

Предварительные результаты испытаний малогабаритной РЛС Ku-диапазона с частотно-манипулированными сигналами

А.В. Ефимов¹, В.Ю. Савостьянов², М.П. Титов¹

¹ЗАО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1, e-mail: titovmp@mail.ru; alexef73@mail.ru

²АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», 125167 г. Москва, Авиационный переулок, д.5, e-mail: v-savostyanov@yandex.ru

В докладе представлена многофункциональная малогабаритная РЛС Ku-диапазона для пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены основные режимы работы РЛС, наиболее сложным из которых является режим картографирования с синтезированной апертурой и детальным разрешением. Данный радиолокатор является одной из первых российских систем, позволяющих получать в реальном масштабе времени радиолокационное изображение поверхности с разрешением до 0,25 м. Для обеспечения такого разрешения в РСА используются частотно-манипулированные сигналы с внутримпульсной ЛЧМ и высокоточная инерциальная навигационная система. Представлены основные результаты проведенных лётных испытаний, приведены радиолокационные изображения, полученные при различных разрешениях и видах обзора.

The report presents a multifunctional small-sized Ku-band radar for manned and unmanned aerial vehicles. The main modes of radar operation are considered, the most difficult of which is the imaging mode with synthesized aperture and detailed resolution. This radar is one of the first Russian systems, allows obtaining a real-time radar image of the surface with a resolution up to 0.25 m. To ensure this resolution, SAR uses frequency-manipulated signals with intra-pulse LFM and high-precision inertial navigation system are used. The main results of the flight tests are presented, radar images obtained at different resolutions and types of review are given.

Результатом исследований путей создания многофункциональных малогабаритных бортовых РЛС (МБРЛС) для пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов [1] явилась разработка МБРЛС Ku-диапазона, включающей в себя:

- цифровой синтезатор частот и синхросигналов управления (АО «НПФ «Микран», г. Томск);
- твердотельный СВЧ-усилитель мощности (АО «НПФ «Микран», г. Томск);
- волноводно-щелевую антенную решётку (АО «БЭМЗ», г. Брянск);
- СВЧ- и ПЧ-приёмники (АО «НПФ «Микран», г. Томск);
- высокопроизводительную БЦВМ (АО «ИТМиВТ», г. Москва), состоящую из цифрового четырёхканального приёмника и центрального процессора (ЦП) на базе отечественного двухъядерного микропроцессора «Эльбрус 2С+» (ЗАО «МЦСТ», г. Москва);

- унифицированное программное обеспечение (ПО) с открытой расширяемой архитектурой (АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», г. Москва).

Головной исполнитель – МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Внешний вид МБРЛС показан на рис. 1.

Основными режимами работы МБРЛС Ku-диапазона являются:

- картографирование поверхности с реальным лучом антенны (КРТ-РЛ) или с синтезированием апертуры антенны (КРТ-СА) при полосовом, секторном или телескопическом обзоре с формированием в реальном времени радиолокационного изображения (РЛИ) подстилающей поверхности, с возможностью оперативного изменения разрешения, дальности и угла наблюдения;

- селекция наземных (надводных) движущихся целей (СНДЦ), в том числе с одновременным формированием РЛИ;
- оценка метеообстановки (МЕТЕО) с формированием РЛИ сечений метеообразований (вертикальных, горизонтальных), обнаружением и индикацией зон опасной турбулентности и опасного низковысотного «сдвига ветра»;
- измерение наклонной дальности до поверхности (ИДЗ) по угловому целеуказанию;
- информационное обеспечение полёта на малых высотах (МВП) с формированием РЛИ различных сечений рельефа местности (вертикальных, горизонтальных, плановых).

