмов частотного масштабирования и дальность-Доплер. Для повышения разрешающей способности по координатам азимут-дальность используется расширение спектра сигнала за счет доплеровского набега фазы (частоты) в сечении сигнала по азимутальной координате движения БЛА и за счет ЛЧМ зондирующих сигналов в сечении по наклонной дальности. Корреляционная (согласованная) обработка комплексной огибающей принимаемого сигнала в этих сечениях обеспечивает сжатие сигналов от элементарных отражателей поверхности по обеим координатам. При этом предполагается, что траектория движения носителя линейна и постоянна скорость движения. Однако на интервале синтеза апертуры антенны имеются отклонения по высоте и скорости, обусловленные турбулентностью атмосферы. Такие смещения вносят искажения в фазовый портрет и значения времени задержки сигнала от целей, что, в конечном счете, искажает РЛИ. Если параметры движения носителя известны, целесообразно их использовать для коррекции РЛИ. В связи с тем, что БЛА ближнего действия в полете более восприимчивы к внешним физическим воздействиям, то учитывать флуктуации движения носителя просто необходимо.

Алгоритмы компенсации движения носителя в импульсно-доплеровских РЛС используются уже давно и хорошо изучены. Однако принципиальные от-

личия непрерывных РСА делают невозможным их применение. В импульсно-доплеровских РЛС предполагается, что в пределах импульса носитель является неподвижным, а в непрерывных РСА движение должно учитываться постоянно.

В статье синтезированы оптимальный и квазиоптимальный алгоритмы компенсации флуктуаций траектории БЛА, пригодные для использования после вышеуказанных алгоритмов синтеза РЛИ. В качестве критерия оптимальности выбран минимум фазовой ошибки. Представленные алгоритмы также исправляют ошибки дальности, вызванные флуктуациями поступательного движения носителя с амплитудой сдвига, большей чем интерполированное значение.

Примем, что частота зондирующего сигнала изменяется от начальной до конечной, определяя девиацию частоты Δf . Время, в течение которого изменяется частота, определяется полосой частот ΔF и периодом повторения T_p .

Участок передаваемого сигнала с повышением частоты во временной области может быть представлен как:

$$s_t(t, \eta) = e^{j(\phi + \omega_0 t + \pi k_r t^2)}, \quad (2)$$

где t, η – время на маленьком и большом масштабах соответственно, ϕ – начальная фаза. Участок сигнала с понижением частоты может быть задан с учетом начальной частоты, равной $f_0 + \Delta F$ и девиации частоты Δf .

Отраженный сигнал от цели, находящийся на дальности $R(t, \eta) = \sqrt{R_0^2 + v^2(t + \eta)^2}$ и соответствующей временной задержкой $\tau = 2R(t, \eta)/c$ может быть определен как

$$s_r(t, \eta) = e^{j(\phi + \omega_0(t - \tau) + \pi k_r(t - \tau)^2)}, \quad (3)$$

где R_0 – минимальная дальность до объекта.

Демодулированный сигнал после смесителя и ФНЧ запишется следующим образом:

$$s_{dc}(t, \eta) = e^{j(\omega_0 r + \pi k_r t r - \pi k_r r^2)}. \quad (4)$$

Представленный в виде (4) сигнал подлежит обработке с целью синтеза РЛИ. Алгоритм дальность-Доплер включает в себя сжатие по дальности с быстрым преобразованием Фурье (БПФ) по дальности и переход в частотную область с БПФ по азимуту.

Компенсация миграции дальности может быть реализована с помощью стандартных интерполяционных методов, однако это приводит к увеличению вычислительных затрат. Кроме того, компенсируется доплеровское приращение частоты, обусловленное постоянным движением носителя. Сжатие по дальности выполняется путем умножения на импульсную характеристику азимутального согласованного фильтра (СФ):

$$H_{az}(f_\eta, R_0) = e^{j \frac{4\pi R_0}{\lambda} D(f_\eta, v)}, \quad (5)$$

где $D(f_\eta, v) = \sqrt{1 - \lambda^2 f_\eta^2 / 4v^2}$ – коэффициент миграции дальности, v – путевая скорость движения носителя, λ – длина волны зондирующего сигнала.

Аналогично алгоритму дальность-Доплер, для работы с демодулированным сигналом на частоте биений может быть модифицирован и алгоритм частотного масштабирования. При этом компенсация флуктуаций параметров движения носителя может производиться без интерполяции. В связи с этим алгоритм частотного масштабирования является основным при обработке непрерывных ЛЧМ сигналов.

Алгоритм частотного масштабирования включает в себя ряд Фурье преобразований и фазовых перемножений. При известной нелинейности ЛЧМ, она может быть компенсирована модифицированной функцией [39]. В начале обработки сигнала алгоритмом частотного масштабирования выполняется БПФ в азимутальном направлении над сигналом (4). Результирующий сигнал в частотной области может быть записан как:

$$S(t, f_{\eta}) = e^{j \frac{4\pi R_0 D(f_{\eta}, \nu)}{\lambda}} e^{j \frac{4\pi k_r R_0}{D(f_{\eta}, \nu)}} e^{j^2 f_{\eta} t} e^{-j\pi k_r t^2}. \quad (6)$$

Функция частотного масштабирования используется с дополнительным коэффициентом, исключаяющим доплеровский сдвиг, то есть

$$H_1(t, f_{\eta}) = e^{-j(2\pi f_{\eta} t + \pi k_r t^2 (1 - D(f_{\eta}, \nu)))}. \quad (7)$$

После БПФ по дальности применяется функция, корректирующая остаточную фазу видеосигнала следующим образом:

$$H_2(f_r, f_{\eta}) = e^{\frac{-j\pi f_r^2}{k_r D(f_{\eta}, \nu)}}. \quad (8)$$

Следующая после обратного БПФ по дальности функция выполняет обратное частотное масштабирование

$$H_3(t, f_{\eta}) = e^{-j\pi k_r t^2 (D(f_{\eta}, \nu)^2 - D(f_{\eta}, \nu))}. \quad (9)$$

Таким образом, осуществляется второй этап коррекции дальности и соответствующей ей фазы. Затем снова выполняется БПФ по дальности и применяется фильтрация, выполняющая роль сжатия по азимуту. Результатом обратного БПФ по азимуту является сфокусированное изображение.

Рассмотренные алгоритмы получения РЛИ предполагают, что носитель движется по прямолинейной траектории с постоянной скоростью. Однако реальная траектория на интервале синтезирования апертуры антенны претерпевает существенные изменения, которые вносят погрешности и ошибки в накапливаемые данные и искажают РЛИ.

Поступательное движение вызывает смещение носителя от идеальной (заданной) траектории. Это приводит к изменению дальностного портрета сцены и вызывает противоречие фазового портрета. Цель на дальности R измеряется как $R + \Delta R$ и обусловлена частотным сдвигом демодулированного сигнала (4), который можно переписать как

$$s_{\Delta dc}(t, \eta) = e^{j(\alpha_0(\tau + \Delta\tau) + 2\pi k_r t(\tau + \Delta\tau) - \pi k_r (\tau + \Delta\tau)^2)}, \quad (10)$$

где $\Delta\tau = 2\Delta R/c$. Цели, расположенные в пределах ширины луча диаграммы направленности, имеют ненулевую частоту Доплера, зависящую от различных

дальностей в пределах азимутального направления. На рис. 23 дальности до целей A и B в процессе движения определяются по-разному.

