

Измерение радиометрических характеристик космических РСА с использованием активной контрольной станции

Т.А. Лепёхина, К.А. Мазлов, В.И. Николаев, Е.Ф. Толстов

ГУП НПП «СПУРТ»: 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.4.;
tatonika@inbox.ru

Радиометрическая разрешающая способность РСА по однородным распределённым целям существенно зависит от статистических свойств спекл-шума на изображении. Определение этой характеристики путём прямых измерений затруднено из-за сложности создания радиомишенного полигона с набором однородных поверхностей, имеющих калиброванные УЭПР. В настоящей работе предлагается способ измерения радиометрических характеристик на лётных испытаниях РСА с помощью активного ретранслятора радиолокационных сигналов, имитирующего отражение от сложных и распределённых целей.

Distinction of distributed terrain targets surveyed with Synthetic Aperture Radar (SAR) by their brightness difference in the image essentially depends on speckle noise probability distribution. SAR radiometric resolution experimental verification in terms of homogeneous target backscatter distinction is complicated because of necessity of a radar test site containing a set of uniform clutter patterns having successively increasing backscatter coefficients. A way of using an active transponder with digital signal processing as a SAR flight test facility for calibrated homogeneous target echo simulation is introduced.

В настоящее время расширяется круг задач, требующих использования космического РСА как измерительного инструмента для определения отражательных свойств земной поверхности в диапазоне частот радиолокатора. Необходимым условием этого является радиометрическая калибровка РСА, от точности которой напрямую зависит точность измерений. Как свидетельствуют многочисленные публикации зарубежных разработчиков РСА, посвящённые накопленному за последние десятилетия опыту эксплуатации радиолокаторов и проблемам их калибровки и валидации, большинство операторов применяют сходные методики калибровки, в которых используются как природные эталонные объекты (леса бассейна Амазонки), так и искусственные калиброванные цели [1].

Принципиальным свойством применяемых в настоящее время радиолокационных мишеней (как уголковых отражателей, так и активных ретрансляторов) является то, что такой отражатель предназначен для имитации одиночной точечной цели (ОТЦ), являющейся наиболее подходящим входным воздействием на испытываемый РСА для измерения сквозных характеристик методом импульсного отклика [2]. Однако технические решения аппаратуры бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК), такие как разрядность АЦП и способ оптимизации уровня сигнала в приёмном тракте, а также алгоритмы вторичной обработки изображения оптимизированы для шумоподобных входных сигналов с гауссовым распределением, какими являются сигналы, отражённые от местности. Следовательно, использование детерминированного сигнала постоянной амплитуды, отражённого от яркой ОТЦ и принимаемого с пренебрежимо малым шумом, для радиометрических измерений не может считаться корректным. Кроме этого, количественное сравнение ЭПР дискретного объекта с УЭПР однородной поверхности требует специальной методики пересчёта.

В связи с тем, что яркость радиолокационного изображения однородной поверхности из-за влияния спекл-шума является случайной величиной, распознаваемость таких объектов существенно зависит от распределения её

вероятности. Из-за этой особенности определение радиометрической разрешающей способности РСА не может быть сформулировано одинаковым образом для одиночных точечных целей и однородных поверхностей. Если технические требования к РСА по радиометрическим характеристикам задаются применительно к съёмке фонов и подразумевают экспериментальную проверку на лётных испытаниях, это может быть выполнено только при наличии специального полигона, содержащего ряд однородных поверхностей с калиброванными УЭПР. В связи с технической сложностью о попытках создания таких полигонов в отечественной и зарубежной практике не известно.

Тем не менее, проверка радиометрических характеристик РСА в ходе лётных испытаний путём прямых измерений представляется возможной с применением активной радиолокационной мишени, имитирующей отражение зондирующего сигнала от сложной цели расчётного вида. Такой функцией будет наделена активная контрольная станция (АКС), разрабатываемая в настоящее время для задач лётных испытаний, калибровки и валидации РСА и имеющая в составе высокопроизводительный сигнальный процессор, позволяющий осуществлять необходимое преобразование зондирующего сигнала для имитации отражений от групповых или распределённых целей.

