# РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э»

В.Э. Турук<sup>1</sup>, В.С. Верба<sup>1</sup>, М.В. Голованова<sup>1</sup>, П.Е. Голубцов<sup>1</sup>, М.В. Евсиков<sup>1</sup>, Л.Б. Неронский<sup>1</sup>, С.Э. Зайцев<sup>2</sup>, Е.Ф. Толстов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>AO «Концерн «Вега», Москва, 121170, Россия
E-mail: mail@vega.su

<sup>2</sup>AO ВПК «НПО машиностроения», Реутов, 143966, Россия
E-mail: noodka@mail.ru

<sup>3</sup>3AO «Аэрокон», Жуковский, 140180, Россия
E-mail: e tolstov@mail.ru

Статья содержит краткое описание российского PCA S-диапазона «Стриж», являющегося полезной нагрузкой малого космического аппарата. Два таких аппарата выведены на орбиты в 2013 и 2014 гг. В процессе полетов протестировано бортовое и наземное оборудование, а также аппаратура и программы синтеза радиолокационных изображений. В статье описаны стандартные режимы работы PCA «Стриж»: непрерывный, прожекторный и обзорный. В PCA «Стриж» также предусмотрены экспериментальные режимы работы: скошенного обзора, интерферометрический, широкозахватный, больших дальностей с подавлением неоднозначностей. Проведено сравнение режимов работы PCA «Стриж» и TerraSAR-X. Приведены изображения, полученные с помощью PCA «Стриж». Выполнено сравнение изображений, полученных с помощью PCA «Стриж» в S-диапазоне и PCA ТегraSAR-X в X-диапазоне. Показано преимущество S-диапазона перед X-диапазоном для интерпретации и тематической обработки радиолокационных изображений. В частности, в X-диапазоне грозовые облака непрозрачны. В S-диапазоне волн облака всех видов прозрачны и не скрывают поверхность Земли. Представлены новые направления исследований космических PCA: портретирование кораблей, обнаружение движущихся целей. Обсуждены пути совершенствования аппаратуры и технологий PCA космического базирования.

**Ключевые слова:** РСА, ДЗЗ, Вега, Стриж, Кондор-Э, TerraSAR

Одобрена к печати: 29.08.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83

В статье рассмотрены основные технические решения, принятые в АО «Концерн «Вега», по созданию современного российского космического РСА «Стриж», работающего в S-диапазоне волн (Верба и др., 2010; Neronskiy et al., 2002; Osipov et al., 2004) в качестве модуля полезной нагрузки малого космического аппарата «Кондор-Э», разработанного в АО ВПК «НПО машиностроения» (Зайцев и др., 2015). Цель разработки — создание универсального многорежимного РСА для решения широкого круга задач ДЗЗ, радиолокационного наблюдения, мониторинга чрезвычайных ситуаций и т. п.

Концепция космического РСА была сформулирована по результатам анализа информативности различных диапазонов волн для решения задач ДЗЗ и возможности их аппаратурной реализации. Сделан вывод, что выбор S-диапазона частот 3,1...3,3 ГГц с полным применением его полосы 200 МГц является оптимальным при использовании широкого набора режимов работы.

Космические аппараты с РСА были запущены с космодрома Байконур: первый — 27 июня 2013 г., второй — 19 декабря 2014 г. с параметрами орбит (№ 1/№ 2): наклонение 74,73°/74,75°, высота в перигее 500,9/501,1 км, в апогее 523,8/525,8 км, период обращения 94,64/94,66 мин (Афанасьев 2013, 2015).

Программа полетов предусматривала тщательную отработку и тестирование бортового и наземного оборудования, системы управления, аппаратных и программных средств синтеза

изображений. Кроме штатных исследовались экспериментальные режимы (скошенный обзор, широкозахватный, интерферометрический, режимы больших дальностей с подавлением неоднозначностей сигналов и т.д.).

# Параметры РСА и режимы его работы

Одна из важнейших задач — оперативность наблюдения, достигаемая сокращением времени повторной съемки, требует максимального расширения полосы обзора, т. е. увеличения углов падения, ограниченных условиями неоднозначности по азимуту/дальности. В настоящей разработке для решения задачи расширения полосы захвата использована гибридная зеркальная антенна с возможностью сканирования лучом в одной из плоскостей, в данном случае — по углу места. Антенна с зонтичным рефлектором диаметром 6 м с большой эффективной площадью (около 28 м²) ферменной конструкции раскрывается в космосе. Она разработана в ОКБ Московского энергетического института.

Общий вид космического аппарата с раскрытой антенной показан на рис. 1.