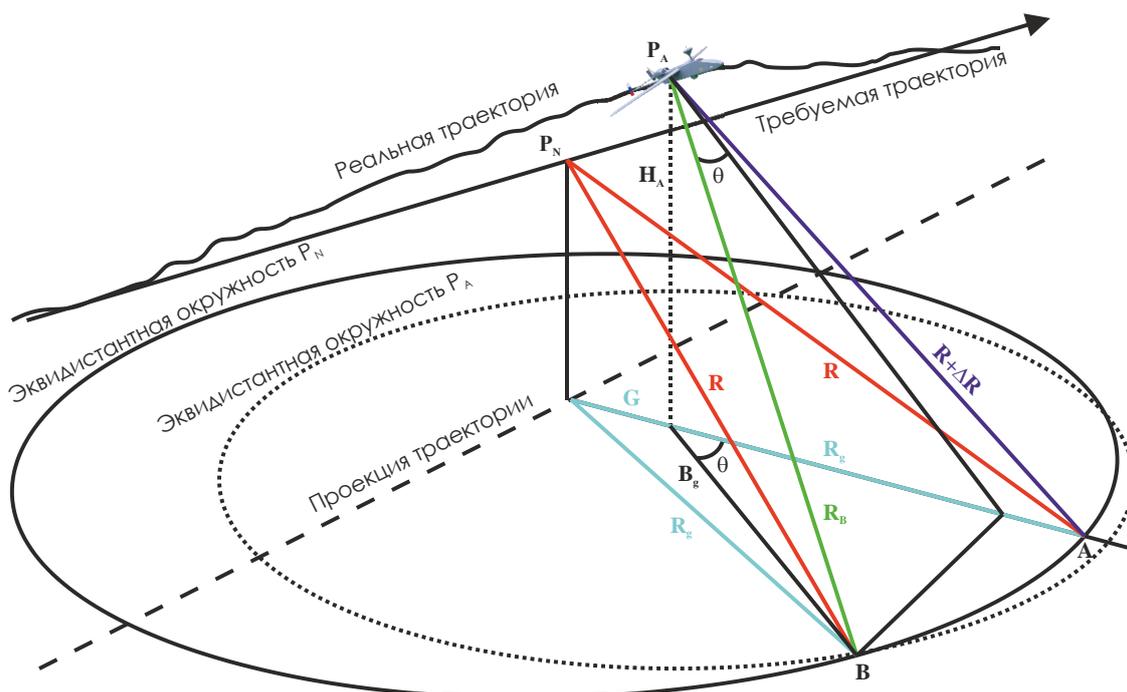


Рис. 23. Геометрия коррекции флуктуаций движения носителя PCA

Изменения в путевой скорости приводят к неравномерности выборки зондирующих импульсов на земле, что, в конечном счете, искажает фазовый портрет сцены. Изменение углов тангажа, крена и рыскания приводит к ошибкам разного рода. Флуктуации тангажа приводят к смещению полосы обзора на земле, крена – к изменению характера усиления антенны над сценой, а углов рыскания – к перекосам РЛИ. Если доплеровский спектр сдвинут так, что часть его лежит вне полосы доплеровских частот, то происходит наложение. Сжатие по азимуту дает затенение изображения по азимуту в местах, где доплеровская частота ошибочно равна нулю.

Разработанные ранее методы и алгоритмы компенсации параметров движения не учитывают реальные искажения движения носителей в случае непрерывных ЛЧМ PCA. В известных методах [40] компенсация движения применяется к строковым данным, а затем к данным, сжатым по дальности. Такой подход учитывает, что в пределах импульса носитель неподвижен. В случае непрерывной ЛЧМ PCA при сжатии по дальности теряется возможность учета движения в пределах периода модуляции.

В случае ЛЧМ сигнала PCA коррекция движения может быть применена напрямую к демодулированному сигналу (10) или в частотной области путем коррекции частот после БПФ по азимуту, примененному к строкам данных. Поскольку каждый отсчет содержит информацию о значении дальности, а параметры коррекции зависят от дальности и азимута, то любые изменения, примененные в частотной области являются действительными только для одной дальности и одного значения азимута. Тем не менее, с некоторым приближением, приведенные ограничения могут быть ослаблены.

В общем случае, параметры движения накапливаются гораздо более медленными темпами, чем данные РСА. Для непрерывных ЛЧМ РСА параметры движения могут быть интерполированы так, чтобы каждый отсчет данных РСА имел соответствующую информацию о позиции (в отличие от импульсных систем, где каждый импульс обладает такой информацией). Вместе с тем, каждый отсчет данных должен иметь соответствующую информацию с исправленной ошибкой.

Для цели на дальности R , ΔR вычисляется как разница между идеальным и реальным расстояниями. На рис. 23 рассматривается геометрия на плоскости. При этом если существуют более точные параметры плоскости, представленная модель может быть скорректирована.

При известных координатах цели A , а также реальной (точка P_A) и идеальной (точка P_N) траекториях, из полученной геометрии возможно вычислить R и $R+\Delta R$. При этом $\Delta\tau$ обновляется в каждый отсчет. Ошибки движения корректируются фильтром

$$H_{MC}(t, \Delta\tau) = e^{-j(\omega_0\Delta\tau + 2\pi k_r t \Delta\tau - \pi k_r (2\pi\Delta\tau - \Delta\tau^2))}. \quad (11)$$

Применение фильтра к данным (в строках во временной или частотной области) позволяет сдвинуть дальность до цели и уточнить фазу.

В случае наличия нескольких целей в пределах ширины диаграммы направленности на одной дальности, но на разных азимутах, сдвиг дальности будет различным благодаря поступательному движению носителя. Для заданных значений азимута на рис. 23, цель B находится на позиции, где частота Доплера f_η . Угол на цель B можно записать как:

$$\theta(f_\eta) = \sin^{-1}\left(\frac{f_\eta \lambda}{2v}\right). \quad (12)$$

Как видно из рис. 23, дальность $R+\Delta R$ и угол ϑ выводятся из данных РСА, а высота H_A и дальность R находятся из параметров движения. Определим правильный треугольник на земной поверхности с гипотенузой B_g и сторонами $B_g \cos(\vartheta)$ и $B_g \sin(\vartheta)$ и угол ϕ между прямыми R_g и G . Исходя из определений, получим выражения:

$$\sin(\phi) = \frac{B_g \sin(\vartheta)}{R_g}, \quad (13)$$

$$\cos(\phi) = \frac{G + B_g \cos(\vartheta)}{R_g}, \quad (14)$$

$$\arcsin\left(\frac{B_g \sin(\vartheta)}{R_g}\right) = \arccos\left(\frac{G + B_g \cos(\vartheta)}{R_g}\right). \quad (15)$$

В представленных равенствах две неизвестных B_g и ϑ . Затем рассмотрим выражение:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{B_g \sin(\vartheta)}{\sqrt{(B_g \cos(\vartheta))^2 + H_A^2}}. \quad (16)$$

Неизвестные B_g и ϑ находятся из системы уравнений (15) и (16) путем символьных вычислений.

В частном сложном геометрическом случае, представленном на рис. 23, найден угол на земле $\vartheta(\theta(f_\eta), R_g, G, H_A)$, из которого определяются дальность:

$$B_g(f_\eta) = -\cos(\vartheta)G \pm \sqrt{\cos^2(\vartheta)G^2 + R_g^2 - G^2} \quad (17)$$

и реальная дальность до цели B

$$R_B(f_\eta) = \sqrt{H_A^2 + B_g^2}. \quad (18)$$

Затем можно найти $\Delta R = R - R_B(f_\eta)$ и $\Delta \tau = 2\Delta R(f_\eta)/c$ и применить (12) к данным в частотной области. Эта коррекция правомерна для единичных значений дальности и азимута.

Точная корректировка ошибок движения таким способом требует высоких вычислительных затрат. Для каждого пикселя РЛИ применяется корректировка в частотной области при заданных значениях дальности и азимута. Данные обрабатываются с помощью сжатия по дальности, затем каждая точка данных сохраняется. Составное сжатое по дальности изображение создается из таких отдельных точек, а окончательное изображение получается после сжатия по азимуту. Для сокращения вычислительных затрат можно использовать приближения, и, тем самым, сохранить преимущества разработанного алгоритма. Например, в случае узкого луча диаграммы направленности, ошибки, вызванные движением, считают постоянными для дальностей в пределах полосы доплеровских частот. Такой подход и соответствующее приближение используется во многих алгоритмах компенсации. В качестве альтернативы такого приближения, для исходных данных используют фильтр (11), однако коррекция правомерна только для одной дальности. Поэтому сначала получают составные изображения, сжатые по дальности, а затем сжимают данные по азимуту.

