

## Анализ возможностей двухчастотного космического РСА X и P диапазонов

В.В. Костров<sup>1</sup>, А.В. Криштопов<sup>2</sup>, Е.Ф. Толстов<sup>3</sup>, О.Е. Цветков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

E-mail: [vyk@mit.ru](mailto:vyk@mit.ru)

<sup>2</sup>ЗАО «Элиарс», 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 1

E-mail: [kav@eliars.ru](mailto:kav@eliars.ru)

<sup>3</sup>ЗАО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, 1

E-mail: [titovmp@mail.ru](mailto:titovmp@mail.ru), [e\\_tolstov@mail.ru](mailto:e_tolstov@mail.ru)

*В докладе представлен сравнительный анализ процедур и результатов радиолокационного наблюдения с помощью комбинированного радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА), использующего радиоволны X и P диапазонов. Дано описание требуемых и реализованных тактико-технических характеристик, которые предъявляются к комбинированному двухчастотному РСА XP. Представлены элементы конструкций интегрированной активной фазированной антенной решетки. Приведены основные характеристики экспериментального образца РСА XP авиационного базирования: разрешающая способность, радиометрические характеристики. Приведены результаты экспериментов по съемке в X и P диапазонах, которые показали, что РЛИ в этих диапазонах взаимно дополняют друг друга. В качестве другого примера РЛИ, полученных в различных диапазонах волн, рассмотрены РЛИ космических аппаратов TerraSAR-X (X диапазон) и Кондор-Э (S диапазон). Отмеченные новые возможности по повышению информативности двухчастотных РСА создают благоприятные условия для дальнейшего развития систем данного класса.*

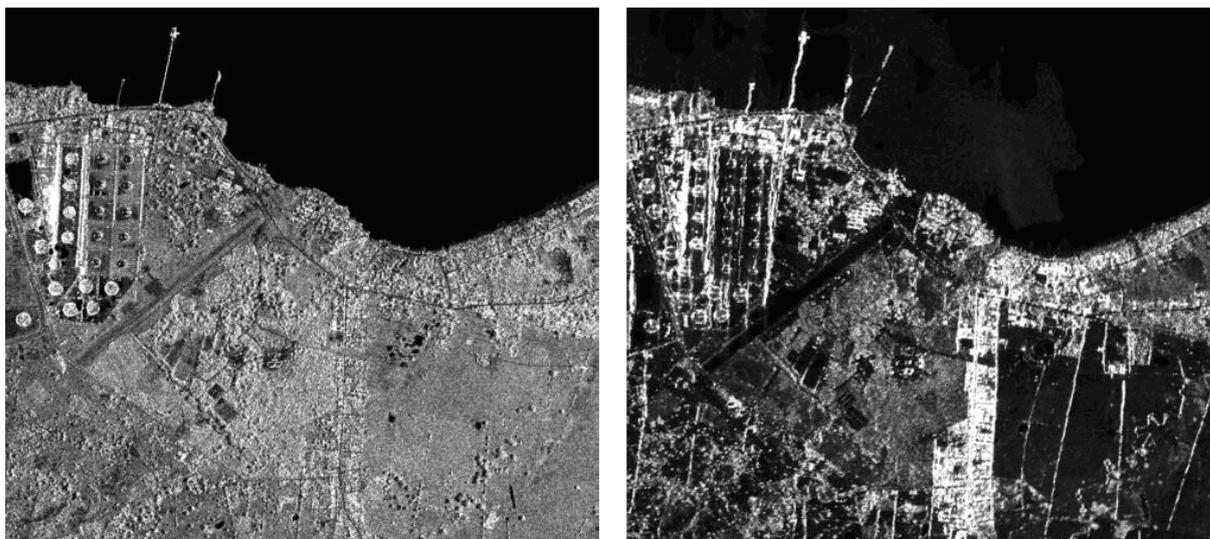
*The comparative analysis of the procedures and results of the radar observation by means of multifunction synthetic aperture antenna radar (SAR), using X and P bands, is presented in report. It is given description required and realized tactician-technical characteristics, which are produced to multifunction double frequency RSA XP. The elements of integrated active phase antenna array, Tx and Rx modules design are presented. The main features of experimental model SAR XP are brought. They are given the results of experiment with SAR in X and P band, which have shown that radar images in these bands mutually complement each other. As other example of the radar images, got in different band of the waves, are considered radar images of space-born SAR: TerraSAR-X (X band) and Condor-E (S band). Noted new possibilities on increasing of information double frequency RSA create the happy circumstances for the further development of the systems given class.*

Известно, что масштабы работ по созданию и применению космических средств радиолокационного зондирования Земли уже в настоящее время весьма значительны и, несомненно, будут возрастать далее. Такая тенденция является объективным следствием не только способности этих средств к эффективному использованию независимо от освещенности сюжета и метеоусловий, но и целого ряда других, столь же ценных, по большей части уникальных достоинств: возможности извлечения обширной дополнительной информации на основе анализа фазы отражённого сигнала и его поляризационных характеристик, проникающей способности длинноволнового зондирующего излучения и т.д. [1–5]. Это резко расширяет функциональные возможности радиолокационных средств наблюдения и позволяет рассматривать их в качестве незаменимого инструмента эффективного решения множества задач военного и гражданского характера. Значение этих достоинств особенно велико применительно к задачам мониторинга территории России. Высокая доля времени, в течение которого здесь имеет место неблагоприятные условия освещенности и облачности (около 75% в среднем по стране, до 90% в арктическом регионе) и длительность непрерывных периодов существования таких условий не позволяют эффективно использовать

оптическую аппаратуру наблюдения при решении обширного круга актуальных задач различного назначения.

Подтверждением сказанному служит, в частности, постоянное увеличение количества эксплуатируемых во всем мире или находящихся на стадии разработки космических аппаратов радиолокационного землеобзора, успехи, достигнутые в деле их практического применения, и интенсивное расширение числа стран, вовлеченных в эту сферу деятельности. Среди таких стран, интенсивно использующих и совершенствующих радиолокаторы землеобзора на базе перспективной технологии активных фазированных антенных решеток (АФАР), следует, в первую очередь, отметить США, Канаду, Германию, Италию, Китай, Японию, Индию, Корею, Испанию и др. Характеристики некоторых из эксплуатируемых зарубежных космических средств радиолокационного зондирования Земли, которые в наибольшей степени определяют современный мировой уровень развития этой перспективной технологии, хорошо известны [1].

