

Итоги и уроки лётных испытаний РСАмалого космического аппарата «Кондор-Э»

М.И. Бабокин¹, А.В. Ефимов¹, С.Э. Зайцев², О.А. Карпов¹, В.В. Костров⁴, Л.Б. Неронский³, Г.В. Савосин², М.П. Титов¹, Е.Ф. Толстов¹, В.Э. Турук³, О.Е. Цветков¹

¹ЗАО «Аэрокон»,

²АО «ВПК «НПО машиностроения»,

³АО «Концерн радиостроения «Вега», (4) Муромский институт (филиал) ВлГУ

В докладе представлен малый космический аппарат «Кондор-Э», на котором установлен радиолокатор с синтезированной апертурой S-диапазона. Данный космический аппарат (КА) является одним из первых российских спутников, который позволяет получить радиолокационное изображение с разрешением порядка 1 м. Прием и первичная обработка радиоголограмм осуществлялись головным разработчиком КА – АО «ВПК «НПО машиностроения». В докладе представлены основные результаты проведенных летных испытаний, приведены радиолокационные изображения, полученные в штатных режимах обзора. Приводятся основные тактико-технические характеристики радиолокационной системы дистанционного зондирования Земли, которые подтверждены в результате измерений, в том числе на радиолокационных полигонах. Обсуждаются проблемы, которые возникали в процессе проведения испытаний, и методы их решения. Особое внимание уделяется экспериментальным режимам съемки, которые не предусматривались в проекте и были реализованы в процессе испытаний.

In this report is presented small satellite "Kondor-E", on which is set up S-band synthetic aperture radar (SAR). Given cosmic satellite is one of the first Russian satellites, which allows to get the radar images with resolution of the order 1 m. The reception and primary radio hologram processing were realized by main satellite developer – JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya». In report are presented main results of flight tests, are brought radar scenes, got in regular modes of the imaging. Main radar system tactician-technical features, which are confirmed as a result of measurements, including the radar test ground, are described. They are discussed the problems, which appeared in process of the undertaking the test, and methods of its decision. Special attention is spared to the experimental imaging modes, which were not provided in project and were marketed in process of the testing.

Введение

В декабре 2014 года в России на орбиту был выведен малый космический аппарат (КА) «Кондор-Э» с РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1,2] на борту. КА «Кондор-Э» запущен в интересах иностранного заказчика с космодрома Байконур [3]. Пуск осуществлён ракетой-носителем «Стрела» 19 декабря с площадки номер 175 в 7 часов 43 минуты по московскому времени. По орбитальным элементам Стратегического командования (СК) США параметры начальной орбиты КА «Кондор-Э» были следующими: наклонение – 74,75°; высота в перигее – 501,1 км; высота в апогее – 525,8 км; период обращения – 94,66 минуты. Головным разработчиком КА является АО «ВПК «НПО машиностроения», а разработчиком РСА – АО «Концерн радиостроения «Вега». За полтора года до этого АО «ВПК «НПО машиностроения» был запущен первый КА радиолокационного наблюдения высокого разрешения [4] (космодром Байконур, площадка 175, 27 июня 2013 г. в 19:53 мск). В каталоге СК США параметры начальной орбиты были следующими: наклонение – 74,73°, высота в перигее – 500,9 км, высота в апогее – 523,8 км, период обращения – 94,64 минуты. Таким образом, в течение полтора лет в России были выведено на орбиту два КА с РСА на борту.

Ко времени запуска первого КА серии «Кондор-Э» на орбите находились целые группировки КА с РСА на борту. В России же последний по счёту КА с РСА на борту прекратил свою работу за двадцать лет до этого запуска. Поэтому внимание к запуску специалистов по космической радиолокации было особое как в России, так и за её пределами.

Космические аппараты «Кондор-Э» предназначены для получения, хранения и передачи на наземные пункты приёма и обработки высокодетальной информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в микроволновом диапазоне спектра электромагнитного излучения. Его бортовая РЛС с синтезированной апертурой антенны обеспечивает круглосуточную и всепогодную съёмку земной поверхности. В общем, в состав КА «Кондор-Э» входит РСА и унифицированная космическая платформа, включающая бортовую вычислительную систему, командно-измерительную систему, систему телеметрических измерений, аппаратуру спутниковой навигации, систему сбора и передачи данных, двигательную установку, систему обеспечения теплового режима, систему генерирования электроэнергии и ряд других подсистем. Радиолокационная и служебная информация, передаваемая с борта КА «Кондор-Э» на наземный пункт, позволяют в наземных условиях не только сформировать радиолокационное изображение (РЛИ) земной поверхности, но и извлечь весьма широкий набор информации, содержащейся в радиоголограммах. Аппаратура РСА позволяет реализовать высокое пространственное разрешение и получать радиолокационные снимки с высокими изобразительными возможностями. Так при использовании сложных сигналов с максимально возможной для S-диапазона полосой частот 200 МГц, ограниченной Регламентом радиосвязи, достигается предельная разрешающая способность по наклонной дальности 0,75 м, а на местности – порядка 1 м.

Главной задачей запуска [3,4] малых космических аппаратов (МКА) серии «Кондор-Э» была отработка сквозного тракта бортовой и наземной аппаратурой синтеза радиолокационных изображений, а также последующая эксплуатация с получением информации из космоса. Финальным этапом разработки РСА МКА серии «Кондор-Э» стали их лётные испытания. И, хотя заказчик полностью удовлетворён качеством полученных снимков [5], результаты испытаний интересуют не только специалистов по радиолокации и космонавтике, но и потребителей информации радиолокационных средств, в первую очередь специалистов по дистанционному зондированию Земли. Интерес к возможностям «Кондора-Э» поддерживается ещё и тем фактом, что АО «ВПК «НПО машиностроения» выиграло тендер на «Выполнение СЧ ОКР «Создание космического комплекса радиолокационного оперативного всепогодного круглосуточного наблюдения Земли на базе КА типа «Кондор-Э» с радиолокатором S-диапазона» [5–8].

Техническое описание и основные характеристики РСА КА «Кондор-Э» достаточно весомо представлены в научной литературе (например, [9–11]). Общий вид КА «Кондор-Э» показан на рис. 1. При его разработке был принят ряд технических решений, предусматривающих гибкое цифровое управление положением полосы съёмки и параметрами сигнала, а также для оптимизации электропотребления в зависимости от циклограммы съёмки. В РСА использована легкая гибридная зеркальная антенна (ГЗА) с диаметром рефлектора около 6 м и эффективной площадью 28 м². Она установлена на поворотном устройстве, обеспечивающем выбор направления съёмки и перенацеливание по углу места. Поворотный облучатель в виде многорупорной линейной антенной решетки в горизонтальном положении обеспечивает работу с ГГ поляризациями и электронным сканированием луча в пределах $\pm 2^\circ$ по азимуту для телескопического (прожекторного) обзора. При переводе облучателя в вертикальное положение

предоставляется возможность работы с ВВ поляризациями и сканированием по углу места для оперативного перенацеливания полосы съемки, а также для работы в обзорном режиме.

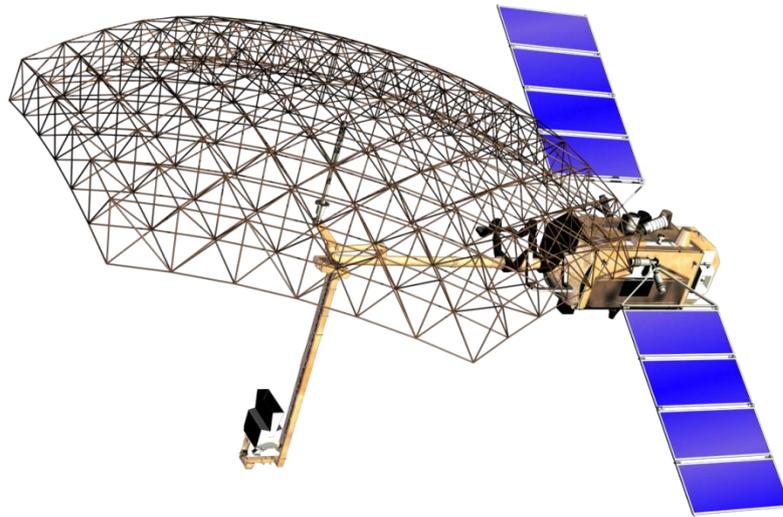


Рис. 1. Общий вид КА «Кондор-Э» с раскрытой антенной РСА

С целью решения широкого спектра пользовательских задач (см. таблицу 1) в РСА серии «Кондор-Э» реализован традиционный для космических РСА набор режимов дистанционного зондирования Земли. К ним относятся:

1) режим максимального разрешения – детальный прожекторный режим (ДПР); съемка осуществляется с использованием электронного разворота диаграммы направленности антенны (ДНА) в азимутальной плоскости; РЛИ представляется в виде кадра местности;

2) режим нормальной боковой (маршрутной) съемки – детальный непрерывный режим (ДНР); максимум ДНА перпендикулярен линии пути КА; РЛИ представляет собой полосу поверхности Земли;

3) широкозахватный режим съемки – обзорный режим (ОР); съемка осуществляется с использованием электронного сканирования ДНА в вертикальной плоскости (режим ScanSAR); РЛИ представляет собой набор парциальных кадров, из которых составляется полоса поверхности Земли по маршруту движения КА.

Следует отметить, что ещё в ходе наземных отладочных работ и испытаний подсистем РСА взгляды на режимы несколько трансформировались. Изменения, в основном, носят терминологический характер. В таблице 1 показаны обобщенные параметры режимов работы РСА «Кондор-Э», которые были сформированы до перехода к лётным испытаниям. Отличия от [9–11] состоят в том, что режимы ОР и СС объединены и называются ОР, поскольку в обоих режимах используется одинаковый вид обзора – ScanSAR. В группу ОР введены два режима с обозначениями ОР30 и ОР50, причём число в обозначениях режимов говорит о ширине полосы частот зондирующего сигнала (МГц). Что касается горизонтальной и вертикальной поляризаций излучаемого и принимаемого сигналов, то она соответствует положению облучателя. Это позволяет в ДНР пользоваться любой поляризацией. В таблице 2 также приведены требования к основным характеристикам РСА системы «Кондор-ФКА» [6–8], что даёт возможность соотнести характеристики РСА «Кондор-Э», «Кондор-ФКА» с возможностями зарубежных образцов РСА.

