

Определение пространственного разрешения и радиометрических характеристик космических радиолокаторов с синтезированной апертурой методом цифровой имитации отражённых сигналов

Т.А. Лепёхина, В.И. Николаев

Открытое акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»,

tatonika@inbox.ru

Аннотация — Изложен метод цифровой имитации отражённых сигналов для формирования испытательных воздействий на космический радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) с помощью активного транспондера с целью измерения сквозных характеристик радиолокатора. Предложены варианты аппаратно-программной реализации активного транспондера. Разработаны математические модели групповых и пространственно-распределённых объектов для отработки методик измерения. Проведено экспериментальное определение пространственного разрешения и радиометрических характеристик РСА с использованием технологического комплекта радиолокатора «Кондор-Э». Предложены методики анализа радиолокационного изображения поверхностно-распределённых целей для определения радиометрического разрешения.

Ключевые слова — радиолокатор с синтезированной апертурой; активный транспондер; цифровая обработка сигналов; полунатурное моделирование; радиометрическое разрешение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системный подход к разработке космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) требует создания универсальных методик, единых на всех этапах жизненного цикла изделия. Метод, на основе которого построена система испытаний, должен обеспечить преемственность методик и результатов измерения сквозных характеристик при наземных и лётных проверках локатора, единство определений основных параметров РСА. Для получения достоверных результатов измерения сквозных характеристик РСА необходимо обеспечить формирование калиброванных испытательных воздействий с последующим автоматизированным анализом выходного продукта (изображения) по чётко выработанным критериям, исключающим возможность неоднозначной интерпретации результатов.

Сквозные характеристики РСА – пространственная разрешающая способность, радиометрическое разрешение, чувствительность, динамический диапазон [1] – связаны с качеством радиолокационного изображения (РЛИ), которое строится в соответствии со снимаемым объектом как полем коэффициента обратного рассея-

ния. Чтобы проверить эти характеристики, тестовый объект должен обладать теми же свойствами, по которым проводится сравнение полученного РЛИ с видом объекта съёмки.

Те тестовые объекты, которые требуются для реализации отдельных методик, например, проверки радиометрического разрешения, но в природе не встречаются и сложны для искусственного создания, могут быть симитированы аппаратно-программными средствами активного транспондера.

Таким образом, для решения поставленных задач требуются: 1) метод для разработки единой системы методик; 2) средства для их аппаратно-программной реализации; 3) методики и программное обеспечение для автоматизированного анализа РЛИ.

II. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ИМИТАЦИИ ОТРАЖЁННЫХ СИГНАЛОВ

Закон преобразования зондирующего сигнала РСА в суперпозицию его отражений от множества элементов снимаемой композиции наземных объектов и фонов с различными амплитудами, фазами и задержками может быть симитирован аппаратно-программными средствами, если известен закон движения носителя и построена модель требуемой фоно-целевой обстановки. Простейшим представлением такого преобразования является свёртка каждого зондирующего импульса в сеансе с заранее рассчитанной импульсной характеристикой.

Метод имитации отражённых сигналов описан в [2], [3] и включает следующие шаги:

- моделирование фоно-целевой обстановки как суперпозиции двумерного поля коэффициента обратного рассеяния в координатах дальность – азимут и набора точечных целей с заданными эффективными площадями рассеяния (ЭПР) в пространстве;

- расчёт закона изменения дальности при движении носителя;

- расчёт закона преобразования зондирующего сигнала в отражённый для каждого импульса в сеансе как импульсной характеристики цифрового фильтра;

– запись реального зондирующего сигнала РСА;

– преобразование массива данных записанного зондирующего сигнала в данные имитированного отражённого с использованием предварительно рассчитанной импульсной характеристики для каждого импульса в сеансе;

– поимпульсное воспроизведение имитированного отражённого сигнала из массива цифровых данных на несущей или промежуточной частоте с нормированной задержкой относительно зондирующего сигнала и подача на вход приёмной системы РСА.

При лётных испытаниях и валидации РСА такое преобразование должно осуществляться с помощью активного транспондера, содержащего антенное устройство и приёмо-передающий радиотракт с калиброванными характеристиками, устройство цифровой имитации и регистрации сигналов и компьютерной системы формирования исходных данных. Устройство, унифицированное с активным транспондером в части аппаратуры цифровой обработки и формирования данных, предполагается использовать и при наземных испытаниях в составе стенда полунатурного моделирования.

