

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ КА TERRASAR-X С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

© 2017 г. Л. М. Атрошенко<sup>3</sup>, А. Н. Горобец<sup>3</sup>, Н. Н. Горобец<sup>3</sup>,  
Т. Д. Данилова<sup>2</sup>, И. В. Елизаветин<sup>2</sup>, А. Г. Жиличкин<sup>1</sup>, В. М. Малюков<sup>1</sup>,  
Р. А. Скрыльников<sup>1</sup>, П. Д. Тарасова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество “Российские космические системы”, Москва

<sup>2</sup> Закрытое акционерное общество “НПК “Ракурс Проекты”, Москва

<sup>3</sup> Общество с ограниченной ответственностью “ЛЕС-ИНФОРМ”, Москва

E-mail: malukwm@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.06.2016 г.

В настоящей работе обобщен опыт взаимодействия различных организаций при реализации технологии верификации характеристик целевой аппаратуры (ЦА) космического комплекса дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) радиолокационного диапазона в натуральных условиях эксплуатации. Приводятся результаты оценки пространственного разрешения и радиометрических характеристик ЦА космического аппарата TerraSAR-X, полученные по реализованной технологии на основе съемки изготовленных наземных тест-объектов. Показана возможность постоянной эксплуатации системы верификационных измерений для подтверждения заданных характеристик РЛ-средств ДЗЗ.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, тест-объект, радиолокационный отражатель

DOI:

#### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при создании и эксплуатации космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) радиолокационного (РЛ) диапазона (КС ДЗЗ РЛД) является задача проверки и регулярного подтверждения характеристик целевой аппаратуры КС ДЗЗ, заявленных в техническом задании (ТЗ) на космическую систему или в анонсируемом оператором КС ДЗЗ перечне характеристик (Атрошенко и др., 2013).

Целевой аппаратурой КС ДЗЗ РЛД являются РЛ-станции с синтезированием апертуры антенны (РСА). К проверяемым характеристикам, определяющим качественные показатели РСА, относят, прежде всего, пространственное разрешение и радиометрические характеристики, оцениваемые по радиолокационным изображениям (РЛИ), полученным с помощью РСА.

Для проверки этих характеристик могут использоваться различные тест-объекты в виде активных отражателей (транспондеров) или групп пассивных РЛ-отражателей (РЛО) с известными характеристиками.

Алгоритм подтверждения характеристик РСА КС ДЗЗ РЛД включает следующие этапы:

- формирование плановых параметров полета КА и определение условий съемки;
- выбор схемы расстановки тест-объектов и определение параметров их ориентации в зависимости от условий съемки;
- подготовку поверхности и размещение тест-объектов на местности;
- съемку тест-объектов космическими РСА;
- получение РЛИ;
- оценку качества РЛИ и характеристик РСА.

Как показывает отечественная и зарубежная практика эксплуатации РЛ измерительных полигонов, реализация приведенного выше алгоритма требует участия нескольких организаций или рабочих групп, и качество конечного результата – оценки характеристик РЛИ и РСА зависит от их скоординированных действий.

В настоящей работе представлено применение созданной технологии верификации характеристик целевой аппаратуры и валидации РЛИ, включающей систему квазисинхронных подспутниковых

валидационных наблюдений, РЛ-съемку и анализ РЛ-снимков, применительно к задаче оценки характеристик космических РЛ-систем ДЗЗ. Приведены результаты работы системы, описана процедура проведения серии сеансов РЛ-съемки и сопутствующих подспутниковых измерений, приведены данные верификации заявленных оператором КС ДЗЗ характеристик коммерчески доступных РЛИ на примере PCA TerraSAR-X (Fritz, Eineder, 2013).

### ПОДГОТОВКА К ОЦЕНИВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК РЛИ

В совместной работе по оцениванию характеристик РЛИ приняли участие следующие организации: Airbus Defence and Space (подразделение компании Airbus) и российские организации АО “Российские космические системы”; ЗАО “НПК “Ракурс Проекты”, ООО “ЛЕС-ИНФОРМ”.

Компания Airbus (подразделение Airbus Defence and Space) в рамках сотрудничества и рабочей договоренности между представителями ЗАО “НПК “Ракурс Проекты” обеспечивала:

- выдачу исходных данных о прогнозных датах, времени съемки и условиях съемки тест-объектов;
- выполнение съемки PCA TerraSAR-X в режимах HS и ST;
- выдачу результатов съемки тест-объектов в ЗАО “НПК “Ракурс Проекты”.

АО “Российские космические системы” обеспечивало координацию экспериментальных работ по оценке характеристик PCA TerraSAR-X в части:

- взаимодействия между российскими организациями при обмене исходной информацией и полученными результатами;
- обработки результатов съемки тест-объектов с учетом наземных измерений и получения оценок характеристик РЛИ.

ЗАО “НПК “Ракурс Проекты” обеспечивало:

- взаимодействие с компанией Airbus при согласовании дат и времени проведения съемки тест-объектов PCA TerraSAR-X, получения результатов съемки и передачи их в АО “Российские космические системы”;
- разработку программного модуля пакета PHOTOMOD Radar, использованного для оценивания характеристик КК ДЗЗ РЛ-диапазона по снимкам, полученным при проведении сеанса съемок.

