

**Библиографические ссылки**

1. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations // S. Mecklenburg, M. Drusch, Y. Kerr et. al. / IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50, № 3. P. 606–612.
2. Миронов В. Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск : Науч.-издат. центр СО РАН, 2000.
3. Дагуров П. Н. Микроволновая радиометрия статистически-неоднородной поверхности // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 31–32.

**References**

1. Mecklenburg S., Drusch M., Kerr Y. et. al. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, vol. 50, no. 3, pp. 606–612.
2. Mironov V. L. Mikrovolnovoye zondirovaniye pochv (Microwavesensing of soils). Novosibirsk, Nauchno-izdatel'skiy tsentr SO RAN, 2000.
3. Dagurov P. N. Izvestiya vuzov. Fizika. 2012, vol. 55, no. 8/2, p. 31–32.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В.,  
Базаров А. В., Раднаева С. Б., 2013

УДК 621.391.14

**ОБОРУДОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛИГОНА  
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ  
РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

Т. А. Лепехина, В. И. Николаев, М. А. Семенов, И. В. Чарыков, В. С. Чикачев

Научно-производственный центр «СПУРТ»  
Россия, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 4. E-mail: tatonika@inbox.ru

*Представлен облик радиолокационного полигона для задач калибровки и валидации космических РСА с позиций системного подхода. Целью работы является создание полигона, позволяющего в сжатые сроки подтверждать сквозные характеристики РСА и контролировать качество его выходного продукта, а также проводить периодические калибровки радиометрической шкалы радиолокатора.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), калибровка, валидация, системный подход, уголкового отражатели, активная контрольная станция.*

**TEST RANGE EQUIPMENT FOR SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR  
CALIBRATION AND VALIDATION**

T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev, M. A. Semenov, I. V. Charykov, V. S. Chikachev

Scientific Production Centre "SPURT"  
4 1-st Zapadny passage, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia. E-mail: tatonika@inbox.ru

*An outline of radar test range for spaceborne SAR calibration and validation using system approach is presented. The goal of the investigation is creating a range permitting SAR through performances approval, its resultant data quality verification procedures, and radiometric scale calibration recurrent routines. Region choice for test range deployment, measured SAR parameter set and metrological means configuration foundation is given in the paper.*

*Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), calibration, validation, system approach, corner reflector, active receiver/transponder.*

Расширение круга задач, для решения которых применяют радиолокационные изображения (РЛИ), обусловило предъявление к современным РСА повышенных требований как к измерительным средствам. Потребителям необходимо не только высокое разрешение изображения, но и возможность получить из снимка геометрические характеристики объектов, а также электродинамическую и радиометрическую информацию.

В настоящее время существует ряд космических РСА с высоким разрешением, работающих в разных

диапазонах частот, поэтому потребитель располагает широким ассортиментом РЛИ, полученных в различных режимах съемки, с разной глубиной обработки и значительно отличающихся по стоимости. Для того чтобы РЛИ, полученные космическим РСА, были конкурентоспособными и гарантировали пользователю решение его задач, процедуры калибровки и валидации необходимо проводить как после вывода радиолокатора на орбиту, так и периодически в процессе эксплуатации, что является достаточно сложной научно-технической и организационной задачей.

Наряду с определением параметров, по которым оценивается качество РЛИ, в данной работе будут рассмотрены следующие аспекты этой задачи: 1) разработка единой системы наземных, летных и валидационных испытаний, которая позволит значительно сократить время и затраты на проведение процедур калибровки и валидации; 2) выбор территории для размещения полигона; 3) определение требований к метрологическим средствам и их аппаратно-программной реализации.