В России в современный период отсутствуют космические средства наблюдения, оснащенные высокоинформативными радиолокационными комплексами (ВРЛК) землеобзора. Соответствующие работы выполняются независимо несколькими кооперациями исполнителей ОКР в интересах различных групп потребителей в рамках нескольких государственных программ или на принципах государственно-частного партнерства. С сожалением приходится признать, что пока достойного ответа на запуски космических РСА с АФАР со стороны России не последовало. Хотя, конечно, нельзя не упомянуть впечатляющие характеристики РСА космического аппарата «Кондор-Э» с гибридной антенной системой [6–8]. Вместе с тем, очень своевременным и даже прорывным мог бы быть шаг по разработке и запуску на орбиту интегрированной двухдиапазонной (X и P) РСА с АФАР. И для этого шага подготовлена как аппаратная часть, так и специальное программное обеспечение [9–12]. Общее представление о возможностях РСА, одновременно работающих в X и P диапазонах, даёт рис. 1 [9]. Хотя снимки и носят рекламный характер, основные достоинства интегрированной РСА хорошо видны и здесь.



**Рис. 1. Радиолокационное изображение (РЛИ) одного и того же участка местности в X (слева) и P (справа) диапазонах**

Есть основания предполагать [1–5, см. рис. 1, таблицу 1 и графики на рис. 2], что сравнительный анализ РЛИ X и P диапазонов даёт следующие результаты:

1. Статистически неравномерные поверхности (СНП, фон местности) со слабой растительностью имеют в Р диапазоне по сравнению с Х диапазоном удельную эффективную площадь рассеяния (ЭПР) примерно в пять раз (в дБ) меньше, что делает картину фонов более контрастной.

2. Искусственные объекты обладают примерно одинаковой ЭПР в Х и Р диапазонах, что приводит к их лучшей наблюдаемости на слабо отражающем фоне в Р диапазоне.

3. Радиоволны Р диапазона, пусть неглубоко, но проникают в плотные среды, что позволяет выявить подземные коммуникации.

4. Удельная ЭПР лесных массивов в Р диапазоне хотя и уступает их ЭПР в Х диапазоне примерно в два раза (в дБ), но не столь сильно, сколь СНП со слабой растительностью, что способствует улучшению наблюдаемости леса на фоне более слабо отражающей местности.

5. Радиоволны Р диапазона, в отличие от Х диапазона, способны проникать сквозь растительность, отразившись перед этим от вершин деревьев, затем, ослабляясь по ходу проникновения, и, наконец, отражаться от искусственных объектов и фона, находящихся под покровом растительности. Однако для обнаружения отражённых от объектов сигналов часто приходится применять специальные способы обработки, поскольку сигналы укрытых растительностью объектов и вершин деревьев часто оказываются соизмеримыми.

6. РЛИ Х диапазона близко по структуре к визуальному восприятию местности, где хорошо видны слабоотражающие в Р диапазоне её фрагменты, и используется для привязки к карте как объектов РЛИ в Х диапазоне, так и объектов в Р диапазоне.

7. Обычно РСА в Х диапазоне имеет гораздо более высокое разрешение, чем в Р диапазоне, что позволяет по РЛИ Х диапазона решать задачи распознавания малоразмерных объектов.

