

Летные испытания показали [4], что созданный ПКК, разработанные метрологические средства и способы их установки обеспечивают возможность валидации, верификации и калибровки характеристик РСА и полученных с их использованием РЛИ.

Специальное описание и оборудование территории ПКК может быть расширено и унифицировано, что значительно расширяет возможности наземного обслуживания ДЗЗ из космоса.

#### Библиографические ссылки

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. М.: Радиотехника, 2010.

2. Толстов Е. Ф., Яковлев А. М., Карпов О. А. Радиолокационный комплекс аппаратуры наблюдения в программе «Открытое небо» // Радиотехника. № 11. Серия «Радиолокационные системы и системы радиоправления». 1995. № 2. Вып. 6. С. 54–57.

3. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования / Л. М. Атрошенко, Н. Н. Горобец, А. Н. Горобец и др. // Вестник Харьк. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». Вып. 20. № 110. С. 3–9.

4. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона «Скрипалі» («Скрипачи», «Violinists») / Л. М. Атрошенко, Н. Н. Горобец, А. Н. Горобец и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: X Всерос. открытая конф. (12–16 ноября 2012, г. Москва).

рошенко, Н. Н. Горобец, А. Н. Горобец и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: X Всерос. открытая конф. (12–16 ноября 2012, г. Москва).

#### References

1. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya (Radar remote sensing space-based). Moscow, Radiotekhnika, 2010. 514 p.

2. Tolstov E. F., Yakovlev A. M., Karpov O. A. Ser. "Radiolokacionnye sistemy i sistemy radioupravleniya" no. 2 (6), 1995, pp. 54–57.

3. Atroshenko L. M., Gorobec N. N., Gorobec A. N., Krasnogorskiy M. G., Kostrikov A. L., Kupko V. S., Lebedev A. S., Malukov V. M., Ratushnaia E. S. Vestnik Xar'kovskogo nacional'nogo universiteta im. V. N. Karazina. Ser. "Radiofizika i elektronika", no. 20 (110), pp. 3–9.

4. Atroshenko L. M., Gorobec N. N., Gorobec A. N., Kostishkin S. I., Krasnogorskiy M. G., Lebedev A. S., Malukov V. M., Ratushnaia E. S. 10-ya Vserossiyskaya otkritaya konferenciya «Sovremennye problemi distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» (10<sup>th</sup> National Open Conference "Modern problems of remote sensing of the Earth from Space"), Moscow, Space Research Institute, 12–16 November 2012.

© Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., 2013

УДК 621.391.14

### ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕРКИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ПРИ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Т. А. Лепехина, В. И. Николаев

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

*Рассматриваются основные проблемные вопросы летных испытаний космических РСА: организация и планирование экспериментов с целью сокращения временных и материальных затрат, выбор методов и формирование единого подхода к определению сквозных характеристик. Изложены методики проверки основных характеристик РСА с помощью метрологических средств радиолокационного полигона.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), калибровка, пространственная разрешающая способность, радиометрическая разрешающая способность, системный подход.*

### SOME PROBLEMS OF SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR PRINCIPAL PERFORMANCE VERIFICATION IN FLIGHT TESTS

T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev

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

*The most debatable aspects of spaceborne SAR flight tests are considered in the paper. Those are: designing an experiment for time and cost saving; technique selection and unified approach developing for SAR through performance determination. SAR principal performance verification methods using radar test range metrological facilities are presented.*

*Keywords: synthetic aperture radar (SAR), calibration, spatial resolution, radiometric resolution, flight tests.*

При летных испытаниях впервые проводятся проверки соответствия характеристик космического РСА требованиям по назначению в реальных условиях, поэтому организации, методическому и аппаратно-программному обеспечению испытаний должно быть уделено самое серьезное внимание. Особое значение летные испытания приобретают в случае, когда запуск космического РСА высокого разрешения осуществляется после длительного перерыва.

Для сокращения времени и затрат на проведение летных испытаний требуется их четкая организация на основе следующих принципов: системный подход к построению единых методик наземных, летных и валидационных испытаний, основанный на общем системном критерии; преемственность методов и результатов измерения сквозных характеристик при наземных и летных испытаниях; единство определений основных характеристик РСА и интерпретации результатов их измерений.