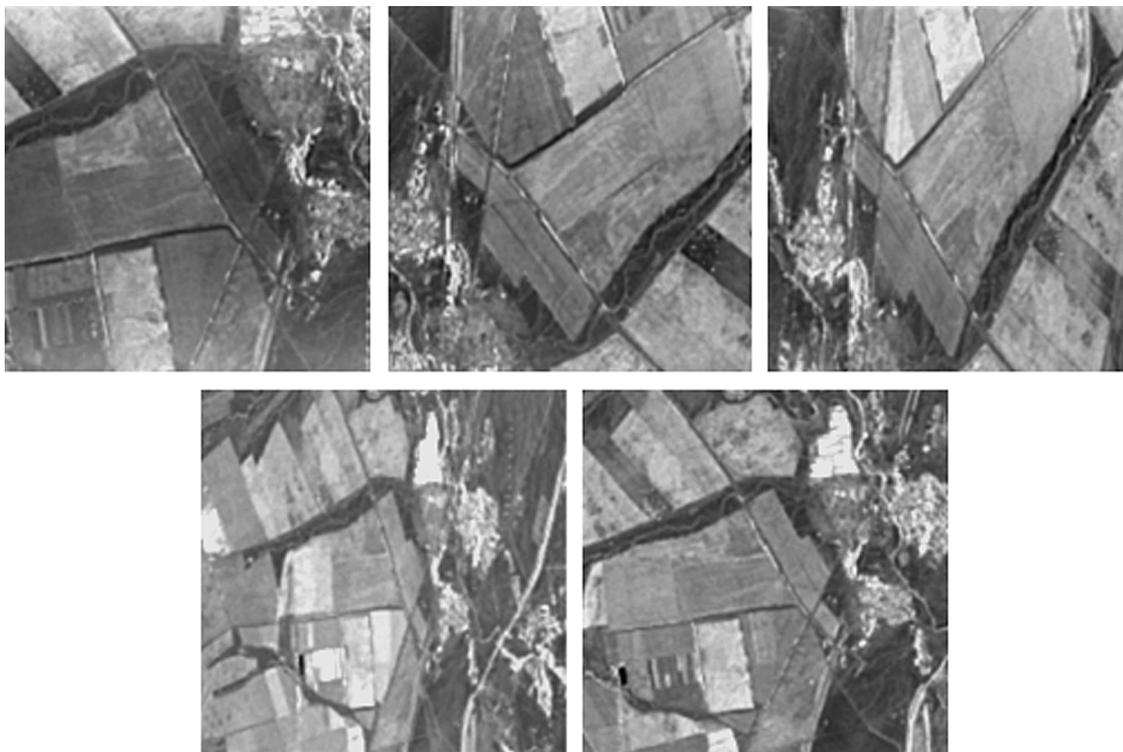
ООО “ЛЕС-ИНФОРМ” обеспечивало подготовку и эксплуатацию мишенного комплекса в части:

- подготовки поверхности мишенного комплекса к проведению наземного обеспечения верификации характеристик PCA;
- подготовки и метрологической аттестации тест-объектов;
- расчета схемы расстановки РЛО и их ориентации для каждого сеанса съемки;
- установки тест-объектов в соответствии со схемой, определение координат РЛО, проведение контроля эффективной площади рассеяния (ЭПР) РЛО;
- выдачи результатов наземных измерений, включая схему размещения РЛО, координаты РЛО, значения ЭПР РЛО, значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) подстилающей поверхности, сопутствующие метеорологические и др. данные в АО “Российские космические системы”.

Из Airbus Defence and Space получен предварительный план съемок, в котором содержались параметры платформы PCA TerraSAR-X и условия съемки тест-объектов в допустимом временном интервале с 20.05 по 25.05. 2015 в режимах HS и ST.

**Таблица 1.** Согласованные параметры съемок

Режим	Дата начала съемки	время начала съемки	Угол падения луча	Номер орбиты	Номер луча	Ветвь орбиты В – восходящая Н – нисходящая
ST	2015-05-20	02:59:33.683	57.7405	46	Spot_112R	Н
То же	2015-05-21	14:59:18.484	50.3596	69	Spot_083R	В
– “ –	2015-05-22	14:42:11.297	26.7365	84	Spot_022R	То же
– “ –	2015-05-20	02:59:33.683	57.7405	46	Spot_112R	Н
HS	2015-05-24	03:25:15.443	26.0483	107	Spot_020R	То же
То же	2015-05-25	03:08:08.363	49.9492	122	Spot_082R	– “ –



**Рис. 1.** РЛИ окрестности измерительного полигона, полученные PCA TerraSAR-X. В верхнем ряду, слева направо, — снимки, полученные в режиме ST 20, 21 и 22 мая 2015 г., в нижнем ряду, слева направо, — снимки, полученные в режиме HS24 и 25 мая 2015 г.

После итерационной корректировки всеми исполнителями окончательно согласованный план включал в себя пять съемок: три в режиме ST и две в HS. Параметры съемок согласно окончательному плану приведены в табл. 1.

Все съемки были проведены в соответствии с планом, данные от оператора системы получены в полном объеме и с качеством, удовлетворяющим спецификации на такие продукты. На рис. 1 показаны полученные снимки.