Дальнейшее упрощение алгоритма возможно путем разделения на два этапа. На первом этапе корректируется опорная дальность R_{ref} . ΔR_{ref} вычисляется как и ранее, через $\Delta \tau_{ref} = 2\Delta R_{ref}$ и $\tau_{ref} = 2R_{ref}/c$. Затем вычисляется

$$H_{MC1}(t, \Delta \tau_{ref}) = e^{-j(\omega_0 \Delta \tau_{ref} + 2\pi k_r t \Delta \tau_{ref} - \pi k_r (2\tau_{ref} \Delta \tau_{ref} - \Delta \tau_{ref}^2))}. \quad (19)$$

На втором этапе используется дифференцированная коррекция после сжатия по дальности, при этом информация о положении усредняется в пределах каждого периода модуляции. Такая коррекция вычисляется для каждого отсчета дальности R_0 с рассчитанными ΔR_0 , $\Delta \tau = 2\Delta R_0/c$ и $\tau_0 = 2R_0/c$. Так, $H_{MC}(t, \Delta \tau_0) / H_{MC}(t, \Delta \tau_{ref})$ или

$$H_{MC2}(\tau_0, \Delta \tau_0) = e^{j(-\omega_0 \Delta \tau_0 + 2\pi k_r \tau_0 \Delta \tau_0 - \pi k_r \Delta \tau_0^2 + \omega_0 \Delta \tau_{ref} - 2\pi k_r \tau_{ref} \Delta \tau_{ref} + \pi k_r \Delta \tau_{ref}^2)}. \quad (20)$$

Это похоже на общепринятую модель компенсации движения, но с некоторыми преимуществами. Кроме того, сдвиг по дальности, вызванный поступательным движением, корректируется без интерполяции. На рис. 24 представлена модель РЛИ точечной цели и пример коррекции движения с использованием разработанного алгоритма.

Так, при отклонении до 1 м траектории от заданной на расстоянии 15 м (рис. 24, д), искаженное РЛИ точечной цели представлено на рис. 24, а. В идеальных условиях РЛИ будет иметь вид, показанный на рис. 24, б (е). Стандартный алгоритм коррекции движения, как видно из рис. 24, в (ж), не справляется со своей задачей и ошибка коррекции приводит к искажению РЛИ со смещением. Применение разработанного алгоритма коррекции флуктуаций траектории движения носителя, как приведено на рис. 24, г (з).

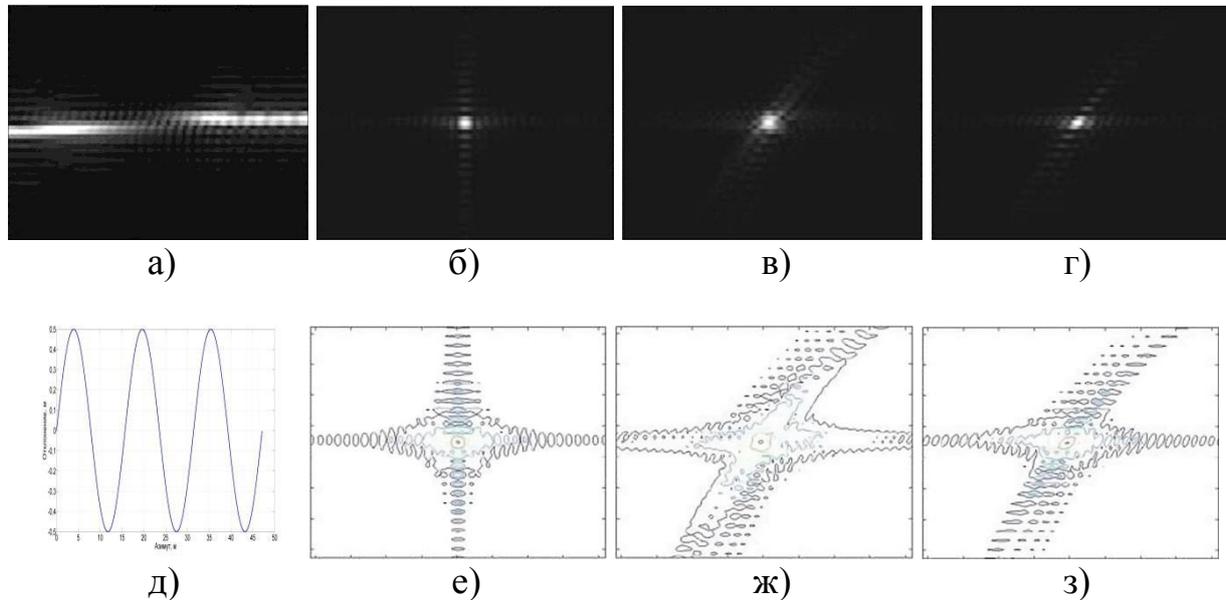


Рис. 24. Модель РЛИ точечного объекта с искажениями вследствие флуктуаций траектории движения носителя и примеры коррекции

Ошибки, введенные при рассмотрении двухэтапного приближенного метода, значительно меньше ошибок при использовании известных методов. Обозначим ошибку фазы, обусловленную приближениями в функции коррекции движения, как

$$\phi_E = \frac{4\pi\Delta R_e}{\lambda}, \quad (21)$$

где ΔR_e – ошибка вычисления требуемой коррекции за счет поступательного движения. Для предлагаемой коррекции отсутствует ошибка, обусловленная движением, в то время как при известной компенсации ошибка первого этапа имеет вид:

$$\Delta R_{e1} = \Delta R_{ref}(t) - \Delta R'_{ref}, \quad (22)$$

где $\Delta R_{ref}(t)$ – изменяющаяся во времени коррекция поступательного движения, учитывающая параметры движения в период модуляции ЛЧМ сигнала, $\Delta R'_{ref}$ – постоянная для каждого периода.

Для компенсации на втором этапе ошибка одинакова для обоих случаев и равна:

$$\Delta R_{e2} = (\Delta R_{ref}(t) - \Delta R_0(t)) - (\Delta R'_{ref} - \Delta R'_0). \quad (23)$$

Очевидно, что применение предлагаемого алгоритма позволяет минимизировать ошибку коррекции фазы на ΔR_{e1} .

Таким образом, предлагаемый алгоритм формирования РЛИ с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия на основе известного алгоритма частотного масштабирования состоит из последовательных шагов: первый этап компенсации траектории движения (19), БПФ по азимуту, частотное масштабирование (7), БПФ по дальности, коррекция (8), обратное БПФ по дальности, обратное частотное масштабирование (9), БПФ по дальности, обратное БПФ по азимуту, второй этап компенсации движения (20), БПФ по азимуту, сжатие по азимуту (5) и обратное БПФ по азимуту. Известный алгоритм формирования РЛИ дальность-Доплер предлагается модифицировать следующим образом: первый этап компенсации движения (19), БПФ по дальности, второй этап компенсации движения (20), БПФ по азимуту, коррекция миграций дальности (известная как РСМС – range cell migration correction), сжатие по азимуту (5) и обратное БПФ по азимуту.

Параметрический синтез оптимального и квазиоптимального алгоритмов автофокусировки РЛИ

Пусть $y_{mk} \in \mathbb{C}$ есть одно из $k=1, \dots, N$ измерений дальности, каждое из которых содержит по M элементов разрешения, формирующих матрицу $M \times N$. Номера строк соответствуют элементам разрешения, номера столбцов – профилю дальности. При приближенном суммировании и обратном БПФ по столбцам различными способами можно получить РЛИ

$$y_{mn} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi kn/N} \tilde{y}_{mk}, \quad (24)$$

где $y_{mn} \in \mathbb{C}$ – один из (m, n) элементов изображения и n в данном случае относится к одной из координат (наклонной дальности или доплеровской координате).

В связи с тем, что фазовый портрет искажен постоянной фазовой ошибкой от импульса к импульсу, её следует скомпенсировать введением фазовой корректировки на каждый отсчет. Пусть вектор фазовой коррекции $\varphi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_N\}$, последовательность импульсов ($k=1, \dots, N$) с уже измененной фазой $\tilde{z}_{mk} = e^{j\varphi_k} y_{mk}$ и

$$z_{mn}(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi kn/N} e^{j\varphi_k} \tilde{y}_{mk} \quad (25)$$

соответствуют сфокусированному изображению. Для удобства и простоты далее будем полагать, что это изображение является функцией фазы ϕ , то есть $z_{mn} = z_{mn}(\phi)$. Определенный интерес представляет синтез итерационного алгоритма определения оптимального вектора фазы, при котором энтропия сфокусированного изображения минимальна.