Традиционно, основным показателем качества РЛИ является пространственная разрешающая способность, характеризующая его детальность. Кроме того, требуется определение координат объектов на РЛИ, а также учет геометрических искажений с точностью до размеров элемента разрешения. Привлечение космических радиолокаторов к исследованию природных, сельскохозяйственных ресурсов и мирового океана обуславливает повышение требований к РСА по радиометрическим характеристикам: радиометрической разрешающей способности, определяющей возможность различения на РЛИ поверхностей (объектов), отличающихся по удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) на величину, не меньшую заданной; динамическому диапазону и шумовому эквиваленту, характеризующему чувствительность РСА. Подтверждение этих характеристик является задачей валидации. Для обеспечения измерения ЭПР объектов и удельной ЭПР местности по изображению с требуемой точностью проводится процедура радиометрической калибровки РСА. Для геометрической калибровки требуется полигон с радиомишенями, имеющими точную геодезическую привязку.

Значительные затраты на обустройство полигонов и проведение калибровки РСА с использованием их измерительных средств оказались вполне оправданными: уже первые снимки, полученные TerraSAR-X, полностью соответствовали требованиям, предъявляемым к качеству РЛИ [1], а RADARSAT-1, благодаря периодической калибровке, более 9 лет позволял получать изображения без ухудшения качества [2].

После вывода РСА на орбиту процедуры калибровки и валидации должны проводиться в сжатые сроки. Например, Европейское космическое агентство отводит на полетную калибровку и валидацию РСА Sentinel-1 не более 3 месяцев [3]. Большое внимание уделяется проблеме заблаговременного выбора полигона с учетом возможных сценариев калибровки, размеров территории и климатических условий. Например, размещение полигона в Svalbard обеспечивало бы, благодаря высокой зоне покрытия, проведение до 34 измерений за цикл, однако этот вариант был отклонен из-за неблагоприятных климатических условий полярного района.

При выборе места расположения полигона необходимо принимать во внимание, в первую очередь, ландшафтно-климатические особенности территории, поскольку местный климат, характерная растительность и рельеф предопределяют структуру полигона и состав тестовых объектов. Предпочтение следует отдавать географическим районам с климатом, обес-

печивающим всесезонность осуществления наблюдений и измерений, предпочтительно на удалении от техногенных зон. Для размещения полигона необходимо выбирать участок, позволяющий избегать зон, характеризующихся частыми осадками. Не менее важно учесть как среднегодовое количество осадков, так и среднегодовую температуру в области расположения испытательного полигона.

В ходе создания и ввода в эксплуатацию к радиолокационным полигонам предъявляются следующие общие требования: радиолокационные характеристики калибровочных объектов должны быть хорошо исследованными; поверхность тестовых участков должна была близкой к ламбертовской (равномерно рассеивающей); все искусственные объекты на полигоне должны сохранять стабильность характеристик. Полигон должен иметь геодезические привязочные метки, пассивные отражатели с большой ЭПР, имеющие точную геодезическую привязку, для юстировки наведения антенны. Полигон и его измерительные средства должны проходить периодическую калибровку и иметь метрологические паспорта.

Реализуя системный подход к испытаниям РСА на всех этапах его жизненного цикла, предлагается для определения пространственной разрешающей способности использовать единые методики, базирующиеся на методе импульсного отклика. Разрешающая способность по дальности и азимуту определяется по ширине сечений радиолокационного изображения точечной цели на уровне  $-3$  дБ [4]. Для уточнения результата измерения по дискретному изображению выполняется его интерполяция. Привязка результата измерения к масштабу на местности выполняется путем пересчета координат по известной длине стороны квадрата мира, установленной на полигоне и состоящей из 9 отдельных уголкового отражателей, расположенных квадратом в 3 ряда по 3 единицы. Одна из диагоналей квадрата расположена перпендикулярно к маршруту полета носителя. Расстояние между соседними уголковыми отражателями комплекта задается одинаковым и не менее 10 элементов разрешения: 100 м для режимов высокого разрешения, 1 000 м для среднего. ЭПР уголкового отражателя комплекта должна быть одинаковой и быть по меньшей мере на 40 дБ выше ЭПР участка фона, равного по площади элементу разрешения РСА:  $15...30$  дБм<sup>2</sup> для режимов высокого разрешения, не менее 49 дБм<sup>2</sup> (длина ребра уголкового отражателя с треугольными гранями не менее 2 м в X-диапазоне) для среднего разрешения.