При необходимости могут применяться уточнённые процедуры преобразования данных, учитывающие миграцию дальности, доплеровские смещения несущей частоты и другие факторы. Используемый метод преобразования определяет только объём требуемых вычислительных операций, однако практически не влияет на физические характеристики сигналов (ширину и форму спектра, циклограмму).

III. СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АКТИВНОГО ТРАНСПОНДЕРА И ЕЁ ВАРИАНТЫ

Предполагается поэтапная (с усложнением схемотехнической структуры и расширением функциональных возможностей) аппаратная реализация активного транспондера в зависимости от доступных аппаратных средств и намеченных задач.

Вариант 1. Для измерения пространственного разрешения и радиометрической калибровки РСА по точечной цели, а также поляриметрических характеристик, которые не могут быть измерены с помощью пассивных отражателей, используется активный транспондер с цифровой линией задержки, имеющий широконаправленную антенну, стабильный калиброванный коэффициент усиления, достаточный для имитации точечной цели с большой ЭПР (70 дБм² и более). Такие активные транспондеры, позволяющие имитировать только одиночную точечную цель, используются для действующих и продолжают совершенствоваться для перспективных РСА Европейской и Канадской космических ассоциаций. Особое внимание здесь уделяется повышению точности калибровки и стабильности коэффициента усиления сквозного тракта транспондера, от которых непосредственно зависит качество радиометрической калибровки РСА [4].

Вариант 2. Активный транспондер, оборудованный буферными запоминающими устройствами достаточного объёма для хранения массивов данных записанного и имитированного сигналов всего сеанса, сможет обеспечить имитацию произвольных фоно-целевых обстановок, занимающих всё предполагаемое поле съёмки, в разомкнутом режиме. Для получения тестового РЛИ проводится, как минимум, два сеанса съёмки: подготовительный, в котором активный транспондер записывает генерируемую радиолокационной станцией серию зондирующих импульсов, и измерительный, в котором станция работает по той же циклограмме, а на вход приёмника от транспондера подаётся имитируемый отраженный сигнал.

Для организации тестовой съёмки в разомкнутом режиме необходимо точное соответствие момента воспроизведения каждого отсчёта имитированного отражённого сигнала расчётной задержке, учтённой при подготовке данных. Для обеспечения относительных уровней боковых лепестков азимутального сечения функции отклика не выше минус 40 дБ необходимо, чтобы среднеквадратическое отклонение разности начальных фаз ретранслированных импульсов и опорного сигнала гетеродина в течение сеанса съёмки не превышало 0,5°, что при несущей частоте сигнала 3 ГГц соответствует стабильности задержки не хуже 4×10^{-13} с и составляет менее 0,1% от периода дискретизации. При имитации отражённого сигнала в режиме реального времени, когда эта задержка составляет целое число тактов АЦП/ЦАП, требуемая стабильность обеспечивается характеристиками опорного генератора, что не представляет серьёзной технической проблемы. Однако при работе в режиме предварительной подготовки данных, когда момент приёма зондирующего сигнала может отличаться от расчётного, для сохранения фиксированной задержки и разности начальных фаз требуется применение специального устройства для уточнённой временной и фазовой привязки ретранслированного сигнала к принимаемому широкополосному зондирующему сигналу с известной модуляцией.

Вариант 3. Активный транспондер с цифровым сигнальным процессором, позволяющий имитировать предварительно сформированную модель произвольной фоно-целевой обстановки в режиме реального времени.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для отработки методик измерения пространственных и радиометрических характеристик РСА были использованы усовершенствованный стенд полунатурного моделирования на базе модульных приборов Agilent [5] и технологический комплект бортового радиолокационного комплекса космического РСА «Кондор-Э» [6]. Аппаратура стенда выполняла роль макета активного транспондера варианта 2. Синхронизация приёмо-передатчика и макета осуществлялась с помощью импульсного сигнала запуска передатчика.

Для отработки методики полунатурной имитации отражённых сигналов использовались математические модели двух тестовых объектов.

Радиолокационная мира [1] для определения пространственного разрешения (рис. 1) представляет собой 9 одинаковых точечных целей (угловых отражателей), образующих квадрат, ориентированный под произвольным углом к трассе спутника, и точечную цель, превышающую остальные по ЭПР на 5 дБ.