Таблица 1. Обобщенные параметры режимов работы РСА «Кондор-Э»

Режим/Параметр	ДНР «Кондор-Э»	ДНР «Кондор-Э»	ОР30 «Кондор-Э»	ОР50 «Кондор-Э»
Диапазон углов падения, град.	20...38...55	20...37...55	20...55	20...40...55
Разрешающая способность, м – дальность – азимут	2...1 1	2...1 3	14...12...5,5 12	6...12 12
Шумовой эквивалент, дБ	минус 25...20...14	минус 25...21...14	минус 33...25	минус 31...25...20
Радиометрическое разрешение, дБ	2,5	2,2...3	3,0...1,4	3...2
Полоса захвата (размер кадра), км	кадр 10×10...15×30	полоса 10...15...30	полоса 30...100	полоса 30...100

Таблица 2. Обобщенные параметры режимов работы РСА «Кондор-ФКА»

Режим/Параметр	ДНР «Кондор-ФКА»	ДНР «Кондор-ФКА»	ОР «Кондор-ФКА»
Диапазон углов падения, градусов	20...55	20...55	20...55
Разрешающая способность, м – дальность – азимут	1...2 1...2	1...3 1...3	6...12 6...12
Шумовой эквивалент, дБ	минус 22...20	минус 25...21	минус 25...30
Радиометрическое разрешение, дБ	3,0	3,0	2,0...3,0
Полоса захвата (размер кадра), км	кадр 10×10	полоса ≥10	полоса 20...100

Полный объём испытаний РСА включал четыре этапа:

1. теоретические оценки характеристик сквозного тракта РСА;
2. оценки потенциальных характеристик РСА по пилот-сигналу в ходе наземных испытаний;
3. повтор оценок потенциальных характеристик РСА по пилот-сигналу на первом этапе лётных испытаний, когда КА уже находится на орбите;
4. оценки реальных характеристик РСА по радиолокационным мирам.

Результаты теоретических оценок отражены в таблице 1. Что касается наземных и лётных испытаний, то речь о них идёт далее.

Наземные испытания РСА

К началу наземных испытаний РСА в комплексе с КА положение дел не вызывало тревоги. Однако именно наземные испытания и подготовили весь коллектив специалистов к спокойному отношению к неожиданностям, что можно трактовать как первые уроки испытаний. При анализе первых же записей радиоголограмм выяснилось, что зондирующий сигнал РСА имеет совершенно неприемлемые амплитудные и фазовые искажения, а когерентность принятого сигнала в ходе синтезирования апертуры нарушается практически во всех режимах. Правда, по разным причинам. Общая картина положения дел в ходе наземных испытаний представлена в виде графиков на рис. 2.

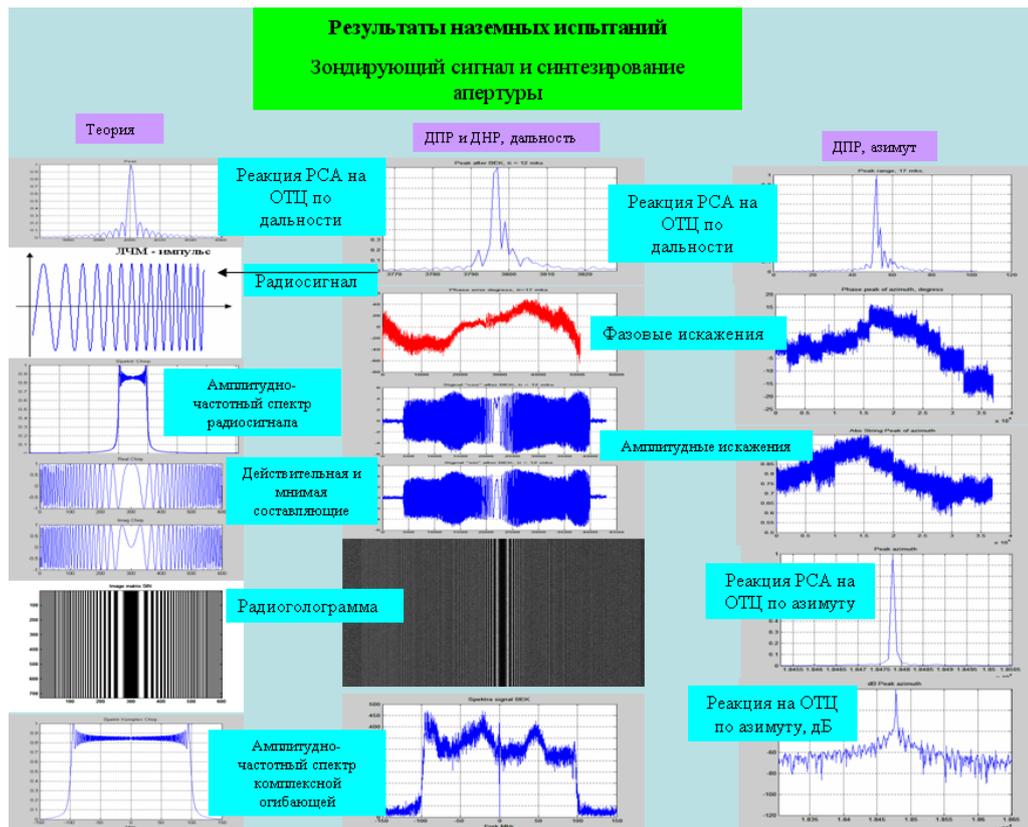


Рис.2. Общая картина первых результатов наземных испытаний

Здесь как пример показана общая картина первых результатов наземных испытаний в виде графиков. Столбец графиков слева отражает теоретические характеристики зондирующего сигнала и радиоголограммы. Амплитудные и фазовые искажения пилот-сигнала, прошедшего сквозной тракт, иллюстрируются центральным столбцом графиков. Правый столбец графиков представляет усреднённый вариант амплитудных и фазовых искажений сигналов на интервале синтезирования в ДПР. Для каждого столбца графиков показаны реакции РСА на одиночную точечную цель (ОТЦ).

После разработки способов учёта всех этих искажений КА и РСА были готовы к лётным испытаниям.

Лётные испытания штатных режимов

Конечно, лётные испытания РСА КА «Кондор-Э» сопровождалось оценками и измерениями характеристик радиолокатор на радиолокационных полигонах. В результате были получены данные, позволяющие утверждать, что все характеристики, помещённые в таблице 1, подтверждены. Однако есть смысл остановиться на основных сложностях и даже проблемах, с которыми пришлось столкнуться в ходе испытаний штатных режимов.

Прежде всего, следует подчеркнуть, что реальный сквозной тракт РСА по отношению к сквозному тракту пилот-сигнала, в котором исключаются мощные каскады, антенная система и среда распространения, вносит радикально иные искажения. Новые корректирующие сигналы были сформированы на основе съёмок радиолокационного полигона с мирами. Далее выяснилось, что расчёты параметров фокусировки в ДПР и ДНР с помощью штатной навигационной системы не дают желаемого результата. Только комбинируя инструментальный вариант фокусировки с автофокусировкой, удалось добиться удовлетворительного результата. Для точного определения положения диаграммы направленности по углу места и азимуту были

использованы свойства миграций и фокусировки (см. ниже) отражённого сигнала. При этом пришлось разработать и использовать алгоритмы формирования РЛИ при скошенном обзоре. И, наконец, долгая борьба за приемлемую точность определения местоположения объектов, включающая оценку аппаратных задержек в приёмо-передающем тракте и тонкости привязки синхронизации РСА к временным шкалам системы управления КА, закончилась удачей. Более того, в ходе ЛКИ выяснилось, что ряд позиций вектора состояния КА как носителя РСА при радиовидении в радиолокаторе может быть измерен точнее, чем в штатных системах.

На рисунках далее показаны примеры РЛИ, формируемые во всех трёх режимах съёмки. КА «Кондор-Э» является собственностью иностранного заказчика, и все снимки РЛИ публикуются с его разрешения. Отметим, что в большинстве случаев изображения показаны в координатах «наклонная дальность – горизонталь, азимут – вертикаль» без геометрической и радиометрической коррекции.

На рис.3–5 представлены РЛИ, характеризующие режимы съёмки РСА КА «Кондор-Э». Наибольший интерес специалистов вызывает ДПР, поскольку этот режим соответствует определению радиовидения [1], т.е. исходная разрешающая способность по дальности и азимуту около 1 м. На рис.3 приведено полученное в режиме ДПР изображение стоянки самолётов (авиабаза Девис-Монтен) со вставками, в которых масштаб увеличен, и самолёты видны более явно. Опытный дешифровщик по таким изображениям может решить ряд вполне конкретных задач [12].

Авиабаза ВВС США «Девис-Монтен» (Davis-Monthan Air Force Base) расположена в черте города Тусон, штат Аризона. Помимо строевых авиачастей и штабов, на базе «Девис-Монтен» хранятся на консервации, вероятно, крупнейший парк авиатехники в мире – более 4400 единиц, складировано и сорок космических кораблей. Город находится на юге Аризоны, на территории крупного оазиса в долине реки Санта-Крус, в окружении полупустынного плато. Ниже будут даны сравнения РЛИ аэродромных сооружений и самолетов в 10-см («Кондор-Э») и 3-см («TerraSAR-X») диапазонах волн.