Одной из важнейших сквозных характеристик РСА является пространственное разрешение. Для его измерения обычно используются два метода: метод импульсного отклика и критерий Рэлея. В работе [1] показана взаимосвязь между результатами измерений, полученными с использованием этих методов. В методиках, базирующихся на методе импульсного отклика, реализован системный подход к измерению пространственного разрешения: в качестве системного критерия используется ширина сечений функции отклика на одиночную точечную цель [2]. Преимущества этих методик в том, что они могут быть реализованы на всех этапах жизненного цикла изделия.

Аппаратной реализацией этих методик при наземных испытаниях является шлейфовый контроль [3], который может применяться как при автономных испытаниях РСА, так и при комплексных в составе КА в безэховой камере или на антенном полигоне. Результаты проверки функции отклика, полученные при наземных испытаниях, протоколируются для последующего сравнения с аналогичными результатами летных испытаний, так как большинство РСА имеет функцию встроенного шлейфового контроля. Таким образом, непосредственно после запуска РСА проводится измерение функции отклика по встроенному шлейфу. Хорошее совпадение с результатами наземных испытаний свидетельствует о сохранении работоспособности РСА после вывода на орбиту.

Для геометрической привязки и юстировки наведения антенны целесообразно использовать уголкового отражателя с достаточной ЭПР и геодезической привязкой, установленный на радиолокационном полигоне. Для определения пространственного разрешения проводится съемка квадратной миры из 9 уголкового отражателей. Полученная цифровая радиолограмма (ЦРГ) обрабатывается средствами испытательного программного обеспечения с усреднением результатов по всем 9 отражателям и приведением к масштабу, привязанному к координатам на местности [4].

Если описанные выше методики позволяют однозначно определить и измерить пространственное разрешение, то единых определений радиометрических

характеристик и методик их измерения до сих пор не выработано. Предлагается использовать методику определения радиометрической разрешающей способности, основанную на методе дифференциального радиоконтраста [5]. Преимуществом этого метода является возможность однозначного определения радиометрического разрешения по вероятностному критерию и автоматического анализа радиолокационного изображения. Метод основан на подсчете вероятности того, что для пары точек, случайным образом выбранных из участков РЛИ поверхностей с различными УЭПР, радиояркость элемента изображения участка с большей УЭПР окажется больше. Критерием радиометрического разрешения для заданного соотношения УЭПР участков является вероятность правильного обнаружения не менее 0,67.

Для практической реализации этого метода необходимо наличие ряда поверхностно-распределенных целей достаточной площади с простой геометрической формой, имеющих однородную калиброванную УЭПР, отличающуюся на заданную величину. Так как подобных целей в природе не существует, для измерения радиометрических характеристик предлагается воспользоваться их аппаратно-программной имитацией с помощью активной контрольной станции [6]. Для измерения радиометрических характеристик (разрешения, шумового эквивалента и динамического диапазона) необходимо имитировать ряд однородных поверхностно-распределенных целей, соответствующих требованиям для проверяемого режима: 1) соотношение УЭПР смежных участков должно соответствовать требованию по радиометрическому разрешению; 2) минимальное значение УЭПР должно быть на 3...5 дБ ниже расчетного значения шумового эквивалента; 3) соотношение максимального значения УЭПР и расчетного значения шумового эквивалента при экспериментальном определении последнего должно быть на 3...5 дБ ниже, а при экспериментальном определении динамического диапазона – на 3...5 дБ выше расчетного значения динамического диапазона РЛИ; 4) должен иметься участок с нулевым коэффициентом рассеяния, по которому определяется уровень собственного шума [5].

Для привязки радиометрической шкалы РСА, определяющей связь коэффициента радиолокационного рассеяния снимаемых объектов с численными значениями радиояркостей их РЛИ, необходима радиометрическая калибровка, выполняемая в два этапа. Первичная калибровка выполняется путем съемки природных поверхностно-распределенных объектов, имеющих однородную на большой площади и стабильную УЭПР [7]. Результатом такой калибровки является уточнение диаграммы направленности антенны и коэффициента, компенсирующего зависимость затухания сигнала от угла места, с остаточной постоянной ошибкой, составляющей около 1 дБ, обусловленной наличием флуктуаций и незначительных сезонных колебаний УЭПР природного объекта.

