

РАСШИРЕННЫЙ МЕТОД МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

EXPANDED METHOD OF METROLOGICAL EVALUATION OF THE RESOLUTION OF THE RADAR IMAGE

А.Н. Горобец,

аспирант, младший научный сотрудник Харьковского национального университета
им. В.Н. Каразина

Рассмотрены классический и альтернативный способы определения разрешающей способности продукции дистанционного зондирования радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны, а также проведен их сравнительный анализ по результатам обработки натуральных измерений. Преимущество

альтернативного метода заключается в том, что он учитывает форму и размеры эквивалентной апертуры эталонных отражателей, что позволяет использовать отражатели любых размеров и в целом повышает точность измерений.

Ключевые слова: Радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, внешняя калибровка, послестартовая калибровка, разрешающая способность, трёхгранный уголкообразный отражатель, эквивалентная апертура, матричная свёртка, ядро размывания.

The classical and alternative methods for the determination of the resolution of products for remote sounding of synthetic aperture radars are considered. Their comparative analysis based on the results of in-situ measurements processing is carried out as well. The advantage of the alternative method is that it takes into account the shape and size of the effective aperture of reference reflectors, which allows using the reflectors of any size and improves measurements accuracy in general.

Keywords: synthetic aperture radar, internal calibration, post-launch calibration, resolution, trihedral corner reflector, equivalent aperture, matrix convolution, blur kernel.

Введение

В последние десятилетия всё большее развитие получают технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в особенности,

космический землеобзор. В то же время спрос накладывает свои требования не только на стоимость и периодичность съёмки, но и на качество спутниковой продукции. В ряде приложений важным требованием является привязка яркости на изображении к соответствующей метрологической характеристике аппаратуры ДЗЗ. Такая тенденция имеет место для продукции ДЗЗ всех диапазонов электромагнитных волн, однако среди прочих наиболее перспективными по целому ряду признаков можно считать снимки в радиодиапазоне.

Что же касается метрологического обеспечения таких продуктов землеобзора, отметим, что калибровку сенсора разделяют на предстартовую (производственную) и послестартовую (эксплуатационную). Если первая предполагает, что и калибруемое устройство, и рабочий эталон находятся в лаборатории, то вторая происходит непосредственно во время эксплуатации, то есть сенсор находится на орбите, а рабочие эталоны – на снимаемой поверхности Земли. Кроме того, лабораторная калибровка регламентируется методиками и стандартами предприятия-производителя, в то время как эксплуатационная калибровка в настоящее время не использует какие-либо стандарты и может полагаться в основном на документы [1], разработанные, как правило, различными организациями-членами CEOS [2]. Такие документы, называемые good practices, не всегда содержат конкретные инструкции и в целом носят рекомендательный характер. В данной статье сделана попытка обобщить и систематизировать современные методы эксплуатационной калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), а также расширить их и предложить новые параметры, наиболее полно характеризующие РСА и получаемые с их помощью радиолокационные изображения (РЛИ). Наиболее четко и емко метод внешней калибровки именно для РСА приведен в работе [3], которая и послужила основой для разработки новых подходов, описанных в данной статье.

Основные единицы

Наряду с оптическими системами ДЗЗ, радиолокатор с синтезированной апертурой имеет ряд существенных особенностей. Так, например, если в оптической системе ДЗЗ яркость пикселя на изображении определена в основном цветом снимаемого объекта, то в радиодиапазоне величина яркости обусловлена эффективной площадью рассеяния (ЭПР). ЭПР — это площадь некоторой условной плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны и являющейся идеальным изотропным переизлучателем, которая, будучи помещена в точку расположения цели, создаёт в месте расположения антенны радиолокационной станции ту же плотность потока мощности, что и реальная цель [4, с. 126]. Эта величина измеряется в квадратных метрах и зависит от формы, проводимости отражающего объекта, а также от длины волны зондирующего сигнала. Этот параметр был впервые введен в радиолокации, однако в контексте прослеживаемости этой величины к системе СИ отметим, что металлический идеально проводящий шар с экваториальной площадью поперечного сечения в 1 м^2 обладает ЭПР соответственно в 1 м^2 при условии, что длина волны зондирующего сигнала много меньше радиуса сферы [5, с. 103].

На практике, как правило, с целью обеспечения максимальной информативности радиолокационные системы имеют нелинейную передаточную функцию. Поэтому в ДЗЗ зачастую ЭПР измеряется в децибелах, что соотносится с квадратными метрами следующим образом:

$$\sigma_m [\text{дБ}] = 101g \frac{\sigma_m [\text{М}^2]}{1 \text{ М}^2}, \quad (1)$$

где σ_m — ЭПР цели в максимуме обратного рассеяния.