Далее, на рис. 4 представлено РЛИ ГЭС Гранд Кулина реке Колумбия (штат Вашингтон, США). ГЭС Гранд Кули – гидроэлектростанция, расположенная в Северной Америке на реке Колумбия, самая крупная в США и шестая по мощности в мире. Сооружена в целях производства электроэнергии и орошения пустынных районов на северо-западном побережье. Водами водохранилища орошается около 2000 км² сельскохозяйственных площадей. Бетонная плотина ГЭС имеет длину 1592 м и высоту 168 м. Ширина водосливной части плотины – 503 м.

Следует подчеркнуть, что основное внимание в ходе испытаний уделялось ДПР и ДНР. Тем не менее, были проверены возможности РСА и в режимах ОР. На рис.5 в качестве примера показан фрагмент РЛИ (справа сверху), сформированный в ОР50 (исходное разрешение лучше 5 м по дальности и около 10 м по азимуту).

Здесь изображены окрестности небольшого города-порта Уиндем (справа сверху, небольшой портовый город на северо-западе Австралии) на территории штата Западная Австралия. Общий размер РЛИ охватывает площадь примерно 50×50 км². Здесь же, ниже, показаны фрагменты изображений этого же района, демонстрирующие так называемую склейку трёх парциальных кадров по дальности. Справа представлено РЛИ (залив Гумбольдта, шт. Калифорния, США) со склейкой трёх парциальных кадров по азимуту.

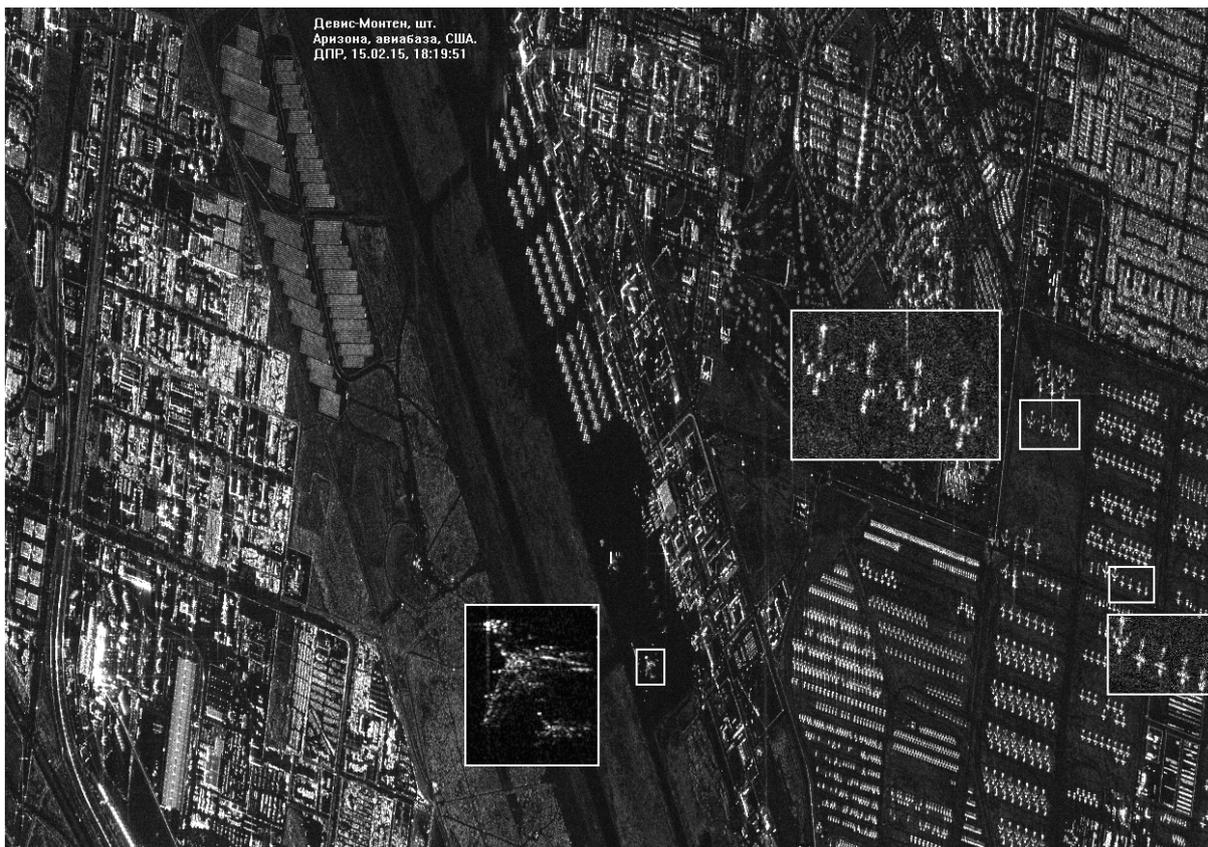


Рис. 3. ДПР, Devis-Monthan, авиабаза, США

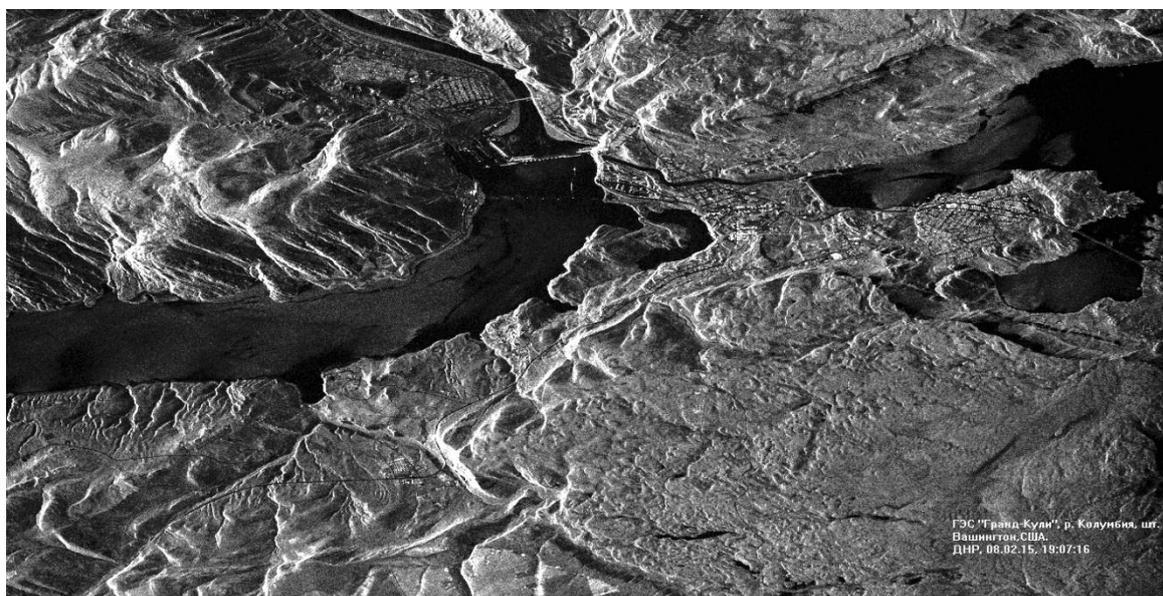


Рис. 4. ДНР, ГЭС «Гранд Кули», шт. Вашингтон, США

Выводы же по результатам лётных испытаний штатных режимов, которые можно отнести к первым урокам, имеют гораздо более общий характер и сводятся к следующим требованиям:

1. К моменту начала работ тщательно разработать и подробно изложить планы и методики наземных и лётных испытаний.

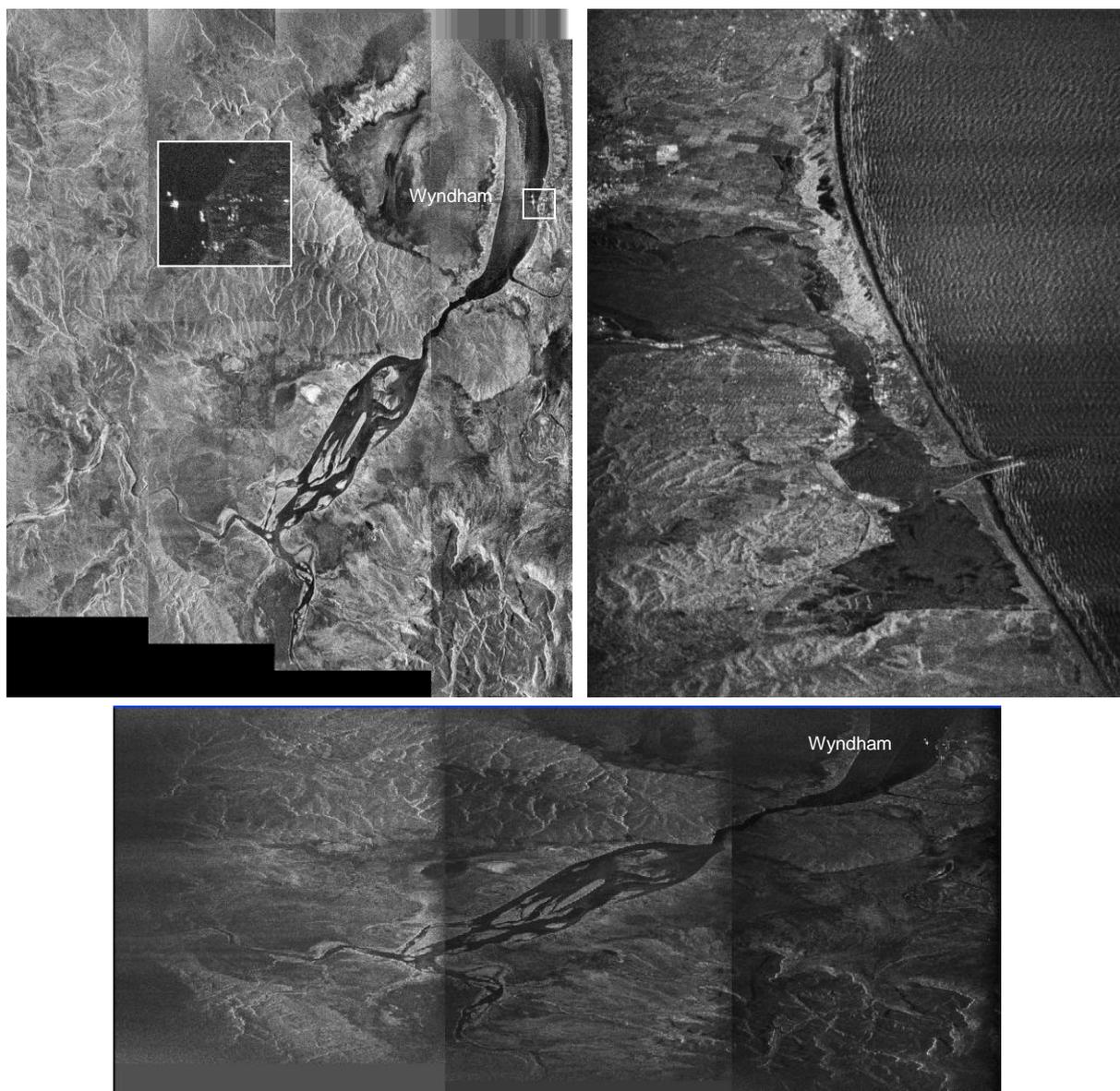


Рис. 5. ОР50, РЛИ общего вида местности вблизи города-порта Уиндем (Западная Австралия) и залива Гумбольдта (шт. Калифорния, США)

2. Для управления РСА и обработки радиоголограмм использовать только свои программы.