Пусть $z_{mn} \in \mathbb{C}$ – (m, n) -й элемент сфокусированного изображения, $|z_{mn}|^2 = z_{mn} z_{mn}^*$ – его интенсивность, $E_z = \sum_{m,n} |z_{mn}|^2$ – суммарная «энергия» изображения, $p_{mn} = |z_{mn}|^2 / E_z$ – нормированная интенсивность пикселя. Тогда энтропия будет определяться как

$$\Phi = - \sum_{m,n} p_{mn} \ln p_{mn}. \quad (26)$$

Без потери общего смысла можно нормализовать z к единице энергии или переопределить энтропию изображения как $-\sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}|^2$. И если полная энергия E_z инвариантна к фазе, то оба случая приведут к одной и той же фазовой оценке. Также следует обратить внимание, что энтропия изображения и энтропия Шеннона z никак не взаимосвязаны – в данном случае энтропия изображения используется как математически удобная мера фокусировки изображения. Другие меры включают контраст изображения и энтропию Реньи, из которых энтропия Шеннона и резкость изображения являются частными случаями. Так как сфокусированное изображение, как было определено ранее, есть функция фазы, то есть $z_{mn} = z_{mn}(\phi)$, выразим энтропию также как функцию от фазовых параметров ϕ :

$$\Phi(\phi) = - \frac{1}{E_z} \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}|^2 + \ln E_z. \quad (27)$$

Тогда оценка фазы по минимуму энтропии будет определяться как

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\phi} \Phi(\phi). \quad (28)$$

Следует отметить, что энтропия изображения является инвариантом как к изменению масштаба (то есть $\Phi(\alpha\phi) = \Phi(\phi)$), так и к сдвигу или перестановке пикселей [41]. Таким образом, по энтропии изображения можно оценить компоненты более высокого порядка функции фазовой ошибки, и именно они расфокусируют изображение. Поскольку для (28) нет решения в аналитическом виде, целесообразно использовать итеративную процедуру численной минимизации для решения оптимальных фазовых параметров. В качестве альтернативы методам на основе универсального градиента или поэтапному подходу в работе используются методы оптимизации для получения квазиоптимального итерационного алгоритма.

Сущность методов и алгоритмов оптимизации состоит в преобразовании одной сложной задачи путем минимизации исходной функции $\Phi(\phi)$ в последовательность более легких в решении задач путем задания последовательности функций подобия $\Theta(\phi; \phi^{(l)}) \geq \Phi(\phi)$ которая является верхним пределом целевой функции на l -й итерации, где $\phi^{(l)}$ – l -я оценка фазовых параметров. Если функции подобия построены правильно, то результирующая последовательность минимизированных оценок будет сходиться к минимуму первоначальной целевой функции, то есть $\lim_{l \rightarrow \infty} \arg \min_{\phi} \Theta(\phi, \phi^{(l)}) = \arg \min_{\phi} \Phi(\phi)$. Для уверенности, что

целевая функция уменьшается (или по крайней мере, не увеличивается) на каждой итерации, используем следующее условие монотонности при заданной функции подобия: $\Phi(\phi) - \Phi(\phi^{(l)}) \leq \Theta(\phi, \phi^{(l)}) - \Theta(\phi^{(l)}, \phi^{(l)}) \leq 0 \forall \phi$, где $\Phi(\phi) - \Phi(\phi^{(l)})$ – изменение в нашей целевой функции на l -й итерации, ограниченное сверху нулем. Для дифференцируемой функции подобия достаточно следующих условий монотонности:

$$\Theta(\phi^{(l)}, \phi^{(l)}) = \Phi(\phi^{(l)}); \tag{29}$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi_k} \Theta(\phi, \phi^{(l)}) \Big|_{\phi=\phi^{(l)}} = \frac{\partial}{\partial \phi_k} \Phi(\phi) \Big|_{\phi=\phi^{(l)}}, \quad k = 1, \dots, N; \tag{30}$$

$$\Theta(\phi, \phi^{(l)}) \geq \Phi(\phi) \forall \phi. \tag{31}$$

Первые два условия (29) и (30) заключаются в том, что функции подобия есть касательные к целевой функции на текущей итерации, при этом третье условие (31) требует, чтобы функция подобия была выше целевой для всех значений параметра вектора ϕ , или наименьшее количество всех значений в пределах интересующего интервала. Так как период изменения фазы 2π , то необходимым является только последнее условие (31) на интервале $[-\pi; \pi]$.

Энтропия изображения может быть записана в следующей форме:

$$\Phi(\phi) = -1 / E_z \sum_{m,n} f(|z_{mn}|^2) + \ln E_z, \tag{32}$$

где $f(p) = -p \ln p$ является вещественной вогнутой функцией для $p > 0$. Пусть $g(p, q) = f(q) - (1 + \ln q)(p - q)$ представляет собой ряд Тейлора первого порядка. Поскольку $f(p)$ является вогнутой, то достаточно просто будет показать, что $g(p, q)$ удовлетворяет условиям монотонности (29)–(31), как показано на рис. 25.

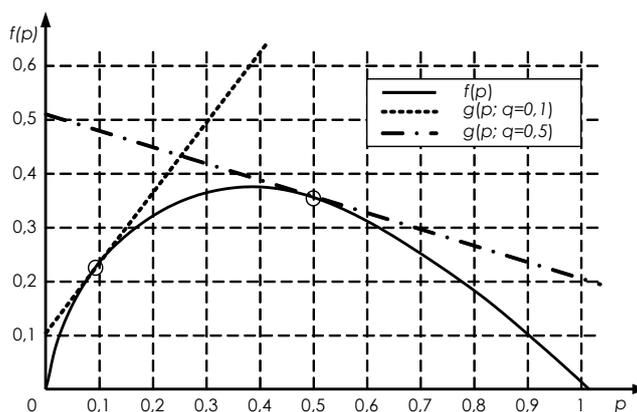


Рис. 25. График функции $f(p) = -p \ln p$ для двух значений целевой точки q

В результате можно показать, что энтропия изображения ограничена сверху при помощи следующего выражения:

$$\begin{aligned} \Phi(\phi) &\leq -1/E_z \sum_{m,n} g\left(|z_{mn}|^2; |z_{mn}^{(l)}|^2\right) + \ln E_z = \\ &= -1/E_z \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}^{(l)}|^2 + \ln E_z = \Theta(\phi; \phi^{(l)}), \end{aligned} \quad (33)$$

где $\phi^{(l)}$ и $z_{mn}^{(l)}$ – оценки фазовых параметров и фазокорректированное изображение соответственно:

$$\Theta(\phi; \phi^{(l)}) = -1/E_z \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}^{(l)}|^2 + \ln E_z \quad (34)$$

и является функцией подобия для исходной функции энтропии изображения, удовлетворяющая условиям монотонности. На рис. 26 показаны варианты функции подобия и энтропии изображения, соответствующие одному фазовому параметру, соответствующему оптимальному (в смысле качества автофокусировки) РЛИ.

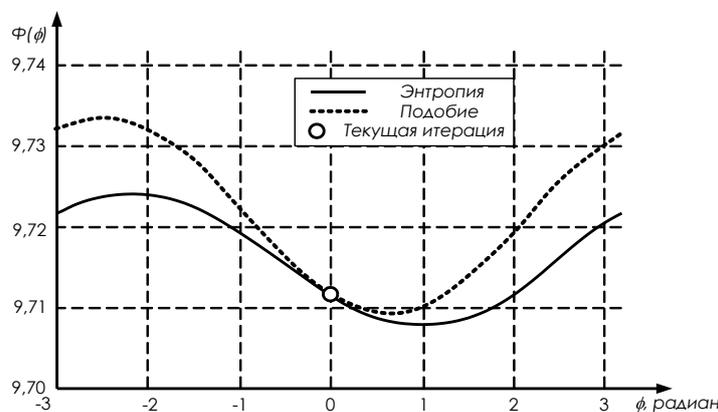


Рис. 26. Варианты функции подобия и энтропии изображения, соответствующие одному фазовому параметру

Хотя функция подобия $\Theta(\phi, \phi^{(l)})$ линейна при интенсивности $|z_{mn}|^2$, одновременная минимизация её на следующей итерации $\phi^{(l+1)} = \arg \min_{\phi} \Theta(\phi, \phi^{(l)})$ остается сложной задачей в связи с нелинейным сопряжением фазовых параметров со значениями интенсивности $|z_{mn}|^2$. В качестве альтернативы одновременной минимизации используем алгоритм убывания координаты, в котором функция подобия минимизируется по одному параметру при прочих неизменных.

Алгоритм убывания координаты (CD) последовательно минимизирует исходную (целевую) функцию по одному параметру, в то время как остальные параметры неизменны. Таким образом, по определению, в данном алгоритме присутствует сходимость к исходной (целевой) функции. В данной работе алгоритм применен для минимизации функции подобия, и когда функция начнет удовлетворять условиям монотонности, то уменьшение функции подобия будет означать уменьшение исходной (целевой) функции на каждой итерации.