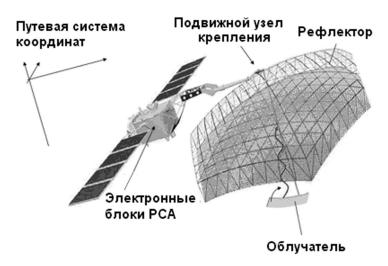


Рис. 1. Общий вид КА «Кондор-Э» с раскрытой антенной РСА

Параметры РСА приведены ниже.

# Параметры РСА

Антенна	
диаметр	6 м
масса	95 кг
Масса приборных блоков	150 кг
Энергопотребление	не более 1450 Вт
Ширина полосы обзора	2×500 км
Высота орбиты КА	500 км
Угол падения луча	2060°

РСА может работать в следующих режимах съемки (рис. 2, табл. 1):

- детальный непрерывный режим (ДНР);
- детальный прожекторный режим (ДПР);
- обзорный режим (OP).

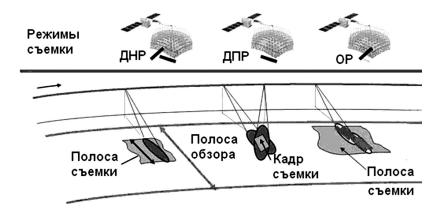


Рис. 2. Режимы работы РСА «Стриж»

Таблица 1. Параметры режимов съемки РСА

Поромонира	Режимы съемки			
Параметры	ДНР	ДПР	OP	
Полоса съемки, км				
ширина	1015	1015	2050	
протяженность	>500	1015	>500	
Разрешение, м				
по горизонтальной дальности	12	11,6	57	
по азимуту (вдоль линии пути), не менее	2,3	1,6	7	
Поляризация	ГГ, ВВ	ГГ	BB	
Число наблюдений	1	225	216	
Чувствительность NESZ, дБ	-20	-15	-20	

В режиме ДНР РСА работает одним лучом. Облучатель может находиться как в вертикальном, так и в горизонтальном положении, при этом поляризация сигнала, соответственно, вертикальная или горизонтальная.

В режиме ДПР осуществляется удержание диаграммы направленности антенны (ДНА) в снимаемом кадре при пролете КА. Это реализуется поворотом луча антенны в азимутальной плоскости. Ширина кадра определяется шириной ДНА. Электронное сканирование лучом обеспечивается многорупорным облучателем в фокальной плоскости рефлектора. В результате формируются до 25 парциальных лучей. В этом режиме возможно некогерентное накопление наблюдений, снижающее спекл-шум.

В обзорном режиме, также именуемом «скансар», облучатель антенны механически разворачивается в вертикальное положение, реализуется электронное сканирование луча по углу места. Подвижной узел крепления антенны позволяет расширить пределы полосы съемки, изменять направление обзора относительно трассы полета. Параметры режимов РСА приведены в *табл. 1*.

Такие же режимы съемки имеются у PCA TerraSAR-X (Helko et al., 2014), но он работает в X-диапазоне, в котором длина волны в три раза меньше. Ширина ДНА также меньше. Она определяет ширину кадра в прожекторном режиме (ПР), который называется «фиксированным ПР». Чтобы расширить ширину кадра, введен дополнительный прожекторный режим, называемый «скользящим ПР», в котором луч не фиксирован в центре кадра, а перемещается («скользит») по азимуту.

Фиксированный ПР PCA TerraSAR-X — аналог ДПР PCA «Стриж». Скользящий ПР не предусмотрен в PCA «Стриж», но может быть введен в будущем как экспериментальный, если в нем возникнет необходимость.

### Сравнение радиолокационных изображений PCA TerraSAR-X и «Стриж»

На *рис. 3* показан снимок р. Волги возле г. Волгограда, полученный с помощью PCA TerraSAR-X в X-диапазоне 21 июня 2007 г. с разрешением около 3 м.



Рис. 3. Фрагмент радиолокационного снимка р. Волги в районе г. Волгограда, файл 20070621 TSX First Image Wolga hig res.tif, ©Infoterra GmbH

По данным метеорологических наблюдений, во время съемки в этой местности была гроза и шел дождь (Верба и др., 2010). Грозовое облако хорошо видно в левой части снимка.

Отражение от него на 5,5 дБ выше, чем от земной поверхности. Облако скрывает расположенные под ним объекты, в результате чего их невозможно распознать. Это не является недостатком аппаратуры РСА или алгоритма синтеза изображения. Это недостаток X-диапазона волн, в котором грозовые облака непрозрачны. В S-диапазоне волн облака всех видов прозрачны и не скрывают поверхность Земли, что является преимуществом этого диапазона.

На *puc.* 4 представлены радиолокационные изображения аэропорта Джибути (Сомали) полученные двумя PCA в прожекторных режимах разных диапазонах волн. Слева расположено РЛИ, выполненное TerraSAR-X в «следящем» ПР в X-диапазоне, справа — РЛИ, полученное с помощью PCA «Стриж» в режиме ДПР в S-диапазоне.