3. В ходе наземных испытаний проанализировать все возможные варианты развития событий и не оставить открытых вопросов в процедурах обработки радиоголограмм.

4. В ходе наземных испытаний в процедурах управления съёмкой не оставить открытых вопросов.

5. Начать лётно-конструкторские испытания с повтора программы наземных испытаний.

6. Постоянно контролировать правдивости технических характеристик подсистем КА.

7. По возможности проверить точность оценок параметров движения и ориентации КА подсистем с помощью РСА.

Далее предстояло исследовать возможности расширения функций РСА космического аппарата «Кондор-Э», связанные с введением новых режимов. Такие режимы стали называться экспериментальными.

Исследования экспериментальных режимов

В ходе лётных испытаний по плану, а отчасти и по необходимости, решались вопросы, связанные с разработкой новых режимов работы РСА и синтезом новых алгоритмов обработки радиоголограмм. Это в первую очередь было связано с формированием РЛИ при «скошенном» виде обзора [13], оценкой рельефа местности и его изменений [14], а также селекцией движущихся целей по тангенциальной скорости, обнаружением аномалий на морской поверхности [15] и возвышающихся объектов с помощью фазовых портретов. Далее описаны явления и приведены примеры изображений, связанные с экспериментальными режимами. Следует признать, что не все алгоритмы окончательно отработаны и не все явления имеют прозрачную физическую интерпретацию. Работа над экспериментальными режимами продолжается в рамках ОКР «Кондор-ФКА». На рис.6 показано РЛИ, сформированное при переднебоковом обзоре. Отклонение диаграммы направленности (ДН) вперёд примерно на её ширину, что составляет около 1° .

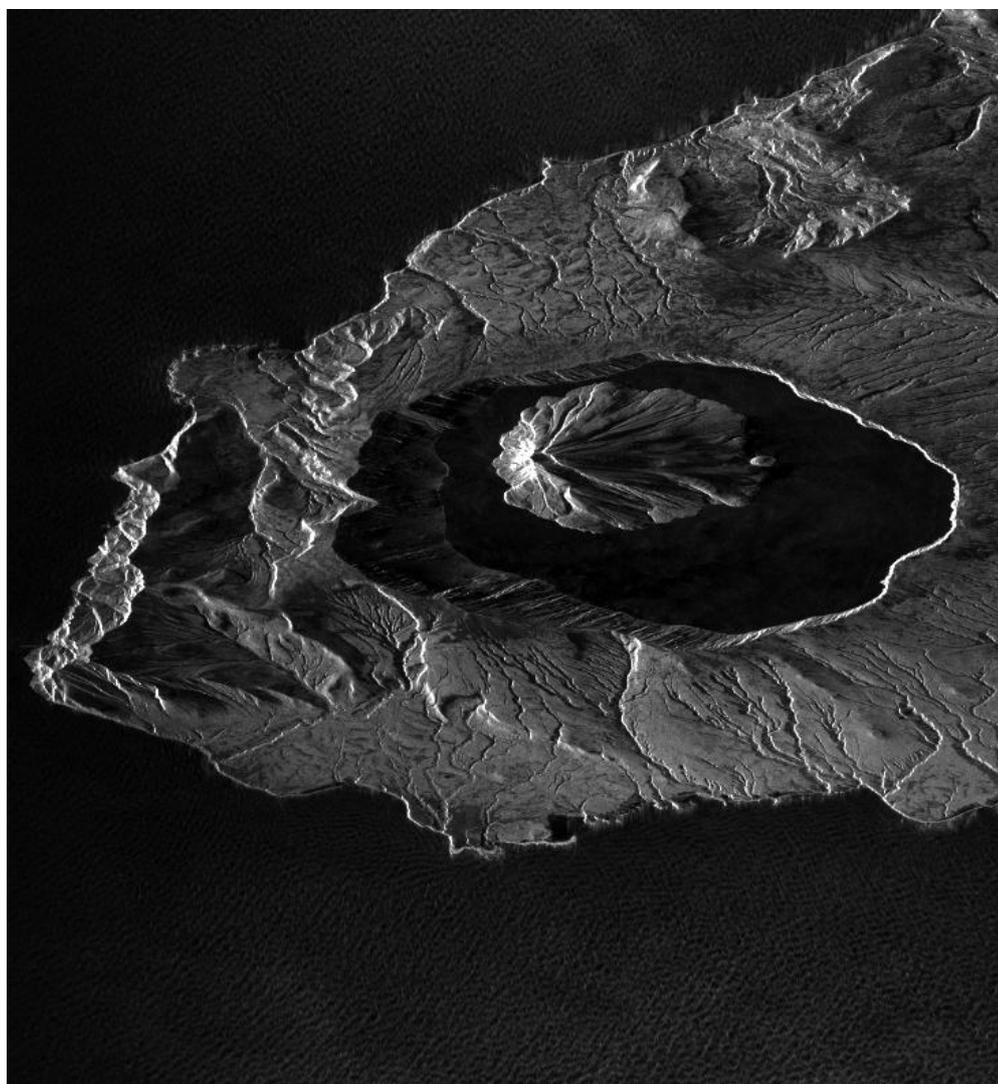


Рис. 6. ДНР, озеро Кольцевое, Курилы, Россия

На основе этой съёмки был реализован вариант однопроходной интерферометрической оценки рельефа местности, результаты которой показаны на рис. 7. Здесь представлены: фрагмент традиционного РЛИ (слева сверху), результат

оценки с контурами одинаковых высот (справа сверху), фотоизображение с контурами одинаковых высот (слева внизу) и сечение рельефа по стрелке.

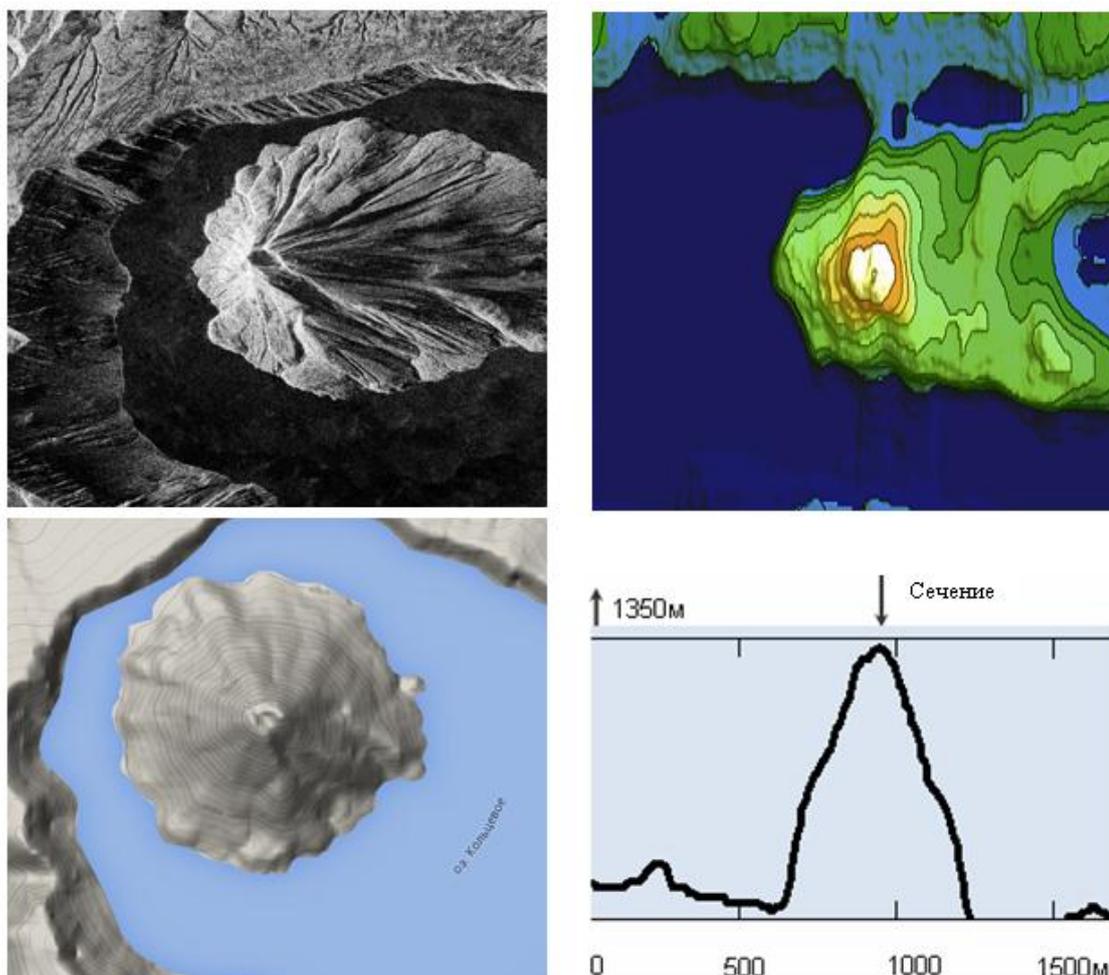


Рис. 7. Оценка рельефа местности, вулкан, озеро Кольцевое, Курилы, Россия

Конечно, точность оценки рельефа в этом случае не высока, но она может удовлетворить, по крайней мере, в случае оперативной необходимости. При всём том, что в оценке совершенно очевидно сильное влияние теней, сама оценка представляется удовлетворительной и близкой к измеренным ранее значениям. Впрочем, теоретические оценки обнадеживают.

