

Экспериментальная двухчастотная РСА ДЗЗ высокого разрешения: технический облик и результаты летных испытаний

М.Е. Ровкин¹, Р.В. Ермаков², М.С. Самулеев¹, И.В. Дьяков², М.Ю. Достовалов²

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 40.

E-mail: mikhail.rovkin@tusur.ru

² Научно-исследовательский институт точных приборов, 127490, Российская Федерация, г. Москва, ул. Декабристов, владение 51

E-mail: romkis.ermakov@mail.ru

Описан прототип двухчастотной авиационной радиолокационной станции с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли, пригодной для применения на легкомоторных и беспилотных летательных аппаратах. Рассмотрены концепция системы, основные технические решения и достигнутые результаты по созданию бортовой аппаратуры. Приведены результаты летных испытаний, проведенных летом и зимой 2019 г. и характеристики радиолокационной съемки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, синтезированная апертура, бортовая радиолокационная станция, высокое пространственное разрешение

High-resolution experimental dual-frequency remote sensing SAR: technical appearance and flight test results

M.E. Rovkin¹, R.V. Ermakov², M.S. Samuleev¹, I.V. Djakov², M.Yu. Dostavalov²

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050.

² Research Institute of Precision Instruments, 51, Dekabristov str., Moscow, Russia, 127490.

The prototype of a two-frequency aviation synthesized aperture radar for remote sensing of the Earth, applicable on light-engine and unmanned aerial vehicles, is described. The concept of the system, the main technical solutions and the achieved results in the creation of on-board equipment are considered. The results of flight tests conducted in the summer and winter of 2019 and the characteristics of the radar survey are presented.

Keywords: remote sensing, synthesized aperture, onboard radar, high spatial resolution

Введение

Наиболее важным показателем любой радиолокационной системы с синтезированной апертурой (РСА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а экспериментальной РСА ДЗЗ в особенности, является ее информативность [1]. Повышение информативности напрямую связано с ростом пространственного разрешения формируемого РСА радиолокационного изображения, а также одновременное ДЗЗ на нескольких существенно различных несущих частотах. Необходимость в новой авиационной радиолокационной РСА стала понятна с расширением в конце 2015 г. Всемирной Конференцией по Радиосвязи выделенного для ДЗЗ участка спектра в X-диапазоне с 600 до 1200 МГц [2], поскольку зондирующий сигнал с расширенной вдвое шириной спектра позволяет повысить пространственное разрешение радиолокационного изображения также вдвое.

В статье приведены результаты проекта по разработке и исследованию новой двухчастотной радиолокационной станции дистанционного зондирования Земли,

предназначенной для применения на платформах легкомоторной и беспилотной авиации.

Основная цель и участники проекта

Главной целью проекта было создание макетов двухдиапазонных РСА ДЗЗ, работоспособных на летательных аппаратах легкомоторной (ЛА) и беспилотной авиации (БПЛА), обеспечивающих повышение качества синтезируемых РСА радиолокационных изображений с предельной пространственной разрешающей способностью не более 0,3 м в Х-диапазоне и не более 0,5 м в L-диапазоне, а также имеющих массу не более 12 кг на комплект бортовой радиолокационной аппаратуры каждого диапазона (без учета веса бортовых ЭВМ). Важно, что были проведены отдельные летные испытания обоих образцов РСА.

Повышение пространственного разрешения по наклонной дальности осуществляется за счет расширения ширины спектра зондирующего сигнала до 1000 МГц в Х - диапазоне (соответственно до 0,3 – 0,15 м) и до 300 МГц в L - диапазоне (соответственно, до 0,5 м), а разрешения по азимуту – увеличением количества когерентно обрабатываемых импульсов (увеличение времени синтеза).

При росте пространственного разрешения падает радиометрическое разрешение, один из основных параметров РЛИ при анализе пространственно распределенных объектов. Для авиационного применения РСА, где отношение сигнал/шум обычно велико, указанный недостаток не критичен. Повышение РЛ контраста цели в данном случае возможно за счет повышения энергетики РСА путем повышения средней мощности облучения (повышение импульсной мощности сигнала и/или снижение скважности сигнала) и повышения коэффициента усиления антенны.