Принцип имитации сигнала, отражённого от сложной цели, кратко изложен ниже. Если снимаемый участок местности описывается двумерным полем комплексного коэффициента рассеяния $\dot{s}_{pat}(x, r) = \sqrt{\sigma_0(x, r)} \cdot e^{i\varphi(x, r)}$, где σ_0 , φ – соответственно УЭПР и сдвиг начальной фазы, то его комплексное радиолокационное изображение (КРЛИ) имеет вид $\dot{J}(x, r) = \dot{h}_{SAR}(x, r) * \dot{s}_{pat}(x, r)$, где $\dot{h}_{SAR}(x, r)$ – двумерная импульсная характеристика, описывающая РСА как линейную систему. В общем виде процесс формирования КРЛИ можно представить в виде композиции операторов формирования радиоголограммы и синтеза изображения [3], каждый из которых представляет собой свёртку (во временной области): $\dot{J}(x, r) = \dot{h}_{synt}(x, r) * \dot{h}_{hol}(x, r) * \dot{s}_{pat}(x, r)$, где $\dot{h}_{SAR}(x, r) = \dot{h}_{synt}(x, r) * \dot{h}_{hol}(x, r)$, или (в частотной области) $\dot{S}_J(\omega_x, \omega_r) = \dot{K}_{synt}(\omega_x, \omega_r) \cdot \dot{K}_{hol}(\omega_x, \omega_r) \cdot \dot{S}_{pat}(\omega_x, \omega_r)$.

Если тестовый участок описывается пространственным спектром коэффициента рассеяния $\dot{S}_{pat}(\omega_x, \omega_r)$, то для имитации отражённого от него сигнала с помощью активного транспондера, установленного на земле в точке (x_t, r_t) , требуется синтезировать его частотную передаточную функцию в виде $\dot{K}_{at}(\omega_x, \omega_r) = \dot{S}_{pat}(\omega_x, \omega_r) \cdot e^{i(\omega_x x_t + \omega_r r_t)}$, или импульсную характеристику $\dot{h}_{at}(x, r) = F^{-1}\{\dot{K}_{at}(\omega_x, \omega_r)\}$, получаемую как обратное преобразование Фурье частотной передаточной функции.

Зондирующий сигнал РСА представляет собой серию модулированных импульсов. Каждый из импульсов обратного сигнала является суперпозицией отражений зондирующего импульса от элементов участка и может быть представлен в виде свёртки с некоторой импульсной характеристикой, индивидуальной для каждого импульса в сеансе. Матрица импульсных характеристик транспондера рассчитывается с помощью преобразования имитируемого двумерного поля $\dot{s}_{pat}(x, r)$ оператором, обратным сжатию по азимуту.

Имитация отражённого сигнала возможна двумя способами: ретрансляция принятого зондирующего сигнала и генерация заранее смоделированного сигнала расчётного вида. В обоих случаях выполняется программная генерация сюжета,

представляющего собой линейку прямоугольных или иной формы участков однородного фона, имеющих расчётный набор значений УЭПР.

К преимуществам первого метода можно отнести: 1) возможность проведения тестовой съёмки и синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) в штатном режиме без модификации каких-либо параметров; 2) возможность предварительного формирования массива отсчётов обратного сигнала от АКС, что освобождает сигнальный процессор от задачи формирования сигнала в реальном времени и снижает требования по его быстродействию; 3) отсутствие влияния фона. Недостатком является неучёт характеристик реального зондирующего сигнала: если, в силу каких-либо причин, реальный сигнал отличается от расчётного, то это никак не отразится на результате измерения. Дополнительными требованиями являются повышенная точность взаимной временной синхронизации БРЛК и АКС, а также точность априорных данных ЭИИМ БРЛК на передачу в направлении АКС для расчёта значений УЭПР имитируемых распределённых целей.

Преимуществом второго метода является учёт характеристик реального зондирующего сигнала. Дополнительными требованиями являются производительность процессора, выполняющего свёртку, и модификация алгоритма сжатия по дальности в части учёта задержки ретранслированного сигнала.

При измерении радиометрических характеристик РСА с помощью АКС следует учитывать их зависимость от расположения сравниваемых участков на РЛИ. Полученный результат соответствует реальным координатам АКС и не зависит от кажущихся координат и размеров имитируемых сюжетов.

Пример РЛИ модели линейки однородных участков, УЭПР которых возрастает с шагом 2 дБ, при использовании зондирующих ЛЧМ-сигналов показан на рис. 1.