К моменту проведения съемок ООО «ЛЕСИНФОРМ» в районе населенного пункта Качалино Волгоградской обл. (место размещения тест-объектов) были проведены подготовительные работы по приведению в готовность мишенного комплекса, в результате которых:

- подготовлена поверхность под размещаемые тест-объекты;
- рассчитана схема расстановки и ориентации РЛО;
- проведена установка РЛО в соответствии со схемой;
- проведена ориентация РЛО в соответствии с расчетами;
- определены координаты и проведен контроль ЭПР РЛО;

— проведена проверка параметров подстилающей поверхности, включая расчеты и прямые измерения УЭПР поверхности, ее шероховатости и диэлектрических характеристик.

В состав тест-объектов входили:

- пространственная мира для оценки пространственной разрешающей способности;
- потенциальная мира для оценки радиометрических характеристик PCA;
- центральный маркер (точка прицеливания).

Пространственная и потенциальная миры состояли из самофазированных пассивных РЛО, выполненных из металлопокрытых композитных материалов трехгранных уголкового отражателей с треугольными гранями, снабженных устройствами поворота по азимуту и углу места. Центральный маркер представлял собой направленную в верхнюю полусферу композицию из четырех трехгранных уголкового отражателей с треугольными гранями. В апреле 2015 г. была проведена метрологическая аттестация всех РЛО тест-объектов. Отклонение полученных при аттестации значений  $ЭПР_{max}$  РЛО не превышало 0.5 дБ.

После обработки подстилающей поверхности под размещаемые тест-объекты на квадратных

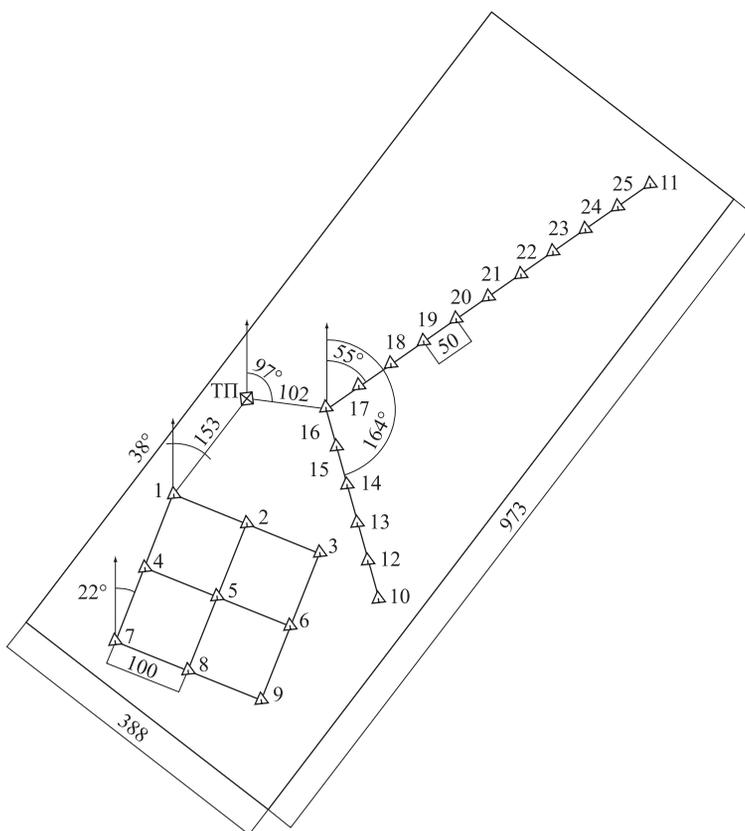


Рис. 2. Схема расстановки тест-объектов на измерительном полигоне.

фрагментах поверхности площадью  $900 \text{ м}^2$  ( $\pm 15 \text{ м}$  от каждого РЛО) было обеспечено значение УЭПР  $< -28 \text{ дБ}$ , что аппаратно контролировалось непосредственно перед проведением съемки *in situ* на этих фрагментах.

Схема расстановки тест-объектов, рассчитанная с учетом навигационных характеристик КА, представлена на рис. 2. Местоположение РЛО рассчиталось с учетом азимута следа трассы КА и дифракции электромагнитной волны на отражающей пластине РЛО. Расчетное и реализованное с точностью до 0.2 м расстояние между РЛО, входящими в состав пространственной миры, составило 100 м; расстояние между РЛО потенциальной миры – 50 м.

Для достижения максимальных значений ЭПР оси РЛО путем применения поворотных устройств ориентировались коллинеарно приходящему сигналу РСА с точностью, не хуже 2 объемн. град. Ориентация РЛО рассчитывалась и осуществлялась индивидуально для каждого сеанса съемки в соответствии с азимутом следа трассы и углом обзора.

Внешний вид РЛО и фрагмент их расстановки показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 2. Параметры РЛО

№ РЛО	РВСР, м	ЭПР <sub>max</sub> , М <sup>2</sup>	ЭПР <sub>max</sub> , дБ
1–11	0.862	2406.55	33.8
12	2.888	303217.30	54.8
13	2.166	95939.85	49.8
14	1.624	30318.61	44.8
15	1.218	9592.99	39.8
16	0.913	3028.65	34.8
17	0.685	959.68	29.8
18	0.514	304.24	24.8
19	0.385	95.77	19.8
20	0.289	30.41	14.8
21	0.217	9.67	9.8
22	0.162	3.00	4.8
23	0.122	0.97	-0.1
24	0.090	0.29	-5.4
25	0.068	0.09	-10.3
Центральный маркер	2.000	69740.52	48.4



Рис. 3. Фото участка местности с установленными РЛО.