Тематика РСА является одной из основных для НИИ ТП (www.niitp.ru) – одного из флагманов космической отрасли в РФ. Помимо традиционной для НИИ ТП сферы космических АФАР с 1990-х гг. велись разработки авиационной РСА. В основе концепции экспериментальных РСА семейства «Компакт» – разделение процессов съемки и обработки, подобно космическим системам и достижение предельных показателей [3]. Система «Компакт» была создана в начале 2000-х гг. в кооперации НИИ ТП (алгоритмы и ПО, системный интегратор), АО НПФ Микран (электроника СВЧ) и других организаций. К концу 2015 г. развитие РСА Компакт завершилось внедрением в нее бортовой навигационной системы с функциями миронавигации, что позволило успешно установить ее на вертолет [4].

Технические требования к системе и основные проблемы реализации.

Режимы полета ЛА – носителя РСА, были ограничены по высоте – в пределах от 0,1 до 6,0 км над земной поверхностью, максимальной высотой полета над уровнем моря – 6 км, по скорости – в пределах от 80 до 400 км/ч, по изменению скорости ЛА не более 5 %, по ускорению не более 0,1g (0,98 м/с²) по каждому из направлений, по точности поддержания угловой ориентации ЛА по крену, углам сноса и тангажа не хуже $\pm 2^\circ$.

Заданные параметры радиолокационной съемки были следующими: максимальный размер района мониторинга 30×30 км²; максимальный размер полосы захвата в каждом радиолокационном канале 8 км, диапазон углов визирования в вертикальной плоскости 25-75 °град, диапазон рабочих дальностей 1000 ... 10000 м.

Аппаратура РСА структурно разделена на бортовой и наземный сегменты. Бортовой сегмент включал приемо-передатчики и антенны Х- и L- диапазонов, два бортовых вычислителя и аппаратуру микронавигации. Наземный сегмент РСА состоял из пункта обработки данных радиолокационного зондирования, который должен был быть мобильным. Такое разделение связано с выполнением фокусировки

радиоголограмм не в ходе полета, а на земле, потому что производительность существующих бортовых ЭВМ не позволяет вести обработку со скоростью, сравнимой со скоростью записи первичных данных РЛ изображения.

Энергетический потенциал был задан требованиями к зондирующему сигналу. В обоих диапазонах использовался сложный радиоимпульсный сигнал с внутриимпульсной ЛЧМ. При этом были заданы максимальная длительность радиоимпульса 60 мкс и минимальная скважность 20. Максимальная импульсная выходная мощность на входе антенны была задана не менее 250 Вт. Очевидно, требования по увеличению энергетического потенциала и ограничению массы РЛС противоречивы.

Необходимость перестройки всех узлов РСА из-за расширения ширины спектра зондирующего сигнала (в т.ч. приемопередатчиков, оборудования цифровой обработки и генерации радиолокационных сигналов, а также антенн), позволяет назвать результат проекта полностью новой разработкой.

Всего было построено два макета РСА ДЗЗ, отличающихся комплектами бортовой приемо-передающей аппаратуры СВЧ, а также ПО бортовых и наземных вычислителей.

Бортовые РЛС и аппаратура ЦОС в обоих макетах использовались одинаковые, т.к. являются серийными покупными изделиями.

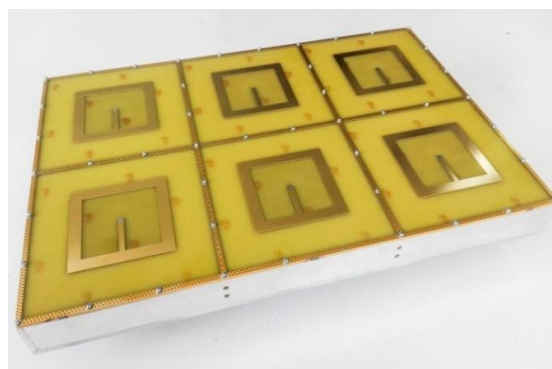
Необходимость одновременного решения противоречивых задач повышения энергетики РСА при одновременном расширении ширины спектра зондирующего сигнала при ограничении по массе привела к применению в РСА ДЗЗ новых технологий. Раскроем технические особенности основных узлов РСА. Из-за широкой относительной полосы частот зондирующего радиолокационного сигнала была выбрана схема частото-образования с прямым преобразованием с векторными квадратурными модулятором и демодулятором СВЧ несущей [5].