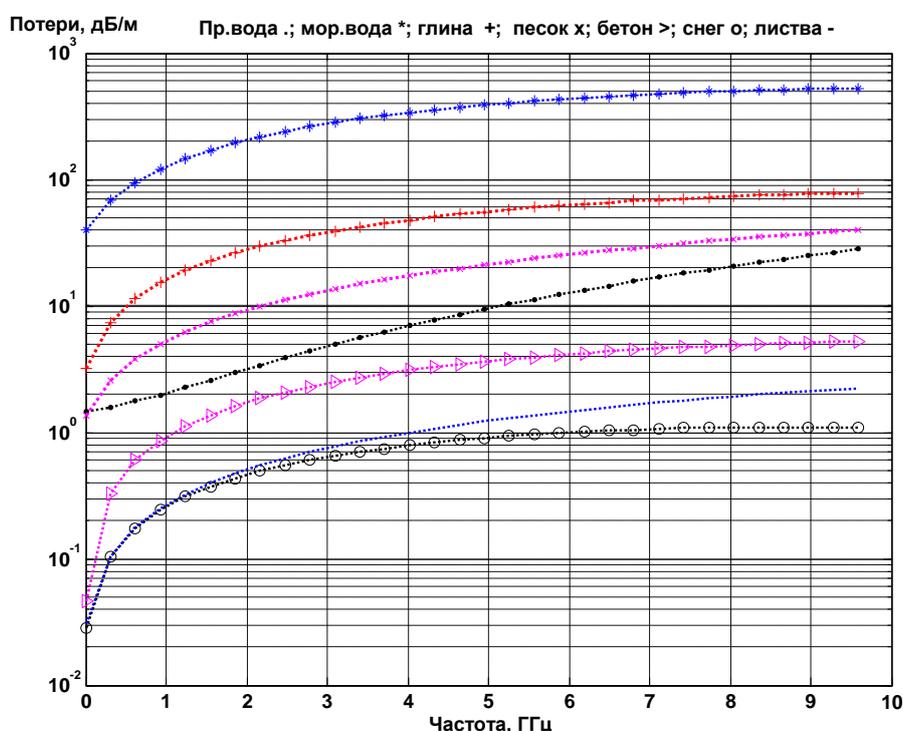


Рис. 2. Удельные потери при распространении радиоволн в плотных природных средах

Таблица 1 – Удельные ЭПР местности

Объекты	Угол падения	$\lambda = 3,0$ см		$\lambda = 10$ см		$\lambda = 23$ см		$\lambda = 70$ см	
		ГГ	ВВ	ГГ	ВВ	ГГ	ВВ	ГГ	ВВ
Море, волнение 2 балла	10	-40	-32	-42	-40	^15	^ 5	-50	-50
	20	-38	-28	-39	-35	-40	-40	-45	^ 5
	50	-35	-30	-36	-33	-38	-36	-35	-42
Море, волнение 6 баллов	10	-35	-30	-33	-30	-30	-30	-35	-35
	20	-30	-25	-29	-25	-29	-25	-32	-32
	50	-27	-22	-27	-22	-28	-23	-30	-30
Взлетно-посадочная полоса	10	^ 0	-30	-40	-35	^ 5	-40	-60	-60
	20	-32	-24	-35	-30	-40	-36	-58	-58
	50	-20	-18	-25	-23	-30	-27	-55	-55
Степь, зима, снег	10	-23	-23	-35	-35	-33	-35	-60	-60
	20	-17	-17	-30	-30	-30	-30	-55	-55
	50	-14	-14	-23	-23	-23	-23	-50	-50
Степь, лето, трава	3	-35	-35	-35	-35	-40	-40	-60	-60
	10	-16	-16	-20	-20	-28	-28	-55	-55
	20	-15	-15	-19	-19	-25	-25	-53	-53
	50	-12	-12	-16	-16	-20	-20	-50	-50
Пустыня, камни, песок	10	-18	-20	-30	-35	-35	-35	-45	^15
	20	-15	-17	-28	-33	-30	-30	-40	^ 0
	50	-12	-14	-15	-15	-15	-17	-35	-35
Лес	10	-14	-14	-21	-22	-25	-23	-35	-35
	20	-14	-15	-20	-21	-20	-18	-30	-30
	50	-12	-12	-14	-14	-14	-14	-25	-25

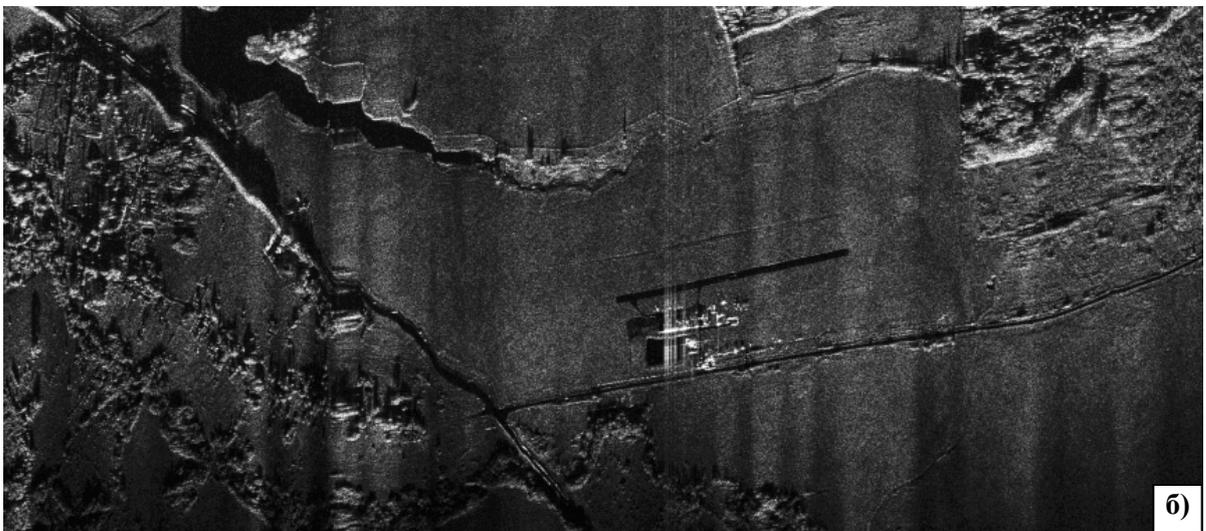
Впечатляющие возможности РСА ХР диапазонов (РСА ХР) давно и прочно занимают внимание специалистов по радиолокации. Так, АО «ЭЛИАРС» и «АЭРОКОН» уже порядка десяти лет занимаются созданием аппаратной части (АЧ) и программного обеспечения (ПО). К настоящему времени у этих фирм имеется солидный задел по РСА ХР, что и иллюстрируется ниже.

В АО «ЭЛИАРС» проведен ряд лётных экспериментов макетов РСА ХР в ходе отработки технологии создания АЧ и подтверждения возможностей такого радиолокационного комплекса. Большая часть лётных экспериментов проводилась на лёгких самолётах и вертолётах в районе аэродрома «Орловка» (рис. 3) Московской области [10–12]. На рис. 3 (а, б) показаны любительский снимок окрестностей аэродрома и их радиолокационное изображение (Х диапазон), полученные по ходу лётных исследований.

В ходе лётных испытаний предполагалось показать возможность решать задачи, всепогодно и круглосуточно, в которых РСА ХР должна обеспечивать:

- обнаружение целей, в том числе малоразмерных и групповых, замаскированных растительным покровом, а также находящихся на небольшой глубине;
- ведение поисково-спасательных работ по элементам металлических конструкций, обнаружение, в том числе в лесу, мест катастроф летательных аппаратов и других объектов по элементам их конструкций;

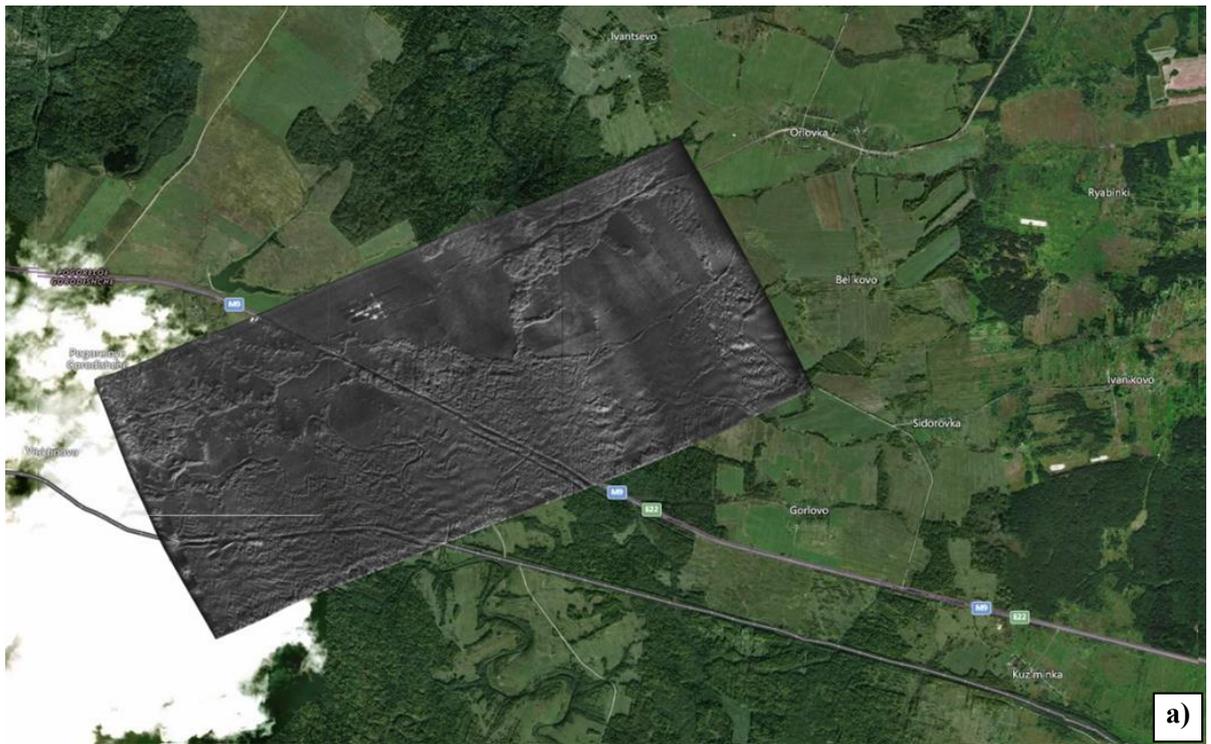
- мониторинг чрезвычайных ситуаций (оценка масштабов бедствий, контроль экологических катастроф; оценка состояния, обнаружение поломок техногенных объектов, включая ЛЭП, кабельные сети, нефтепроводы, газопроводы, плотины, дамбы и т.п.);
- обеспечение ледовой разведки;
- наблюдение объектов, выполненных по технологии СТЕЛС, скрытых маскировочными сетями и ложных целей;
- обеспечение навигационной привязки к радиолокационно-контрастным ориентирам.