Что касается характеристик качества РЛИ, на основе которых конечный потребитель может выбрать режим требуемой съёмки, — это разрешающая способность и радиометрические свойства радиоизображения.

Для оптических систем разрешающую способность измеряют, как правило, при помощи двух эталонных целей путём изменения расстояния между ними. Минимальное расстояние, при котором цели на снимке различаются, и считается разрешающей способностью (по Рэлею) [6]. В радиолокации такой метод не практикуют, так как в силу интерференции полей от близко расположенных отражателей их изображение на снимке сильно отличается от случая к случаю. Даже при большой выборке на одном снимке конкретная величина традиционной разрешающей способности будет носить статистический характер. Поэтому при оценке разрешающей способности сенсора по РЛИ,

как правило, оценивают ширину отклика на точечную цель [3, с. 514] по уровню 0,707 от максимума сигнала. При этом ширина отклика определяется в пикселях для центральной строки и центрального столбца отклика, а затем полученные значения преобразуют в метры следующим образом:

$$\rho_Y = \frac{L_R M_R}{\sin \gamma_i}; \quad \rho_X = L_X M_X.$$

Здесь ρ_Y — разрешающая способность по поперечной дальности на местности в метрах; ρ_X — разрешающая способность в метрах вдоль следа трассы космического аппарата (КА); L_R — ширина отклика в пикселях по каналу линейной частотной модуляции; L_X — ширина отклика в долях пикселей по каналу синтеза; M_R, M_X — масштабы (размеры пикселя) по наклонной дальности и по оси движения КА соответственно; γ_i — угол падения радиоволн (от горизонта).

Субпиксельная поправка

Предложенные в данной работе подходы требуют наиболее точного определения положения центра отклика в растре РЛИ, причем с точностью до долей пикселя, поэтому рассмотрим возможность уточнения координат центра отклика на основе яркости пикселей, окружающих пиксель с максимальной яркостью. Уточненные координаты вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

$$\text{Row} = \sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} i \cdot W_{ij}; \quad (2)$$

$$\text{Col} = \sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} j \cdot W_{ij}; \quad (3)$$

$$W_{ij} = \frac{\text{Rstr}_{ij}}{\sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} \text{Rstr}_{ij}}, \quad (4)$$

где **Rstr** — исследуемое изображение; r, c — номер строки и столбца начального приближения соответственно; i, j — итератор строк и столбцов в пределах области коррекции соответственно; d — размер окрестностей (области коррекции).

Значения весовой функции (4) пропорциональны яркостям пикселей и формируются так, чтобы их сумма (в пределах области коррекции) всегда равнялась единице. Таким образом, чтобы получить средневзвешенное значение координаты центра отклика, достаточно умножить этот массив на соответствующие номера строк или столбцов, а затем просуммировать согласно (2) и (3).

Для большинства типов сенсоров достаточно учитывать только 8 ближайших пикселей ($d=1$). Если адрес цели был выбран корректно (самый

Таблица 1

| № снимка | Режим | РС по поперечной дальности, м | | РС по азимуту, м | | Коэффициент роста РС, м/дБ | | Угол падения электромагнитной волны, град. | Некорректированная яркость у ТУО с ЭПР, дБ: |
|----------|-------|-------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|--|---|
| | | Заявленная | Фактическая средняя | Заявленная | Фактическая средняя | По поперечной дальности | По азимуту | | |
| 1 | ST | 1,303 | 1,309 | 0,23 | 0,248 | $3,047 \cdot 10^{-3}$ | $8,702 \cdot 10^{-4}$ | 26,79 | 49,8; 39,8 |
| 2 | ST | 0,764 | 0,711 | 0,23 | 0,257 | $4,323 \cdot 10^{-4}$ | $-2,597 \cdot 10^{-4}$ | 50,39 | 33,8; 39,8 |
| 3 | ST | 0,696 | 0,738 | 0,23 | 0,223 | $1,07 \cdot 10^{-4}$ | $5,132 \cdot 10^{-5}$ | 57,77 | 39,8 |
| 4 | HS | 1,338 | 1,407 | 1,1 | 1,135 | $2,318 \cdot 10^{-3}$ | $6,373 \cdot 10^{-4}$ | 26,08 | 39,8 |
| 5 | HS | 0,768 | 0,819 | 1,1 | 1,122 | $2,19 \cdot 10^{-3}$ | $5,878 \cdot 10^{-4}$ | 49,98 | — |

яркий пиксель), то поправка не превысит 0,75 пикселя по обоим измерениям. Разработанный подход также допускает учёт большего числа пикселей в тех случаях, когда случайный всплеск яркости “стягивает” поправку от тусклой цели в свою сторону. В таких случаях возможно увеличить область коррекции так, чтобы поправки, вносимые шумами, взаимно компенсировались ($d=2...5$).