Антенная система новой авиационной РСА

Для РСА были разработаны несколько антенн. В X-диапазоне разработаны малогабаритная легкая (650 г) зеркальная антенна (рис. 1,а) и антенна с косекансной формой диаграммы направленности (рис.1,б). Габариты компактной антенны составляют 142×256×х167 мм, ее масса 650 г.



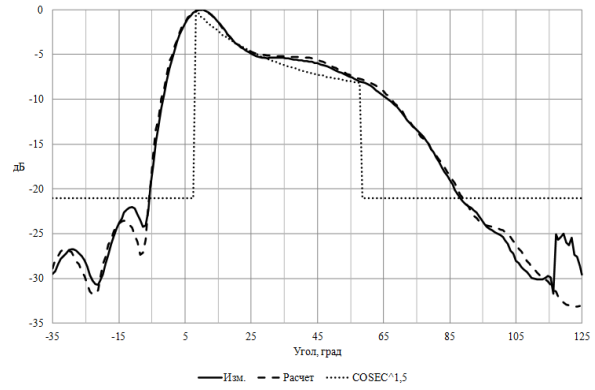
а)



б)

Рис. 1 – Внешний вид антенн РСА: а) легкая зеркальная антенна X-диапазона, б) антенна L-диапазона.

Масса антенны X-диапазона с диаграммой косеканс-квадрат 2,5 кг. На рис.2.б показана форма ДН в угломестной E- плоскости антенны X-диапазона косеканс-квадрат.



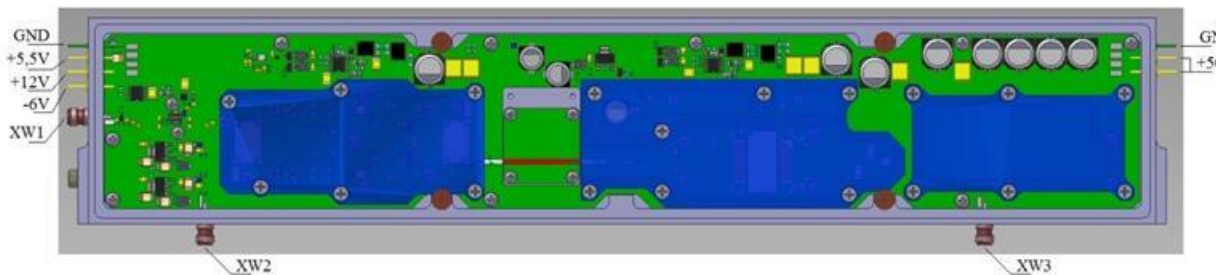
а)

б)

Рис. 2. Антенна с формой диаграммы направленности с косеканс-квадрат: а) внешний вид б) характеристики направленности в вертикальной плоскости (справа).

Приемо-передающие тракты СВЧ РСА

Именно мощные выходные каскады определяют массу бортовых приемо-передатчиков РСА. Снижение массогабаритных показателей обеспечено использованием выходных транзисторов GaN в выходных каскадах передатчиков обоих диапазонов. Передатчик X-диапазона имеет блочно-модульную конструкцию и построен по схеме суммирования мощности множества каскадов небольшой мощности [6]. Передатчик L-диапазона (рис.3) имеет однотактный выходной каскад на мощном GaN транзисторе.



а)



б)

Рис. 3. Конструкция мощного оконечного усилителя L-диапазона из состава макета двухчастотной РЛС высокого разрешения с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли: а) вид сверху(крышка снята); б) вид снизу.

Бортовая аппаратура управления РСА и цифрового формирования сигналов излучения и обработки радиолокационного отклика

Цифровое ядро РСА было реализовано на основе импортных промышленных компьютеров в конструктиве Compact PCI (поставщик АО «RTSoft»), снабженных

отечественными модулями расширения ЦОС (поставщик «АО Инструментальные системы») [7]. На рис. 4 показан внешний вид унифицированного бортового вычислителя и его модулей, выполняющих функции ЦОС.



Рис. 3. Внешний вид унифицированного бортового вычислителя с установленными модулями расширения ЦОС

Программное обеспечение бортового вычислителя было разработано специалистами НИИ ТП. Программирование модуля ЦОС выполнено производителем АО «Инструментальные системы».