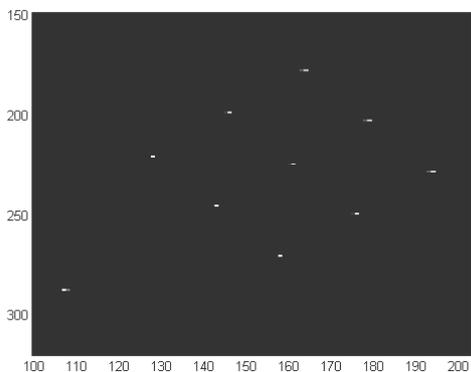


Рис. 1. Модель радиолокационной миры для определения пространственного разрешения

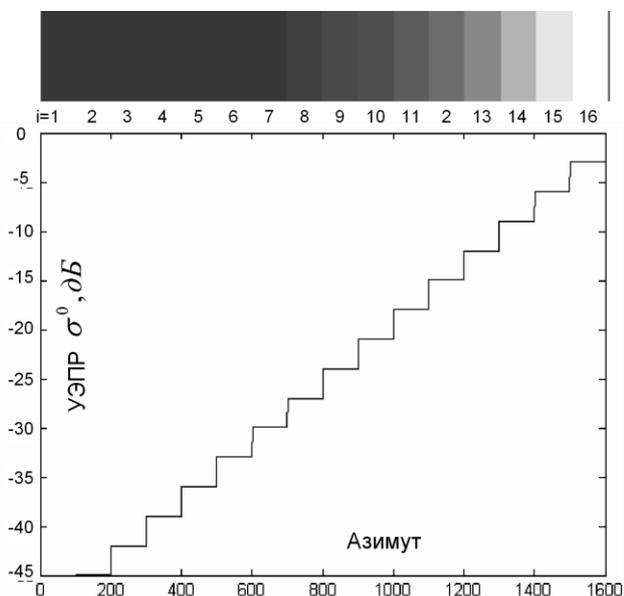


Рис. 2. Модель радиолокационной миры для определения радиометрических характеристик

Радиолокационная мира для определения радиометрических характеристик содержит 15 однородных прямоугольных участков одинаковых размеров, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) которых возрастает с шагом 3 дБ (что приблизительно соответствует расчётной величине радиометрической разрешающей способности РСА при отсутствии некогерентного накопления). Имеется участок таких же размеров с нулевой УЭПР, окружающий фон также считается нерассеивающим. Чередование участков выбрано в направлении азимута. На рис. 2 приведены фраг-

мент полутонного изображения миры (по горизонтали – азимут) и график сечения профиля УЭПР в логарифмическом масштабе.

V. АНАЛИЗ ТЕСТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Функция отклика на одиночную точечную цель, получаемая при анализе изображения миры (рис. 1), является критерием качества сквозного радиотракта и взаимной синхронизации транспондера и аппаратуры радиолокатора. Анализ ширины и уровней ближайших боковых лепестков функции отклика, интерполированной методом «раздвижки спектра», продемонстрировал удовлетворительные результаты, что являлось необходимым условием корректности дальнейших экспериментов с моделированием более сложных фоно-целевых обстановок.

Амплитудные изображения ряда однородных поверхностно-распределённых целей, синтезированные с коэффициентами межэлементного некогерентного усреднения 1, 4 и 16, приведены на рис. 3, 4. Помимо визуального контроля их качества эти РЛИ были использованы для отработки методик автоматизированного анализа РЛИ таких целей, основанного на методе дифференциального радиоконтраста (МДРК) [7]. Ниже изложены основные принципы МДРК и способ его применения для анализа тестовых РЛИ.

Первичным продуктом сжатия цифровой радиолограммы является комплексное радиолокационное изображение (Single Look Complex, SLC), представляющее собой матрицу вида $\hat{z}(k, m)$, где k, m – координаты пиксела, соответствующие азимуту и наклонной дальности. Комплексный отклик $\hat{z} = \hat{s} + \hat{n} + \hat{l}$ (для краткости координаты пиксела опущены) может быть выражен суммой трёх величин: $\hat{s}(k, m)$ – основная составляющая, являющаяся результатом согласованной фильтрации зондирующего сигнала, рассеянного выбранным элементом на местности с азимутом x_k и наклонной дальностью r_m ; $\hat{n}(k, m)$ – остаточный отклик теплового шума приёмной системы РСА, присутствующий на выходе согласованного фильтра; $\hat{l}(k, m)$ – паразитная составляющая отклика, являющаяся суммой боковых лепестков откликов от всех элементов снимаемой фоно-целевой обстановки.