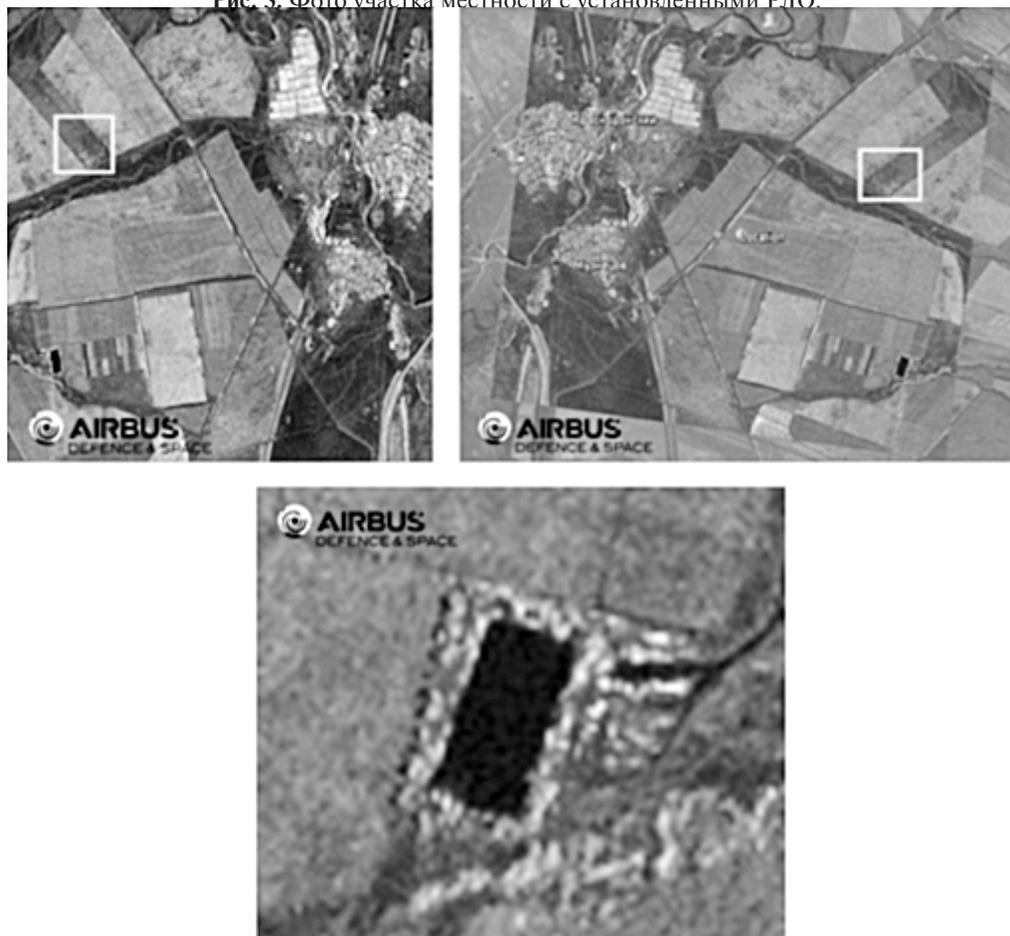


Рис. 4. Полный кадр в проекции наклонной дальности (в верхнем ряду, слева), наложение РЛИ на оптическую подложку (в верхнем ряду справа), искусственно созданный водный репер, используемый для определения мощности шума (в нижнем ряду). Прямоугольником выделено расположение тест-объектов измерительного полигона.

Параметры РЛО приведены в табл. 2. Значения ЭПР РЛО указаны для длины волны РСА TerraSAR-X 3.1 см. РВСР – размер внутренней стороны ребра РЛО.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ СЪЕМОК

Обработка результатов съемок проводилась по всем пяти снимкам тест-объектов, полученным РСА TerraSAR-X, три из которых были сделаны в режиме ST и два – в режиме HS. Снимок в режиме HS и его

совмещение с оптической подложкой показаны на рис. 4. Фрагмент снимка с пространственной и радиометрической мирами – на рис. 5.

Оценивались следующие характеристики качества РЛИ:

- (пространственное разрешение) разрешающая способность по дальности и азимуту;
- относительный уровень боковых лепестков по дальности и азимуту;
- радиометрическое разрешение;

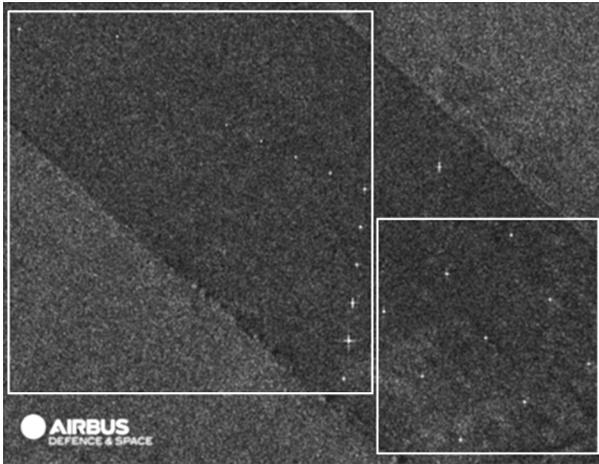


Рис. 5. Фрагмент РЛИ с мирами отражателей (справа – пространственная мира, слева – радиометрическая).