Для режимов низкого разрешения (300 м, 1 000 м) требуются УО с размером ребра более 5 м, что затрудняет их изготовление, транспортировку и обслуживание. Вместо пассивных отражателей целесообразно использовать активные транспондеры или активную контрольную станцию (АКС).

Активные устройства целесообразно применять для решения следующих задач: создание дискретного отражателя с большой ЭПР и равномерной диаграммой рассеяния в широком диапазоне углов при небольших собственных размерах; селекция и форми-

рование сигналов с требуемой поляризацией, в том числе с поляризацией возвращенной волны, отличающейся от падающей; регулировка имитируемой ЭПР; имитация сложных целей. Активные устройства, по сравнению с пассивными отражателями, позволяют контролировать больший набор характеристик радиолокатора и обеспечивают значительно более высокую точность измерений. Активные транспондеры могут создаваться на базе широконаправленных рупорных антенн. Точность их калибровки и стабильность установленного значения ЭПР может достигать 0,1 дБ [5].

Особенностью АКС [6] является ее возможность принимать, регистрировать, обрабатывать сигналы, излучаемые бортовой радиолокационной аппаратурой, измерять их параметры, а также генерировать и излучать контрольные сигналы, которые могут быть приняты аппаратурой РСА, обработаны в трактах приема и преобразования и переданы обратно на наземные пункты приема, где из них будет извлечена нужная информация. Главным достоинством АКС являются ее возможности по определению радиометрических характеристик радиолокаторов.

В настоящее время радиометрическая разрешающая способность РСА, как правило, не проверяется экспериментально, а оценивается расчетным путем. Это связано, в том числе, с отсутствием природных и сложностью создания искусственных поверхностно-распределенных объектов, содержащих ряд участков большой площади с однородной и калиброванной УЭПР, отличающейся с заданным шагом. Имеющиеся природные объекты с равномерной калиброванной УЭПР, такие как леса бассейна Амазонки, бореальные леса в Канаде и ледовый купол в Антарктиде, используются для радиометрической калибровки РСА по абсолютному значению.

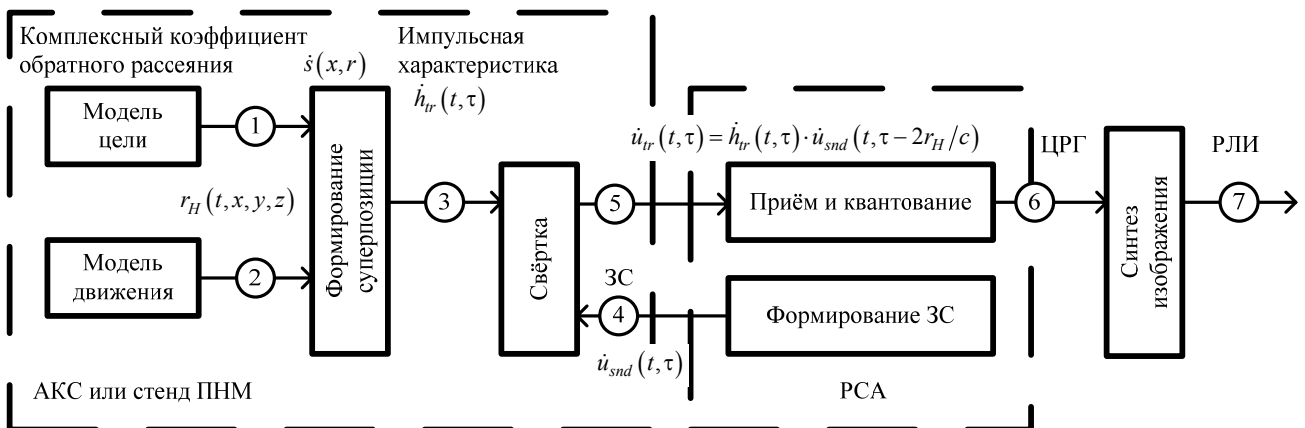
Аппаратно-программными средствами АКС может выполняться имитация траекторных сигналов, соответствующих съемке одиночных, групповых, протяженных и поверхностно-распределенных целей с заданными характеристиками, что позволяет проводить уточненную радиометрическую калибровку и экспериментальное определение радиометрических характеристик РСА [7]. Структура алгоритма