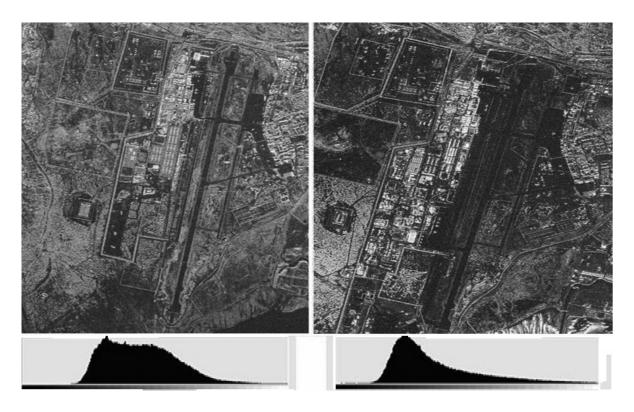


Рис. 4. Сравнение радарных снимков аэропорта Джибути, Сомали: слева — TerraSAR-X, следящий  $\Pi P$ ,  $\Gamma \Gamma$ ,  $\gamma_i = 54,3^\circ$ , 19.08.2008; справа — «Кондор-Э»,  $\Pi P$ ,  $\Gamma \Gamma$ ,  $\gamma_i = 40,65^\circ$ , 01.02.2015, снизу размещена гистограмма снимка и калибровочная полоса яркости

На обоих снимках самолеты, наземные транспортные средства и неподвижные сооружения аэропорта выглядят светлыми, при этом площадки, на которых они стоят, и подъездные пути на правом снимке существенно темнее, что облегчает тематическую обработку изображения и распознавание его элементов. Это еще одно преимущество S-диапазона волн по сравнению с X-диапазоном. Различие в отражении радиоволн диапазонов S и X вызывает отличие их гистограмм.

Под каждым снимком расположена гистограмма яркости и калибровочная полоса. Левые части обеих гистограмм (область малых яркостей) похожи — оба снимка содержат мало темно-серых элементов на черном фоне, трудно различимых зрительно. Это — достоинство обоих снимков. Гистограмма левого снимка (TerraSAR-X) содержит пологую область средних яркостей для природных объектов и короткий спад в сторону максимальной яркости

изображения искусственных объектов. Гистограмма правого снимка (РСА «Стриж», S-диапазон) не содержит пологой части и имеет резкий спад в сторону максимальной яркости. Подстилающая поверхность темная, а расположенные на ней искусственные объекты ярко выделяются. Поэтому правый снимок более удобен для анализа и тематической обработки.

Так как в TerraSAR-X два прожекторных режима, представляет интерес их сравнение между собой и с ДПР РСА «Стриж». Такое сравнение показано на puc. 5 — РЛИ стоянки самолетов. Слева (puc. 5a) — РЛИ TerraSAR-X в следящем ПР, в середине (puc. 56) — РЛИ TerraSAR-X в фиксированном ПР, справа (puc. 5a) — РЛИ PCA «Стриж» в ДПР.

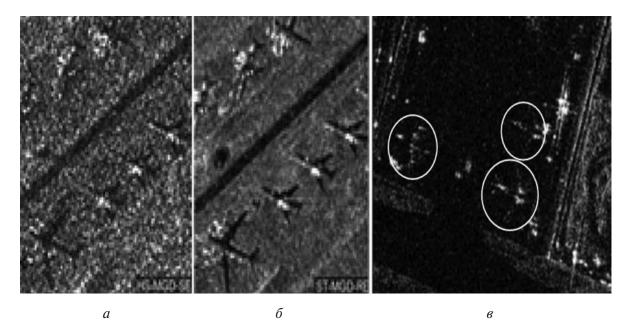


Рис. 5. РЛИ стоянки самолетов: а) — TerraSAR-X, следящий ПР, ГГ,  $\gamma_i = 54,3^\circ$ ; б) — то же, фиксированный ПР; в) — «Кондор-Э», ДПР, ГГ,  $\gamma_i = 40,65^\circ$ , 29.01.2015

В следящем прожекторном режиме TerraSAR-X (*puc. 5a*) самолеты практически неотличимы от подстилающей поверхности. Лишь у одного из них в левом нижнем углу рисунка хорошо видна его радиотень. В фиксированном прожекторном режиме TerraSAR-X (*puc. 56*) радиотени заметны лучше самих самолетов. В детальном прожекторном режиме PCA «Стриж» *puc. 5в*) самолеты заметны без радиотеней на фоне темной подстилающей поверхности. Сравнение снимков свидетельствует о значительно меньшем отражении от земной поверхности в S-диапазоне волн, в связи с чем отсутствуют силуэты теней от самолетов на РЛИ. Суммарная энергия от самолетов достаточна для их обнаружения, а по распределению отметок возможно распознавание их типа.