Бортовая микронавигационная система

Новый навигационный приемник позволял определять координаты в темпе 50 отсч./сек с точностью 3,3 мм с.к.з., а также угол сноса. Датчики включают миниатюрные 3D гироскоп, 3D акселерометр и 3D магнетометр (компас). На рисунке 4 справа показан внешний вид платы навигационного приемника с функциями микронавигации. Программное обеспечение в реальном времени непрерывно решает навигационную задачу определения собственных параметров по нескольким пространственным и угловым координатам. Сложность реализованных алгоритмов характеризуется девятнадцатью функционирующими фильтрами Калмана.

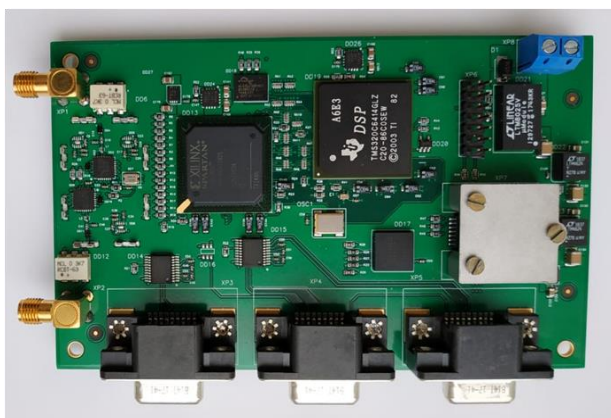


Рис.4. Внешний вид бортового навигационного приемника с функциями микронавигации.

Система фокусировки радиоголограмм

Представляла собой высокопроизводительный ноутбук с 8-поточным процессором с ОЗУ 64 Гб. Программное обеспечение также разработано специалистами НИИ ТП.

Первый этап летных испытаний РСА ДЗЗ летом 2019 г.

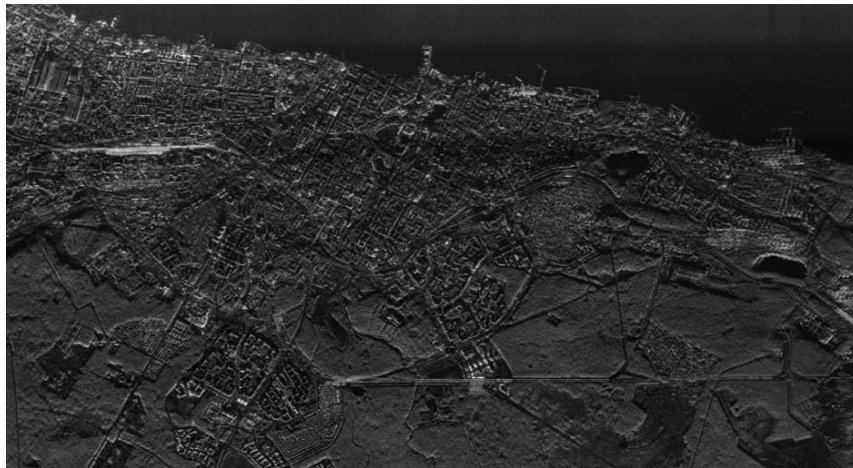
Испытания проводились с использованием самолета-лаборатории Ил-18Д в конце июня - начале июля 2019 г. в а/п Ухта и Петрозаводск и на перелёте между ними. На рисунке 4 показана бортовая аппаратура РСА ДЗЗ, установленная в переднем салоне

летающей лаборатории. Обе антенны располагались в салоне и работали на изучение-прием через иллюминаторы ЛА.