На рис. 8 представлены зависимости ошибки оценивания относительного рельефа σ_h при ОБО (однопроходный интерферометр с двумя КА при боковом обзоре), ББО (бистатистический интерферометр с поперечным смещением при боковом обзоре) и ОПБО (однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре). Рассматривается вариант, когда угол отклонения от нормали к линии пути при ОПБО $\alpha_0 = 10^0$, а разрешающая способность в азимутальном направлении $\delta x \approx 3..4$ м и по наклонной дальности $\delta r = 3$ м. Выбрана ситуация, когда обеспечивается за счёт выбора базовых параметров и разрешающей способности РСА высокая потенциальная точность оценивания при корреляции парных сигналов выше 0,8. Здесь символ B с индексом, λ и H представляют базу интерферометра, длину волны РСА и высоту орбиты КА.

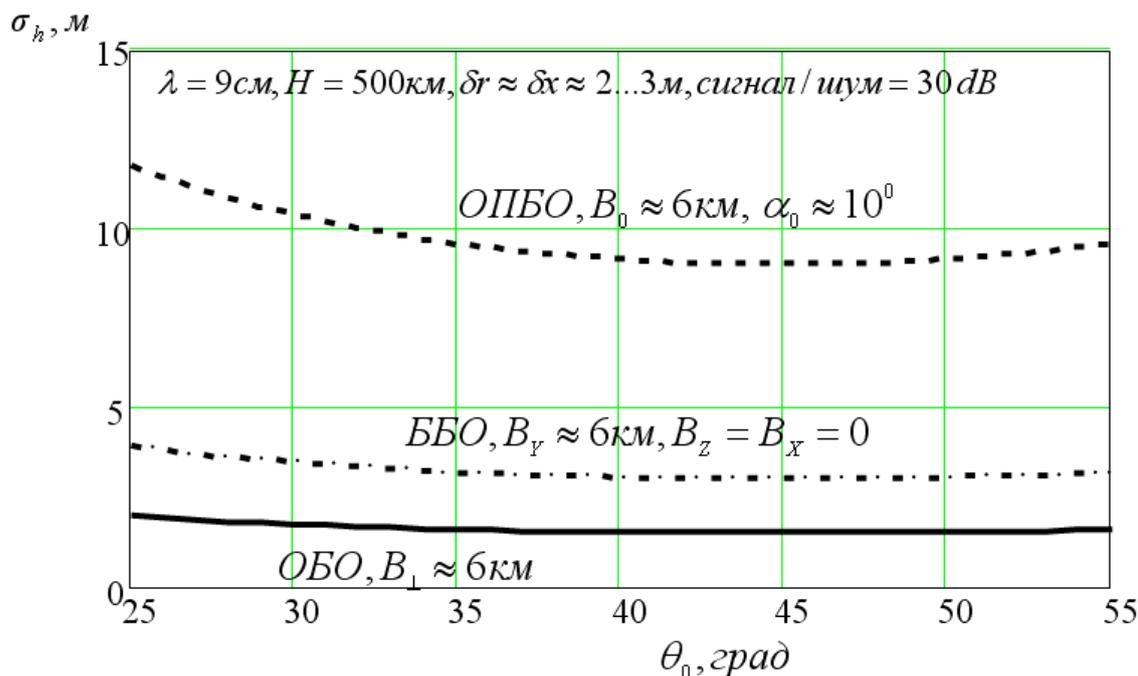


Рис. 8. Зависимость ошибки оценивания относительного рельефа

Немало неожиданных эффектов даёт сочетание и несогласованность по трём параметрам съёмки: скошенному обзору, фокусировке РЛИ и миграций дальности. Так на рис. 9 слева показано штатное РЛИ с приведённой скоростью для неподвижных объектов, справа – при приведённой скорости на 10 м/с больше. Видно, что на правом снимке оказались сфокусированными движущиеся цели, причём их отметки сдвинуты по дальности. Таким образом, появляется возможность селективировать цели по тангенциальной скорости и даже определять значение этой скорости.

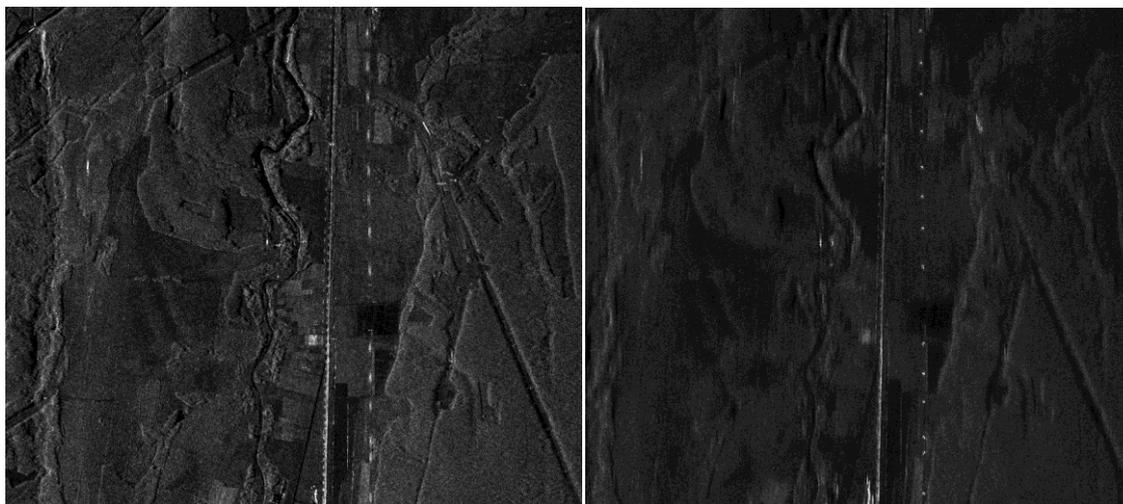


Рис. 9. Селекция движущихся целей (СДЦ) по тангенциальной скорости

Вместе с тем известно, что получаемые в РСА радиолокационные изображения передают характерные особенности местности, объектов, растительного покрова благодаря их различиям в функции отражения. При этом обычно интенсивность каждой точки радиолокационного изображения пропорциональна амплитуде отраженного сигнала соответствующего разрешаемого участка поверхности. Формируется, так называемый амплитудный портрет. Таким образом, амплитудный

портрет– это такое радиолокационное изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна амплитуде отраженного сигнала от соответствующего разрешаемого участка поверхности.

Однако движение объектов, изменение их отражающих свойств во времени и по координатам определяют не только амплитудные различия элементов РЛИ, но и *фазовые*. Различают *статический фазовый портрет* и *динамический фазовый портрет* [16].

Статический фазовый портрет – это радиолокационное изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна начальной фазе функции отражения соответствующего разрешаемого участка поверхности или разности фаз функции отражения в двух каналах обработки траекторного сигнала (например, каналов дальности, доплеровских, а также пространственных, поляризационных и т.д.). Этот метод позволяет обнаружить изменение отражающих свойств элементов разрешения РСА, например, вследствие их различных диэлектрических свойств.

Динамический фазовый портрет– это радиолокационное изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов двух разнесенных во времени (а также в пространстве и времени и т.п.) каналов РСА соответствующего разрешаемого участка поверхности. Динамический фазовый портрет чувствителен к изменению фазы функции отражения во времени. Это изменение может быть обусловлено движением отражающей поверхности либо изменением ее свойств.

Наиболее интересные варианты использования фазовых портретов в сочетании с интерферометрической обработкой иллюстрируются РЛИ, показанными на рис.10 и 11 [17]. На первом фазовом портрете (рис.10) более явно, чем на амплитудном портрете, выделяются возвышающиеся строения. Дело в том, что наличие этих строений провоцирует нарушение фазовой структуры отражённого сигнала и проявляется оно при изменении пространственного положения РСА, например, за счёт естественного смещения носителя. Таким образом, происходит относительный сдвиг фазы сигнала в смежных сеансах наблюдения. Особенно эти отклонения проявляются при «скошенном» обзоре.

На втором (рис.11) представлены радиолокационные изображение (РЛИ с пониженным разрешением) морской поверхности и интерферограммы (разность фаз парных сигналов) с активным движением объектов для иллюстрации возможности их обнаружения и измерения параметров движения. Как и в предыдущем случае, парные сигналы формируются в смежных сеансах наблюдения с относительным смещением в доли интервала синтезирования. Чтобы минимизировать влияние фазовых отклонений высотного характера, исследование проявлений движущегося объекта целесообразно проводить при боковом обзоре. В данном случае «яркость» на интерферограмме показывает скорость и направление движения объекта. Из анализа представленных данных можно сделать вывод, что одна часть кораблей движется «налево» (максимальная яркость на интерферограмме), другая часть с минимальной яркостью «направо», и есть группа неподвижных объектов в нижней части изображения.