Все перечисленные составляющие комплексного отклика являются случайными величинами, двумерные плотности вероятности которых $w_s\{\hat{\xi}\}(k, m)$, $w_n\{\hat{\xi}\}(k, m)$, $w_l\{\hat{\xi}\}(k, m)$, где $\hat{\xi} = \eta + i\zeta$ – возможное комплексное значение, принимаемое переменными s, n или l , имеют различные зависимости от координат пиксела на РЛИ и от вида снимаемой фоно-целевой обстановки. Отклик теплового шума на РЛИ является результатом некогерентного суммирования аддитивных шумовых составляющих всех отсчётов радиолограммы и, согласно центральной предельной теореме, описывается двумерным нормальным законом распре-

деления $w_n(\dot{z}) = f(\dot{z}, \sigma_n)$ с дисперсией $\sigma_n^2 = const$, где

$$f(\dot{z}, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{|\dot{z}|^2}{2\sigma^2}\right).$$

Если, как в рассматриваемом эксперименте, снимаемый объект представляет собой поверхностно-распределённую цель с однородной УЭПР $\sigma_i^0(x, r) = const$ в пределах некоторого участка с номером i , то, как показано в [8] и др., значение комплексного РЛИ этого участка, при пренебрежимо малом аддитивном шуме, является случайной величиной с двумерной нормальной плотностью вероятности $w_{s,i}(\dot{z}) = f(\dot{z}, \sigma_{s,i})$, где $\sigma_{s,i}(k, m) = C \cdot \sqrt{\sigma_i^0(x_k, r_m)}$.

Для составляющей $i(k, m)$, учитывая, что она является суммой боковых лепестков от большого числа откликов со случайными фазами, можно ограничиться аппроксимацией плотности вероятности двумерным нормальным распределением, где $\sigma_i(k, m)$ имеет некоторую зависимость от координат пиксела на РЛИ, связанную с видом фоно-целевой обстановки и двумерного зондирующего сигнала, и может быть оценена путём имитационного моделирования.

Для визуального отображения на видеомониторах и в печатных документах комплексное РЛИ преобразуется в некоторую действительную форму $J(k, m)$, где J называют радиояркостью. На практике широко применяются амплитудное РЛИ $J = |\dot{z}|$ и энергетическое РЛИ $J = |\dot{z}|^2$ [6].

Задачей анализа полученного РЛИ набора однородных поверхностно-распределённых целей является вычисление радиометрической разрешающей способности. Здесь и далее используется определение радиометрического разрешения в терминах метода дифференциального радиоконтраста (МДРК). Критерий радиометрической разрешающей способности подробно описан в [7] и формулируется следующим образом. На изображениях двух сравниваемых поверхностно-распределённых целей случайным образом выбирается по одному элементу. Правильным обнаружением радиоконтраста считается событие, когда в выбранной паре элемент изображения участка с большей УЭПР имеет большую радиояркость. Согласно МДРК, считается, что радиометрическое разрешение для данных поверхностно-распределённых целей выполняется, если вероятность правильного обнаружения радиоконтраста $P_{i,i}$ составляет не менее заданного порогового значения P_i , где $0,5 < P_i < 1$. В качестве критерия радиометрического разрешения в МДРК принимается вероятность правильного обнаружения, обеспечиваемая при сравнении изображений двух поверхностно-распределённых целей, одна из которых имеет нулевую УЭПР, другая – УЭПР, равную шумовому эквиваленту. Для энергетического и амплитудного РЛИ

значения P_i составляют соответственно $P_{i,y} \approx 0,67$ и $P_{i,a} \approx 0,8$ [7].

Для подавления спекл-шума и улучшения радиометрических характеристик в соответствии с техническими требованиями к тому или иному режиму съёмки РСА используются различные способы некогерентного накопления и другие методы фильтрации [9].