**Рис. 3. Фото (а) и РЛИ (б) окрестностей аэродрома в X диапазоне**

Кроме того, РСА может быть использована в других приложениях, таких как классификация землепользования или повсеместный мониторинг лесной биомассы. Одновременно в ходе полётов анализировались свойства РСА ХР.

Действительно, удалось убедиться, что РЛИ X диапазона хорошо совмещается картой (см. рис. 4), что позволяет ориентироваться по сторонам света и осуществлять привязку. Подтверждены основные свойства РСА ХР вплоть до обнаружения в Р диапазоне того, что в X вообще не видно. Всё это иллюстрируется РЛИ на рис.5 (а,б,в).



**Рис. 4. Совмещение РЛИ X (а) и Р (б) диапазонов с гибридной картой**

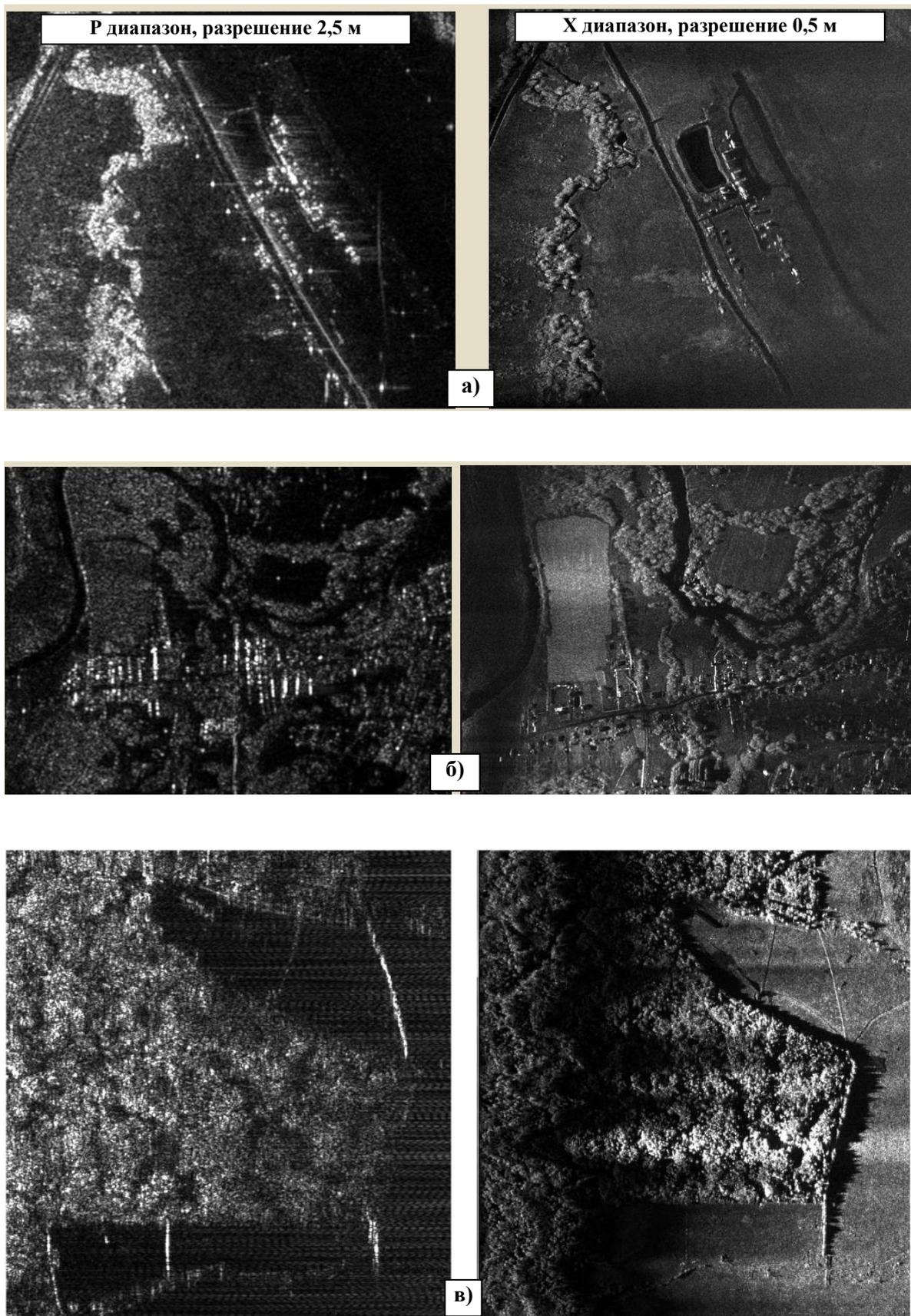
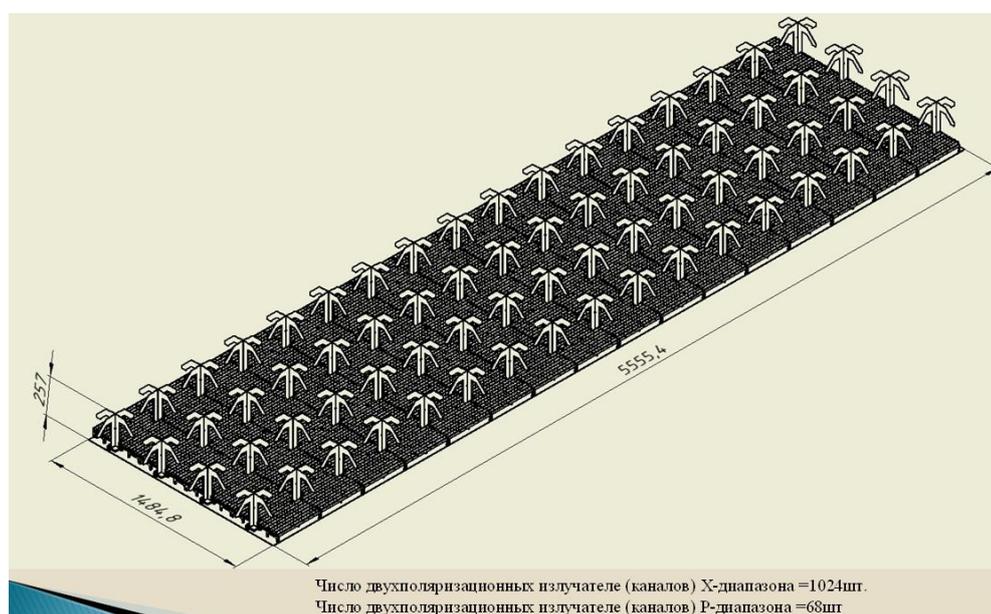