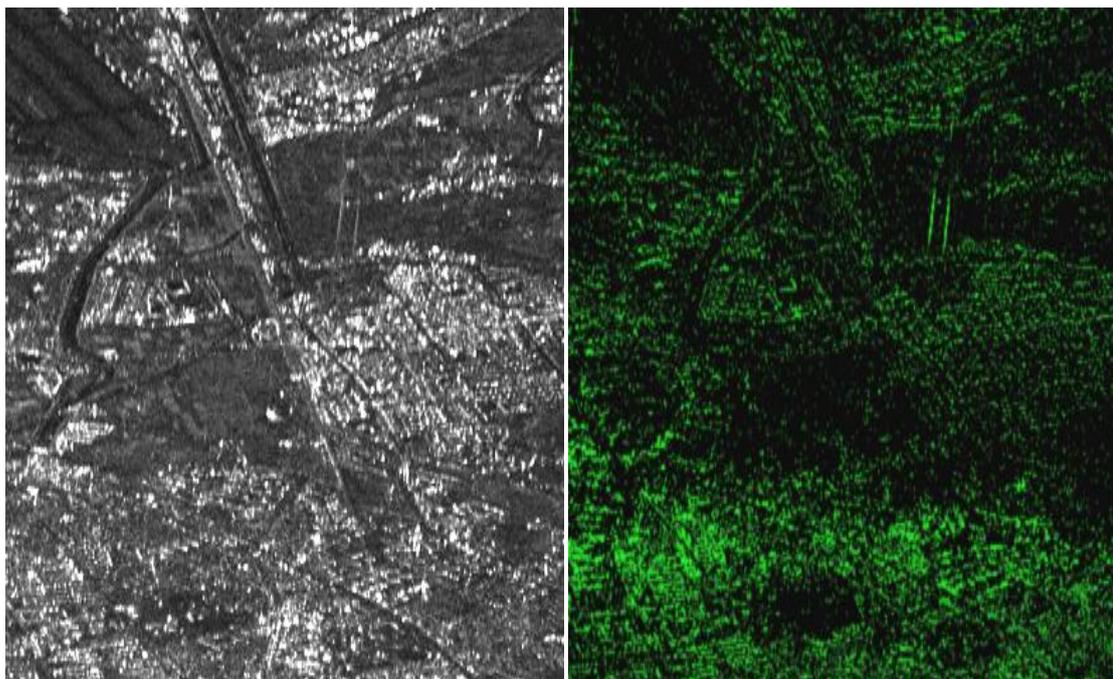


Рис. 10. Амплитудный и статический фазовый портреты в районе аэропорта г.Сеул

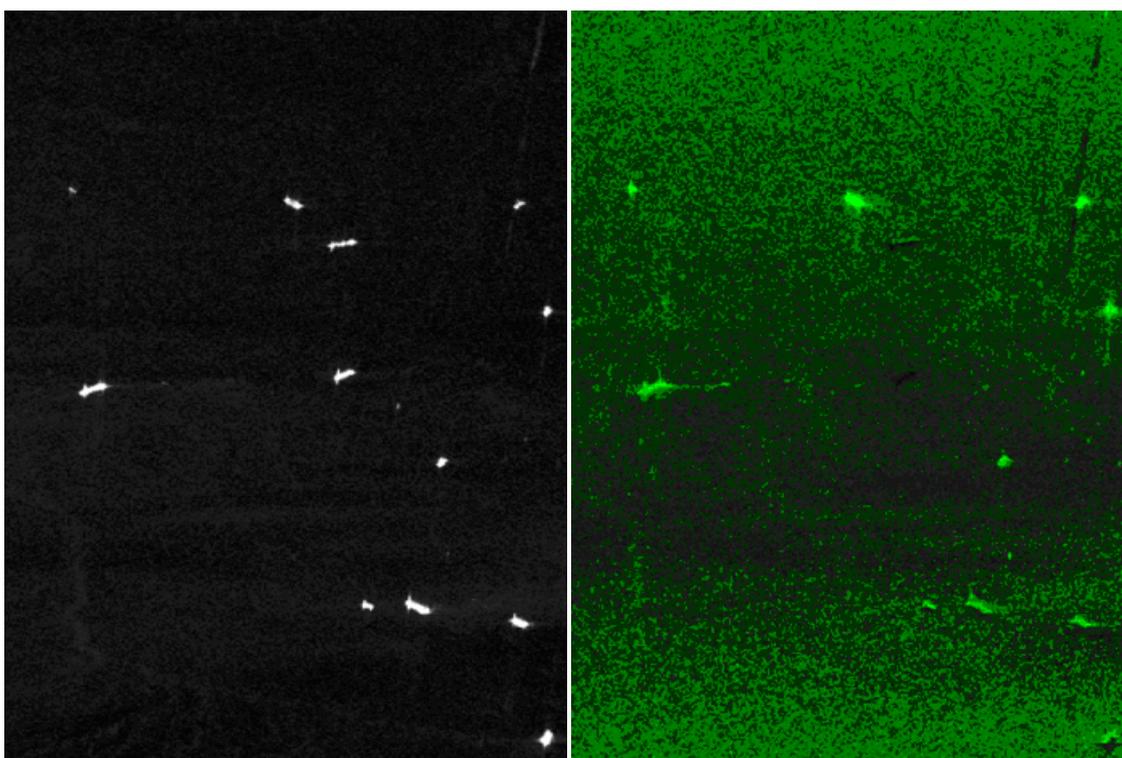


Рис. 11. Амплитудный и динамический фазовый портреты морской поверхности и судов

Таким образом, можно утверждать, что результаты экспериментальных исследований новых возможностей РСА КА «Кондор-Э» позволяют надеяться на то, что при проектировании набор штатных режимов РСА КА «Кондор-ФКА» даже без аппаратных доработок можно расширить, введя ряд новых, включая интерферометрические.

Сравнение РЛИ РСА «TerraSAR-X» и «Кондор-Э»

Конечно, представляется интересным сравнить возможности КА «Кондор-Э» с типовым вариантом современных РСА космического базирования, находящимися на орбитах в настоящее время. Наиболее представительным и перспективным образцом такой РСА, судя по доступной литературе, является РСА КА «TerraSAR-X», которая с РСА КА «TanDEM» образуют бистатическую пару и к которой вскоре может присоединиться РСА КА «TerraSAR-L» [18–22].

При внимательном изучении содержания табличесных характеристик этих радиолокаторов можно обнаружить множество схожестей РСА КА «Кондор-Э» и «TerraSAR-X». Так, обе РСА были установлены на малых КА и выведены примерно на одинаковые (500 км) высоты орбит. В обеих РСА одинаковый набор штатных режимов и в этих режимах близкие значения пространственных разрешений. Однако между РСА КА «Кондор-Э» и «TerraSAR-X» немало и отличий. Среди отличий есть принципиальные. К главным, в первую очередь, следует отнести разные диапазоны радиоволн (на КА «TerraSAR-X» – X-диапазон, на КА «Кондор-Э» – S-диапазон) и разницу в построении антенных систем (на КА «TerraSAR-X» – АФАР, на КА «Кондор-Э» – гибридная схема [8–10]).

Области применения данных дистанционного зондирования, полученных с КА «TerraSAR-X», близки к областям применения КА «Кондор-Э» и декларируются так:

1. Создание и обновление топографических и специальных карт, вплоть до масштаба 1:10 000.
2. Создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ) высокой точности (2–4 м по высоте).
3. Высокоточное наблюдение за состоянием объектов транспортной инфраструктуры (трубопроводы, железные дороги и т. д.), а также различных строений, инженерных сооружений и т. д.
4. Оценка сейсмической опасности, прогнозирование землетрясений, извержений вулканов.
5. Всепогодный мониторинг последствий природных и антропогенных катастроф (половодья, землетрясения, цунами, техногенные аварии и т. д.).
6. Контроль береговых зон и наблюдение за судами.
7. Картирование сельскохозяйственных культур, определение состояния посевов, высокоточное сельское хозяйство.
8. Картирование древостоев, определение породного состава лесов без наземных исследований, мониторинг вырубок и состояния лесов.
9. Контроль и управление городской средой.
10. Обеспечение обороны и безопасности.

Если при сравнении речь идёт только о штатных режимах радиолокационного картографирования, то можно утверждать, что характеристики РСА КА «Кондор-Э» и «TerraSAR-X» близки. Всем перечисленным областям применения РСА КА «Кондор-Э» удовлетворяет. Уже по ходу анализа основных характеристик РСА КА «TerraSAR-X» и КА «Кондор-Э» становится явным их соразмерность. Если рассматривать вопрос более тонко, то можно найти, что в штатных режимах разрешение по дальности в РСА КА «Кондор-Э» несколько лучше, благодаря более широкому спектру зондирующего сигнала, а в РСА КА «TerraSAR-X» – более широкая полоса захвата в StripMap Mode (режим ДНР в РСА «Кондор-Э») из-за меньшего размера антенны по вертикали. Режим SlidingSpotLight в РСА «TerraSAR-X», видимо, введен для расширения кадра РЛИ до размеров $10 \times 10 \text{ км}^2$, что из-за узости диаграммы направленности (ДН) по азимуту в режиме HighRes. SpotLight оказывается затруднено. В РСА КА «Кондор-Э» этого не

требуется, поскольку ДН по азимуту достаточно широкая. И, наконец, экспериментальные режимы обеих РСА открывают серьёзные перспективы для них.

Возвращаясь снова от экспериментальных к штатным режимам, как наиболее весомым для практики, следует отметить впечатляющее сходство РЛИ, полученные с помощью РСА КА «TerraSAR-X» в X -диапазоне, и РЛИ тех же объектов, сформированные в рамках РСА КА «Кондор-Э» в S -диапазоне. На рис.12 представлены фрагменты РЛИ авиабазы Девис-Монтен, изображение которого показаны на рис.3. Похожее РЛИ авиабазы Девис-Монтен, сформированное РСА КА «TerraSAR-X» и представленное на этом же рисунке, позаимствовано из [19]. В дополнение к этому, РЛИ фрагмента аэродрома Джибути, Сомали показано на рис.13. Отметим, что ракурсы наблюдения и размеры кадров РЛИ примерно одинаковы.