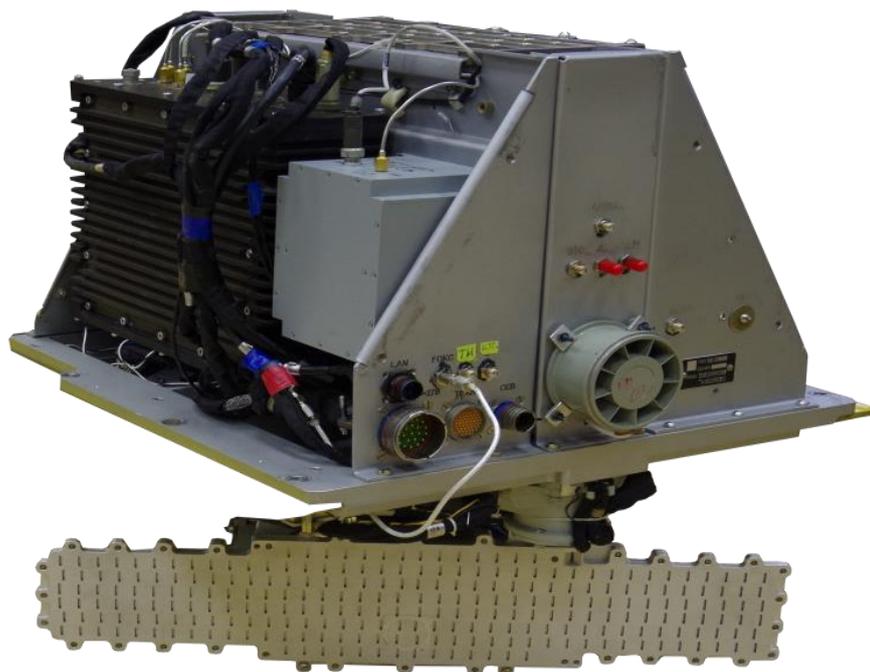


Рис. 1. Внешний вид МБРЛС.

В соответствии с требованиями по оперативному обнаружению и сопровождению объектов с выдачей целеуказания аппаратная и программная реализация МБРЛС разработана таким образом, чтобы формировать целевую информацию (РЛИ подстилающей поверхности, сечений метеообразований и рельефа местности, координаты и параметры движения объектов и т.д.) непосредственно в МБРЛС в реальном масштабе времени без вмешательства оператора. При этом в процессе формирования сообщения в его заголовках записывается информация (геодезические координаты РЛИ, азимут, межпиксельное расстояние), позволяющая упростить «привязку» РЛИ к местности или в случае необходимости из полученных изображений собрать одно большое результирующее РЛИ. Сформированная информация затем передаётся на наземный пункт управления или на экран индикатора в кабине пилота.

Большое внимание было уделено обеспечению помехозащищённости режимов, что стало возможным благодаря применению частотно-манипулированных сигналов с быстрой (от импульса к импульсу) перестройкой несущей и псевдослучайным изменением закона следования частот. При этом для повышения функциональных возможностей режимов и качества радиолокационной информации используется внутриимпульсная ЛЧМ с изменяемыми значениями девиации частоты, длительности импульсов и количества частот.

Общие характеристики МБРЛС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Общие характеристики МБРЛС

Параметр		Значение
В режиме КРТ-РЛ	разрешающая способность по дальности, м	7,5...60
	максимальная дальность (в зависимости от разрешения), км	35...65
В режиме КРТ-СА	линейная разрешающая способность, м	0,25...60
	максимальная дальность (в зависимости от разрешения), км	15...80
В режиме СНДЦ	дальность обнаружения объекта с ЭПР 5 м ² (скорость 15 км/ч), км	50
	дальность обнаружения объекта с ЭПР 1 м ² (скорость 5 км/ч), км	25
В режиме МЕТЕО	дальность обнаружения опасных метеообразований, км	150
	дальность обнаружения зон опасной турбулентности, км	40
	дальность обнаружения зон опасного «сдвига ветра», км	10
В режиме ИДЗ	дальность действия, км	0,2...12
	СКО измерения дальности, м	5...20
В режиме МВП	дальность обнаружения препятствий, км	0,2...2
	зона обзора азимут×угол места, градус	60×20
Размеры полотна антенны (Ш×В), мм		520×140
Ширина диаграммы антенны, градус:		
– по азимуту		2,3
– по наклону		11,7
Углы прокачки антенны, градус:		
– по азимуту		-95...+95
– по наклону		-30...+5
Потребляемая мощность от бортсети 27 В, Вт		400
Масса, кг		35
Средняя наработка на отказ, ч		450

Понятно, что режим КРТ-СА с детальным разрешением (до 0,25 м) является наиболее сложным с точки зрения требований не только к аппаратуре, но и к ПО МБРЛС. Однако помимо общеизвестных процедур [2], используемых при обработке принимаемых сигналов в РСА субметрового разрешения (автофокусировка, коррекция детерминированных миграций по дальности и т.д.), необходимо также задействовать алгоритмы, связанные со спецификой применения частотно-манипулированных сигналов [3, 4]:

- сортировка отсчётов сигнала по порядку следования частот в последовательности;
- компенсация детерминированных фазовых скачков, вызванных разрывами в принимаемом сигнале и зависящих от частоты, направления и порядка следования частот;
- измерение и компенсация в сигнале частотной неравномерности приёмопередающего тракта (по амплитуде и фазе) с учётом искажений, вызванных прохождением одиночных импульсов через узкополосные избирательные цепи.

На рис. 2 представлена обобщённая структура ПО режима КРТ-СА с детальным разрешением, где красным цветом отмечены данные алгоритмы.

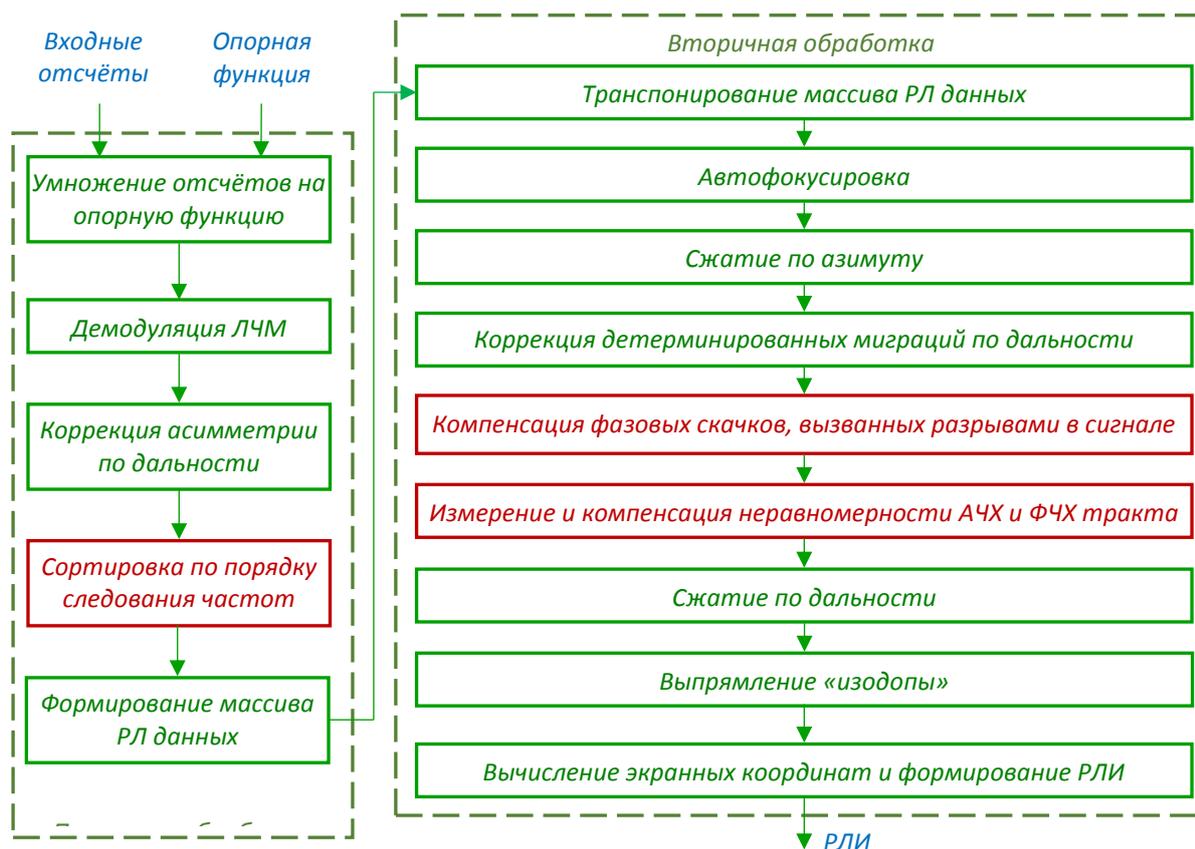


Рис. 2. Обобщённая структура ПО режима КРТ-СА.