### Примеры радиолокационных изображений РСА «Стриж»

На *рис.* 6 показано РЛИ района Перл-Харбор, остров Форд и побережье Джойнт Бейс Перл Харбор-Хикем, Гавайи (Turuk et al., 2016). Виден аэродром, терминалы, стоянки судов.



Рис. 6. РЛИ района Перл-Харбор, остров Форд и окрестности, Гавайи, ДПР, ГГ,  $\gamma_i$  = 35,9°, 15.02.2015

На *puc*. 7 приведен фрагмент РЛИ г. Тусон, (США) с аэродромом и стоянками самолетов.

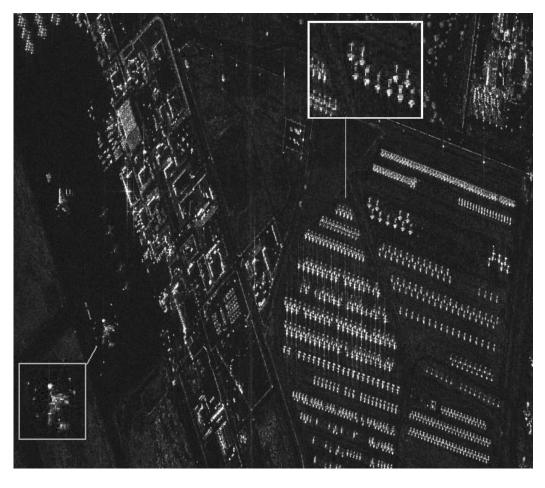


Рис. 7. Фрагмент РЛИ г. Тусон, США, ДПР, ГГ,  $\gamma_i = 46,56^{\circ}$ , 15.02.2015

На puc.~8a показано РЛИ г. Сент-Пол (штат Миннесота, США) и его окрестности, снятое в режиме ДНР, рамкой белого цвета очерчен центр г. Сент-Пол. Он показан с увеличением на puc.~86.

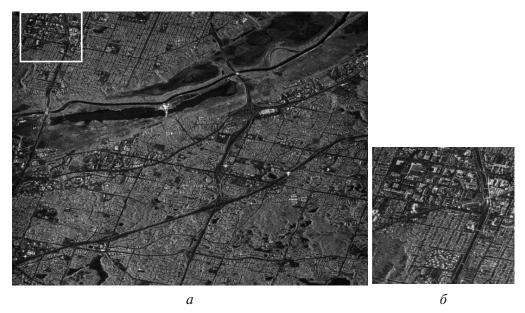


Рис. 8. РЛИ Минеаполис (США), ДНР, ГГ,  $\gamma_i$  = 32,87°, 15.02.2015: а) — г. Сент-Пол и его окрестности; б) —центр г. Сент-Пол с увеличением

На *рис.* 9 показано РЛИ района Беловежской пущи, выполненное в режиме ДНР с разрешением 3 м для мониторинга растительного покрова (Turuk et al., 2016). Для этих задач не требуется предельное пространственное разрешение (1...2 м), а важнее чувствительность и радиометрическое разрешение снимков и расширение полосы съемки.

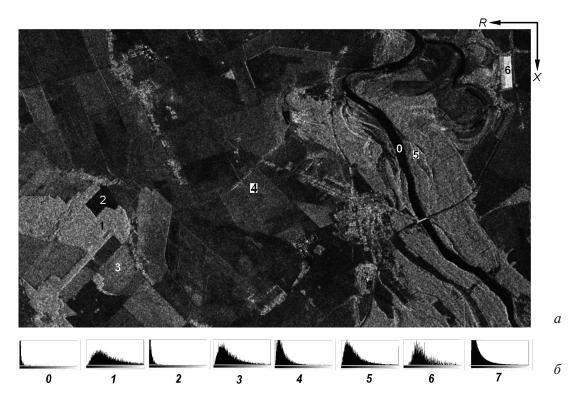


Рис. 9. РЛИ Беловежской пущи, ДНР, ГГ,  $\gamma_i = 41,11^\circ$ , 1.02.2015 (a); гистограммы ЭРИ: 0-6- участков, обозначенных на снимке, 7- всего кадра (б)

Для анализа параметров РЛИ на прилагаемых снимках были выбраны характерные участки, их номера нанесены на рисунок. Река Неман и ее гистограмма обозначены цифрой 0, как поверхность с нулевым отражением (шумы приемника). Численный анализ отраженной энергии с измерением параметров ЭРЛИ остальных участков и всего кадра приведен в *табл. 2*.