Пусть $\phi^{(l,k)}$ есть оценка фазового параметра на l -й итерации, где первые $k-1$ уже обновлены:

$$\phi^{(l,k)} = \left\{ \phi_1^{(l+1)}, \dots, \phi_{k-1}^{(l+1)}, \phi_k^{(l)}, \phi_{k+1}^{(l)}, \dots, \phi_N^{(l)} \right\}, \quad (35)$$

которая определяется как полный цикл итераций по N фазовым параметрам. Аналогично определяется параметр ϕ :

$$\phi = \left\{ \phi_1^{(l+1)}, \dots, \phi_{k-1}^{(l+1)}, \phi_k^{(l)}, \phi_{k+1}^{(l)}, \dots, \phi_N^{(l)} \right\}. \quad (36)$$

Такой выбор свободных или фиксированных параметров превращает функцию подобия в скалярную функцию ψ фазового параметра ϕ_k , $\psi(\phi_k) = \Theta(\phi, \phi^{(l,k)})$ и задача одновременной минимизации сводится к следующей задаче минимизации скаляра:

$$\phi_k^{(l+1)} = \arg_{\phi_k} \min \psi(\phi_k). \quad (37)$$

Функцию ψ можно представить в форме $\psi(\phi_k) = A_k \cos(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + B_k \sin(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + C_k$, где постоянные A_k, B_k, C_k функции подобия и их производные соответствуют текущей итерации $\phi^{(l,k)}$. Решение уравнения при $\psi'(\phi_k) = 0$ позволяет получить решение (37) в аналитическом виде, которое, в свою очередь, позволяет вывести следующие выражения:

$$\phi_k^{(l+1)} = \phi_k^{(l)} + \operatorname{tg}^{-1}(B_k / A_k) \quad (38)$$

и

$$z_{mn}^{(l,k+1)} = z_{mn}^{(l,k)} + \frac{1}{N} e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \left(e^{j\phi_k^{(l+1)}} - e^{j\phi_k^{(l)}} \right) \tilde{y}_{mk}, \quad (39)$$

где с каждой итерацией фазовая оценка последовательно обновляется, а затем используется для предыдущей итерации при фокусировке изображения. Для того чтобы использовать нужную ветвь касательной, проводится проверка решения на экстремум путем взятия второй производной $\psi''(\phi_k) > 0$, что равносильно

$$A_k \cos(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + B_k \sin(\phi_k - \phi_k^{(l)}) < 0. \quad (40)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии, в общем случае, состоит из итеративного выполнения следующих шагов: оценка фазовых параметров (38) и фазовая коррекция изображения (39), пока функция подобия не достигнет минимума (37).

Для оценки эффективности работы квазиоптимального алгоритма произведена оценка энтропии одного из полученных изображений известным алгоритмом фазового градиента и предлагаемыми в работе алгоритмами коррекции фазы по минимуму энтропии (*CD* и *SU* – оптимальным и квазиоптимальным соответственно). Как видно из рис. 27, известный алгоритм позволяет достичь минимального значения энтропии 8,58 за меньшее число итераций, при этом ошибка измерения фазы составила 5,6 градусов. Ошибка измерения фазы пред-

лагаемыми алгоритмами составила 2,4 градуса, что подтверждает высокую эффективность автофокусировки РЛИ.

На рис. 28, а представлено РЛИ, синтезированное квазиоптимальным алгоритмом формирования изображения с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия. В данном случае, съемка производилась на автомобиле, движущемся со скоростью 5 км/ч, интервал синтезирования (на изображении справа налево) составил около 30 м, дальность (на изображении снизу вверх) – 120 м, длительность импульса ЛЧМ сигнала – 2 мс.

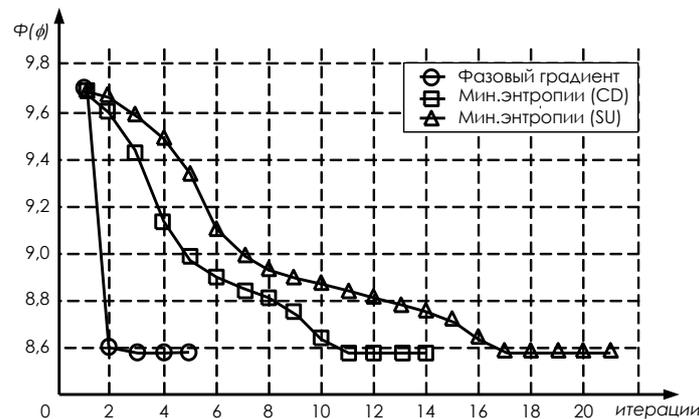


Рис. 27. Зависимость энтропии изображения от числа итераций алгоритмов

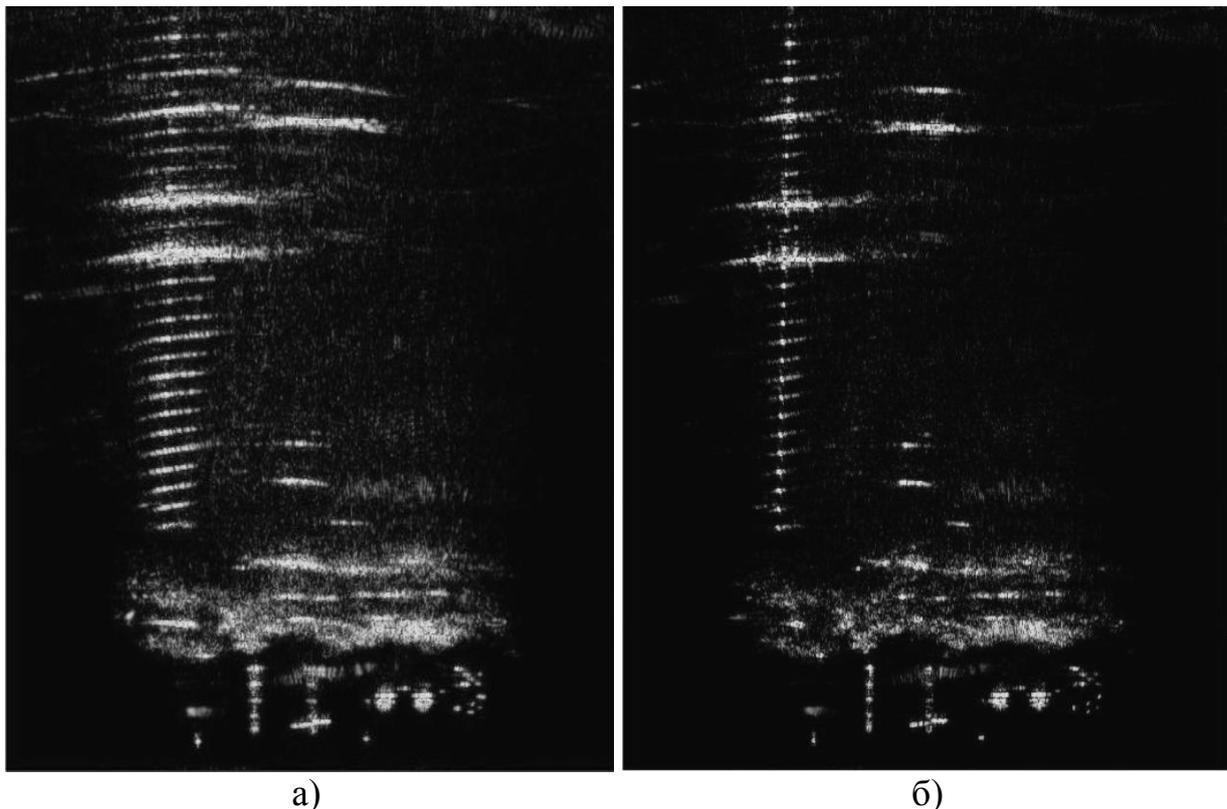


Рис. 28. РЛИ до (а) и после автофокусировки (б)

Как видно на рис. 28, б, квазиоптимальный алгоритм автофокусировки по минимуму энтропии изображения позволяет существенно улучшить качество РЛИ. Вычисленное искажение прямолинейной траектории, соответствующей

щее выполненной коррекции фазы, не превысило 0,06 м. Экспериментальная оценка разрешающей способности разработанной РСА по РЛИ составила 0,19–0,4 м в зависимости от полосы рабочих частот зондирующего сигнала.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день важность беспилотной авиации не вызывает сомнений. Одним из перспективных ее направлений является развитие БЛА ближнего действия. При этом наблюдается тенденция комплексирования информации, получаемой со всех возможных датчиков, в том числе радиолокационных. В связи с крайне ограниченной массой полезной нагрузки БЛА ближнего действия, установка существующих на данный момент образцов радиолокаторов невозможна по массогабаритным показателям. Поэтому интерес представляет создание малогабаритной радиолокационной станции с синтезированием апертуры. Применение системного подхода к разработке РСА позволило определить роль, место и перспективы радиолокационных данных высокого разрешения, в том числе многомерных, а также выявить параметры, определяющие оптимальность той или иной структуры радиолокатора при размещении на БЛА ближнего действия.