- относительная радиометрическая ошибка;
- эффективное число накоплений;
- радиометрическая линейность;
- динамический диапазон сигнала;
- радиометрическая точность.

Разрешающая способность  $\delta$  по азимуту (дальности) определялась как произведение ширины главного лепестка отклика от РЛО на уровне 0.707 по амплитуде  $W_{0.707}$  по направлению азимута (дальности) в пикселах и межпиксельного расстояния по направлению азимута  $\Delta$  (дальности) в метрах

$$\delta = W_{0.707} \times \Delta. \quad (1)$$

Относительный уровень боковых лепестков  $PSLR$  определялся через отношение амплитуды первого бокового лепестка  $b_{MAX\_SIDE}$  (по дальности или азимуту) к амплитуде главного лепестка  $b_{MAX\_MAIN}$

$$PSLR = 10 \times \lg \frac{b_{MAX\_SIDE}}{b_{MAX\_MAIN}}, \quad (2)$$

Измерения пространственного разрешения и уровня боковых лепестков производились по интерполированным отсчетам сечений импульсных откликов на РЛИ. Интерполяция проводилась по двум вариантам: в частотной области с коэффициентом 16 и функцией Гаусса.

На рис. 6 показаны сечения импульсного отклика от РЛО № 1 по дальности и азимуту.

Радиометрическое разрешение определялось как отношение среднеквадратического отклонения  $\sigma$  интенсивности принятого сигнала (далее – интенсивность) однородного участка РЛ-снимка к среднему значению  $m$  интенсивности по этому участку

$$L = \frac{\sigma}{m}. \quad (3)$$

Относительная радиометрическая ошибка  $\Delta E_{RAD}$  определялась через отношение суммарных значений интенсивности двух однородных участков  $R1$  и  $R2$  снимка (при этом предполагается, что соответствующие участки на подстилающей поверхности обладают одинаковой отражающей способностью)

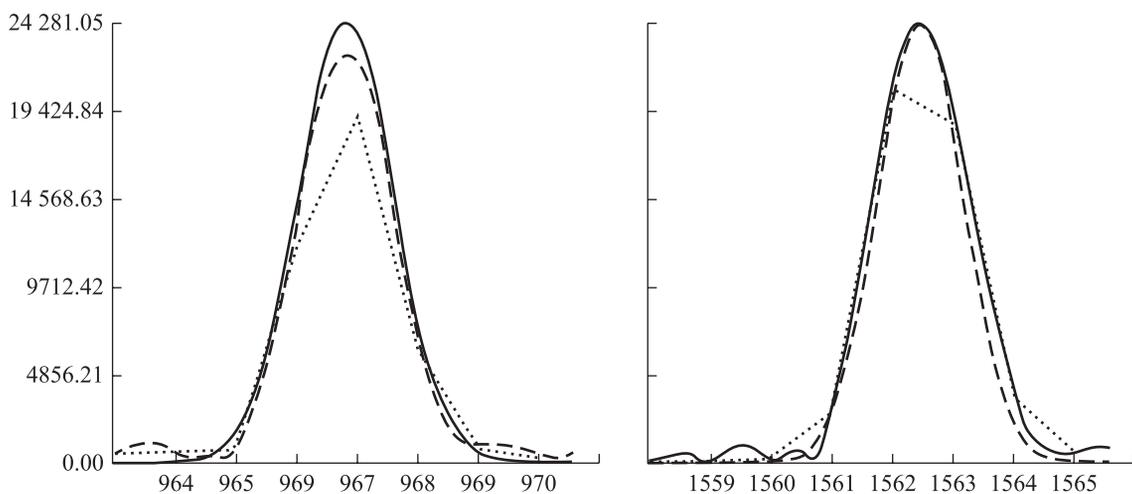


Рис. 6. Сечения импульсного отклика РЛО № 1 пространственной мира. Съемка 20.05.2015. Слева – отклик по направлению дальности, справа – по линии пути. Точечный график – исходный сигнал, сплошной – интерполированный в частотной области, пунктирный – интерполированный функцией Гаусса.

$$E_{RAD} = 10 \cdot \left| \log \frac{\sum_{(i,j) \in R1} x(i,j)}{\sum_{(i,j) \in R2} x(i,j)} \right|, \quad (4)$$

где  $x(i, j)$  – интенсивность, соответствующая пикселу с файловыми координатами  $(i, j)$ ;  $R1$  – первый однородный анализируемый участок снимка;  $R2$  – второй однородный анализируемый участок снимка.

Радиометрическая линейность, определяемая как коэффициент прямолинейной корреляции между мощностью сигнала на входе и мощностью сигнала на выходе системы обработки, оценивалась по коэффициенту корреляции  $r$ , между значениями интерполированной интенсивности точечных целей на снимке и значениями фактической отражаемой мощности этих целей (документированных значений ЭПР).