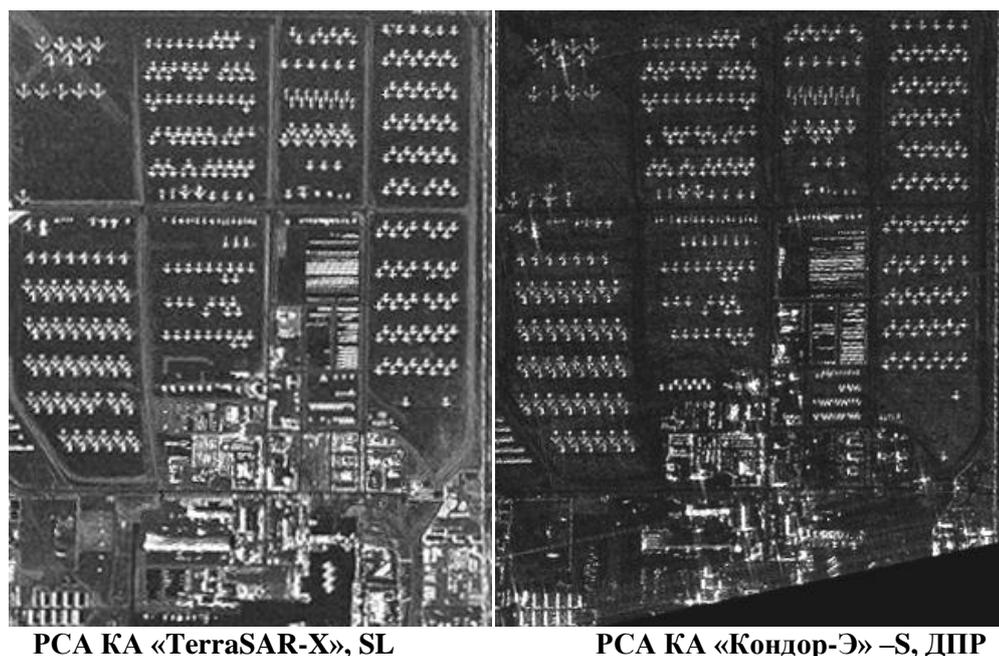


Рис. 12. Сравнение РЛИ самолетов на стоянке Девис-Монтан

Сравнение РЛИ самолетов на стоянках (рис. 11) показывает близость их портретов, получаемых в X - и S -диапазонах волн. Лучшее разрешение в S диапазоне обусловлено полосой зондирующего сигнала 200 МГц в ДПР в сравнении со 150 МГц в «следящем режиме» «TerraSAR-X». Тем не менее, самолёты на обоих снимках выглядят примерно идентично, теней от самолётов практически не видно, аэродромное хозяйство узнаваемо и соотносимо.

Вместе с тем, отличия изображений на этих снимках между X - и S -диапазонами может быть не очень заметные, но очень важные. При внимательном рассмотрении обращает на себя внимание то, что в S -диапазоне заметное ослабление фона местности и более значимо проявляющееся проникновение в плотные среды. Так, более заметный контраст изображений в S -диапазоне обусловлен меньшим отражением от земной поверхности. По-разному выглядят рулёжные дорожки между прямоугольными стоянками самолётов: в X -диапазоне они оказываются светлыми на тёмном фоне местности, а в S -диапазоне они становятся тёмными на чуть более светлом фоне местности. Более того, на и так тёмном фоне местности в S -диапазоне появляются совсем тёмные дорожки, которые не видны в X -диапазоне (см. левую верхнюю стоянку).



**Рис. 13. РЛИ фрагмента аэродрома Джибути, Сомали.
КА «TerraSAR-X», X-диапазон, 2008-08-19, HH, SL, 54,3 deg.
КА «Кондор-Э», S-диапазон, 04.02.2015, VV, ДПР, 40,6 градусов**

Все предыдущие наблюдения подтверждаются и изображением на рис. 13. Особенно это убедительно выглядит с учётом заметно более яркого фона местности вблизи взлётной полосы в X-диапазоне по отношению к S-диапазону. Немаловажным фактом является ещё и то, что слева, внизу снимка, где расположено строение прямоугольной формы, окружающий лесной массив близок на снимках по яркости. Это подтверждает известное положение о том, что УЭПР леса при углах падения близких к 45° слабо отличаются в X- и S-диапазонах.

Таким образом, в данном случае сравнение РЛИ двух РСА разных диапазонов волн позволяет лишь подтвердить, что характеристики их близки, а также то, что в S-диапазоне на РЛИ заметное ослабление фона местности и более значимо проявляющееся проникновение в плотные среды, чем в X-диапазоне. Вместе с тем, подтверждается очевидный вывод: экспериментальные исследования радиолокаторов разных диапазонов волн требуется продолжить.

Вторые уроки

Теперь хотелось бы сказать несколько слов о, так сказать, необязательной, но интересной части этого сообщения про РЛИ при радиовидении. Формируя РЛИ и позже изучая их, наши специалисты часто сталкиваются с неожиданностями, не всегда получающими объяснение. Назовём это вторыми уроками. Вот некоторые из них.

На рис. 14,15 показаны фрагменты РЛИ городов (деловой район на базе Перл Харбор, США и стадион в г. Хэйхэ, Китай) с высотными домами и телебашней. Справа на рис. 14 представлены космические фотоснимки примерно того же района базы Перл Харбор. Высотные сооружения на РЛИ оказываются вытянутыми по дальности в сторону облучения. Поскольку облучение производится под углом $30^\circ \dots 50^\circ$ по отношению к земной поверхности, то на РЛИ по мере увеличения дальности сначала появляется изображение верхней части высотных сооружений, а затем средняя по высоте его часть и, наконец, цокольный этаж. Далее видна радиотень. Вся картина

представляется объяснимой. Вместе с тем часто, что соответствует приёмам дешифрирования оптических снимков, изображение располагают тенями к оператору, как это показано на рис. 16, 17. И сразу же возникает впечатление, что высотные сооружения прозрачны: сквозь них видны другие здания. Это хорошо проявляется на рис. 17 для правого высотного дома. Но следует помнить, что развёртка РЛИ производится по дальности, а не по углу. Такой эффект возникает из-за того, что облучение сцены производится с одной стороны, а рассматривается картина со стороны, противоположной облучению.



Рис. 14. ДПР, Pearl Harbor, военно-морская база, США. Деловые районы



Рис. 15. ДПР, РЛИ района города Хэйхэ со стадионом



Несколько следующих снимков связаны с решением задач распознавания по РЛИ сложных объектов, таких как самолёты. На рис. 18 показано изображение аэропорта Гонконга (Китай). На РЛИ хорошо виден ряд из трёх самолётов, стоящих боком по отношению направления излучения (середина левой половины снимка). И почти совсем не виден вертикальный ряд из более крупных самолётов (почти центр снимка). Этот факт наводит на мысль, что при обнаружении и распознавании самолётов ракурс самолётов горизонтального ряда предпочтительнее, чем вертикального. Теперь рассмотрим три увеличенных изображения самолётов из этих же рядов, помещённых отдельно слева от общего снимка. Выясняется, что при увеличении изображений самолётов вертикального ряда самолёты на изображении видны более явственно, а при увеличении изображений самолётов горизонтального ряда – контуры самолётов начинают теряться, а левый в ряду объект уже трудно отнести к самолётам.

Интересна также разница в изображении объектов (см. рис. 19 [18–22]) на других снимках. На этом рисунке представлены РЛИ, сформированные РСА КА «TerraSAR-X» и «Кондор-Э». Большая часть изображений получена РСА КА «TerraSAR-X», только слева внизу рисунка показаны фрагменты РЛИ, сформированного РСА КА «Кондор-Э» и помещённого на рис. 3.

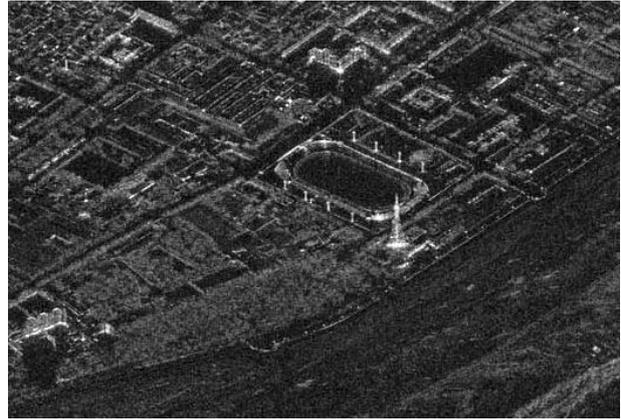
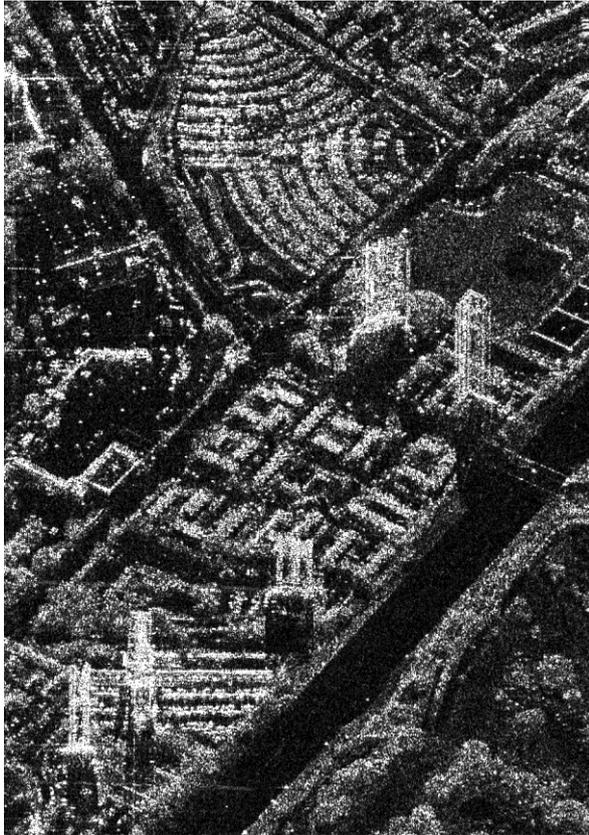


Рис. 16. ДНР, вид
телевизионных башен
на РЛИ



Рис. 17. ДНР, PearlHarbor, военно-морская база, США. Деловые районы, высотные здания

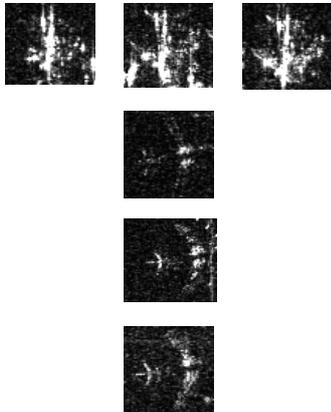


Рис. 18. РЛИаэропорта, Гонконг, Китай

Здесь все изображения РСА КА «Кондор-Э» получены в режиме ДПР. Наименование режимов для РЛИ РСА КА «TerraSAR-X» указаны в верхнем левом углу каждого снимка (HighResolutionSpotLight– HS; SlidingSpotLight – SL; StaringSpotLight– ST). По-видимому, все РЛИ в режиме ST показаны после межэлементного некогерентного накопления.