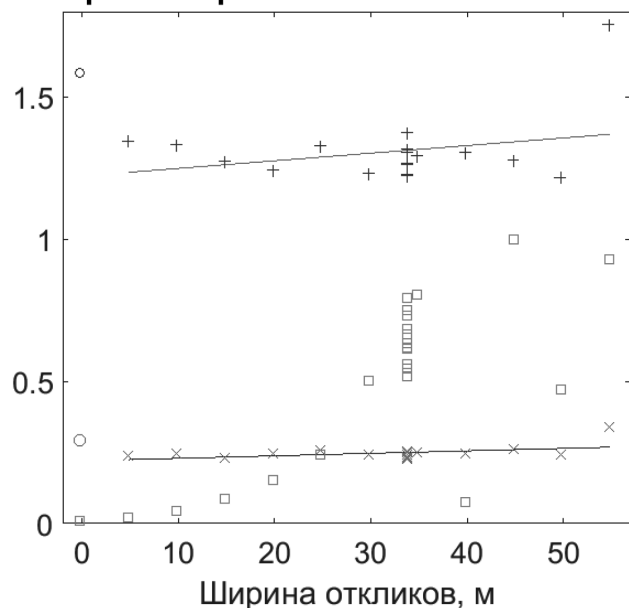
Разрешающая способность

Рассмотрим подробно классический подход к послестартовой калибровке по РЛИ, его специфику и недостатки. Для исследований были взяты пять изображений РСА TerraSar-X местности с расположенными на ней трёхгранными уголковыми отражателями (ТУО), которые являются рабочими эталонами с ЭПР, известной априори. По результатам откликов на снимках были построены зави-

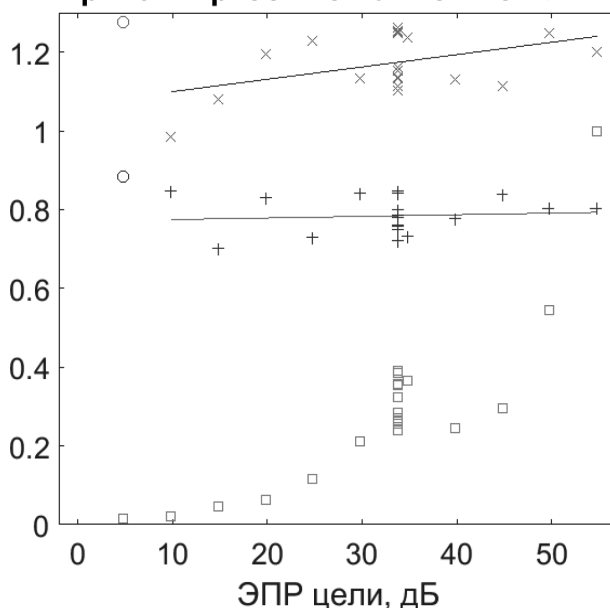
симости разрешающих способностей от ЭПР отражателя. Примеры этих зависимостей приведены на рис. 1. Каждое радиолокационное изображение укомплектовано соответствующим.xml-файлом с метаданными (сопроводительными параметрами). Все необходимые для анализа данные, включая заявленные и фактические, приведены в табл. 1. Отметим, что изображения были использованы без коррекции наклона снимаемой поверхности, однако это удалось скомпенсировать за счёт определения размеров пикселя по фактическим расстояниям между отражателями. Так что далее будем рассматривать разрешающую способность (РС) по поперечной дальности и по азимуту (вдоль следа трассы).

Полученные зависимости строились по отражателям, квадрат уровня сигнала которых превосходит квадрат среднего уровня яркости подстилающей поверхности не менее чем в 50 раз, как установлено в [3, с. 514]. На рис. 1 уровни яркости для каждого

Ширина и яркость откликов по РЛИ №1



Ширина и яркость откликов по РЛИ №5



— Линия регрессии ширины отклика по наклонной дальности ○ Пропущенные отсчеты
 + Отсчеты ширины отклика по наклонной дальности — Линия регрессии ширины отклика по азимуту
 × Отсчеты ширины отклика по азимуту □ Яркость откликов в долях от максимальной яркости РЛИ

Рис. 1. Зависимости ширины отклика на точечную цель по двум измерениям и яркости откликов на РЛИ от ЭПР соответствующих отражателей, полученные классическим способом

доступного на снимке рабочего эталона для удобства приведены в долях от максимальной яркости снимка. Кроме слишком “слабых” откликов также были исключены отражатели с некорректным уровнем яркости (отмечено в табл. 1). Отметки разрешающих способностей всех исключённых из исследования отражателей помечены на графиках рис. 1 знаком “о”.