Как известно, коэффициент корреляции принимает значения на отрезке  $[-1; 1]$ . В данном контексте низкий уровень его достоверности свидетельствует о радиометрической нелинейности системы. Если система радиометрически линейна, значение указанного коэффициента корреляции близко к единице. Согласно разработанной методике, за оценку радиометрической линейности принималось значение выборочного коэффициента корреляции  $r$ , между значениями интерполированной интенсивности точечных целей на снимке и значениями фактической мощности РЛ-отклика этих целей (документированных значений ЭПР). Размерность выборки определялась непосредственно по данным снимка – выборка включала в себя РЛ-отклик от всех используемых РЛО, принимаемый от которых сигнал был ниже уровня насыщения приемного тракта. При этом (здесь и далее) приняты следующие обозначения:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}};$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2,$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2, \quad (5)$$

где  $x_i$  – документированная отражательная способность (ЭПР)  $i$ -й цели;  $y_i$  – интенсивность на радиолокационном изображении соответствующая

$i$ -й цели;  $n$  – количество целей, отклик от которых анализируется.

Эффективное число накоплений определялось как отношение квадрата средней интенсивности по однородному участку снимка к дисперсии интенсивности по этому участку

$$L = \frac{m_I^2}{\sigma_I^2},$$

$$m_I = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W x_{ij}, \quad (6)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (x_{ij} - m_I)^2,$$

где  $H, W$  – высота и ширина однородного участка изображения соответственно;  $x_{ij}$  – интенсивность, соответствующая пикселу  $(i, j)$ .

*Динамический диапазон сигнала* определялся как разность между значением ЭПР однородного участка, соответствующим уровню насыщения сигнала и  $s_0$  шумовым эквивалентом (чувствительностью) РСА в децибелах

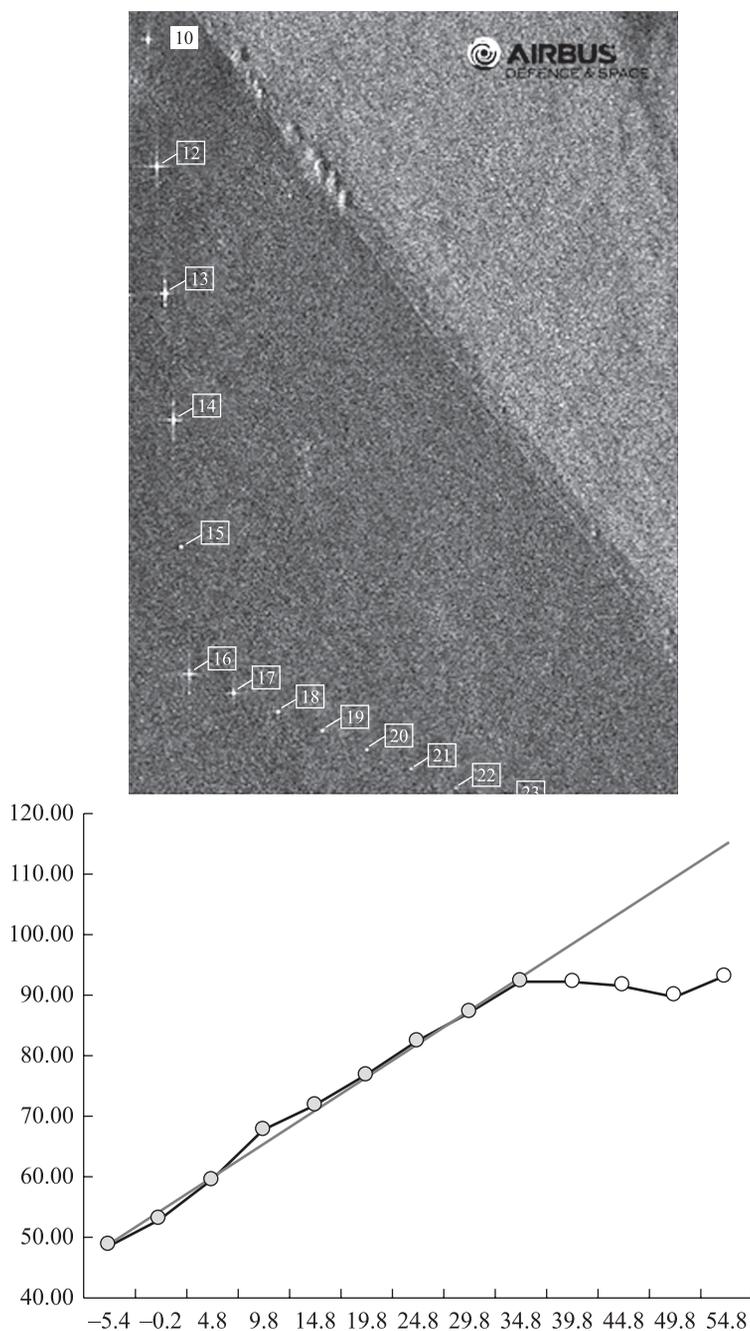
$$D_{РСА} = x_{\text{нас}} - \sigma_0. \quad (7)$$

Радиометрическая точность определялась как среднеквадратическое отклонение значений интенсивности сигналов РЛО на снимке, выраженных в децибелах, от соответствующих значений на “прямой идеального реагирования” – линейной части зависимости интенсивности сигнала от фактических значений отражательной способности РЛО.

