

ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
№1/2018

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Стр. 3

Россия на мировом рынке продукции
военного назначения

Стр. 15

Две жизни Николая Макаровца

Стр. 23

Честь выше почести

Стр. 37

С прицелом на «гражданку»

Стр. 68

Космические технологии РКС

Стр. 83

Высшая школа и производство



Многофункциональные малогабаритные бортовые РЛС

Критические технологии создания

ЮРИЙ ГУСКОВ

первый заместитель
генерального
директора,
генеральный
конструктор
АО «Корпорация
«Фазотрон-НИИР»,
кандидат технических
наук, старший научный
сотрудник

ВЛАДИМИР САВОСТЬЯНОВ

начальник лаборатории
АО «Корпорация
«Фазотрон-НИИР»,
кандидат технических
наук, доцент

ОЛЕГ САМАРИН

начальник отделения
АО «Корпорация
«Фазотрон-НИИР»,
кандидат технических
наук, старший научный
сотрудник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Исследования технических путей создания многофункциональных малогабаритных бортовых РЛС (МБРЛС) начались в АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» около десяти лет назад и трансформировались в перспективный проект по созданию семейства МБРЛС для пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов самолетного и вертолетного типов. В ходе работ выполнен анализ результатов, полученных в Российской Федерации и за рубежом в части, касающейся принципов построения МБРЛС и режимов их работы (прежде всего класса «воздух-поверхность»). Разработаны методы, алгоритмы и математические модели процессов обработки информации и управления. Проведенные расчеты и моделирование позволили разработать открытую масштабируемую архитектуру МБРЛС, сформировать требования к составным частям системы и разработать конструкторскую документацию.

Совместно с соисполнителями были разработаны и изготовлены:

- волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) Ka-, Ku- и X-диапазонов длин волн;
- конверторы (высокочастотные приемники) Ka-, Ku- и X-диапазонов и унифицированные приемники промежуточной (ПЧ) частоты;
- унифицированные цифровые приемники (ЦПРМ);
- синтезаторы частот и синхросигналов управления (СЧС);
- твердотельные усилители мощности;
- высокопроизводительная БЦВМ, включающая ЦПРМ и центральный процессор (ЦП) на базе отечественного микропроцессора (МП) «Эльбрус 2С+»;

- унифицированное программное обеспечение (ПО).

Результатом указанных работ явилось создание базовой модели семейства — МБРЛС Ku-диапазона, основными режимами работы которой являются:

- картографирование земной (водной) 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, включая детальное разрешение и возможность 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 различных сечений метеообразований (вертикальных, горизонтальных, плановых), обнаружением и индикацией зон опасной турбулентности и опасного низко-высотного «сдвига ветра»;
 - измерение наклонной дальности до поверхности (ИДЗ) по угловому целеуказанию, заданному внешней (например, оптико-электронной) системой или непосредственно оператором (летчиком);
 - информационное обеспечение полета на малых и сверхмалых высотах (МВП) с формированием РЛИ различных сечений рельефа местности (вертикальных, горизонтальных, плановых).
- Аппаратная и программная реализация режимов позволяет формировать целевую информацию (радиолокационные изображения

подстилающей поверхности, сечений метео-образований и рельефа местности, координаты и параметры движения объектов) непосредственно в МБРЛС в реальном времени без вмешательства оператора. Сформированная информация может быть передана на наземный пункт управления комплекса с беспилотного летательного аппарата (БЛА) или на экран индикатора летчика в пилотируемом варианте.

Большое внимание в проекте было уделено обеспечению помехозащищенности режимов, что стало возможным благодаря применению частотно-манипулированных сигналов с быстрой (от импульса к импульсу) перестройкой несущей и псевдослучайным изменением закона следования частот.

Общие характеристики МБРЛС Ку-диапазона приведены в таблице 1.