Таблица 2. Параметры участков изображения

Параметр ЭРЛИ	Номер участка					Pau uada	
	1	2	3	4	5	6	Весь кадр
Средний уровень М1, ед.	229	33,1	154	88,7	161,5	1318	105
М2, ед.	1,3·10 <sup>5</sup>	2,3·10 <sup>3</sup>	6,1·10 <sup>4</sup>	1,7·10 <sup>4</sup>	$7.10^{4}$	5,9·10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>
УЭПР местности $\sigma^0_{\ \ s}$ , дБ	-17	-29	-19	-22	-19	-9	-19
Отношение сигнал/шум, дБ	7	-5	5	2	5	15	5
Коэффициент текстуры M1 <sup>2</sup> /M2	0,39	0,48	0,39	0,46	0,37	0,29	0,11

Участки 1 и 5 — лес, участки 2—4 — поля, участок 6 — ярко отражающая поверхность (предположительно, шифер с волнообразным профилем). Для каждого участка изображения и для всего кадра на ЭРЛИ вычислены средний уровень энергии — начальный момент 1-го порядка М1, а также начальный момент 2-го порядка М2. Отношение квадрата момента 1-го порядка к моменту 2-го порядка называется коэффициентом текстуры. Есть и другие определения коэффициента текстуры, подробнее они описаны в книге (Верба и др., 2010, п. 9.6.2, формулы 9.20). Коэффициент текстуры характеризует индивидуальные особенности участка поверхности (почвы, растительного покрова). По данным метеорологических наблюдений, типичная толщина снежного покрова в начале февраля в Беловежской пуще составляет 15...30 см. Даже под снегом почва и остатки растительного покрова на разных участках дают на ЭРЛИ S-диапазона различные коэффициенты текстуры, что является преимуществом радиолокационного изображения по сравнению с оптическим.

Приведенный предварительный материал свидетельствует о возможностях применения измерительных технологий для материалов съемки МКА серии «Кондор-Э» для оценки состояния растительного покрова, прогноза урожая, а также восстановления пирогенной и послерубочной динамики лесных угодий.

#### Экспериментальные режимы съемки

#### Режим скошенного обзора

Отрабатывается технология перспективных экспериментальных режимов съемки. При скошенном обзоре (переднебоковом или заднебоковом) получаются РЛИ объектов в разных ракурсах (Turuk et al., 2016).

Съемка при скошенном обзоре позволяет при одном КА получать два или более РЛИ в пределах одного рабочего участка орбиты. Продольной интерферометрией возможно построение карт рельефа за счет естественного пролета носителя. Это позволяет при одном проходе с одной орбиты получить две или более радиоголограмм при разных ракурсах. Их совместная обработка позволяет получить карту рельефа местности. Возможен оптимальный выбор интерферометрической базы при изменении угла скоса. Пример РЛИ скошенного обзора и результаты его обработки показаны на рис. 10.

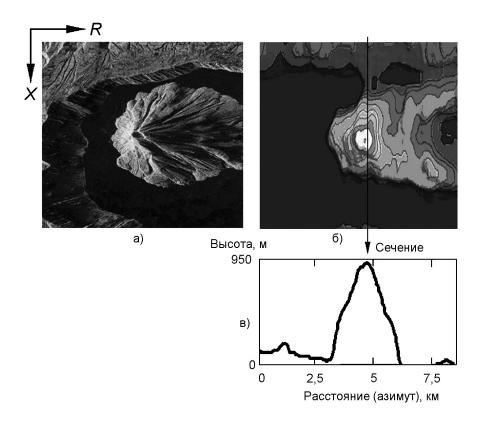


Рис. 10. Озеро Кольцевое, Курильские острова: а) — РЛИ, ДНР (скошенный обзор),  $\Gamma\Gamma$ , 31.01.2015; б) — карта рельефа местности; в) — график рельефа местности по сечению, указанному стрелкой

На *рис.* 10a слева показано РЛИ озера Кольцевое и окружающей местности, полученное в режиме скошенного обзора. В результате обработки этого РЛИ получена карта рельефа местности, показанная на *рис.* 106. По сечению, указанному стрелкой, построен график рельефа местности, представленный на *рис.* 10в. Высота на *рис.* 10в показана относительно уровня воды в озере, который на 400 м выше уровня моря.

#### Интерферометрическая съемка

Продуктивно проведение интерферометрической съемки на повторных витках с получением высокоточных цифровых моделей рельефа, цифровых карт смещений объектов (или изменений рельефа) за время между съемками и данных по когерентности изображений, например при амплитудно-когерентном анализе. Данный режим будет одним из основных режимов работы после модернизации аппаратуры.

#### Новые направления исследований

# Портретирование кораблей

На puc. 11 показаны изображения кораблей, полученные в режиме ДНР PCA «Стриж» с разрешением  $1,3\times2,5$  м.