На рис. 7 показаны фрагмент РЛИ с радиометрической мирой и график зависимости яркости отражателей на снимке в зависимости от их ЭПР. На рисунке представлена также “прямая идеального реагирования” (ПИР), линейно аппроксимирующая эту зависимость. На графике темным отмечены точки (отклики от РЛО), используемые в формировании ПИР, светлым – точки, отнесенные к области насыщения динамического диапазона. Значения по абсциссе приведены в децибелах, по ординате – в условных единицах яркости на снимке.

Результаты оценок, проведенных по полученным РЛИ, незначительно отличаются друг от друга, поэтому фрагменты РЛИ других съемок и результаты их обработки здесь не приводятся.

Все характеристики РЛИ оценивались в автоматизированном режиме с использованием разработанного по заказу АО “Российские космические системы” программного комплекса для оценивания характеристик КК ДЗЗ РЛД на основе программных средств пакета PHOTOMOD Radar.



**Рис. 7.** Фрагмент РЛИ с радиометрической мирой и график, показывающий зависимость яркости откликов РЛО на снимке от их реальной ЭПР.

Результаты измерений характеристик импульсного отклика PCA TerraSAR-X приведены в табл. 3. Результаты измерений радиометрических характеристик PCA TerraSAR-X – в табл. 4.

Как видно из табл. 3, пространственное разрешение PCA TerraSAR-X, по данным проведенных измерений для продуктов типа SSC\_ST\_S, составляет величину не хуже 0.59 м по наклонной дальности и не хуже 0.24 м – по азимуту. Ухудшение

результата за счет автоматических округлений при расчетах составляет в среднем 0.01(2) м.

Сравнение полученных результатов оценки в части пространственного разрешения с заявленным оператором системы пространственным разрешением (при съемке в режиме HS300 МГц для продуктов типа SSC\_HS\_S составляет 0.6 м – по наклонной дальности, 1.1 м – по азимуту; при съемке в режиме ST 300 МГц для продуктов типа

**Таблица 3.** Результаты измерений характеристик импульсного отклика РСА TerraSAR-X, усредненные по всем РЛО пространственной миры. Результаты измерений пространственного разрешения приведены для аппроксимации импульсного отклика в частотной области (БПФ) и функцией Гаусса

	Разрешение по дальности, м		Разрешение по азимуту, м		Первый боковой лепесток по дальности, дБ		Первый боковой лепесток по азимуту, дБ	
	БПФ	Гаусс	БПФ	Гаусс	Левый	Правый	Левый	Правый
Съемка в режиме ST 20.05.2015								
Среднее	0.601630	0.581888	0.239026	0.225880	-31.6343	-28.7160	-28.7782	-33.7229
СКО	0.005230	0.015488	0.002773	0.012264	1.109	2.2409	3.1725	4.3117
Съемка в режиме ST 21.05.2015								
Среднее	0.601245	0.578721	0.23679	0.227369	-36.7838	-30.912	-28.9243	-30.0423
СКО	0.007106	0.006509	0.002574	0.012049	5.907095	6.002328	2.775589	6.37658
Съемка в режиме ST 22.05.2015								
Среднее	0.602674	0.57362	0.235290	0.221753	-39.0070	-32.7524	-37.3284	-32.9516
СКО	0.001569	0.015494	0.002828	0.009914	7.248753	6.095767	10.10402	7.358993
Значения, усредненные по всем съемкам в режиме ST								
Среднее	<b>0.601850</b>	<b>0.578076</b>	<b>0.237035</b>	<b>0.225001</b>	<b>-35.8084</b>	<b>-30.7935</b>	<b>-31.677</b>	<b>-32.2389</b>
СКО	<b>0.004635</b>	<b>0.012497</b>	<b>0.002725</b>	<b>0.011409</b>	<b>4.988916</b>	<b>4.779665</b>	<b>5.350702</b>	<b>6.015758</b>
Съемка в режиме HS24.05.2015								
Среднее	0.598830	0.566533	1.185758	1.113123	-37.3204	-31.4552	-33.9937	-37.4095
СКО	0.002804	0.014189	0.012097	0.031806	9.31443	4.82228	3.760008	6.390421
Съемка в режиме HS25.05.2015								
Среднее	0.601196	0.566887	1.184008	1.106669	-36.9381	-33.8193	-28.8693	-34.8804
СКО	0.006481	0.023267	0.00946	0.025922	9.098027	7.494723	22.71031	5.563505
Значения, усредненные по всем съемкам в режиме HS								
Среднее	<b>0.600013</b>	<b>0.56671</b>	<b>1.184883</b>	<b>1.109896</b>	<b>-37.1292</b>	<b>-32.6373</b>	<b>-31.4315</b>	<b>-36.1449</b>
СКО	<b>0.004643</b>	<b>0.018728</b>	<b>0.010778</b>	<b>0.028864</b>	<b>9.206228</b>	<b>6.158501</b>	<b>13.23516</b>	<b>5.976963</b>

SSC\_\_ST\_S – 0.6 м по наклонной дальности, 0.24 м – по азимуту) показывает совпадение полученных оценочных характеристик с заявленными с точностью, не хуже 5–10%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе серии подспутниковых измерений и выполнения на их основе оценок характеристик РЛИ TerraSAR-X были достигнуты следующие результаты:

1. Отработана технология по подтверждению характеристик РЛИ в натуральных условиях с использованием серии космических съемок наземного измерительного полигона радиолокатором с синтезированной апертурой. В процессе отработки использовались следующие элементы технологии:

– тест-объекты (пространственная и радиометрическая миры) из состава РЛ мишенного комплекса в р-не Качалино Волгоградской обл. на базе пассивных отражателей с эталонированной ЭПР;

– методика выполнения РЛ-съемок тест-объектов (проверена на примере съемок, выполненных РСА TerraSAR-X в двух режимах – ST и HS);

– методическое и программное обеспечение обработки результатов съемок и оценивания характеристик КК ДЗЗ РЛД.