Схемы построения РСА и алгоритмы формирования и автофокусировки РЛИ, полученные в данной статье в результате структурно-параметрического синтеза системы в целом, являются оптимальными – они удовлетворяют определенным в работе критериям: двухпараметрическому минимаксному критерию массогабаритные характеристики-разрешающая способность, критериям минимума фазовых ошибок и минимума энтропии изображения соответственно.

Разработка оптимальной (или в частном случае, рациональной) схемы РСА с требуемыми характеристиками позволит реализовать и эффективно применять радиолокационный модуль БЛА как вспомогательный или, в сложных условиях съемки, основной и единственный источник информации. Представленная методика структурно-параметрического синтеза малогабаритной РСА может быть расширена до многомерного случая – для многодиапазонной поляриметрической РСА БЛА ближнего действия.

Литература

1. Дорожная карта AeroNet // Национальная технологическая инициатива 2035 [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.nti2035.ru/markets/aeronet> (дата обращения 03.12.2017).
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: Ленанд, 2015. – 306 с.
3. Кузнецов В. А., Деревин В. В., Бледных И. А., Старков А. М., Стряпчев Э. Н. Анализ рынков беспилотных летательных аппаратов и радиолокационных данных ДЗЗ // Технические науки – от теории к практике:

сборник статей по материалам LXIII Международной научно-практической конференции. № 10. – Новосибирск: 2016. – С. 7-20.

4. Балагуров А. А. Анализ действующего российского законодательства в части положений, связанных с приемом, обработкой и использованием данных ДЗЗ // ГИС-Ассоциация [Электронный ресурс]. 19.10.2016. – URL: www.gisa.ru/file/file2968.doc (дата обращения 19.10.2016).

5. Анпилогов В. Р. Рынок дистанционного зондирования Земли: индустрия и сервисы на рынке ДЗЗ. – М.: ВИСАТ-ТЕЛ, 2015. – 58 с.

6. Mondello C., Нернер G. F., Williamson R. A. Прогноз ASPRS по развитию рынка ДЗЗ на ближайшие 10 лет // ГИС-Ассоциация [Электронный ресурс]. 30.11.2017. – URL: <http://www.gisa.ru/files/file174.doc> (дата обращения 30.11.2017).

7. Кузнецов В. А. Структура и свойства наземных объектов на изображениях РСА в задачах распознавания // Телекоммуникации. 2012. № 10. С. 31-38.

8. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Системный подход к решению проблемы автоматического дешифрирования радиолокационных изображений наземных объектов в реальном масштабе времени // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 5-15.

9. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Автоматическое обнаружение нефтяных загрязнений по данным спутниковых радиолокационных станций с синтезированной апертурой антенны // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 10. С. 20-27.

10. Коршунов Н. А. Обзор состояния рынка беспилотных средств, которые могут быть задействованы для охраны лесов от пожаров // ФБУ «Авиалесоохрана» [Электронный ресурс]. 19.10.2016. – URL: <http://www.aviales.ru/files/documents/2009/07/obzor%20rynka%20bla.doc> (дата обращения 19.10.2016).

11. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Обзор малогабаритных радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны и непрерывным излучением для беспилотного летательного аппарата ближнего действия // Академические Жуковские чтения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 21-26.

12. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Обоснование требований к РСА беспилотных летательных аппаратов ближнего действия // Молодежные чтения памяти Ю. А. Гагарина: сборник статей по материалам Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – С. 29-32.

13. ImSAR NanoSAR C Data and specification sheet // ImSAR [Электронный ресурс]. 19.11.2014. – URL: http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Jul2014.pdf (дата обращения 19.11.2014).

14. SlimSAR // ARTEMIS [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.artemisinc.net> (дата обращения 03.12.2017).

15. Long D. G. The BYU microSAR System // Microwave Earth Remote Sensing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR_descrip3.pdf (дата обращения 03.12.2017).

16. M. de Wit J. J., Hoogeboom P., Otten M. P. G. Feasibility Study Of An FM-CW SAR System // CEOS-SAR [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f_papers/ceos024.pdf (дата обращения 03.12.2017).

17. Aguasca A., Acevo-Herrera R., Broquetas A., Mallorqui J. J., Fabregas X. ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR Sensors for Small UAVs // Sensors. 2013. № 13. P. 3204-3216.

18. Edwards M., Madsen D., Stringham C., Margulis A., Wicks B., Long D. A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2008. P. 514-517.

19. Meta A., de Wit J. J. M., Hoogeboom P. Development of a High Resolution Airborne Millimeter Wave FM-CW SAR // European Radar Conference. Amsterdam, 2004.

20. Tsunoda S. I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar // Sandia [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: http://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf (дата обращения 03.12.2017).

21. MiniSAR – Aerial detection and tracking of moving targets // Metasensing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <https://www.metasensing-group.com/minisar> (дата обращения 03.12.2017).

22. NuSAR: NRL UAV Synthetic Aperture Radar // Space Dynamics Laboratory [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.spacedynamics.org/downloads/nusar.pdf> (дата обращения 03.12.2017).

23. Fransson J. E. S., Walter F., Ulander M. H. Estimation of Forest Parameters Using CARABAS-II VHF SAR Data // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 2. P. 720-728.

24. Henke D., Barmettler A., Meier E. Bistatic Experiment With UWB-CARABAS Sensor – First Results and Prospects of Future Applications [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/652f/4fe4865257bdbbc774a0d07dc62d90356323.pdf> (дата обращения 03.12.2017).

25. The Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar System // PENTEK Setting the Standart Signal Processing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: http://www.pentek.com/applications/17_1/RadarSystem.cfm (дата обращения 03.12.2017).

26. Rizki Akbar P., Sumantyo J. T., Kuze H. CP-SAR UAV Development // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. Vol. 38. No. 8. P. 203-208.

27. Мониторинговый комплекс с беспилотными вертолетами БПВ-500 // Радар ММС [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product_3_2 (дата обращения 03.12.2007).

28. Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. 2009. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/mac/oct09/5/text.html> (дата обращения 03.12.2007).

29. Малогабаритная бортовая радиолокационная станция двойного назначения «Когитор» (МФ2) // Московский авиационный институт [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319 (дата обращения 03.12.2017).

30. Лихачев В. П., Пашук М. Ф. Многодиапазонная малогабаритная РЛС с синтезированной апертурой антенны. Принципы построения и функционирования, перспективы // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VI общероссийской научно-технической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2016. – С. 261-271.

31. Канащенков А. И. Интеллект для беспилотника // Авиапанорама. 2012. № 4. С. 11-13.

32. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Формирование частотно-модулированных сигналов малогабаритных РСА // Молодежные чтения памяти Ю. А. Гагарина. Перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник статей по материалам II Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 156-162.

33. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Малогабаритная радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: аннотации работ 7 Межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов. – М.: МАИ, 2015. – С. 155.

34. Кузнецов В. А., Арестов Е. Ю. Блок цифровой обработки сигналов РСА на ПЛИС Xilinx // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 27-31.

35. Кузнецов В. А., Овчинников К. А. Цифровой согласованный фильтр РСА на ПЛИС Xilinx // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 221-225.

36. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Структура и элементная база малогабаритной радиолокационной станции С-диапазона // Авиакосмические

технологии: тезисы XVIII Международной научно-технической конференции и школа молодых ученых, аспирантов и студентов. – Воронеж: Элист, 2017. – С. 44-48.

37. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Опыт и основные результаты разработки малогабаритных радиолокаторов для беспилотных летательных аппаратов // Современное состояние и перспективы развития систем связи и РТО в управлении авиацией: сборник статей VI Международной научно-технической конференции, посвященной дню образования войск связи. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 136-140.

38. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Радиолокационная станция с синтезированием апертуры и непрерывным линейно частотно-модулированным излучением // Заявка на изобретение № RU 2016121055, опубл. 01.12.2017, бюл. № 34.

39. Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data // Proc. 3rd Eur. Radar Conf. 2006. P. 9-12.

40. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1994. Vol. 32. No. 5. P. 1029-1040.

41. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Алгоритм автофокусировки радиолокационного изображения по энтропии // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 127-131.

References

1. Dorozhnaia karta AeroNet [Roadmap AeroNet] *Natsional'naia tekhnologicheskaiia initsiativa 2035* [National Technological Initiative 2035], 03 December 2017. Available at: <http://www.nti2035.ru/markets/aeronet> (accessed 03 December 2017).

2. Andreichikov A. V., Andreichikova O. N. *Sistemnyi analiz i sintez strategicheskikh reshenii v innovatike: Matematicheskie, evristicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovatsii* [System analysis and synthesis of strategic solutions in innovation: mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow, Lenand Publ., 2015. 306 p. (in Russian).

3. Kuznetsov V. A., Derevin V. V., Blednykh I. A., Starkov A. M., Stryapchev E. N. Analiz rynkov bespilotnykh letatel'nykh apparatov i radiolokatsionnykh dannykh DZZ [Analysis of the markets of unmanned aerial vehicles and radar data of remote sensing]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sbornik statey po materialam LXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the LXIII International Scientific and Practical Conference “Engineering – from theory to practice”]. Novosibirsk, 2016, no 10, pp. 7-20 (in Russian).

4. Balagurov A. A. Analiz deistvuiushchego rossiiskogo zakonodatel'stva v chasti polozhenii, svyazannykh s priemom, obrabotkoi i ispol'zovaniem dannykh DZZ [Analysis of the current Russian legislation with regard to provisions related to the reception, processing and use of remote sensing data]. 19 October 2016. Available at: <http://www.gisa.ru/file/file2968.doc> (accessed 19 October 2016) (in Russian).

5. Anpilogov V. R. *Rynok distantsionnogo zondirovaniia Zemli: industriia i servisy na rynke DZZ* [Market for Remote Sensing of the Earth: Industry and Services in the Market for Remote Sensing of the Earth]. Moscow, Visat-Tel Publ., 2015, 58 p (in Russian).

6. Mondello C., Hepner G. F., Williamson R. A. Prognoz ASPRS po razvitiuu rynka DDZ na blizhaishie 10 let [The forecast of ASPRS on development of the market of remote sensing for the next 10 years]. *GIS-Assotsiatsiia*, 30 November 2017. Available at: <http://www.gisa.ru/files/file174.doc> (accessed 30 November 2017) (in Russian).

7. Kuznetsov V. A. Struktura i svoistva nazemnykh ob"ektov na izobrazheniiakh RSA v zadachakh raspoznavaniia [Structure and properties of surface facilities in the SAR images in pattern recognition]. *Telecommunications*, 2012, no. 10, pp. 31-38 (in Russian).

8. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Sistemnyi podkhod k resheniiu problemy avtomaticheskogo deshifrirovaniia radiolokatsionnykh izobrazhenii nazemnykh ob"ektov v real'nom masshtabe vremeni [System approach to solving the problem of automatic decoding of ground-based radar images in real time]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2017, no. 2, pp. 5-15 (in Russian).

9. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Avtomaticheskoe obnaruzhenie neftianyykh zagriaznenii po dannym sputnikovyykh radiolokatsionnykh stantsii s sintezirovannoi aperturoi anteny [Automatic detection of oil pollution from satellite synthetic aperture radar]. *Herald of computer and information technologies*, 2017, no. 10, pp. 20-27 (in Russian).

10. Korshunov N. A. Obzor sostoianiia rynka bespilotnykh sredstv, kotorye mogut byt' zadeistvovany dlia okhrany lesov ot pozharov [Overview of the market situation of unmanned vehicles that can be used to protect forests from fires]. *FBU «Avialesookhrana»*, 19 October 2016. Available at: <http://www.aviales.ru/files/documents/2009/07/obzor%20rynka%20bla.doc> (accessed 19 October 2016) (in Russian).

11. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Obzor malogabaritnykh radiolokatsionnykh stantsii s sintezirovaniem apertury anteny i nepreryvnym izlucheniem dlia bespilotnogo letatel'nogo apparata blizhnego deistviia [Overview compact synthetic aperture radar and a continuous radiation for a drone near field]. *Akademicheskie Zhukovskie chteniia: sbornik nauchnykh statey po materialam II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Academic Zhukovsky readings"]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2015, vol. 1, pp. 21-26 (in Russian).

12. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Obosnovanie trebovaniy k RSA bespilotnykh letatel'nykh apparatov blizhnego deistviia [Justification of the requirements for SAR of near-range unmanned aerial vehicles]. *Molodezhnye chteniia pamiati Iu. A. Gagarina: sbornik statey po materialam Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kursantov i slushateley* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Youth readings in memory of Yu. A. Gagarin"]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2014, pp. 29-32 (in Russian).

13. ImSAR NanoSAR C Data and specification sheet. *ImSAR*, 03 December 2017. Available at: http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Jul2014.pdf (accessed 19 November 2014).

14. SlimSAR. *ARTEMIS Inc*, 03 December 2017. Available at: <http://www.artemisinc.net> (accessed 03 December 2017).

15. Long D. G. The BYU microSAR System. *Microwave Earth Remote Sensing*, 03 December 2017. Available at: http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR_descrip3.pdf (accessed 03 December 2017).

16. M. de Wit J. J., Hoogeboom P., Otten M. P. G. Feasibility Study Of An FM-CW SAR System. *CEOS-SAR Conf*, 03 December 2017. Available at: ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f_papers/ceos024.pdf (accessed 03 December 2017).

17. Aguasca A., Acevo-Herrera R., Broquetas A., Mallorqui J. J., Fabregas X. ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR Sensors for Small UAVs. *Sensors*, 2013, no. 13, pp. 3204-3216.

18. Edwards M., Madsen D., Stringham C., Margulis A., Wicks B., Long D. A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, pp. 514-517.

19. Meta A., de Wit J. J. M., Hoogeboom P. Development of a High Resolution Airborne Millimeter Wave FM-CW SAR. *European Radar Conference*, Amsterdam, 2004.

20. Tsunoda S. I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar. *Sandia*, 03 December 2017. Available at: http://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf (accessed 03 December 2017).

21. MiniSAR – Aerial detection and tracking of moving targets. *Metasensing*, 03 December 2017. Available at: <https://www.metasensing-group.com/minisar> (accessed 03 December 2017).

22. NuSAR: NRL UAV Synthetic Aperture Radar. *Space Dynamics Laboratory*, 03 December 2017. Available at: <http://www.spacedynamics.org/downloads/nusar.pdf> (accessed 03 December 2017).

23. Fransson J. E. S., Walter F., Ulander M. H. Estimation of Forest Parameters Using CARABAS-II VHF SAR Data. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 2000, vol. 38, no. 2, pp. 720-728.

24. Henke D., Barmettler A., Meier E. Bistatic Experiment With UWB-CARABAS Sensor – First Results and Prospects of Future Applications. Available

at: <https://pdfs.semanticscholar.org/652f/4fe4865257bdbbc774a0d07dc62d90356323.pdf> (accessed 03 December 2017).

25. The Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar System. *PENTEK Setting the Standart Signal Processing*, 03 December 2017. Available at: http://www.pentek.com/applications/17_1/RadarSystem.cfm (accessed 03 December 2017).

26. Rizki Akbar P., Sumantyo J. T., Kuze H. CP-SAR UAV Development. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, vol. 38, part 8, pp. 203-208.

27. Monitoringovyi kompleks s bespilotnymi vertoletami BPV-500 [Monitoring complex with unmanned helicopters BPV-500]. *Radar MMC*, 03 December 2017. Available at: http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product_3_2 (accessed 03 December 2017) (in Russian).

28. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Iu. Aviatsionnye mobil'nye malogabaritnye radiolokatory s sintezirovannoi aperturoi semeistva «Kompakt» (printsipy realizatsii i opyt primeneniia) [Aeronautical mobile compact synthetic aperture radar "Compact" family (the principles of the implementation and application of the experience)]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2009, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/mac/oct09/5/text.html> (accessed 03 December 2017) (in Russian).