Рис. 5. Сравнение РЛИ Р и Х диапазонов

В результате исследований по построению и свойствам РСА ХР был разработан вариант космической РСА ХР с интегрированной АФАР. Её модули и конструктивные элементы показаны на рис. 6, 7. Исходные данные для расчётов основных характеристик показаны в таблице 2. Отметим, что зелёным цветом в таблице указан вариант с характеристиками РСА ХР, в котором используется четверть интегрированной АФАР. Этот вариант предполагается использовать в рамках НИР, хотя, если понизить требования по разрешению, этот вариант может быть использован и как самостоятельный, разрабатываемый в рамках отдельной ОКР.

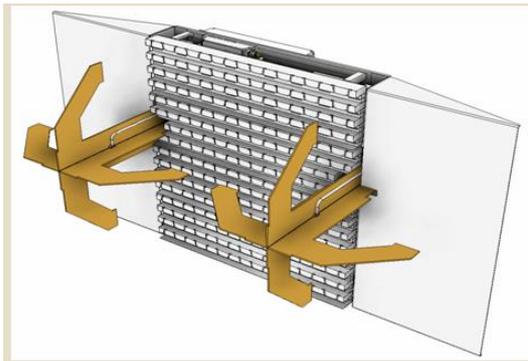
Одновременно с лётными исследованиями в АО «АЭРОКОН» разрабатывалось ПО формирования РЛИ и готовились оценки основных характеристик для РСА S диапазона «Кондор-Э» и для РСА ХР. Графики оценки основных характеристик РСА ХР показаны на рис.8–11. В подготовке иллюстрируемых в данной статье РЛИ также принимали участие сотрудники АО «АЭРОКОН». В качестве примера работы ПО штатных режимов и оценки уровня качества РЛИ РСА «Кондор-Э» на рис. 12 показаны РЛИ авиационной базы (США) TerraSAR и РСА КА «Кондор-Э». Что касается основных характеристик, они, судя по расчётам, вполне соответствуют современным требованиям, а именно: 1) пространственное разрешение в прожекторном режиме до 0,5 м в X диапазоне и до 5 м в Р диапазоне. При этом остальные характеристики не хуже, чем планировалось получить в РСА «ЭЛСАР» КА «Метеор-М» №3. Кроме того, предполагается, что в РСА ХР появятся интерферометрические и другие режимы. Кстати сказать, уже в этих (X и S) диапазонах имеется разница в характере РЛИ. Так, например, рулѐжные дорожки в X диапазоне светлые, а в S диапазоне – тѐмные. Сказывается уменьшение отражательной способности и увеличение проникающей способности.



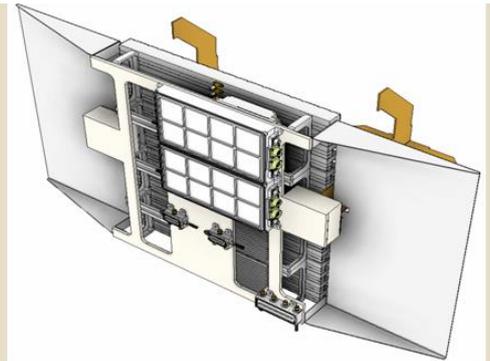
**Рис. 6. Макет интегрированной АФАР РСА ХР**