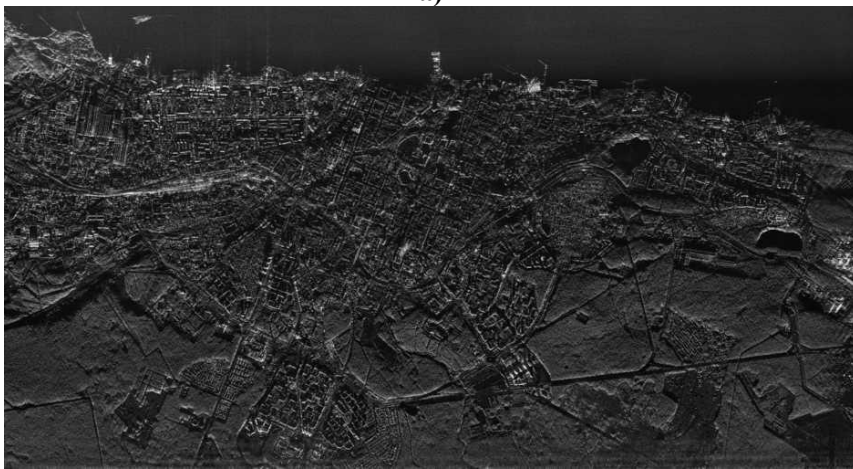


Рис. 5 .Аппаратура РСА Д33 на борту летающей лаборатории. Слева комплект Х-диапазона, справа комплект L-диапазона. Бортовые ЭВМ наверху приемо-передатчиков.

На первом макете РСА Д33 было достигнуто минимальное целевое предельное разрешение 0,3 и 0,5 м в X- и L- диапазоне, соответственно, выявлены недостатки аппаратуры, получено более 100 радиолокационных изображений (РЛИ) высокого качества. На рисунке 5 показаны РЛИ г. Петрозаводск в X- и L-диапазоне, полученные в ходе летних полетов.



а)



б)

Рис. 6. Радиолокационные изображения г. Петрозаводск, полученные в ходе летних испытаний прототипа РСА летом 2019 г: а) X-диапазон, б) L-диапазон.

Второй этап летных испытаний зимой 2019 г.

В ходе второго этапа испытательных полетов в а/п Талаги (г. Архангельск) в конце ноября 2019 г. испытывался второй макет РСА и две версии ПО бортовой аппаратуры РСА. Аппаратура РСА была пространственно разнесена внутри ЛА– комплект Х-диапазона был смонтирован в переднем (рис.6,а), а L-диапазона в заднем (рис.6, б) салонах самолета- лаборатории (рис.7) вблизи радиопрозрачной двери, в которой была установлена антенна (рис.6, в).

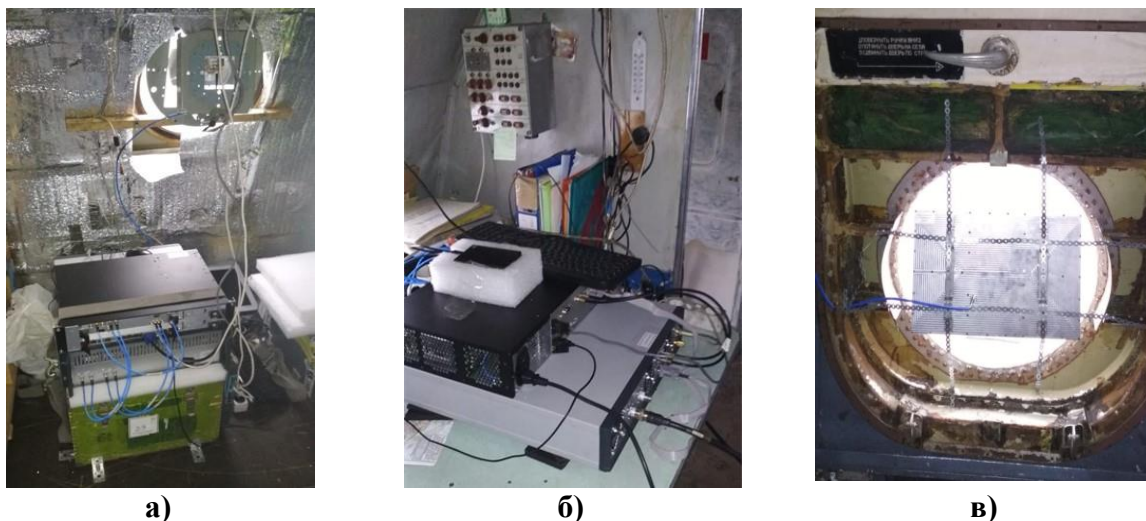


Рис. 6 .Аппаратура РСА ДЗЗ на борту летающей лаборатории зимой 2019 г.: а) комплект Х-диапазона, включая антенну; б) комплект L-диапазона; в)антенна L-диапазона.



Рис.7 Внешний вид самолета- лаборатории ИЛ-18Д б/н 75713 в а/п Салаги. Ноябрь 2019г.