Анализ РЛИ тестовой цели, полученного в проверяемом режиме съёмки и вторичной обработки, в части радиометрических характеристик может проводиться для решения следующих задач: 1) констатация выполнения/невыполнения требований по заданной величине радиометрической разрешающей способности; 2) определение фактического значения радиометрической разрешающей способности, обеспечиваемой системой РСА в проверяемом режиме; 3) определение уровня шумового эквивалента; 4) определение динамического диапазона при съёмке поверхностно-распределённых целей.

Для решения задачи 1 моделируется фоно-целевая обстановка, содержащая ряд участков однородных поверхностно-распределённых целей с радиоконтрастом, равным заданному требованию по радиометрической разрешающей способности (рис. 2).

Радиояркость участков РЛИ, отображающих нерассеивающие поверхности (рис. 4), соответствует собственному шуму РСА. Уровень УЭПР, соответствующий радиояркости, на 3 дБ превышающей радиояркость шума, принимается за шумовой эквивалент РСА в проверяемом режиме съёмки. В данном эксперименте шумовой эквивалент занимает уровень между УЭПР участков 9 и 10 и составляет минус 23 дБ.

На каждом участке РЛИ (рис. 3), соответствующем однородному поверхностно-распределённому элементу фоно-целевой обстановки с номером i , в известных границах этого участка поточечно подсчитывается гистограмма распределения радиояркости (рис. 5). По гистограмме рассчитывается аппроксимированная функция плотности вероятности радиояркости $w_i\{J\}(\xi)$ элементов изображения участка с УЭПР σ_i^0 .

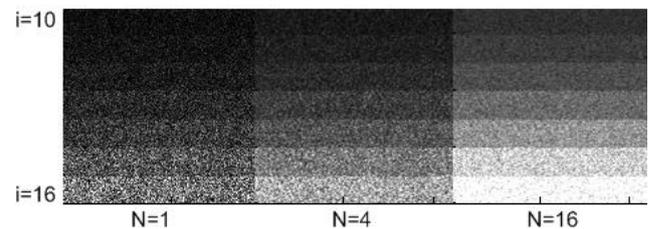


Рис. 3. Амплитудные РЛИ модели тестового участка при различном количестве некогерентных усреднений

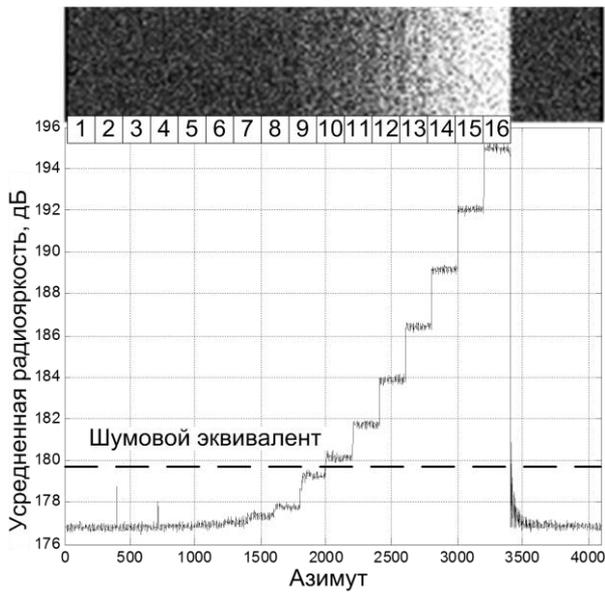


Рис. 4. Фрагмент амплитудного РЛИ и профиль его усреднённой радиояркости

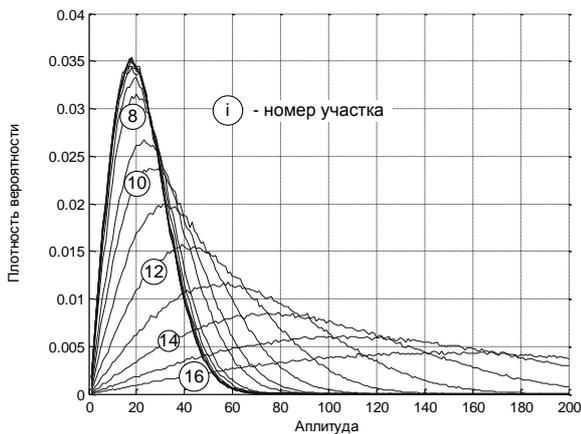


Рис. 5. Гистограммы радиояркости участков амплитудного РЛИ

Для каждой пары смежных участков ($i, i+1$), $i=2\dots 15$ вычисляется плотность вероятности разности радиояркостей $w'_i\{J_{i+1} - J_i\}(\eta) = w_{i+1}\{J\}(\eta - \xi) * w_i\{J\}(\xi)$ и вероятность правильного обнаружения $P_{i\hat{i}.i} = \int_0^\infty w'_i(\eta) d\eta$. Требование по радиометрической разрешающей способности считается выполненным для тех пар участков $i, i+1$, где $P_{i\hat{i}.i} \geq P_{\bar{i}}$.