Таблица 2 – Исходные данные по характеристикам РСА ХР

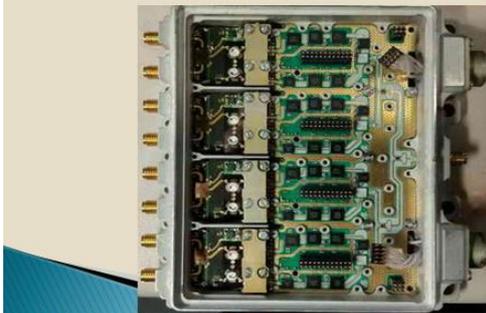
Параметр	Х диапазон	Р диапазон	Х диапазон (НИР)	Р диапазон (НИР)
Диапазон частот несущей, МГц	9300 – 9800	420–450	9300 – 9800	420–450
Длина волны, см	3,14	68	3,14	68
Максимальная ширина спектра зондирующего сигнала, МГц	500	30	200 (ограничена энергетическим потенциалом)	30
Поляризация сигнала, передача/прием	V/V, H/H, V/H, H/V, V/HV, H/VH	V/V, H/H, V/H, H/V, круговая	V/V, H/H, V/H, H/V, V/HV, H/VH	V/V, H/H, V/H, H/V, круговая
Поляризационная развязка сигналов, дБ, не менее	минус 25	минус 20	минус 25	минус 20
Тип антенного устройства, - размер апертуры по длине, м - размер апертуры по ширине, м - ширина ДН по углу места, градусы - ширина ДН по азимуту, градусы - число излучателей (каналов), шт.	АФАР 5,6 1,5 1,0±0.1 0,3±0.05 1024(Г), 1024(В)	АФАР 6,0 1,5 23.0±1.0 5.7±0.5 68(Г), 68(В)	АФАР 2,8 0,75 2,1±0.1 0,5±0.1 256(Г), 256(В)	АФАР 3,0 0,75 45.0±1.0 11.5±0.5 18(Г), 18(В)
Углы сканирования луча антенны: - по азимуту, градусы; - по углу места, градусы;	±1,5 ±15	±20 ±20	±0.75 ±15	±20 ±20
Пиковая излучаемая мощность АФАР, Вт	15360	27200 (круговая поляризация) 13600 (линейная)	3840	7200 (круговая поляризация) 3600 (линейная)
Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) в максимуме диаграммы направленности при установке луча: по нормали, дБВт при отклонении по азимуту на предельный угол, дБВт при отклонении по углу места на предельный угол, дБВт	89.5±0.5 89.0±0.5 88.5±0.5	66.5±0.5 65.0±0.5 65.0±0.5	77.5±0.5 77.0±0.5 76.5±0.5	55.5±0.5 54.0±0.5 54.0±0.5
Параметр качества на прием (G/Кш) в максимуме диаграммы направленности при установке луча: по нормали, дБВт при отклонении по азимуту на предельный угол, дБВт при отклонении по углу места на предельный угол, дБВт	44.0±0.5 43.5±0.5 43.0±0.5	19.5±0.5 18.0±0.5 18.0±0.5	38±0.5 37.5±0.5 37.0±0.5	13.5±0.5 12.0±0.5 12.0±0.5
Скважность, минимум	10	10	10	10
Вид модуляции излучаемого сигнала	ФМ, ЛЧМ	ФМ, ЛЧМ	ЛЧМ	ЛЧМ
Энергопотребление, кВт (при скважности 10)	9,0	6,0 (круговая поляризация) 3,0 (линейная)	2.2	1.6 (круговая) 0.8 (линейная)