Следует отметить оригинальные конформные конструктивные решения при создании семейства, которые дают возможность разместить

МБРЛС в выделенные на летательном аппарате объемы и конфигурации за счет использования разработанных модулей нескольких уровней иерархии и их интерфейсов. Так, модуль приема-передающий (второй уровень иерархии) выполнен по распределенной архитектуре, позволяющей разместить его составные части (модули третьего уровня) — конвертор, ПЧ-приемник, синтезатор частот и синхросигналов управления, твердотельный усилитель мощности — в заданные техническим заданием точки. В свою очередь, наиболее сложный из перечисленных модуль — синтезатор частот и синхросигналов управления сконструирован из радиогерметичных модулей четвертого уровня иерархии, которые также можно разместить конформно.

Для проведения натурных работ МБРЛС была сопряжена с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС) ГЛ-100 (ООО «Гиrolаб»), установленной на общем основании с МБРЛС и комплексированной с прием-

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	250
	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
Средняя наработка на отказ, ч		450
Потребляемая мощность от бортсети 27 В, Вт		400
Масса, кг		35

ником глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). При этом по данным, получаемым от БИНС, в МБРЛС в реальном масштабе времени осуществлялось управление лучом антенны, периодом повторения зондирующих импульсов, положением зоны приема и параметрами опорных функций в ПО обработки принимаемых сигналов.

С МБРЛС Ku-диапазона в составе летающей лаборатории в 2017 году было проведено 15 натурных экспериментов. Полеты выполнялись на самолете Ан-2 с размещением аппаратуры как внутри фюзеляжа, так и на внешнем подвесе. Отрабатывалось не только аппаратное и программное обеспечение МБРЛС при работе в режимах КРТ-РЛ, КРТ-СА и СНДЦ с различными видами обзора, разрешениями, дальностями и углами наблюдения, но и совместное функционирование МБРЛС с БИНС. В результате летных испытаний на борту (в реальном времени) было получено несколько сотен РЛИ высокого качества, что подтвердило правильность принятых в проекте решений. Заметим, что использование высокоточной широкополосной навигационной информации позволило обеспечить не только стыковку фрагментов (парциальных кадров) РЛИ и надежную качественную их фокусировку при разрешении лучше 1 м, но и точное определение координат объектов.

В качестве примеров результатов на рисунках 1–5 с комментариями приведены РЛИ, полученные на борту в реальном времени в режиме КРТ-СА с линейным разрешением от 0,25 до 4 м в «привязке» к спутниковым оптическим фотоснимкам.

По результатам натурных работ была откорректирована конструкторская и программная документация.

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Следует отметить, что разные режимы работы многофункциональной РЛС предъявляют различные требования к характеристикам составных частей МБРЛС и системы навигации. Возможность реализации заданных требований определяется используемыми технологиями, которые называют критическими со своими технологическими пределами. При этом под технологическими пределами обычно понимают предельные техни-

ческие параметры продукта, которые наиболее важны для потребителя. К таким технологиям относятся как технологии разработки и изготовления составных частей, так и интегрированные технологии создания сложных наукоемких изделий, каким является МБРЛС. К критическим технологиям разработки и изготовления составных частей МБРЛС следует отнести:

- создание малогабаритных масштабируемых БЦВМ на базе отечественных многоядерных микропроцессоров;
- изготовление малогабаритных широкополосных цифровых приемников;
- изготовление компактных волноводно-щелевых антенных решеток;
- изготовление малогабаритных программно управляемых цифровых СЧС, обеспечивающих широкую полосу зондирующего сигнала и перестройку частоты от импульса к импульсу;
- разработка и изготовление малогабаритных программно управляемых твердотельных усилителей мощности;
- создание компактных комплексированных систем БИНС и спутниковых навигационных систем;
- создание надежного программного обеспечения МБРЛС, реализующего многофункциональность, а также необходимый модернизационный потенциал.

К интегрированным технологиям относят процессы создания сложных наукоемких изделий. МБРЛС, являясь таким сложным наукоемким изделием, требует формализации процессов системного анализа, проектирования, комплексирования, отладки, испытаний, документирования, управления работой специалистов и поддержки эксплуатации. Весьма полезным для этих целей может служить стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005 «Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем», который устанавливает общие основы для описания жизненного цикла систем, определяет детально структурированные процессы и соответствующую терминологию.