Режим КРТ-СА с детальным разрешением является также наиболее требовательным к точности навигационных данных. Для обеспечения работы этого режима МБРЛС сопряжена с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС) ГЛ-100 (ООО «Гиролаб», г. Пермь), установленной на общем основании с МБРЛС и комплексированной с приёмником глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). При этом по данным, получаемым от БИНС, в МБРЛС в реальном масштабе времени осуществляется управление лучом антенны, периодом повторения зондирующих импульсов, положением зоны приёма и параметрами опорных функций в ПО обработки сигналов.

С созданным экспериментальным образцом МБРЛС и БИНС ГЛ-100 в 2017 году было проведено 15 натурных экспериментов в составе летающей лаборатории. В результате испытаний режима КРТ-СА на борту в реальном масштабе времени было получено более сотни РЛИ размером 1024×1024 пикселя с различными видами обзора [5]. Использование высокоточной широкополосной информации от БИНС позволило обеспечить не только стыковку фрагментов РЛИ и их фокусировку, но и точное определение координат объектов.

В качестве примера на рис. 3...8 приведены РЛИ, полученные на борту летающей лаборатории в реальном масштабе времени в режиме КРТ-СА при различных видах обзора с линейным разрешением от 0,25 до 3,8 м, в «привязке» к спутниковым оптическим фотоснимкам. На рис. 9 показано результирующее РЛИ, собранное из нескольких полученных на борту изображений, также в «привязке» к спутниковому оптическому фотоснимку района.

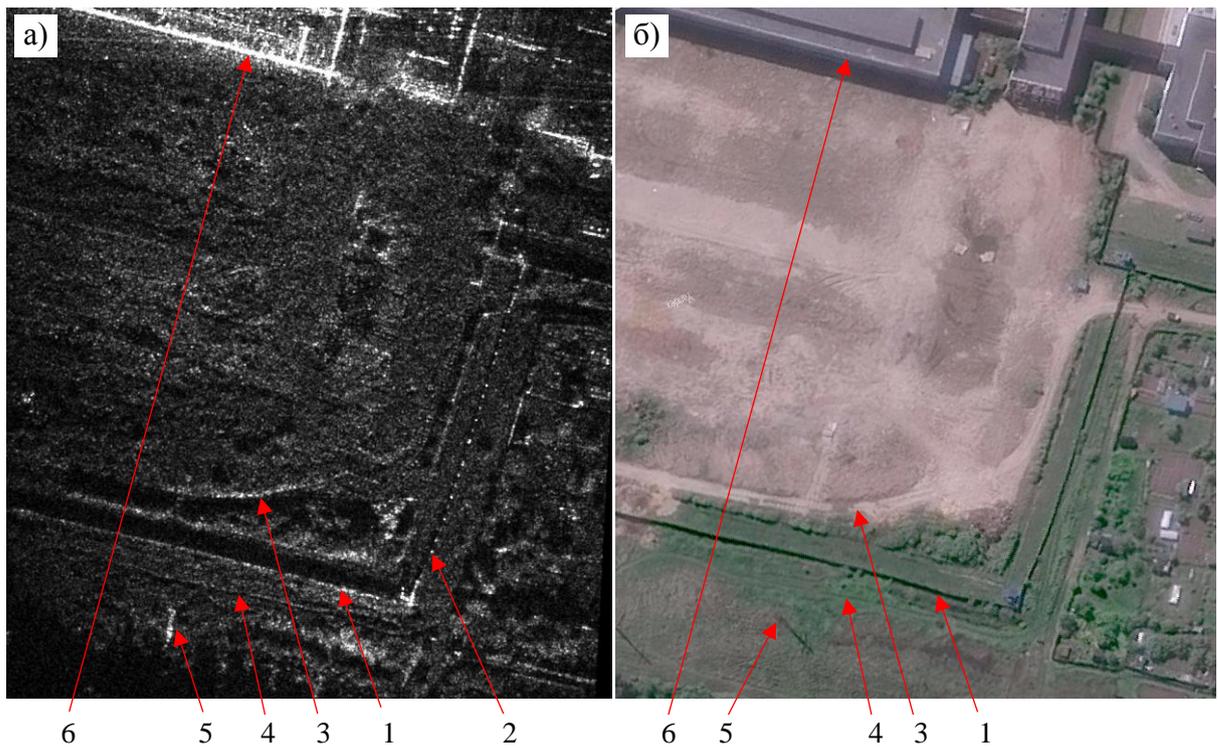


Рис. 3. РЛИ с разрешением 0,25 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) производственной площадки (телескопический обзор): 1 – ограждение, 2 – столбы ограждения, 3 – следы автомобиля на грунте, 4 – тропа, 5 – опора ЛЭП, 6 – здание.