Конструктивный элемент на технологической раме



Размещение ППМ X и P диапазона на технологической раме



ППМ X-диапазона



ППМ P-диапазона

Рис. 7. Конструктивные элементы интегрированной АФАР РСА ХР

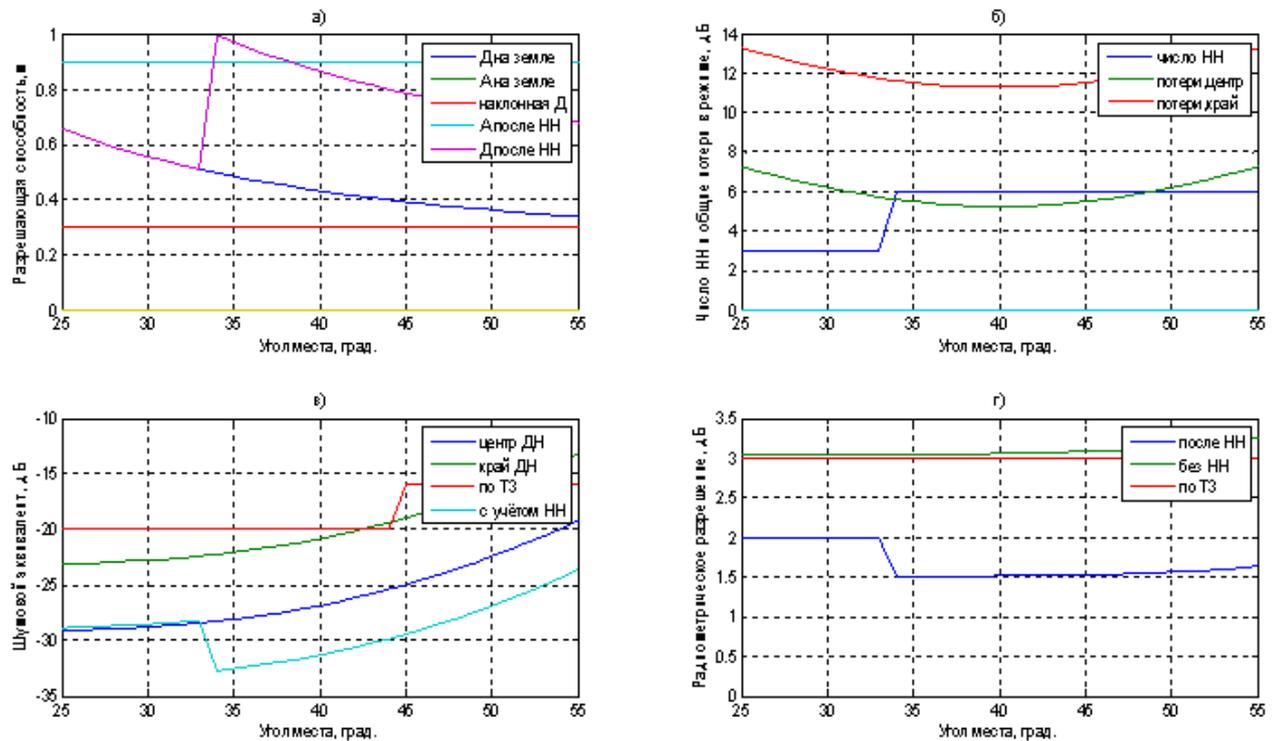
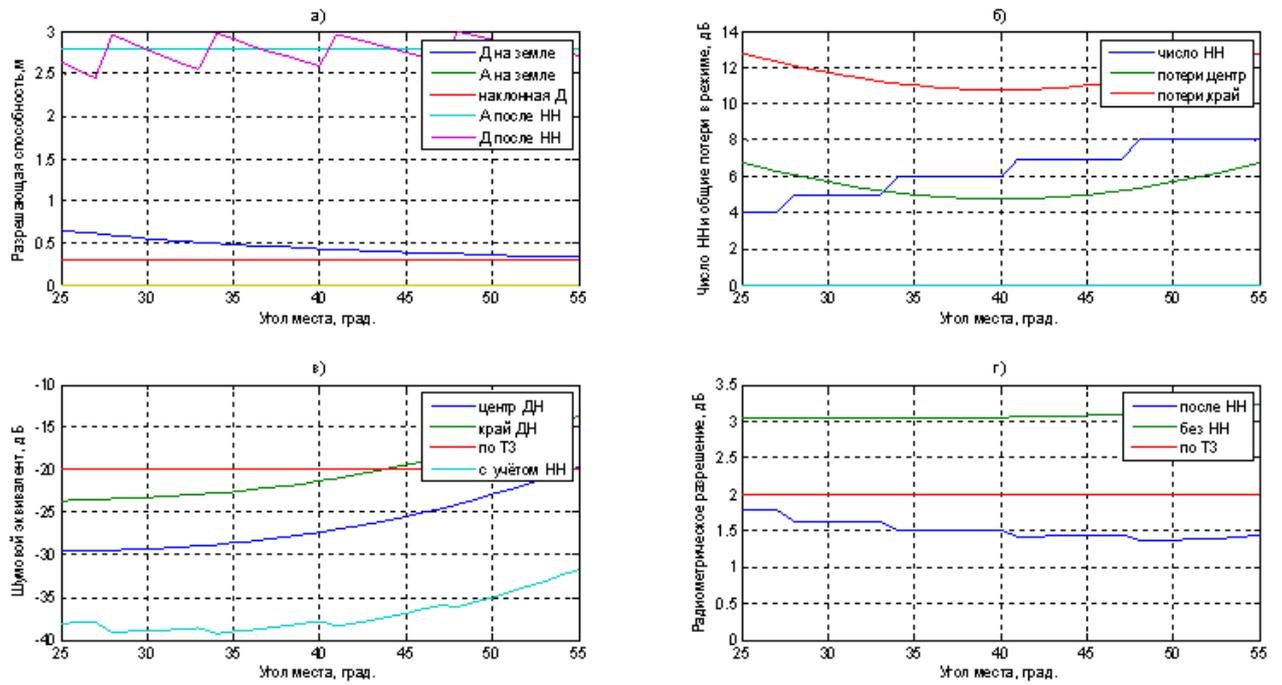
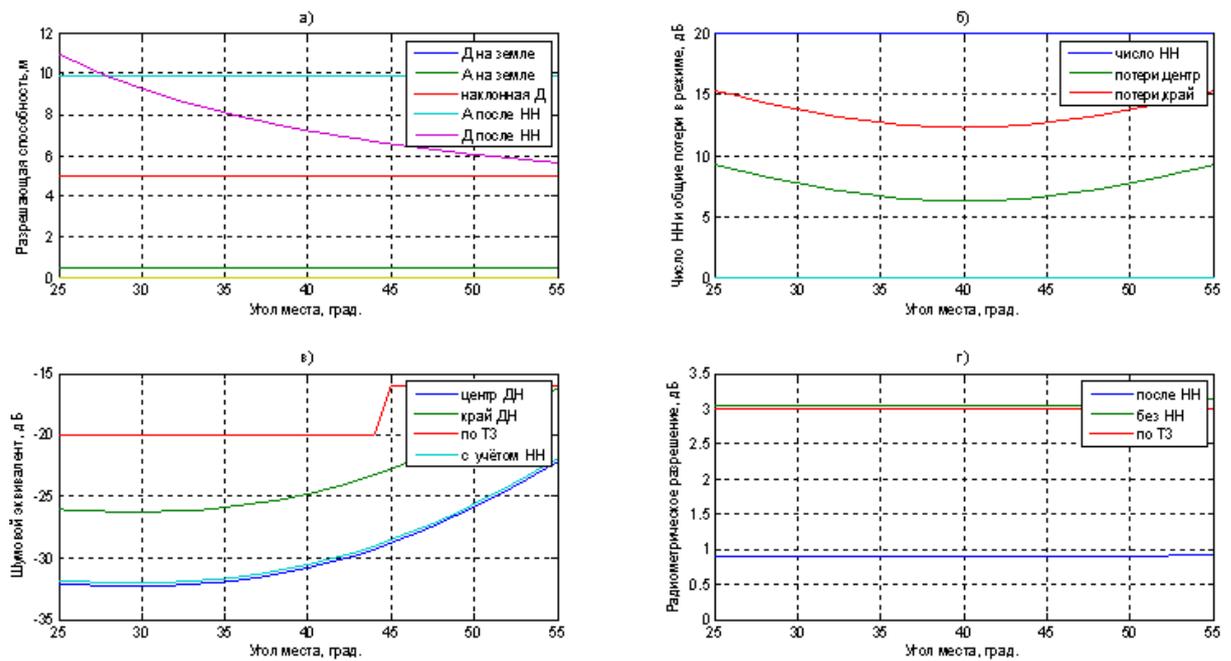


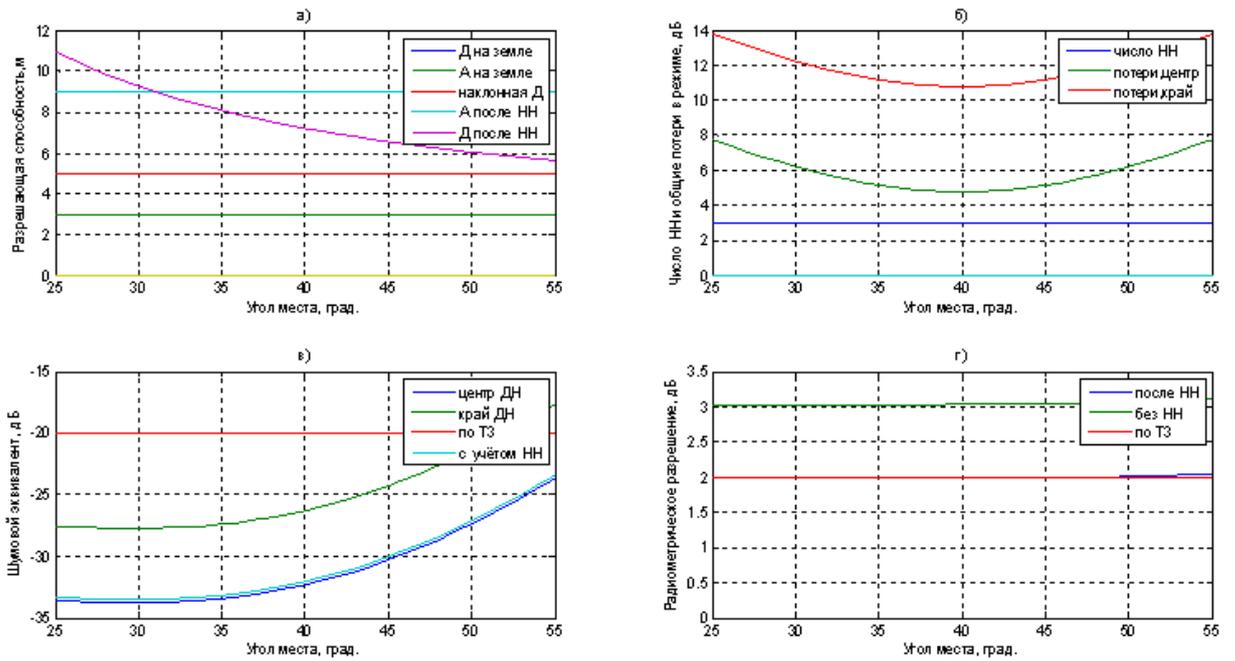
Рис. 8. Основные характеристики в проекторном режиме (телескопический обзор – ТО, X диапазон)