С первой версией ПО в ходе полетов Архангельск - Нарьян Мар - Архангельск были подтверждены полученные летом 2019 г. результаты и зафиксировано отсутствие выявленных летом проблем с аппаратурой L-диапазона и проведена РЛ азросъемка с высоты до 6 км. В ходе второй части полетов с новым ПО было достигнуто ожидаемое предельное разрешение 21 см в X- диапазоне. Пример РЛ изображений со вторых летных испытаний показан на рисунках 8 и 9. На рисунке 8 приведены радиолокационные изображения г Северодвинск в X-диапазоне.

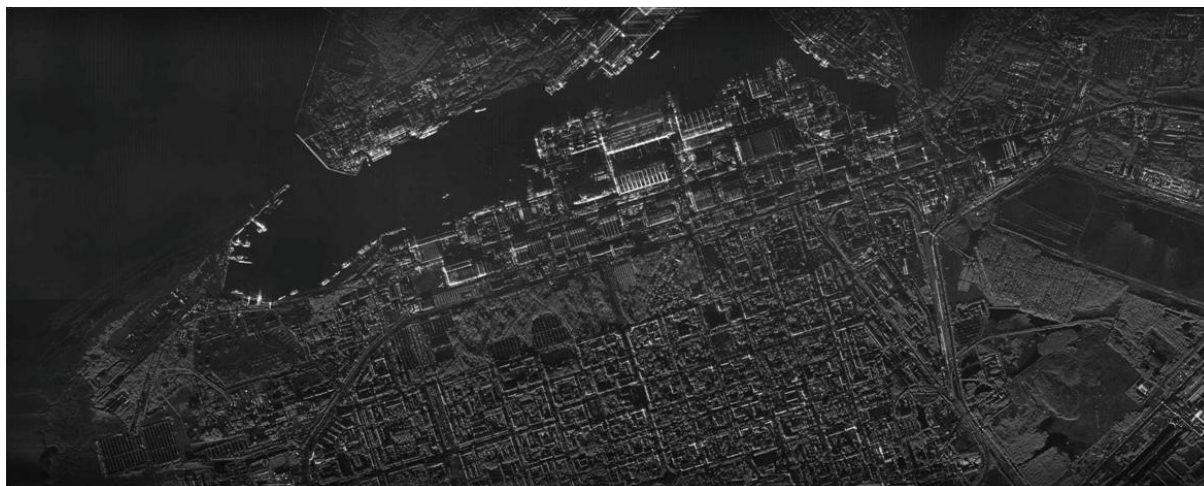


Рис.8. Радиолокационное изображение бухты г. Северодвинск, ноябрь 2019 г, X диапазон, разрешение 21 см,

На РЛИ аэродрома г.Нарьян-Мар (рис.9,а) хорошо видны самолеты Ан-2. Изображения железнодорожных путей (рис.9,б) при детальном рассмотрении представляли собой набор отражений от головок костылей рельсовых креплений, имеющих полусферическую форму. Пространственное разрешение РСА в X-диапазоне (21 см) позволило нам увидеть эту особенность.

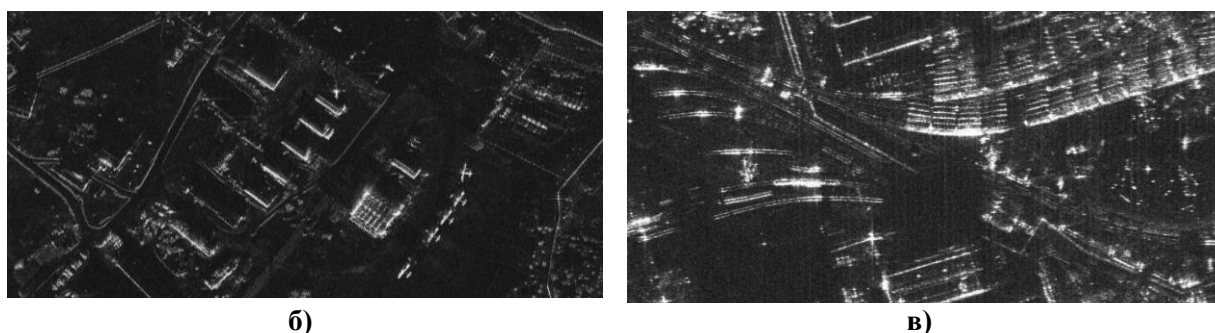


Рис. 9. Фрагменты радиолокационных изображений, полученных в ходе испытаний второго макета РСА зимой 2019 г: а) а/п Нарьян-Мар, стоянка Ан-2, X-диапазон, ширина спектра сигнала 600 МГц разрешение 27 см.б) Северодвинск, ж/д узел: X-диапазон, ширина спектра сигнала 1 ГГц. Разрешение 21 см