В таблице 2 представлены рассчитанные и подтвержденные натурными испытаниями требования к предельным характеристикам составных частей МБРЛС и БИНС при функционировании в различных режимах работы.

Таблица 2. Требования к характеристикам составных частей МБРЛС и БИНС.

Параметр		Режим работы МБРЛС					
		КРТ-РЛ	КРТ-СА	СНДЦ	МЕТЕО	МВП	ИДЗ
<i>ВЧ-тракт (СЧС, передатчик, ВЩАР, конвертор)</i>							
Общая ширина спектра сигнала, МГц		20	640	640	10	640	20
Модуляция		внутриимпульсная (ЛЧМ, ФКМ), от импульса к импульсу (частотная манипуляция)					
Время перестройки несущей частоты, мкс		<0.1					
Количество приемных каналов		2	2	2	3	3	3
Полоса пропускания ЦПРМ, МГц		20	60...80	60...80	10	20	20
Частота оцифровки АЦП, МГц		160	640	640	80	160	160
<i>ЦП БЦВМ</i>							
Скорость приема данных из ЦПРМ, Мбайт/с		293	166	166	75	53	293
Первичная обработка	Производительность, Гфлопс	5	8	8	2	7	13.5
	Объем ОЗУ, Гбайт	0.01	1	1	<0.01	0.01	<0.01
Вторичная обработка	Производительность, Гфлопс	0.4	17.5	18	6	0.4	0.3
	Объем ОЗУ, Гбайт	0.01	9	9	0.1	0.02	<0.01
Формирование изображений	Производительность, Гфлопс	0.1	0.1	0.1	<0.1	21	---
	Объем ОЗУ, Гбайт	0.01	0.013	0.014	<0.01	0.01	---
Итого (без учета системного ПО)	Производительность, Гфлопс	5.5	25.6	26.1	8.1	28.4	13.8
	Объем ОЗУ, Гбайт	0.03	10	10	0.1	0.04	<0.02
<i>БИНС, комплексированная с приемником ГНСС</i>							
Полоса пропускания, Гц		200	300	300	200	200	200
Максимальная ошибка определения составляющих линейной скорости, м/с		1.7	6·10–4	6·10–4	3.4	1.7	1.7
Максимальная ошибка определения линейных координат, м		7.5	0.25	0.25	15	4	7.5
Максимальная ошибка определения угловых координат, градус		0.6	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1

Таблица 2 показывает, что «критическими» параметрами для получения предельных характеристик МБРЛС, например разрешающей способности 0.25 м на максимальной дальности 15 км в режиме КРТ-СА (см. таблицу 1), являются:

- общая ширина спектра сигнала — 640 МГц;
- полоса пропускания ЦПРМ — не менее 60 МГц;
- скорость передачи данных из ЦПРМ в ЦП БЦВМ — не менее 300 Мбайт/с;
- производительность ЦП БЦВМ — не менее 30 Гфлопс;
- объем ОЗУ ЦП БЦВМ — не менее 12 Гбайт;
- ошибка определения составляющих линейной скорости в БИНС — не более 6·10–4 м/с;
- ошибка определения угловых координат в БИНС — не более 0.1 градус.

В целях удовлетворения изложенных требований в АО «Институт точной механики и вы-

числительной техники» Академии наук РФ была разработана БЦВМ на базе МП «Эльбрус 4С», которая обеспечивает производительность не менее 35 Гфлопс и предоставляет пользователю до 16 Гбайт оперативной памяти. Кроме того, для повышения точности определения составляющих линейной скорости необходимо в БИНС осуществить интеграцию имеющихся навигационных данных с измерительной информацией, получаемой в самой МБРЛС (научный журнал «Вестник СибГУТИ», № 3/2016).