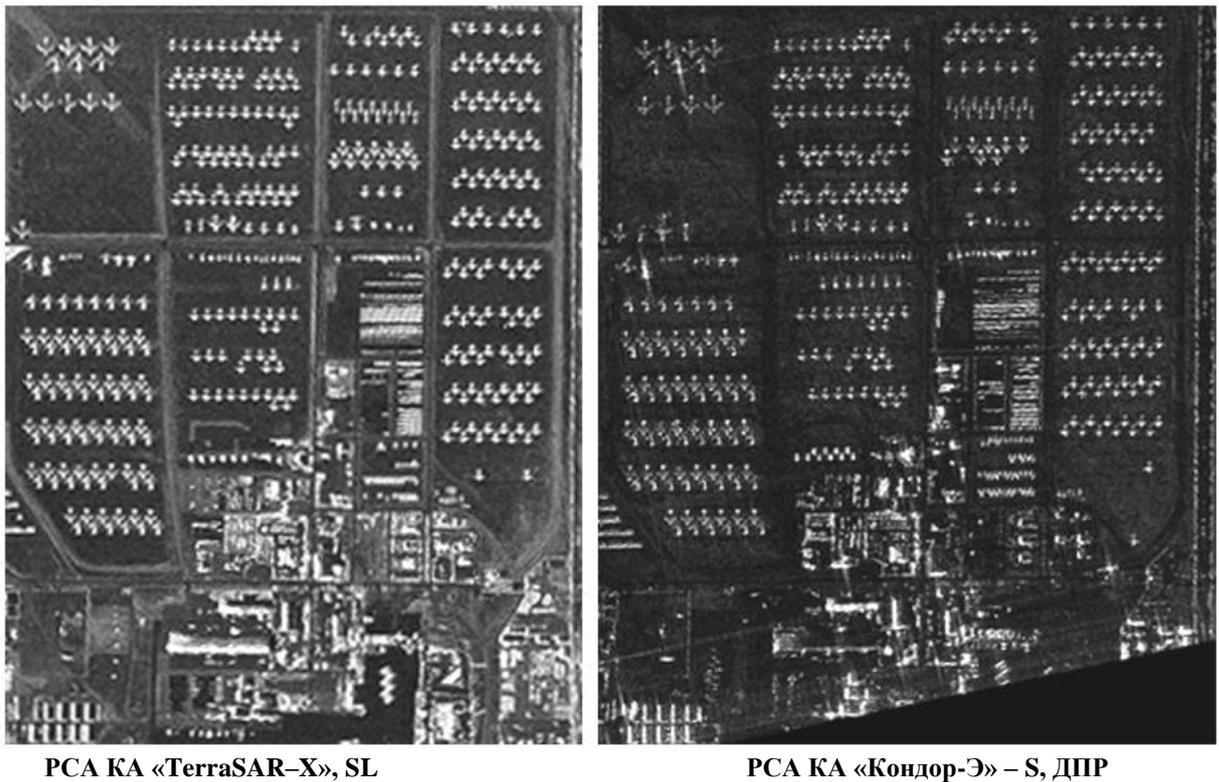
**Рис. 9. Основные характеристики в маршрутном режиме (боковой обзор – БО, X диапазон)**



**Рис. 10. Основные характеристики в прожекторном режиме (телескопический обзор – ТО, Р диапазон)**



**Рис. 11. Основные характеристики в маршрутном режиме (боковой обзор – БО, Р диапазон)**



**Рис. 12. Сравнение РЛИ самолетов на стоянке Девис-Монтан**

Наиболее проблематичными вопросами при формировании РЛИ в Р диапазоне считаются фазовые искажения отражённых сигналов и вращения вектора поляризации при прохождении ионосферы. Теоретические исследования и моделирование показывают, что с этими проблемами можно справиться. Что касается фазовых искажений, то при полёте малого самолёта или вертолёта их не меньше, чем теория

предсказывает в ионосфере. И они не менее причудливы. Влияние вращения же вектора поляризации заметно снижается при наличии одновременного приёма двух поляризаций. Такой вариант в рассматриваемом РСА ХР предусмотрен.

Изложенные материалы позволяют сделать вывод о том, что специалисты России готовы к созданию двухдиапазонной интегрированной РСА Х и Р диапазонов.

## Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005.
3. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005.
4. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
6. Turuk V., Verba V., Golovanova M., Neronskiy L., Zaitsev S., Tolstov E. Russian Spaceborne Synthetic Aperture Radar “Strizh” for Light Satellites of “Condor-E” type // Proc. EUSAR’2016. Hamburg, Germany. 2016. P. 947–952.
7. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В, Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. РСА космического аппарата «Кондор-Э» и её возможности // Исследование Земли из космоса, №3, 2017.
9. Fugro EarthData, Inc. 7320 Executive Way Frederick, MD 21704 Point of Contact: Brian Wegner TEL: 301-948-8550 FAX: 301-963-2064 E-MAIL: [bwegner@fugro.com](mailto:bwegner@fugro.com)
10. Васильев О.В., Детков А.Н., Зинченко О.Н., Криштопов А.В., Цветков О.Е. Малогабаритная радиолокационная система Р-диапазона беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы, № 2, т. 14, 2016.
11. Самарин О.Ф., Савостьянов В.Ю., Меркулов В.И. Интегрированные двухдиапазонные малогабаритные РЛС с синтезированной апертурой антенны // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2016, т.14, № 5.
12. Васильев О.В., Детков А.Н., Цветков О.Е., Криштопов А.В. Перспективная малогабаритная двухдиапазонная радиолокационная система для беспилотного авиационного комплекса ледовой разведки // Материалы Всерос. научно-технической конференции «XIII Научные чтения, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского» / Сборник докладов. – М.: Изд. дом Академии им. Н.Е. Жуковского, 2016.