имитации траекторных сигналов для испытаний РСА приведена на рисунке.

Предварительно строится модель снимаемого объекта 1 как двумерного поля комплексного коэффициента рассеяния в радиолокационных координатах (наклонная дальность-азимут). В соответствии с известным или моделируемым законом движения спутника 2 строится матрица импульсных характеристик для каждого зондирующего импульса в сеансе, имитирующих суперпозицию его отражений от элементов земной поверхности 3. Эти операции выполняются заблаговременно. Зондирующий сигнал 4 принимается от проверяемого РСА, и вычисляется свертка 5 огибающей каждого импульса ЗС с предварительно рассчитанной импульсной характеристикой фильтра.

Полученная в результате матрица представляет собой массив данных имитированного отраженного сигнала, загружаемый в генератор сигналов произвольной формы для воспроизведения и подачи на вход приемника РСА. В зависимости от вида испытаний и конфигурации аппаратуры, подача имитированного сигнала на РСА может осуществляться от АКС (при летных испытаниях), через измерительную антенну или коаксиальный кабель (при наземных испытаниях). Записанная ЦРГ 6 при летных испытаниях передается на наземный РЛК, содержащий систему синтеза изображения, по радиолинии. При наличии бортовой системы синтеза изображения готовое РЛИ 7 передается на НРЛК для анализа с целью определения сквозных характеристик РСА. При наземных испытаниях ЦРГ принимается с выхода информационного интерфейса РСА штатным или технологическим запоминающим устройством, а затем обрабатывается системой синтеза РЛИ. Также имеется возможность записи на измерительный АЦП сигналов с контрольных выходов промежуточных сечений приемного тракта РСА и тестового сигнала 5 с выхода генератора для самоконтроля аппаратуры стенда.

Описанные методики используются для экспериментального определения сквозных характеристик космического РСА при лабораторно-отрабочных испытаниях макета с использованием стенда натурного моделирования. При этом выполняется разработка и отладка унифицированного программного



Структура алгоритма имитации траекторных сигналов для испытаний РСА

обеспечения для автоматизированного определения сквозных характеристик РСА путем анализа РЛИ типовых целей с заданными характеристиками. Для аппаратной имитации и регистрации сигналов при наземных испытаниях в составе стенда применяется комплект приборов производства Agilent Technologies. В дальнейшем планируется использование отечественных модульных приборов Информтест, а в перспективе – разработка специализированных блоков компактной конструкции для серийного производства АКС, которые будут устанавливаться на радиолокационных полигонах.

Учитывая, что сейчас в нашей стране нет специализированных радиолокационных полигонов, их создание и оборудование является важной и насущной задачей. Географически требуемый полигон может быть расположен в Забайкалье или на юге Бурятии, южнее г. Улан-Удэ: незначительное количество осадков (существенно влияющих на измерения в X-диапазоне), невысокий растительный покров, рельеф с требуемыми перепадами высот, отсутствие техногенных объектов, наличие трудовых ресурсов и производственных мощностей, а также имеющийся центр космической связи недалеко от г. Улан-Удэ создают благоприятные условия для устройства радиолокационного полигона требуемой площади в этом районе [8].