Окончательную радиометрическую калибровку, позволяющую уменьшить остаточную ошибку до 0,3 дБ и учесть возможную нестабильность коэффициента

усиления радиотракта, предлагается периодически осуществлять путем съемки активной контрольной станции, обеспечивающей имитацию точечных целей с калиброванной ЭПР.

Для повышения точности измерений необходима калибровка коэффициента усиления собственного радиотракта активной контрольной станции с точностью до 0,1 дБ, а также может применяться дополнительная модуляция ретранслированного сигнала для глубокого подавления отклика от подстилающей поверхности [8].

Анализируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

Для успешного проведения летных испытаний требуется специально оборудованный радиолокационный полигон с установленными на нем угловыми отражателями, имеющими калиброванную ЭПР и проходящими периодическую поверку, и активной контрольной станцией.

Для сокращения временных и материальных затрат целесообразно как можно больший объем измерений выполнять при наземных испытаниях радиолокатора, а затем, используя единые методики, провести летные испытания и сравнить полученные результаты с целью уточнения сквозных характеристик космического РСА.

Использование метода импульсного отклика и единого системного критерия позволяет проводить наземные и летные испытания по единым методикам. Установлена однозначная взаимосвязь между разрешающей способностью по критерию Рэля и шириной функции отклика на точечную цель на основе вероятностного метода.

Метод дифференциального радиоконтраста и разработанные на его базе методики обеспечивают однозначное определение радиометрических характеристик РСА путем автоматического анализа РЛИ. Предложен способ формирования калиброванных испытательных воздействий для реализации измерений радиометрического разрешения, шумового эквивалента и динамического диапазона по этому методу.

Периодическая радиометрическая калибровка РСА с помощью активной контрольной станции обеспечивает повышение качества РСА как измерительного инструмента для исследования свойств снимаемых объектов по их радиометрическим характеристикам.

#### Библиографические ссылки

1. Лепехина Т. А., Николаев В. И., Толстов Е. Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром). Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 486–490.

2. Лепехина Т. А. Методика применения моделей комплекса наземной обработки при проведении испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли : материалы VII науч.-техн. конф. М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 225–230.

3. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Стенд полунатурного моделирования для проверки сквозных характеристик космических РСА апертурой // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли : материалы VII науч.-техн. конф. М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 231–236.

4. Программно-математическое обеспечение для оценки показателей качества радиолокаторов с синтезированной апертурой / А. А. Баталов, Т. А. Лепехина, В. И. Николаев, М. А. Семенов // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром). Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 471–475.

5. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Вопросы экспериментального подтверждения сквозных характеристик космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Радиолокация, навигация, связь : материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф. (RLNC'2012). Воронеж : ОАО «Концерн «Созвездие», 2012. Т. 3. С. 1725–1737.

6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Experimental determination of spaceborne SAR radiometric resolution / Microwave & Telecommunication Technology: the 22nd Intern. Conf. Ukraine, 2012. P. 1009–1011.

7. Canadian Government Calibration Operations: Imaging Performance Update in the Fifteenth Year of Service [Electronic resource] / S. Cote, S. Srivastava, S. Muir, R. Hawkins URL: <http://sarvc.ceos.org/documents/doc/41>.

8. An innovative calibration concept for space SAR using an active antenna with improved efficiency, reliability and radiometric accuracy / J. Richard, K. Dumper, F. Heliere, C. Buck // Proc. of EUSAR'2006. P. 026.

#### References

1. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., Tolstov E. F. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Radiofizicheskie metody v distancionnom zondirovanii sred». Murom: Izd.-poligraficheskij centr MI VIGU, 2012. 567 p. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), pp. 486–490.

2. Lepekhina T. A. Materialy VII nauchno-tehnicheskoi konferencii «Sistemy nabljudenija, monitoringa i distancionnogo zondirovanija Zemli». Moscow, MNTORJeS im. A. S. Popova, Adler, 2010, p. 225–230.

3. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Materialy VII nauchno-tehnicheskoi konferencii «Sistemy nabljudenija, monitoringa i distancionnogo zondirovanija Zemli». Moscow, MNTORJeS im. A. S. Popova, g.Adler, 2010, p. 231–236.

4. Batalov A. A., Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., Semenov M. A. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Radiofizicheskie metody v distancionnom zondirovanii sred». Murom, Izd.-poligraficheskij centr MI VIGU, 2012. 567 s. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), p. 471–475.

5. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Materialy XVIII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konf. «Radiolokacija, Navigacija, Svjaz» (RLNC\*2012). Voronezh, ОАО «Koncern «Sozvezdie», 2012, vol. 3, p. 1725–1737.

6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Experimental Determination of Spaceborne SAR Radiometric Resolution.

The 22nd International Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P. 1009–1011.

7. Cote S., Srivastava S., Muir S., Hawkins R. Canadian Government Calibration Operations: Imaging Performance Update in the Fifteenth Year of Service. CEOS

SAR calibration and validation workshop 2010. Available at: <http://sarvc.ceos.org/documents/doc/41>.

8. Richard J., Dumper K., Heliere F., Buck C. An innovative calibration concept for space SAR using an active antenna with improved efficiency, reliability and radiometric accuracy. Proc. of EUSAR 2006, ID: 026.

© Лепехина Т. А., Николаев В. И., 2013

УДК 537.867+523.034.43

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОЧАСТОТНЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ «КОМПАКТ»

С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов, Р. В. Ермаков, Т. Г. Мусинянц, Е. П. Севалкина

Научно-исследовательский институт точных приборов  
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51. E-mail: kotik\_55@mail.ru

*Представлены результаты зондирования земной и водной поверхности, полученные авиационным много-частотным радиолокационным комплексом РСА «КОМПАКТ». Комплекс устанавливается на борту вертолета Ми-8 и функционирует одновременно в четырех диапазонах (X, L, P, VHF). С его использованием был получен большой объем экспериментальных данных, направленных на решение следующих задач: анализ отражающих характеристик объектов и фонов в разных диапазонах, оценка затухания РЛ сигнала в лесных массивах, наблюдение объектов на водной поверхности.*

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированной апертурой, РСА, РСА «КОМПАКТ».

## THE RESULTS OF MULTIFREQUENCY SAR OBSERVATIONS WITH 4-BAND AIRBORNE RADAR COMPLEX «COMPACT»

S. L. Vnotchenko, M. Y. Dostovalov, R. V. Ermakov, T. G. Moussiniants, E. P. Sevalkina

Research Institute of Precise Instruments  
51 Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: kotik\_55@mail.ru

*Multifrequency airborne SAR "Compact" was designed to operate in X, L, P and VHF band, mounted on board of Mi-8 helicopter without the need of any platform modification. The comparative analysis of backscattering properties for some natural surfaces was performed with the use of generated SAR images. Backscatter coefficients for surfaces for different bands were calculated. The examples of 4-band SAR observations are demonstrated. The joint use of multifrequency radar data seems to be an interesting instrument in SAR image analysis of natural surfaces and water areas.*

*Keywords:* synthesized aperture radar, SAR, multifrequency SAR.

Применение синхронной многочастотной радиолокационной (РЛ) съемки является перспективным направлением повышения информативности систем наблюдения на основе РСА космического и авиационного базирования.

Исследования в области многочастотных РЛ систем проводятся в ОАО «НИИ ТП» в течение длительного времени. В 2005 г. был разработан авиационный РЛ-комплекс функционирующий в X- и L-диапазонах [1]. Следующая модификация комплекса (2007 г.) включала РСА L- и VHF-диапазонов (0,23 и 2,5 м соответственно) [2; 3]. В 2009 г. была проведена летная отработка 3 диапазонного комплекса (X-, L- и P-диапазоны), а в 2011 г. комплекс РСА «КОМПАКТ» был модернизирован для одновременной работы четырех диапазонов (X, L, P, VHF) на борту вертолета Ми-8 без необходимости доработки носителя (рис. 1).

Основной задачей РЛ-комплекса было обеспечение возможности проведения многоканальных радиолокационных экспериментов, в том числе, и в длинноволновом диапазоне, в удаленных районах без необходимости использования специализированного носителя, с целью снижения затрат на проведение экспериментальных работ. Аппаратура РСА, включая не только электронные компоненты, но и VHF антенну и калибровочные отражатели, может перевозиться на пассажирском самолете и легко транспортироваться в любой необходимый район работ.

Создание подобного комплекса потребовало решения большого числа научно-технических задач в различных областях: аппаратное построение, системы, сегмент обработки информации, проблемы обеспечения электромагнитной совместимости.