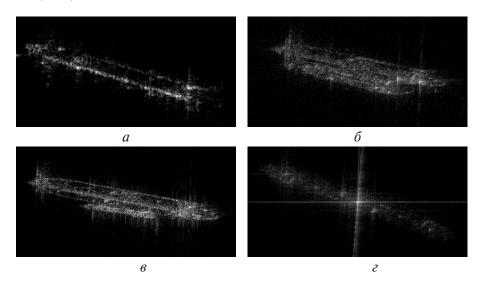


Рис. 11. Образцы портретов кораблей



Рис. 12. Результаты обработки: а) — с ухудшением разрешения до 3 м; б) — то же до 5 м

На рис. 11а виден один корабль, на рис. 11б и в — пары кораблей. Эти изображения без дополнительной обработки пригодны для распознавания и классификации кораблей. Но так бывает не всегда. Сложные случаи возникают, когда корабль содержит хотя бы один сильно отражающий элемент конструкции, например антенну, случайно направленную в сторону РСА. При синтезе изображения отражение от такого объекта фокусируется в очень яркую точку, с боковыми лепестками, которые на изображении видны как крест, который может исказить изображения других объектов. Такой случай показан на рис. 11г. Обычно динамический диапазон изображения корабля — 30...40 дБ. В данном случае самая яркая точка превосходит по энергии остальные точки изображения корабля не менее чем на 40 дБ. Артефакты препятствуют распознаванию и классификации, особенно с помощью автоматических алгоритмов. В этом случае возникает задача устранения артефакта или хотя бы его уменьшения. Для этого в процессе синтеза изображения применяется двумерная фильтрация в частотной области с окном Гаусса. Подбирая параметр этого окна, можно регулировать ослабление артефакта, при этом ухудшается разрешение РЛИ. Результаты обработки показаны на рис. 12.

На *puc. 12a* разрешение ухудшено до 3 м. Вместо креста появились концентрические эллипсы вокруг самой яркой точки. Они не превышают размера корабля и не искажают другие объекты рядом с ним. На *puc. 126* имеем разрешение 5 м. Артефакт подавлен. Следует отметить, что для задачи распознавания и классификации кораблей разрешающей способности порядка 3...5 м достаточно.

#### Проблемы и перспективы измерения скоростей движущихся объектов

Обнаружение движущейся цели (ДЦ) на РЛИ, измерение ее скорости и получение сфокусированного портрета встречает определенные трудности. Вектор скорости цели имеет неизвестные радиальную и тангенциальную составляющие по направлению движения РСА с учетом вращения Земли. Алгоритм синтеза РЛИ выполняет фокусировку неподвижной относительно земной поверхности точечной цели. В частности, этим алгоритмом компенсируется миграция дальности неподвижной цели. Из-за наличия радиальной составляющей скорости цель смещается по дальности за время пролета РСА над ней. В результате возникает расфокусировка отметки цели по дальности. Кроме этого, радиальная составляющая скорости вызывает смещение отметки цели по азимуту. Из-за наличия тангенциальной составляющей скорости цели возникает нескомпенсированная фазовая модуляция отраженного от нее сигнала по азимуту, близкая к ЛЧМ, которая вызывает расфокусировку отметки цели по азимуту. Согласно формуле (6.11) из книги (Верба и др., 2010) ширина азимутальной отметки при наблюдении движущейся точечной цели равна:

$$\rho_X(V_X) = \sqrt{\rho_{0X}^2 + \frac{(|V_X| R\lambda)^2}{(V_{le}\rho_{0X})^2}},$$

где  $\rho_{0X}$  — разрешение PCA по азимуту; R — наклонная дальность цели;  $\lambda$  — длина волны PCA;  $V_X$  — тангенциальная составляющая скорости цели;  $V_{le}$  — линейная эквивалентная скорость PCA.

Для изучения перечисленных выше эффектов на фрагмент РЛИ нанесены отметки пяти искусственных точечных целей (ИТЦ), как показано на *puc. 13*.