Выводы

В ходе выполнения проекта был создан и испытан прототип РСА ДЗЗ для легкомоторной и беспилотной авиации. Достигнутые показатели новой РСА существенно превысили требования на проектирование: предельное разрешение в X-диапазоне было 0,21 м (в L-диапазоне 0.5 м), масса аппаратуры L-диапазона составила 8,4 кг (в X-диапазоне 12 кг), при ширине полосы обзора при максимальном разрешения 8,4 км.

К моменту написания данной работы университетский проект уже получил продолжение. В 2020 г. успешно завершена работа «Акватория» по заказу фонда прикладных исследований, соисполнителем которой был НИИ точных приборов. В 2021 завершается работа «Локация», выполняемая в интересах государственного заказчика силами НИИ ТП (головной исполнитель) и АО «НПФ «Микран» (соисполнитель), в ходе которой летом 2020 г были успешно проведены предварительные летные испытания.

Важной тенденцией развития авиационных РСА является продвижение правительством РФ применения БПЛА для решения практических задач, примером является проект «Тайга» по созданию опытного района эксплуатации БПЛА, реализуемый по инициативе Томской областной Администрации при участии ФПИ [8-11]. Актуальным становится создание более компактной версии SAR с сохранением разрешения, но с уменьшенным потолком полета и, следовательно, с уменьшенной максимальной дальностью.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2020-0039 от 01.03.20.. Измерения проведены с использованием оборудования ЦКП «Импульс», проект № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. ID RFMEFI62119X0029.

Литература

1. Modern Tendencies in the Development of Airborne Synthesized Aperture Radars for Remote Sensing of the Earth. 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – P. 439 – 443. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545651.
2. World Radiocommunication Conference 2015 (WRC-15), Geneva, Switzerland, 2-27 November 2015 // Доступно по ссылке <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>
3. S.L. Vnotchenko, M.Yu. Dostovalov, A.V. Dyakov at al. Aviation four-band radar complex "КОМПАКТ" - features, results and development prospects. // Proceedings of the XXVIII Russian Symposium "Radar Investigations of Natural Environments», St.Petersburg, 2013, vol.1, pp. 34-44.
4. Уникальный вертолетный радиолокатор на основе космических технологий представили на «Армии-2016». 6 сентября 2016 г. РКС – Российские космические системы // Доступно по ссылке <http://russianspacesystems.ru/2016/09/06/vertoletnyy-radiolokator-kompakt-4/>
5. Гусев А.Н., Рыжов Ф.В., Самулеев М., Ровкин М.Е. Приемо-передающий тракт с расширенным частотным диапазоном для РСА с повышенным разрешением. //Crimico'2018. Материалы конференции. – С. 1749-1754.
6. Shabash, A V, Komendantenko A V., Rovkin M E Modular Power Amplifier for Transmitter of X-band Aircraft High Resolution SAR for Earth Remote Sensing. Proceedings - 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019, 2019, 8736590, pp. 412-415. DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736590.
7. Дьяков И.В., Ермаков Р.В. Цифровой тракт формирования и обработки сигнала РСА нового поколения//Crimico'2018. Материалы конференции. С. 1755-1760.
8. 2015ФПИ предлагает создать в Томской области район "Тайга-1" для применения беспилотников. ТАСС 11 апреля 2019 года.// Доступно по ссылке <https://tass.ru/v-strane/6320815>
9. Томская "Тайга" обрела план развития пилотной зоны тестирования БАС Новости 12 сентября 2018 // Доступно по ссылке https://aeronet.aero/press_room/news/121683
10. Тайга. Опытный район применения беспилотных авиационных систем. Российский фонд перспективных исследований. // Доступно по ссылке <https://fpi.gov.ru/projects/fiziko-tekhicheskie-issledovaniya/tayga/>
11. В Томской области стартовал федеральный проект «Тайга» // Доступно по ссылке <https://www.tomsk.gov.ru/news/front/view/id/30811> 12июля 2020