2. Подтверждена готовность системы оценивания характеристик КК ДЗЗ РЛД к проведению полного цикла валидационных и верификационных работ для разрабатываемых российскими организациями космических комплексов ДЗЗ, в том

Таблица 4. Результаты измерений радиометрических характеристик РСА TerraSAR-X

Дата съемки	Радиометрическая ошибка, дБ	Радиометрическая линейность	Эффективное число накоплений	Радиометрическое разрешение, дБ	Шумовой эквивалент, дБ	Динамический диапазон, дБ
Режим HS						
24.05.2015	0.00758	0.989586	0.997827	3.01266	-19.0	61.6149
25.05.2015	0.15173	0.999080	0.925633	3.09501	-19.0	62.9973
Среднее	<b>0.07965</b>	<b>0.994333</b>	<b>0.961730</b>	<b>3.05383</b>	<b>-19.0</b>	<b>62.3061</b>
СКО	<b>0.10192</b>	<b>0.006713</b>	<b>0.051048</b>	<b>0.05823</b>	<b>0.0</b>	<b>0.97750</b>
Режим ST						
20.05.2015	0.08824	0.998051	0.958333	3.05675	-18.0	54.3832
21.05.2015	0.12918	0.997221	0.977812	3.03473	-18.0	53.4838
22.05.2015	0.03467	0.996542	0.934033	3.08503	-18.0	52.1196
Среднее	<b>0.08403</b>	<b>0.997271</b>	<b>0.956726</b>	<b>3.05883</b>	<b>-18.0</b>	<b>53.3288</b>
СКО	<b>0.04739</b>	<b>0.000756</b>	<b>0.021934</b>	<b>0.02521</b>	<b>0.0</b>	<b>1.139726</b>

числе и функционирующих в составе орбитальной группировки.

3. Проведена оценка пространственных и радиометрических характеристик РЛИ тест-объектов измерительного полигона. Выявлено, что результаты оценок пространственных характеристик снимков совпадают с характеристиками КК ДЗЗ, заявленными оператором ДЗЗ на радиолокатор TerraSAR-X, с точностью, не хуже 5–10%.

4. Сделан вывод о целесообразности расширения спектра оцениваемых характеристик РСА, включая фазовые, для обеспечения верификации интерферометрических режимов съемки, для чего необходимо продолжить практику проведения

натурный испытаний с использованием съемок измерительного полигона космическими аппаратами, находящимися в настоящее время на орбите.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Красногорский М.Г., Малюков В.М.* Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для РСА космического базирования // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. Акад. М.Ф. Решетнева.* 2013. Т. 5. № 51. С. 30–32.
- Fritz T., Eineder M.* TerraSAR-X Basic Product Specification Doc. TX-GS-DD-3302. Iss. 1.9. 2013. P. 52–55.

## Results of Verification of Data Received TerraSAR-X Using Ground Test Facilities

L. M. Atroshenko<sup>3</sup>, A. N. Gorobets<sup>3</sup>, N. N. Gorobets<sup>3</sup>, T. D. Danilova<sup>2</sup>,  
I. V. Elizavetin<sup>2</sup>, A. G. Zhilichkin<sup>1</sup>, V. M. Malukov<sup>1</sup>, R. A. Skrylnikov<sup>1</sup>, P. D. Tarasova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company "Russian Space Systems", Moscow

<sup>2</sup> Closed Joint-Stock Company "SPC Rakurs Projects", Moscow

<sup>3</sup> Limited Liability Company "LES- INFORM", Moscow

This paper presents some results of validation campaign, which had the goal to evaluate onboard equipment and ground facilities of space borne synthetic aperture radar system intended for earth remote sensing. Over validation campaign workflow the technique of efforts integration between several organizations and enterprises was implemented and tested in order to execute the set of TerraSAR-X radar surveillances over special designed test site with wide range of ground corner reflectors. Whole validation setting procedure including test site installation, imaging arrangement, received data processing shows the possibility for permanent exploitation of the measurements and verification system designed for in-flight evaluation of remote sensing space borne SAR key characteristics. Paper presents the results of collected TerraSAR-X data processing and images estimation results according to list of spatial and radiometric key features.

**Keywords:** synthetic aperture radar, test object, corner reflector

## REFERENCES

- Atroshenko L.M., Gorobes N.N., Krasnogorskiy M.G., Malukov V.M.* Opyt sozdaniya poligonno-kalibrochnogo kompleksa dlja RSA kosmicheskogo bazirovaniya (Experience of creation of the ground calibration polygon complex for the space synthetic aperture radar testing // Vestnik SibGAU. 2013. Vol. 5. No. 51. P. 30–32.
- Fritz T., Eineder M.* TerraSAR-X Basic Product Specification Doc. TX-GS-DD-3302. Iss. 1.9. 2013. P. 52–55.