29. Malogabaritnaia bortovaia radiolokatsionnaia stantsiia dvojnogo naznacheniiia «Kogitor» (MF2) [The small-sized on-board radar station of dual purpose "Kogitor" (MF2)]. *Moscow Aviation Institute*, 03 December 2017. Available at: https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319 (accessed 03 December 2017) (in Russian).

30. Likhachev V. P., Pashuk M. F. Mnogodiapazonnaia malogabaritnaia RLS s sintezirovannoi aperturoi anteny. Printsipy postroeniia i funktsionirovaniia, perspektivy [Multi-band small-sized radar with synthesized antenna aperture. Principles of construction and operation, prospects]. *Obmen opytom v oblasti sozdaniia sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem: materialy VI obshcherossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference "Exchange of experience in the field of creating ultra-wideband radio-electronic systems"]. Omsk, Omsky Gosudarstvenny Tekhnicheskyy Universitet, 2016, pp. 261-271 (in Russian).

31. Kanashchenkov A. I. Intellect dlia bespilotnika [Intelligence for the drones]. *Aviapanorama*, 2012, no. 4, pp. 11-13 (in Russian).

32. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Formirovanie chastotno-modulirovannykh signalov malogabaritnykh RSA [Formation of frequency-modulated signals of small SAR]. *Perspektivy razvitiia aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniia: sbornik statey po materialam II Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kursantov i slushateley* [Proceedings of the 2nd All-Russian Conference "Molodezhnye chteniia pamiati Iu.A. Gagarina"]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2015, pp. 156-162 (in Russian).

33. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Malogabaritnaia radiolokatsionnaia stantsiia s sintezirovannoi aperturoi anteny [The compact synthetic aperture radar].

Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki: annotatsii rabot 7-i Mezhotraslevogo molodezhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh rabot i proektov [Youth and the future of aviation and cosmonautics: annotations of the works of the 7th Inter-branch Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2015, pp. 155 (in Russian).

34. Kuznetsov V. A., Arestov E. Iu. Blok tsifrovoy obrabotki signalov RSA na PLIS Xilinx [The digital SAR signal processing block based on FPGA Xilinx]. *Akademicheskiye Zhukovskiye chteniya. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya: sbornik nauchnykh statey po materialam III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 3th All-Russian Scientific and Practical Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects for the development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2016, pp. 27-31 (in Russian).

35. Kuznetsov V. A., Ovchinnikov K. A. Tsifrovoy soglasovannyi fil'tr RSA na PLIS Xilinx [Digital matched SAR filter of Xilinx FPGA]. *Akademicheskiye Zhukovskiye chteniya. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya: sbornik nauchnykh statey po materialam III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 3th All-Russian Scientific and Practical Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects for the development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2016, pp. 221-225 (in Russian).

36. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Struktura i elementnaia baza malogabaritnoi radiolokatsionnoi stantsii C-diapazona [The structure and element base of the small-scale C-band radar]. *Aviakosmicheskie tekhnologii: tezisy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkola molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Abstracts of the 18th International Scientific and Practical Conference “Aerospace Technologies”]. Voronezh, Elist Publ., 2017, pp. 44-48 (in Russian).

37. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Opyt i osnovnye rezul'taty razrabotki malogabaritnykh radiolokatorov dlia bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Experience and main results of development of small-size radars for unmanned aerial vehicles]. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia sistem svyazi i RTO v upravlenii aviatsiei: sbornik statey VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy dnyu obrazovaniya voysk svyazi* [Proceedings of the 6th International Conference “Current state and prospects of the development of communication systems and radio engineering support in aviation management”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2017, pp. 136-140 (in Russian).

38. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Radiolokatsionnaia stantsiia s sintezirovaniem apertury i nepreryvnym lineino chastotno-modulirovannym izlucheniem [Synthetic Aperture Radar with Continuous Linearly Frequency-

Modulated Radiation]. Patent Russia, no. RU 2016121055. Publish. 01.12.2017, bul. no. 34 (in Russian).

39. Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data. *Proc. 3rd Eur. Radar Conf*, 2006, pp. 9-12.

40. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 1994, vol. 32, no. 5, pp. 1029-1040.

41. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Algoritm avtofokusirovki radiolokatsionnogo izobrazheniia po entropii [The autofocusing radar image algorithm by entropy]. *Akademicheskie Zhukovskie chteniia. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia aviatsionnogo radioelektronnoho oborudovaniia: sbornik nauchnykh statey po materialam IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 4th All-Russian Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects of development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2017, pp. 127-131 (in Russian).

Статья поступила 06 декабря 2017 г.

Информация об авторах

Кузнецов Виктор Андреевич – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: системный анализ, радиолокация, распознавание образов. E-mail: kuzzvictor@mail.ru

Гончаров Сергей Анатольевич – курсант факультета авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: радиолокация. E-mail: sergius36you@gmail.com

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

Structural-Parametric Synthesis of Short-Range Unmanned Aerial Vehicle Small-Sized SAR

V. A. Kuznetsov, S. A. Goncharov

Purpose. One of the perspective direction for the development of unmanned aviation is the development of short-range unmanned aerial vehicles (UAV), used at high and medium altitudes with a long flight endurance. The UAV airborne sensors under difficult monitoring conditions are ineffective, which leads to the impossibility of ensuring continuity of monitoring. To exclude the dependence on the time of day and weather conditions, it is necessary to use the radar module of payload UAV. However, because of mass-size equipment characteristics and power consumption hard limitations for UAV, the location of existing synthetic aperture radars (SAR) is impossible, which makes the work relevant. Because of SAR development is interdisciplinary, the one possible way to solve this class problems is system analysis. When designing a universal radar module for short-range UAV, it is necessary to develop such a SAR construction scheme, which

will provide the possibility of its technical implementation with minimal mass-size characteristics, and the maximum resolution should be achieved. The purpose of the work is to increase the share of Russian participation in the remote sensing radar data market by using a new radar sensor on the UAV with effective secondary trajectory signal processing under conditions of high a priori uncertainty. **Methods.** The problem solution of the small-size SAR developing is based on the structural synthesis of the scheme for constructing it using the minimax criterion "mass-size characteristics-resolution", while the radar image high resolution is achieved by using the resulting of parametric synthesis the quasioptimum radar image formation and autofocusing algorithms with minimal phase estimate error and minimal image entropy criteria. **Novelty.** The novel elements in this paper is the SAR optimal structure, which additionally includes a distance compensation filter, a control controller and an on-board microcomputer allowing to increase the signal-to-noise ratio of the signal reflected from targets at long ranges, to increase the modulation stability of the signal frequency with irregular modulation characteristic distortions of the linear frequency modulated (LFM) signal generator due to a change in the operating temperature and voltage range, and also to form a high resolution radar image directly on UAV board and remote control the modes of the SAR operations. **Results.** Using synthesized on the basis of the system approach and presented structure of small-size SAR and quasioptimal radar image formation and autofocusing algorithms, it is possible to realize a universal radar module for short-range UAV with a payload mass of up to 5 kg with the trajectory signal processing directly on board, which significantly reduces the consumer equipment cost. The proposed structural SAR scheme is implemented in digital and radio frequency printed circuit boards. The radio frequency part transmits the signal in the band of operating frequencies 5100-6000 MHz, receive and primary processing of the trajectory signal. The digital part is designed to form supply voltages and control the elements of the structural circuit. In the on-board microcomputer, a secondary processing of the received signal is carried out, including the radar image formation and autofocus with a resolution of up to 0.19 m. **Practical relevance.** The of presented solutions complex is proposed to be implemented in a universal short-range UAV radar module form that allows for real monitoring continuity and, ultimately, to take priority positions in the world remote sensing market in the radar data segment obtained with HALE / MALE type UAV.

Key words: remote sensing, system analysis, synthetic aperture radar, linear frequency-modulated signal, radar image, autofocus, unmanned aerial vehicle.

Information about Authors

Viktor Andreevich Kuznetsov – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Airborne Electronic Equipment. Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation. Field of research: system analysis, radiolocation, pattern recognition. E-mail: kuzzvikt@mail.ru

Sergey Anatolevich Goncharov – Cadet. Faculty of Aviation Radioelectronic Equipment. Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation. Field of research: radiolocation. E-mail: sergius36you@gmail.com

Address: Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevikov st, 54a.