Следует также отметить, что помимо требований к характеристикам МБРЛС, связанных с реализацией основных функций, весьма важным является обеспечение высокой боеготовности. Она может быть достигнута благодаря системе функционального контроля и диагностирования, не требующей наземных средств и специалистов для проведения профилактических и регламентных работ в про-

цессе обслуживания МБРЛС. К характеристикам боеготовности следует, по нашему мнению, отнести и уровень подготовки летчиков (операторов), работающих в едином контуре с МБРЛС. Для их подготовки должны быть реализованы учебно-тренировочные режимы как дополнительные функции. Решение таких задач требует формирования в СЧС пилот-сигнала с динамическим управлением параметрами (задержкой, амплитудой, доплеровской частотой, фазой), а в БЦВМ — накопителя с объемом памяти не менее 60–70 Гбайт для хранения данных системы объективного контроля, цифровых карт местности района полетов, 3D-моделей метеообразований и др.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные аппаратная и программная платформы МБРЛС обеспечивают решение широкого круга задач для летательных аппаратов различного назначения. Базовая МБРЛС Ku-диапазона может быть применена в составе перспективных или модернизируемых разведывательных и поисково-спасательных летательных аппаратов.

2. Решена задача совместного функционирования МБРЛС с БИНС ГЛ-100, комплексированной с приемником ГНСС, с управлением по навигационным данным положением луча антенны, временной диаграммой работы МБРЛС и обработкой принимаемых сигналов. Это обеспечило не только стыковку фрагментов (парциальных кадров) РЛИ и надежную качественную их фокусировку при детальном разрешении, но и точное определение координат объектов.

3. В результате летных испытаний на борту носителя в реальном масштабе времени были получены РЛИ высокого качества с различным, в том числе детальным, разрешением, подтвердившие правильность проектных решений.

4. Достигнутые характеристики по надежности и обслуживаемости МБРЛС обеспечивают высокую боеготовность и снижение затрат на эксплуатацию комплексов.

5. Конструкция составных частей МБРЛС обеспечивает их конформное размещение на летательных аппаратах самолетного и вертолетного типов.



Рисунок 1. РЛИ с разрешением 0.25 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) производственной площадки:
1 – ограждение; 2 – столбы ограждения; 3 – следы автомобиля на грунте; 4 – тропа; 5 – опора ЛЭП; 6 – здание