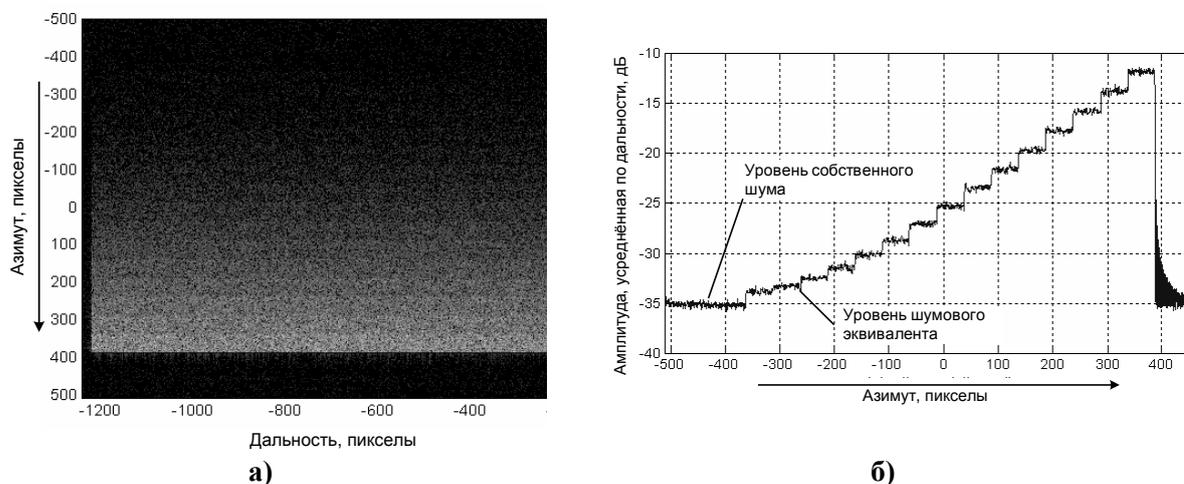


Рис. 1. РЛИ модели тестового участка (а) и профиль его усреднённой амплитуды (б)

Анализ полученного РЛИ (рис.1) для оценки радиометрического разрешения, чувствительности и динамического диапазона выполняется следующим образом. На РЛИ по расчётным координатам имитируемых однородных объектов выделяются участки, соответствующие их изображениям. На каждом i -ом участке выполняется поточечный подсчёт гистограммы распределения амплитуды (для амплитудного РЛИ) или мощности (для энергетического РЛИ) отклика ξ_i , по этим данным рассчитывается (аппроксимируется) плотность вероятности $W_{\xi_i}(x)$. Математическое ожидание m_{ξ_i} соответствует экспериментальной оценке коэффициента рассеяния σ_i снимаемого (имитируемого) однородного участка. Оценка радиометрических характеристик

выполняется по методу дифференциального радиоконтраста (МДРК), основанному на определении вероятности правильного обнаружения. Критерием выполнения радиометрического разрешения для рассмотренной пары участков с УЭПР σ_{i1} и σ_{i2} является превышение вероятностью их правильного распознавания P_{det} порогового значения P_0 . Это пороговое значение соответствует вероятности правильного распознавания участков с нулевой УЭПР и УЭПР, соответствующей шумовому эквиваленту σ_{NE} [4], и зависит от способа представления радиояркости изображения ξ : для квадрата ($\xi \sim |J|^2$) $P_0 \approx 0,67$; для модуля ($\xi \sim |J|$) $P_0 \approx 0,8$. МДРК может применяться для анализа изображений, обработанных с использованием различных алгоритмов фильтрации и некогерентного накопления.

Активная контрольная станция разрабатывается как экспериментальная и предназначается не только для обеспечения испытаний, валидации и калибровки РСА, но и для отработки перспективных методик. Поэтому при выборе аппаратной реализации станции авторы руководствовались следующими принципами: 1) максимальное использование серийных и стандартных элементов; 2) модульная структура, удобная для технического обслуживания и ремонта; 3) открытая архитектура и возможность наращивания конфигурации; 4) унификация основных подсистем [5].