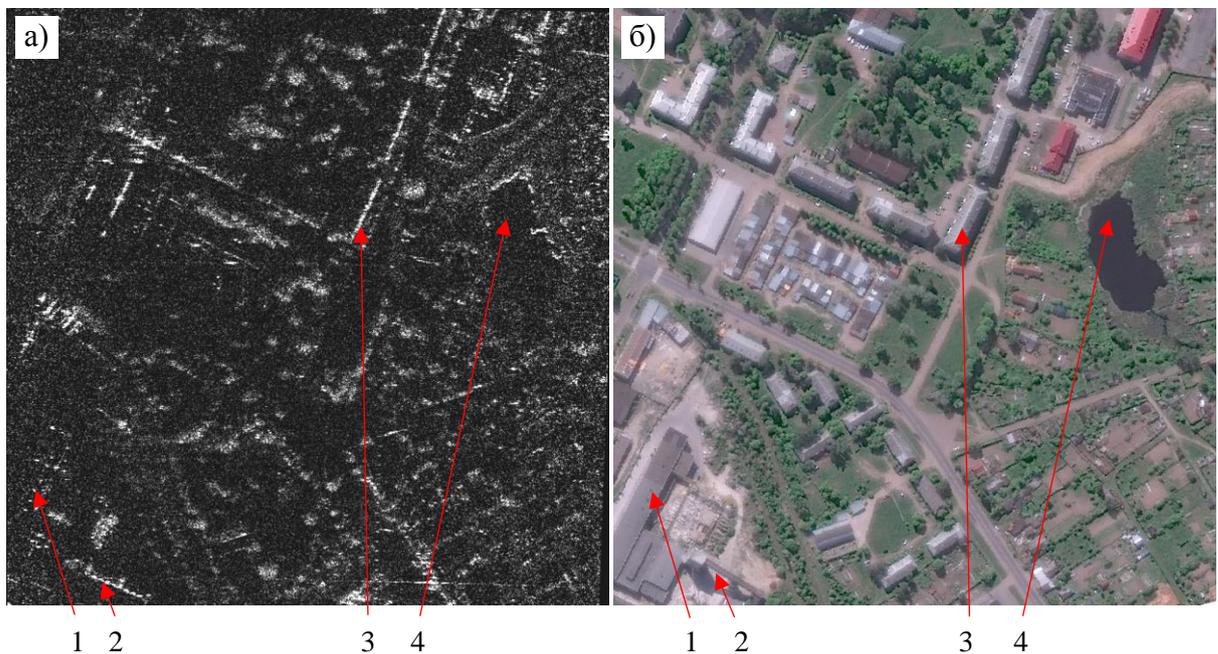


Рис. 4. РЛИ с разрешением 0,5 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) жилого сектора (телескопический обзор): 1 – вентиляционные люки на крыше здания, 2 – надземный переход, 3 – конёк крыши здания, 4 – водоём.