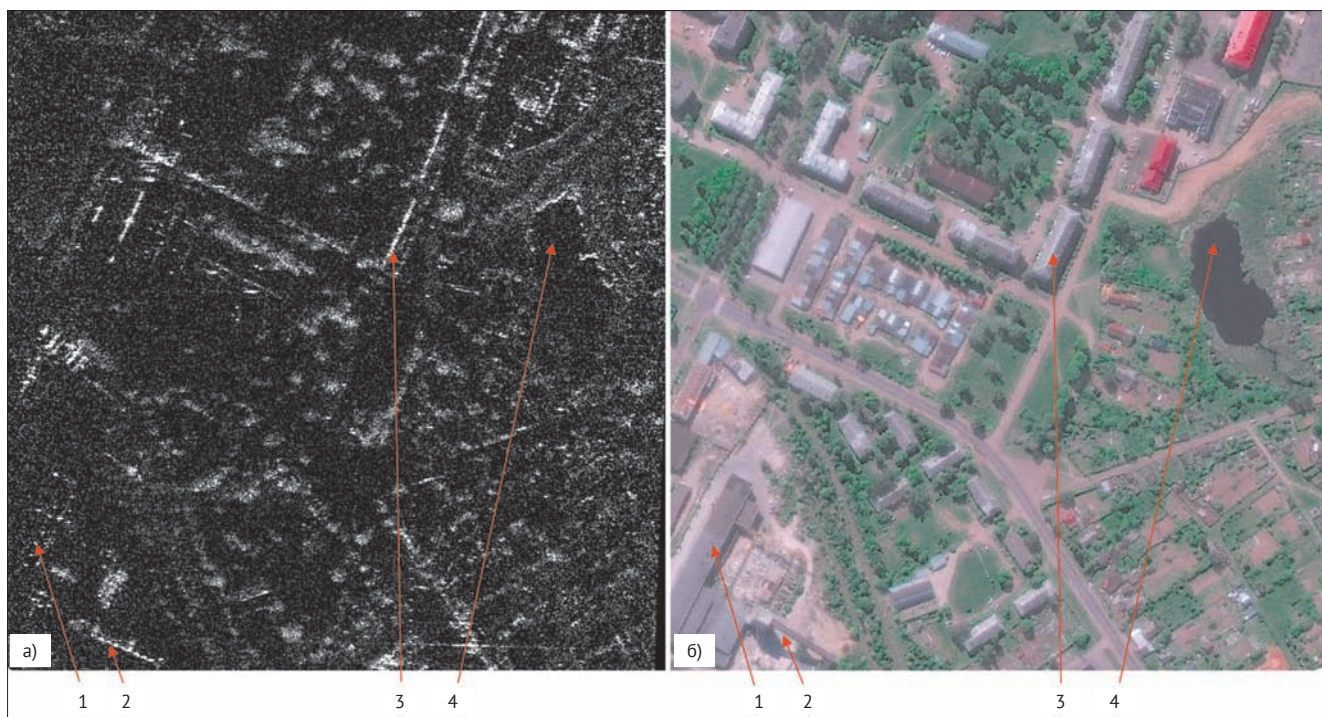


Рисунок 2. РЛИ с разрешением 0,5 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) жилого района:

1 – вентиляционные люки на крыше здания; 2 – надземный переход; 3 – конек крыши здания; 4 – водоем

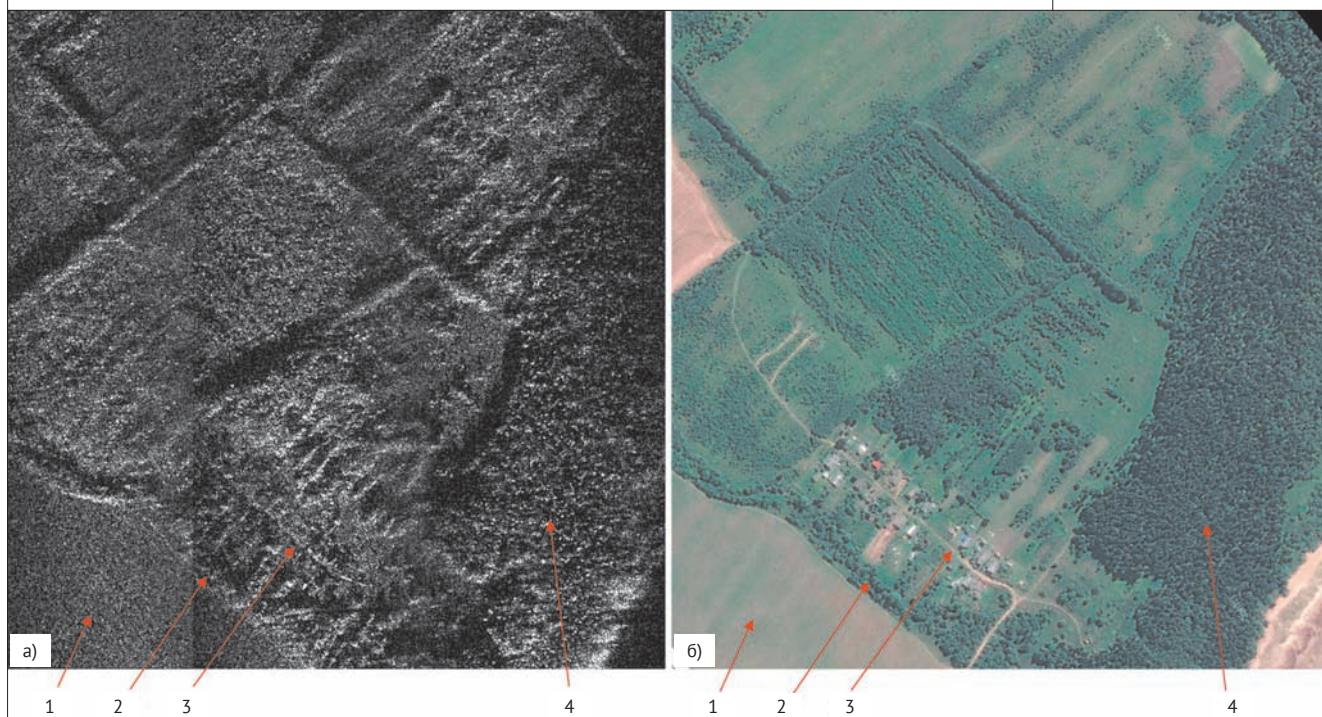


Рисунок 3. РЛИ с разрешением 1 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) сельской местности:

1 – поле; 2 – кустарник; 3 – грунтовая дорога; 4 – лес

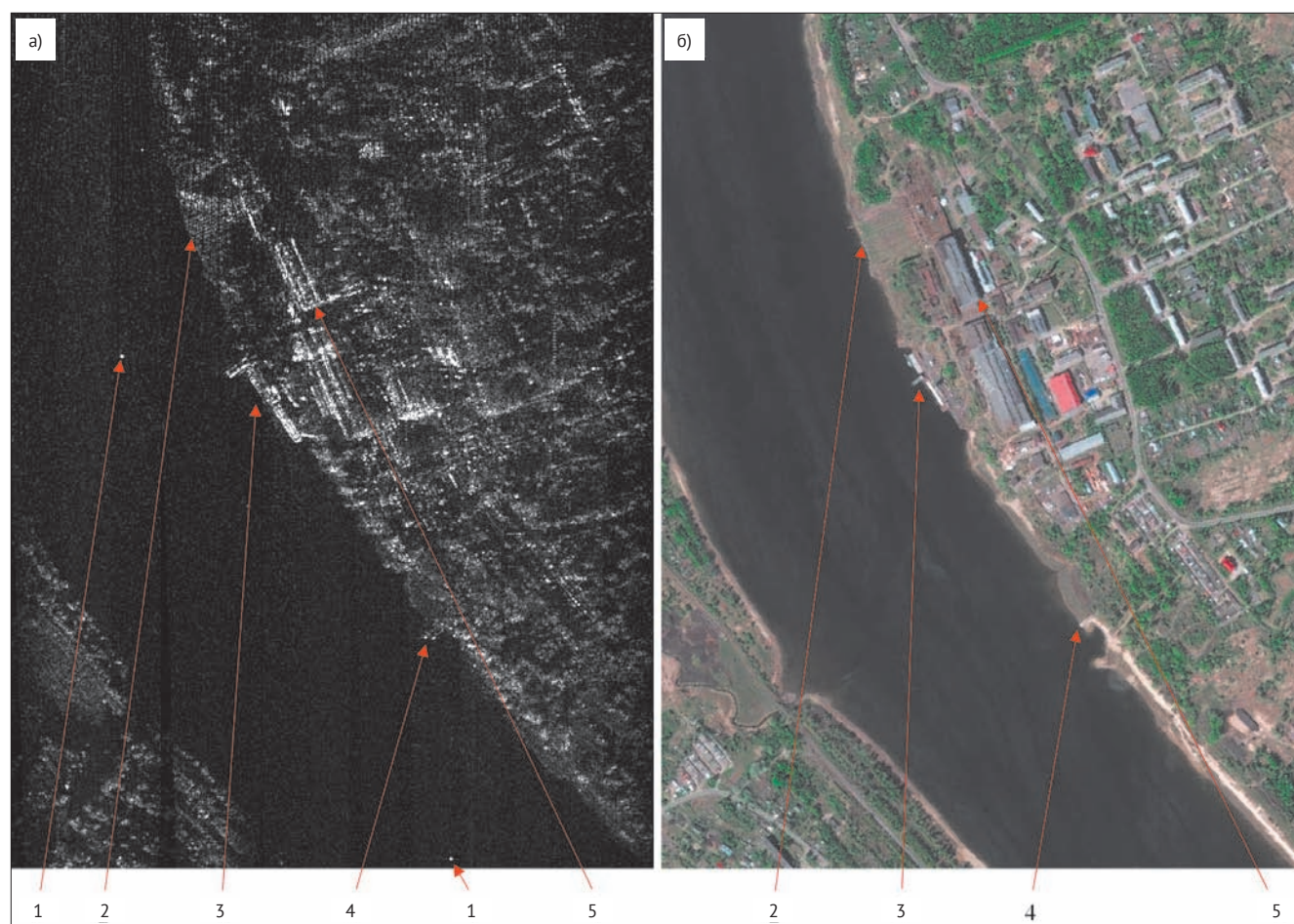


Рисунок 4. РЛИ с разрешением 2 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) судовой верфи:

1 – бакен; 2 – спускной стапель; 3 – достроечный причал; 4 – причал; 5 – судостроительный эллинг

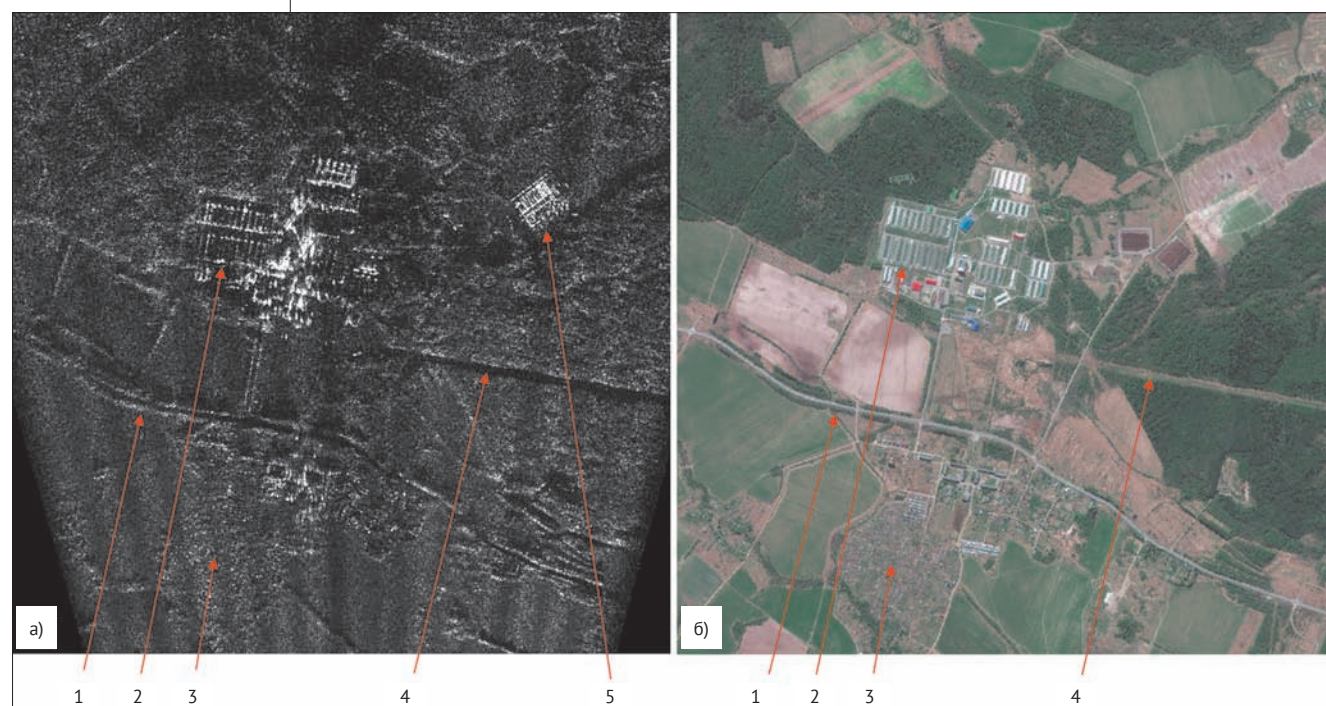


Рисунок 5. РЛИ с разрешением 4 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) пригородного района:

1 – обсадка вдоль дорог; 2 – цеха птицефабрики; 3 – дачные участки; 4 – просека; 5 – новый объект – эллинг