Центральным элементом АКС является универсальный имитатор и регистратор сигналов (УИРС), содержащий высокоскоростные модули АЦП и ЦАП [6]. Опытный образец УИРС представляет собой сборку VХI-модулей «Информтест», включающую 8-разрядный цифровой осциллограф МОСЦ-6 с частотой дискретизации 5 ГГц и модифицированный 14-разрядный генератор сигналов произвольной формы МГВЧ с частотой дискретизации 2,5 ГГц. Такой комплект аппаратуры обеспечивает цифровую регистрацию и воспроизведение сигналов с произвольной модуляцией в полосе частот до 500 МГц на промежуточной частоте 600 МГц. УИРС в такой конфигурации под управлением специального программного обеспечения позволяет осуществлять имитацию сигналов, отражённых от сложных целей, в режиме генерации сигнала из предварительно подготовленного массива данных.

Начальным этапом использования описанного выше комплекта УИРС должны стать наземные испытания бортового радиолокационного комплекса (БРЛК), где он будет использоваться в составе стенда полунатурного моделирования в качестве основного источника тестовых сигналов. Сеанс съёмки тестовой радиоголограммы организуется следующим образом: 1) БРЛК передаёт зондирующий сигнал – серию импульсов, который с помощью УИРС записывается в виде массива цифровых данных; 2) специальное ПО системы формирования исходных данных (СФИД) осуществляет пересчёт этого массива в данные для синтеза имитируемого эхо-сигнала; 3) сеанс тестовой съёмки с такими же исходными данными запускается на БРЛК повторно, и на вход его приёмника подаётся синтезированный эхо-сигнал от УИРС.

Для реализации синтеза эхо-сигнала в режиме реального времени, который будет основным для АКС при лётных испытаниях РСА, аппаратура поэтапно должна получить следующие усовершенствования: 1) оборудование модулей АЦП и ЦАП высокоскоростным интерфейсом для чтения и загрузки полезных данных в режиме реального времени, при этом средством промежуточного хранения данных будет служить массив жёстких дисков RAID или твердотельное запоминающее устройство; 2) замыкание цепочки передачи данных через высокопроизводительный сигнальный процессор или многопроцессорное устройство, подобное описанному в [7].

Управление режимами работы АКС и обработки данных осуществляется оператором через аппаратно-программное рабочее место (АРМ) оператора. Примерная структура программного обеспечения АКС, включая АРМ и СФИД, описана в [5].

Таким образом, рассмотренная активная контрольная станция с функцией синтеза эхо-сигналов сложных целей позволит проводить прямые измерения радиометрических характеристик РСА, заданных для однородных фонов, при лётных испытаниях и процедурах валидации, что до сих пор было затруднено из-за сложности создания необходимых измерительных полигонов. Предлагаемый для анализа тестовых изображений метод дифференциального радиоконтраста содержит объективный вероятностный критерий оценки радиометрической разрешающей способности и радиометрической чувствительности РСА, удобный для компьютерного анализа РЛИ [8].

Гибкость алгоритмов синтеза сигналов позволяет использовать АКС в качестве универсального средства для испытаний и калибровки различных РСА с разными видами модуляции сигнала.

Возможность использования УИРС для имитации эхо-сигналов в составе стенда полунатурного моделирования даст возможность разработки и отладки методик калибровки и валидации, а также реализующего их программного обеспечения уже на этапе наземных испытаний и автономных испытаний подсистем.

Литература

1. Schwerdt M., Döring B., Zink M., Schrank D. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1 // EUSAR 2010. – P.350.
2. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Детков А.Н. и др. Радиолокационные станции воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 530 с.
3. L.V. Neronskiy, V.S. Verba, A.P. Kurochkin, V.F. Los, I.G. Osipov, A.G. Ostrovsky. Modelling of Signal Transformation in Spaceborne UWB Short Pulse SAR // EUSAR 2006.
4. Захаров В.Д., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Оценка шумового эквивалента и радиометрического разрешения РСА по методу дифференциального радиоконтраста // Радиопромышленность. – 2011. – Вып. 4. – С.122-134.
5. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Активная контрольная станция для задач валидации и калибровки космического РСА // 21-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2011. – С.1063-1064.
6. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Варианты построения устройства имитации и регистрации сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Материалы НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», Геленджик, 2011.
7. Wen, Z. Tao. Design and Implementation of Real-time SAR Echo Simulator for Natural Scene // EUSAR 2010.
8. Захаров В.Д., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Аппаратно-программная реализация методов контроля радиометрических характеристик космических РСА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СОИУ. – 2012. – Вып. 2. – С.182-196.