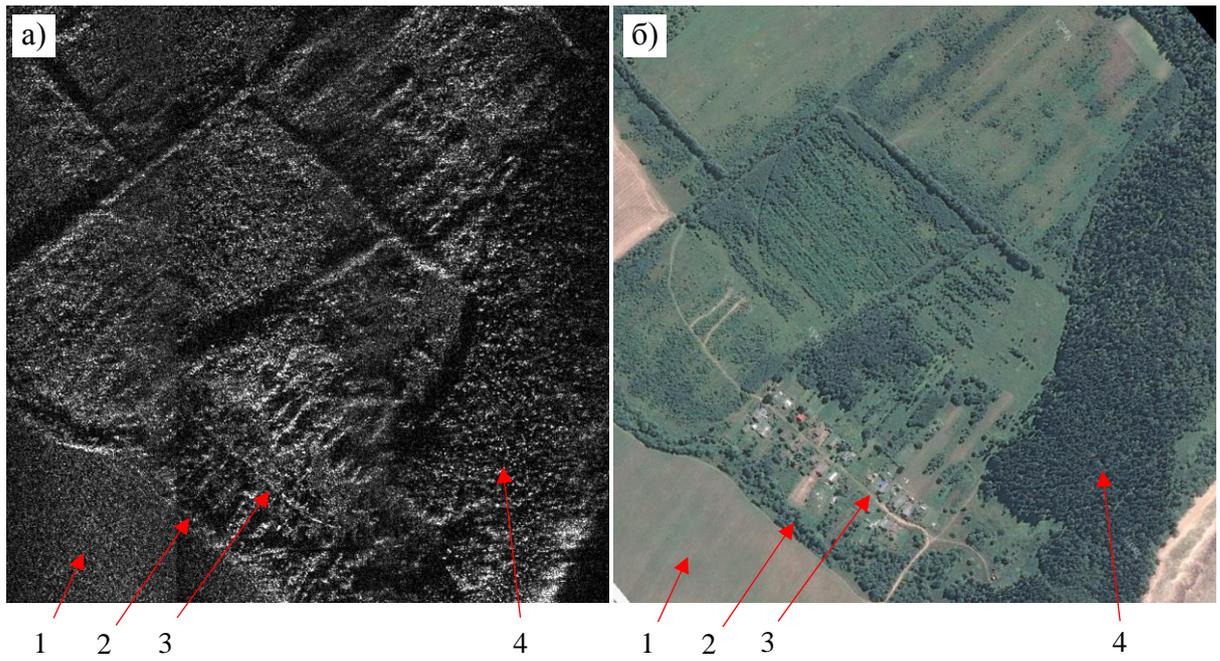


Рис. 5. РЛИ с разрешением 1 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) сельской местности (полосовой обзор): 1 – поле, 2 – кустарник, 3 – грунтовая дорога, 4 – лес.