Для решения задачи 2 требуется определить минимальный радиоконтраст (соотношение УЭПР) однородных поверхностно-распределённых целей, при котором обеспечивается их радиометрическое разрешение по критерию, принятому в МДРК. Чтобы выполнить такой анализ с использованием вероятностей $P_{i\hat{i}.i}$ для пар участков РЛИ, полученного в результате одного эксперимента, необходимо выполнить следующие операции.

1. Рассчитать $P_{i\hat{i}.i,j}$ для всех, а не только смежных, пар участков $i \neq j$; результаты заносятся в таблицу. Очевидно, что $P_{i\hat{i}.i,j} = P_{i\hat{i}.j,i}$, а значения диагональных элементов $P_{i\hat{i}.i,i} \equiv 0,5$.

2. Для $i=2\dots 16$ (УЭПР $\sigma^0 = -45\dots -3$ дБ), $k=-14\dots 14$ (радиоконтраст $-42\dots 42$ дБ) строится сетка точек в координатах (x_i, y_k) : $x_i = 10 \lg \sigma_i^0$, $y_k = 10 \lg \frac{\sigma_{i+k}^0}{\sigma_i^0}$ (рис. 6). По вертикали откладываются рассчитанные значения вероятности правильного обнаружения: $z = P_{i\hat{i}.i,k}$.

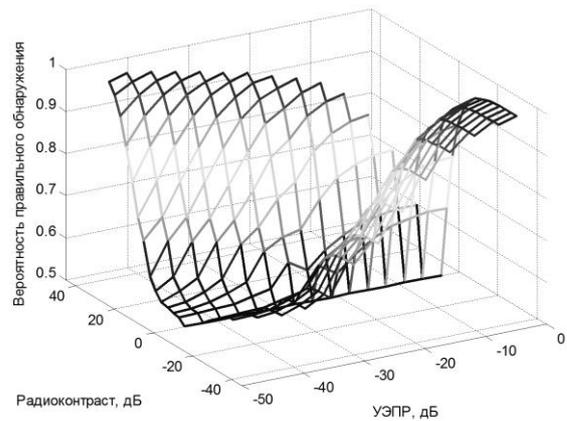


Рис. 6. Вероятность правильного обнаружения радиоконтраста участков РЛИ с различными УЭПР

3. Построенная на сетке точек функция интерполируется с применением стандартных методов MATLAB, и строится сглаженная поверхность.

4. Строится сечение полученной поверхности горизонтальной плоскостью $z = P_{\bar{i}}$, представляющее собой график зависимости радиометрической разрешающей способности от УЭПР более тёмного из сравниваемых участков (верхняя ветвь) или более яркого (нижняя ветвь). На рис. 7 приведено семейство таких сечений, построенных для одиночного амплитудного РЛИ (рис. 3, $N=1$) и для полученных из него вторичных изображений при межэлементном некогерентном усреднении с коэффициентами $N=4$ и 16 . Графики вида рис. 7 могут быть использованы для определения радиометрических характеристик РСА.

Оценка радиометрической разрешающей способности РСА улучшается при увеличении отношения сигнал/шум и сходится к предельному значению $C_{\sigma,N}$. При коэффициентах $N=1, 4, 16$ для $C_{\sigma,N}$ получены значения 6,2, 3,5, 2,2 дБ.

При уменьшении УЭПР участков до уровня шумового эквивалента и ниже верхние ветви сечений асимптотически приближаются к убывающим линей-

ным функциям вида $y_N(x) = -x + b_N$, где $x = \sigma^0$ – УЭПР более тёмного из пары сравниваемых участков, $b_N = \sigma_{\text{ш.}N} + C_{\sigma,N}$, $\sigma_{\text{ш.}N}$ – эффективный шумовой эквивалент РСА для режима с N некогерентными накоплениями, $C_{\sigma,N}$ – предельная радиометрическая разрешающая способность при увеличении отношения сигнал/шум для N некогерентных накоплений. Нижние ветви сечений стремятся к вертикальным прямым $x = b_N$. Отсюда могут быть получены оценки эффективного шумового эквивалента, равные соответственно -23, -25 и -28 дБ для $N=1, 4, 16$.