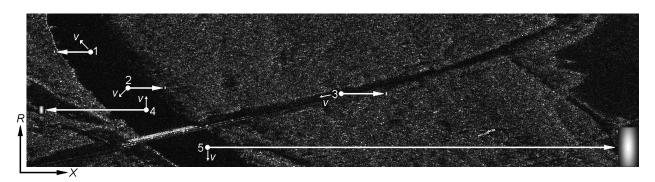


Рис. 13. Искусственные движущиеся точечные цели на РЛИ

Истинное положение цели показано белым кружком с ее номером для момента минимума наклонной дальности. Малая стрелка с буквой «V» около номера цели показывает направление вектора скорости. Горизонтальные линии со стрелками показывают смещение отметок ДЦ на РЛИ от их истинных положений. Величина смещения пропорциональна радиальной скорости ДЦ. Каждая ИТЦ моделировалась одной блестящей точкой. Затем были вычислены радиоголограммы каждой ИТЦ с максимальной амплитудой и сложены с радиоголограммой, полученной от РСА. В процессе синтеза на РЛИ появились отметки ИТЦ, показанные на *puc. 13*. Параметры ИТЦ: № 1 — лодка, скорость движения V=5 м/с, курсовой угол относительно направления полета КА  $\psi=225^\circ$ , отдаляется; № 2 — лодка, V=5 м/с,  $\psi=135^\circ$ , приближается; № 3 — автомобиль, V=20 м/с вдоль дороги,  $\psi=167^\circ$  (тангенциальная составляющая скорости 19,5 м/с), приближается; № 4 — катер V=10 м/с,  $\psi=270^\circ$ , отдаляется; № 5 — вертолет, V=40 м/с,  $\psi=90^\circ$ , приближается.

На *рис.* 13 видно, что отметки ИТЦ сместились далеко от истинных значений за пределы их естественных положений. Лодки (ИТЦ № 1 и № 2) и катер (ИТЦ № 4) сместились с реки на берега, автомобиль (ИТЦ № 3) сместился с шоссе на обочину, вертолет (ИТЦ № 5) — почти на 4 км вправо по азимуту. Хорошо видна расфокусировка каждой ИТЦ, максимальная — у вертолета (ИТЦ № 5).

Рисунок 13 иллюстрирует проблемы поиска, обнаружение, измерения скорости и получения сфокусированного портрета ДЦ на РЛИ. Чтобы отметки ИТЦ были хорошо заметны, радиоголограммы каждой ИТЦ моделировались с максимальной амплитудой. Но сигнал от реальной ДЦ может быть намного меньше максимума. Кроме того, расфокусировка уменьшает максимум отклика от ДЦ. Из-за этого ДЦ может быть не видна на фоне неподвижных объектов на земной поверхности. Смещение отклика ДЦ по азимуту заранее неизвестно и может быть велико. Из-за этого поиск ДЦ должен быть проведен на большой площади далеко от предполагаемых мест (автомобили — не обязательно на шоссе, суда — не обязательно на воде и т.п.). Для получения портрета ДЦ обычный алгоритм синтеза РЛИ должен быть дополнен автофокусировкой по радиальной и тангенциальной составляющих скорости ДЦ. По мере приближения этих неизвестных параметров к истинным значениям изображение ДЦ будет фокусироваться и приближаться к своему истинному положению на РЛИ. Из-за того, что скорости ДЦ разные, изображение каждой ДЦ необходимо фокусировать отдельно. В некоторых случаях, например автомобили с примерно одинаковой скоростью в потоке на шоссе, будут фокусироваться одновременно. Но каждый поток необходимо фокусировать отдельно.

В общем случае неизвестных радиальной и тангенциальной составляющих эти задачи легче решаются при наблюдении движущихся целей на ровной поверхности (море, прямое шоссе на равнине), чем в городских кварталах. Корректное решение этих задач, с определением ракурса наблюдения целей, коррекции миграции дальности и последующей фокусировкой для каждой цели, требует проведения тщательных исследований.

# Развитие технологий КА серии «Кондор-Э»

В настоящее время начата разработка следующей системы — космического комплекса радиолокационного оперативного всепогодного круглосуточного наблюдения Земли на базе КА типа «Кондор-Э» с радиолокатором S-диапазона.

Предусматривается получение полезной информации о наблюдаемой поверхности с возможностью когерентной обработки данных ДЗЗ в интерферометрических режимах съемки.

#### Заключение

Проведенные работы по отладке бортового и наземного оборудования в ходе запуска космических аппаратов серии «Кондор-Э» подтвердили высокую эффективность дистанционного зондирования в 10-см диапазоне волн с реализацией высокого пространственного разрешения от 1...2 м в зависимости от угла падения. Полученная информация может служить основой для развития методов ДЗЗ, интерпретации радиолокационных изображений, формирования банков данных, а также для совершенствования аппаратуры космических РСА.