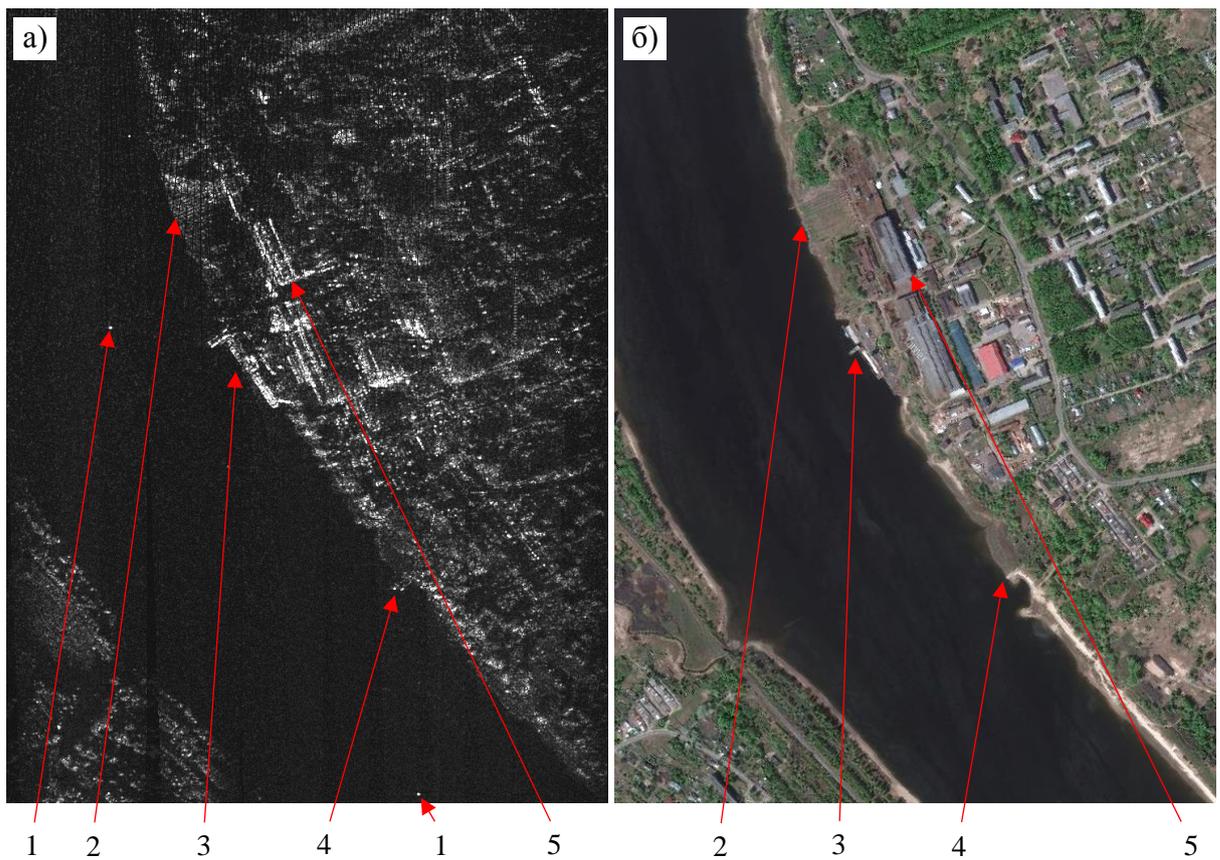


Рис. 6. РЛИ с разрешением 1,9 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) судовой верфи (полосовой обзор): 1 – бакен, 2 – спускной стапель, 3 – достроечный причал, 4 – причал, 5 – судостроительный эллинг.

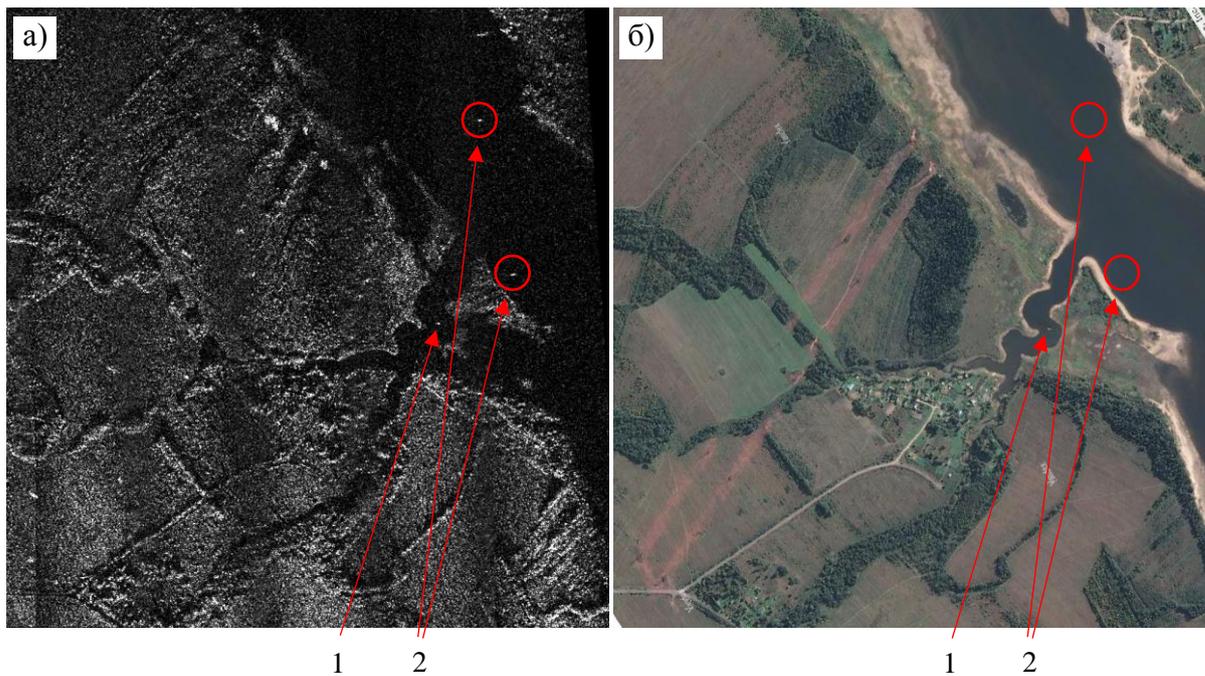


Рис. 7. РЛИ с разрешением 1,9 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) бассейна реки (секторный обзор): 1 – объект на реке, 2 – новые объекты.