Динамический диапазон РЛИ D_N определяется как соотношение УЭПР самого яркого участка и величины b_N . В рассмотренном примере $D_1=14$ дБ, $D_4=19$ дБ, $D_{16}=23$ дБ.

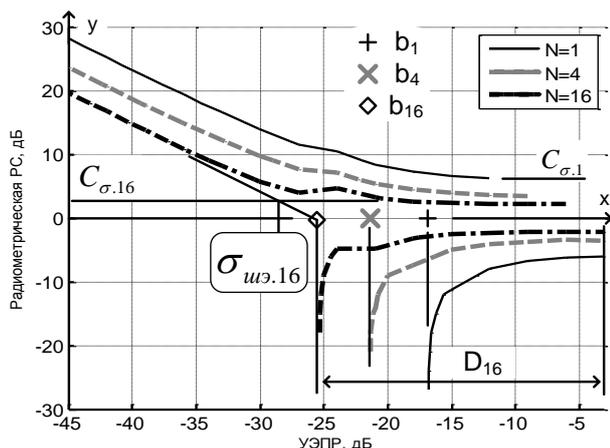


Рис. 7. Пример экспериментальной оценки радиометрических характеристик РСА методом дифференциального радиоконтраста

VI. ВЫВОДЫ

Метод цифровой имитации отражённых сигналов даёт возможность преобразования зондирующих сигналов РСА в имитированные отражённые с учетом фоно-целевой обстановки и режима съёмки.

Разработаны методики и программное обеспечение для автоматизированного определения сквозных характеристик РСА по радиолокационному изображению тестового объекта.

Идеология построения методик формирования входных воздействий для измерения пространственного разрешения и радиометрических характеристик РСА является универсальной, что даёт возможность применения единых методик на наземных, лётных и валидационных испытаниях.

Таким образом, предложена и опробована на практике методика экспериментального определения радиометрических характеристик РСА с заданной достоверностью по калиброванному входному воздействию.

Это открывает возможность включения радиометрических характеристик, приобретающих всё большую востребованность среди пользователей данных радиолокационного зондирования Земли, в программу лётных и валидационных испытаний РСА с использованием комплекса наземных метрологических средств. Создание такого комплекса является насущной задачей в связи с успешным запуском РСА «Кондор-Э».

Аппаратно-программная реализация активного транспондера с возможностью имитации произвольных фоно-целевых обстановок с групповыми и пространственно-распределёнными целями позволит реализовать сквозную систему испытаний РСА, от наземных до валидационных, по единым критериям оценки и методам их анализа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Радиолокационные станции воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
- [2] Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Алгоритм цифровой имитации траекторных сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». М.: РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013. С. 418-422.
- [3] Лепёхина Т.А. Метод имитации отраженных сигналов для определения сквозных характеристик космических РСА. // Материалы научно-технической конференции «Научно-технические проблемы построения систем и комплексов землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами». М.: ОАО «Концерн «Вега», 2013. С. 29-30.
- [4] Jirousek M, Döring B.J, Looser P., Schwerdt M. Linearity Measurements of an Accurate Transponder for Calibrating Future Spaceborne SAR Systems // Proc. of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2012. Nuremberg, Germany, 2012. P. 67-70.
- [5] Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Аппаратно-программное обеспечение стенда полунатурного моделирования для наземных испытаний космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. №1. С. 53-60.
- [6] Радиолокационные системы землеобзора комического базирования / Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- [7] 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.
- [8] Laur H., Bally P., Meadows P., Sanchez J., Schaettler B., Lopinto E., Esteban D. ERS SAR Calibration: Derivation of the Backscattering Coefficient Sigma-Nought in ESA ERS SAR PRI Products / ESA. Document No: ES-TN-RS-PM-HL09. Issue 2.f 05. November, 2004.
- [9] Moreira A. Improved Multilook Technique Applied to SAR and SCANSAR Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991. V. 29. № 4. P. 529-534.