В настоящее время для проведения процедур калибровки и валидации космического РСА высокого разрешения может быть использован украинский полигон Скрипай [9] с установленными на нем мирами из угловых отражателей для измерения пространственного разрешения и динамического диапазона. Юстировка наведения антенны выполняется по искусственным объектам полигона с известной геодезической привязкой. Для режимов низкого и среднего разрешения целесообразно установить на полигоне активные транспондеры.

Применение описанных единых методик для измерения пространственных и радиометрических характеристик космического РСА на всех этапах его жизненного цикла позволяет значительно сократить временные и материальные затраты на проведение летных испытаний и процедур калибровки и валидации.

Предложенная аппаратно-программная реализация активной контрольной станции дает возможность экспериментального определения радиометрических характеристик космического РСА в процессе валидации, а также периодической калибровки его радиометрической шкалы.

#### Библиографические ссылки

1. TerraSAR-X Calibration Results / M. Schwerdt, B. Bräutigam, M. Bachmann, B. Döring // Proc. of EUSAR'2008. 2008. Vol. 1. P. 91–94.
2. From Commissioning to Extended Mission: 9 Years of Maintaining RADARSAT-1 Image Quality Performance / S. Cote, S. Srivastava, P. Le Dantec, B. Hawkins // Proc. of EUSAR'2006. P. 093.
3. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1 / M. Schwerdt, B. Döring, M. Zink, D. Schrank // EUSAR'2010. P. 350.
4. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Исследование аппаратной функции отклика фрагмента космическо-

го радиолокатора дистанционного зондирования Земли // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XIX Междунар. Крымская конф. КрыМиКо, 2009. Т. 2. С. 951–953.

5. Linking Reference Target Properties to Its Perceived RCS in SAR Images / B. Döring, P. Looser, M. Jirousek, M. Schwerdt // Proc. of EUSAR'2012. P. 9.

6. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Активная контрольная станция для задач валидации и калибровки космического РСА // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXI Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2011. Т. 2. С. 1063–1064.

7. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Экспериментальное определение радиометрического разрешения космического РСА // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXII Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2012. Т. 2. С. 1009–1010.

8. Zakharova L., Darizhapov D., Kirpizhekova I. Study of Natural Objects in Transbaikalia by means of Polarimetry and Polarimetric Interferometry // Proc. of EUSAR'2004. P. 733.

9. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования / Л. М. Атрошенко, А. Н. Горобец, А. Л. Костриков и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXII Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2012. Т. 2. С. 1005–1006.

#### References

1. Schwerdt M., Bräutigam B., Bachmann M. Döring B. TerraSAR-X Calibration Results. Proc. of EUSAR'2008, vol.1, pp.91-94.
2. Cote S., Srivastava S., Le Dantec P., Hawkins B. From Commissioning to Extended Mission: 9 Years of Maintaining RADARSAT-1 Image Quality Performance. Proc. of EUSAR 2006, ID: 093.
3. Schwerdt M., Döring B., Zink M., Schrank D. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1. – EUSAR 2010, p. 350.
4. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 19th International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2009. P. 951–953.
5. Döring B, Looser P., Jirousek M., Schwerdt M. Linking Reference Target Properties to Its Perceived RCS in SAR Images. Proc. of EUSAR 2012, p.9.
6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 21st International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2011. P.429–430.
7. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 22nd International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P. 1009-1011.
8. Zakharova L., Darizhapov D., Kirpizhekova I., Study of Natural Objects in Transbaikalia by means of Polarimetry and Polarimetric Interferometry. Proc. of EUSAR 2004, p. 733.
9. Atroshenko L. M., Gorobets N. N., Gorobets A. N., Kostrikov A. L., Krasnogorskiy M. G., Lebedev A. S., Malyukov V. M., Ratushnaya E. S. The 22nd International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P.1005–1007.

© Лепехина Т. А., Николаев В. И., Семенов М. А., Чарыков И. В., Чикачев В. С., 2013