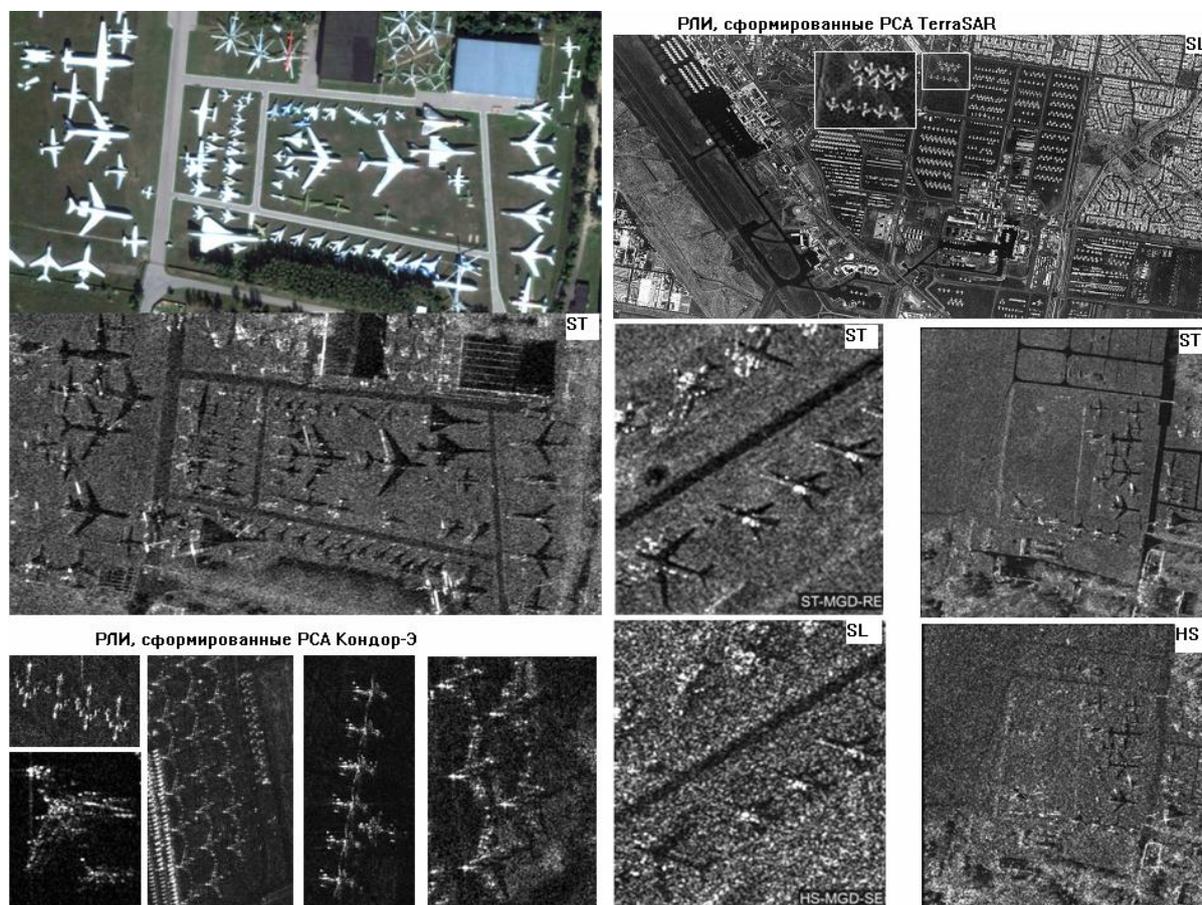


Рис. 19.РЛИсамолётов, сформированных РСА КА «TerraSAR-X» (режим ST, HS и SL) в X-диапазоне и РСА КА «Кондор-Э»(режим ДПР) в S-диапазоне

На рис.19 обращает на себя внимание тот факт, что на всех снимках, сформированных РСА КА «TerraSAR-X», видны тени самолётов. Впечатляет картина теней в режиме ST, особенно после почти семикратного межэлементного некогерентного накопления. Вместе с тем, сами самолёты на изображениях даже после некогерентного накопления видны фрагментарно или вовсе не видны. На снимках, сформированных обеими РСА в штатных режимах (рис. 12, 13), почти не видно теней от самолётов, но сами самолёты в большинстве случаев на РЛИ вполне узнаваемы, поскольку контура их обрисовываются достаточно полно. На снимках, сформированных РСА КА «Кондор-Э», в тех редких случаях, когда тени самолётов видны (правый снимок из набора), сами самолёты вполне узнаваемы. Самое простое объяснение этого явления сводится к тому, что в случаях, когда самолёты видны плохо, использован неудачный ракурс их наблюдения. Отметим, что такая же картина сохраняется и после некогерентного накопления. И, следовательно, приходится признать, что межэлементное некогерентное накопление, проясняя картину местности, не приводит к улучшению изображения объектов наблюдения, в данном случае самолётов.

Заключение

Подводя итог всему сказанному, можно утверждать, что в России разработаны, выведены на орбиту и успешно испытаны две космических РСА с характеристиками, близкими к характеристикам работающих на орбитах зарубежных РСА. Кроме того, очевидно, что возможно совершенствование РСА этого ряда с малыми аппаратными доработками не только в отношении улучшения параметров штатных режимов, но и в отношении введения новых режимов работы, включая скошенный обзор и интерферометрию.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Афанасьев И. Полет второго «Кондора» // Новости космонавтики. 2015. №2. С.34-36.
4. Афанасьев И. Зоркий «Кондор» // Новости космонавтики. 2013. №8. С.46-50.
5. Афанасьев И., Извеков И., Красильников А., Ильин А. МАКС 2015 // Новости космонавтики, №10, 2015.
6. Зайцев С.Э., Савосин Г.В. Космическая система радиолокационного наблюдения «Кондор-ФКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: 2016.
7. Денисов П.В., Костюк Е.А., Трошко К.А., Елизаветин И.В., Зайцев С.Э. Информационные продукты данных космического комплекса радиолокационного наблюдения «Кондор-ФКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: 2016.
8. Костюк Е.А., Зайцев С.Э., Толстов Е.Ф., Бабокин М.И. Расширение информационных возможностей космического комплекса «Кондор-ФКА» за счет реализации «скошенного» обзора // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: 2016.
9. Osipov I.G., Neronskiy L.B., Turuk V.E., Andrianov V.I., Verba V.S., Korolev A.V., Kulikovskiy M.G., Pushkov D.V., Janushevskiy G.D., Feyzulla N.M., Panteleev V.A. Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 24–28 2004. Vol. 1. Pp. 59-62.
10. Osipov I.G., Neronskiy L.B., Andrianov V.I., Verba V.S., Kozlov K.V., Kurenkov V.N., Pushkov D.V. Calculated Performance of SAR for High Orbit Spacecraft Using Nuclear Power Supply // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18. 2006.
11. Неронский Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журнал радиоэлектроники. 2011. №11.
12. Денисов В.П., Зайцев С.Э., Костюк Е.А., Толстов Е.Ф., Цветков О.Е. Вопросы дешифрирования радиолокационных снимков при радиовидении // Радиотехника. 2014. №7.
13. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
14. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7.
15. Бабокин М.И. Оценка состояния взволнованной морской поверхности с помощью РСА // Радиотехника. 2009. №11. С.5-14.

16. Кондратенков Г.С., Колтышев Е.Е., Фролов А.Ю., Янковский В.Т. Фазовый портрет объектов в РЛС с синтезированной апертурой // Радиолокационные системы и системы радиуправления. 2000. № 8.
17. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся целей // Радиотехника. 2012. №10.
18. Fritz T., Breit H., Schättler B., Balss U., Fischer M., Lachaise M., Yague-Martinez N. High Precision Processing – Unified Approaches for TerraSAR-X, TanDEM-X and Beyond // Remote Sensing Technology Institute (IMF), German Aerospace Center (DLR) ASAR 2013 Montreal, Oct. 16th 2013.
19. Moreira A. German Spaceborne Radar Program: TerraSAR-X, TanDEM-X and Beyond //1st German / Japanese Science and Application Workshop for Next Generation SAR, Sola City, Tokyo, June 27, 2013.
20. Breit H., Fischer M., Balss U., Fritz T. TerraSAR-X Staring Spotlight Processing and Product // Proc. of EUSAR'2014, Berlin, Germany. June 3–5, 2014. Pp. 193-196.
21. Lange S. SAR-Lupe Satellites launched / Strategie & Technik – International Edition II/2007. Pp. 13-15.
http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contnts/products/facpublikationen/SAR_Lupe_ks.pdf
22. TerraSAR-X Image Products // TerraSAR-X Image Products_Airbus Defence and space.html.