### Литература

- Афанасьев И. Зоркий «Кондор» // Новости космонавтики. 2013. № 8. С. 46—50.
- Афанасьев И. Полет второго «Кондора» // Новости космонавтики. 2015. № 2. С. 34—36. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника. 2010. 680 с.
- Зайцев C.Э., Красногорский M.Г., Савосин  $\Gamma.В.$ , Широков  $\Pi.A.$  О некоторых возможностях разрабатываемых в АО «ВПК «НПО машиностроения» космических систем радиолокационного наблюдения // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: материалы 12-й научно-технич. конф. Сочи, 21-27 сент. 2015. С. 34-38.
- Helko B., Fischer M., Balss U., Fritz T. TerraSAR-X Staring Spotlight Processing and Product // Proc. EUSAR'2014. Berlin, Germany, 2014. P. 193-196.
- Neronskiy L., Osipov I., Turuk V., Andrianov V., Porokhov I. Choice of Engineering Performances in Designing Multipurpose Synthetic Aperture Radar for Small Satellites // Proc. EUSAR'2002. Cologne, Germany, 2002.
- Osipov I.G., Neronskiy L.B., Turuk V.E., Andrianov V.I., Verba V.S., Korolev A.V., Kulikovsky M.G., Pushkov D.V., Janushevsky G.D., Feyzulla N.M., Panteleev V.A. Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations // Proc. EUSAR'2004. Ulm, Germany. 2004. P. 59–62.
- 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.

# Strizh SAR for small Condor-E satellites

V.E. Turuk<sup>1</sup>, V.S. Verba<sup>1</sup>, M.V. Golovanova<sup>1</sup>, P.E. Golubtsov<sup>1</sup>, M.V. Evsikov<sup>1</sup>, L.B. Neronskiy<sup>1</sup>, S.E. Zaitsev<sup>2</sup>, E.F. Tolstov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC "Corporation "Vega", Moscow 121170, Russia E-mail: mail@vega.su <sup>2</sup>JSC MIC "NPO mashinostroenia", Reutov 143966, Russia E-mail: noodka@mail.ru <sup>3</sup>JSC "Aerokon", Zhukovskiy 140180, Russia E-mail: e\_tolstov@mail.ru

This article briefly describes the Russian S-band SAR named Strizh as payload of a small satellite. Two such satellites were launched into orbit in 2013 and 2014. During the missions, the onboard and ground equipment, hardware and software for radar image formation were tested. The article describes the standard operating modes of Strizh: Stripmap, Spotlight and ScanSAR. Strizh also operates in experimental modes: squint surveilance mode, interferometric mode, wide swath mode, long ranges mode with ambiguities suppression. The images obtained by Strizh are shown. Comparisons of operation modes and radar images of Strizh and TerraSAR-X are presented. The advantage of S-band over the X-band in interpretation and thematic processing of radar images is shown. For example, thunderstorm clouds are nontransparent for X-band waves, but they are transparent for S-band waves. New directions of research using spaceborne SAR are presented: recognition of ships and detection of moving objects. The ways of improving the equipment and technologies of spaceborne SAR are discussed.

Keywords: SAR, ERS, Vega, Strizh, Condor-E, TerraSAR

Accepted: 29.08.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83

#### References

- 1. Afanas'ev I., Zorkii "Kondor" (Sharp-sighted "Condor"), Novosti kosmonavtiki, 2013, No. 8, pp. 46-50.
- 2. Afanas'ev I., Polet vtorogo "Kondora" (Flight of the second "Condor"), *Novosti kosmonavtiki*, 2015, No 2, pp. 34–36.
- 3. Verba V.S., Neronskii L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo baziro-vaniya* (Spaceborne Earth Surveillance Radar Systems), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p.
- 4. Zaitsev S.E., Krasnogorskii M.G., Savosin G.V., Shirokov P.A., O nekotorykh vozmozhnostyakh razrabatyvaemykh v AO "VPK "NPO mashinostroeniya" kosmicheskikh sistem radiolokatsionnogo nablyudeniya (About some capabilities of spaceborne Radar Surveillance Systems developed in the JSC MIC "NPO Mashinostroenia"), 12<sup>th</sup> Nauchno-Tekhnicheskaya Konferentsiya "Sistemy Nablyudeniya, Monitoringa i Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli" (Surveillance, monitoring and Earth remote sensing systems: materials of the 12th Scientific and Technical Conference), Sochi, September 21–27, 2015, pp. 34–38.
- 5. Helko B., Fischer M., Balss U., Fritz T., TerraSAR-X Staring Spotlight Processing and Product, *Proceedings of EUSAR'2014*, Berlin, Germany, 2014, pp. 193–196.
- Neronskiy L., Osipov I., Turuk V., Andrianov V., Porokhov I., Choice of Engineering Performances in Designing Multipurpose Synthetic Aperture Radar for Small Satellites, *Proceedings of EUSAR'2002*, Cologne, Germany, 2002, pp. 449–452.
- 7. Osipov I.G., Neronskiy L. B., Turuk V. E., Andrianov V.I., Verba V.S., Korolev A.V., Kulikovsky M.G., Pushkov D.V., Janushevsky G.D., Feyzulla N.M., Panteleev V.A. Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations, *Proceedings of EUSAR'2004*, Ulm, Germany, 2004, pp. 59–62.
- 8. 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, *Proceedings of EUSAR'2016*, Hamburg, Germany, 2016, pp. 947–952.