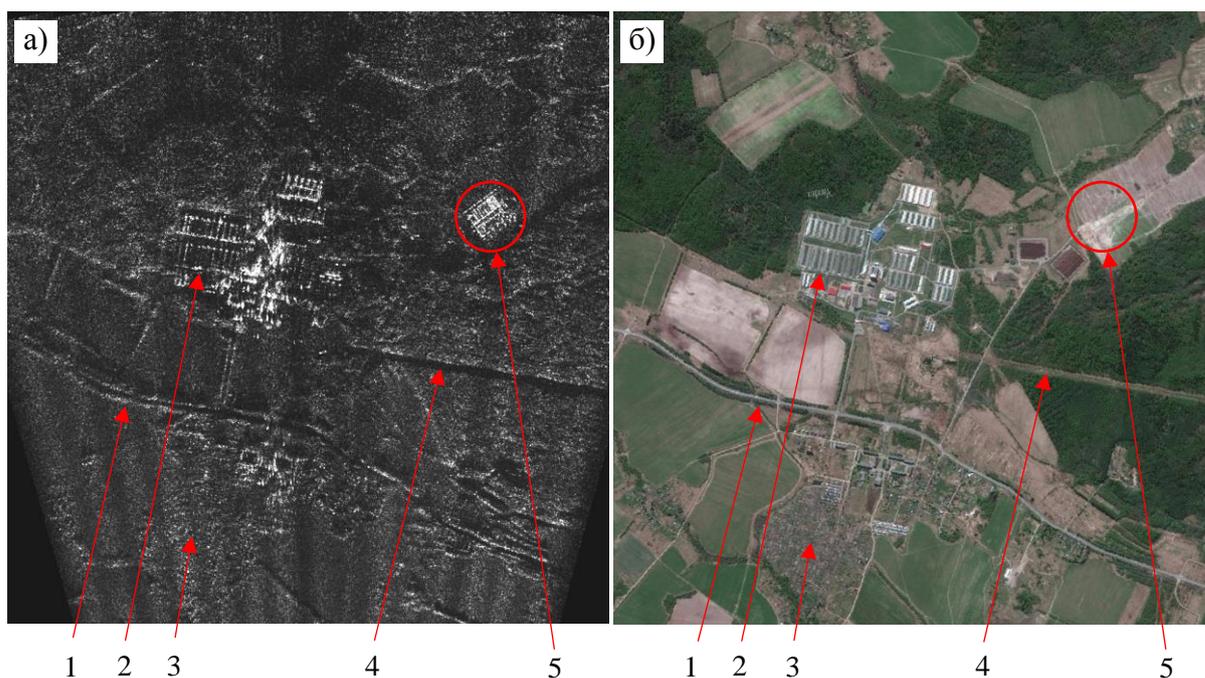


Рис. 8. РЛИ с разрешением 3,8 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) пригородной зоны (секторный обзор): 1 – обсадка вдоль дороги, 2 – цеха птицефабрики, 3 – дачные участки, 4 – просека, 5 – новый объект.



Рис. 9. Результирующее РЛИ с разрешением 1,9 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) городской местности (полосовой обзор).

В целях дальнейшего улучшения характеристик МБРЛС в настоящее время проводится разработка нового образца, включающего в себя БЦВМ с микропроцессором «Эльбрус-4С», двухосный карданный привод антенны, а также интеграцию БИНС и МБРЛС в части использования радиолокационной оценки ошибки по скорости для коррекции навигационного решения.

Литература

1. Гуськов Ю.А., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф. Малогабаритные БРЛС для летательных аппаратов // Радиоэлектронные технологии. Информационно-аналитический журнал. 2015. №3. С.78-83.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
3. Савостьянов В.Ю. Разрешающая способность по дальности и уровень боковых лепестков при использовании частотно-манипулированного сигнала в узкополосной РЛС // Радиотехника. 2005. №6. С.26-30.
4. Савостьянов В.Ю., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Тарасенко А.М. Особенности обработки частотно-манипулированных сигналов в РСА // VII Всероссийские Арmandовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром, 27-29 июня 2017 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017. С274-280.
5. Гуськов Ю.А., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф. Многофункциональные малогабаритные бортовые РЛС. Критические технологии создания // Радиоэлектронные технологии. Информационно-аналитический журнал. 2018. №1. С.40-46.