Из рис. 1 видно, что имеется зависимость (положительная корреляция) ЭПР и ширины отклика на точечную цель. Это легко объяснить тем, что с ростом ЭПР отражателя увеличивается и площадь его эквивалентной апертуры. Согласно [5], эквивалентная апертура в максимуме диаграммы обратного рассеяния имеет форму равностороннего шестиугольника со стороной в одну треть от гипотенузы грани. Путём несложных преобразований легко доказать, что ширина эквивалентной апертуры по противоположащим углам равна

$$W_{\text{EqA}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot l}{3},$$

где l — длина грани (катета) уголкового отражателя.

Так, наименьший из рабочих отражатель с ЭПР = 4,82 дБ имеет ширину эквивалентной апертуры 0,153 м, в то время как наибольший из имеющихся отражатель с ЭПР = 54,82 дБ с длиной ребра 2,88 м имеет ширину эквивалентной апертуры соответственно 2,72 м. При размерах пикселя менее метра, этот фактор и оказывает решающее влияние на неоднозначность ширины отклика на точечную цель. Для более подробного изучения этого явления по каждому снимку была произведена линейная регрессия рабочих откликов с вычислением коэффициентов роста (тангенсов углов наклона) прямой, которые приведены в соответствующей графе табл. 1. Из приведенных данных видно, что коэффициенты положительны в девяти случаях из десяти.

Поскольку в литературе, посвященной внешней калибровке РСА, рекомендации в отношении выбора условно точечной цели, как правило, сводятся к требуемому отношению сигнал/шум, очевидно, что необходимо установить конкретный размер эквивалентной апертуры либо (что представляется более востребованным) дополнить метод таким образом, чтобы разрешающая способность не зависела от ширины эквивалентной апертуры используемого отражателя.

В рамках решения этой задачи рассмотрим предложенные модификации классического метода определения разрешающей способности. Введём несколько понятий для удобства рассмотрения концепции. Будем считать, что существует гипотетическое исходное изображение (**SrsImg**), ему соответствует размытое изображение, которое получено непосредственно с КА

(**ResImg**). Эти изображения связаны через двумерную свёртку $\text{ResImg} = (\text{SrsImg} * \mathbf{K})(x, y)$. Когда известны оба изображения, можно найти ядро “условного размытия” \mathbf{K} . Это ядро эквивалентно отклику на точечную цель или, по крайней мере, на цель, размер которой меньше пикселя, расположенную в его центре. Очевидно, что получить отклик на такую точечную цель в натуральных условиях весьма проблематично даже с использованием дорогостоящих транспондеров, так как не известно заранее, где на земле окажутся проекции границ пикселей. Ширину отклика, измеренную по ядру свёртки, назовём истинной разрешающей способностью. Несомненное достоинство такого подхода состоит в том, что ядро будет иметь практически одинаковую ширину по уровню 0,707 максимальной амплитуды сигнала как в случае, когда отражатель находится в центре пикселя РЛИ, так и в случае его попадания на границу. Кроме того, ширина ядра практически не изменяется по мере увеличения размера эквивалентной апертуры отражателя.

Рассмотрим способ получения исходного изображения **SrsImg**. Зная положение центра эквивалентной апертуры, её геометрические размеры и размеры пикселя РЛИ, несложно построить эту апертуру поверх раstra, с тем, чтобы вычислить для каждого пикселя его долю, заполненную апертурой.

Для этого прежде всего определим углы эквивалентной апертуры ТУО (шестиугольника). Поскольку для большинства ТУО размеры апертуры разные, удобно сначала найти координаты углов шестиугольника с единичной стороной и центром в начале координат. Здесь и далее рассматривается случай, когда разрешение по наклонной дальности вычисляется из центрального столбца изображения отклика, иначе говоря, принимаем, что КА летит вдоль оси X относительно формируемого изображения. Поскольку гипотенуза нижней грани ТУО всегда параллельна земле, нижняя грань соответствующей шестиугольной апертуры должна быть параллельна оси X изображения. Исходя из этого, несложно получить координаты углов относительно центра:

$$X_{\text{H}} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ 0 \\ -\sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 \\ 0 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}; \quad Y_{\text{H}} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 1 \\ 1/2 \\ -1/2 \\ -1 \\ -1/2 \end{bmatrix}.$$

Далее все координаты необходимо домножить на размер стороны шестиугольника (в метрах), который может быть вычислен из ЭПР отражателя так:

$$L_H = \frac{\sqrt{2}}{3 \sin \gamma_i} \cdot \sqrt[4]{\frac{3\lambda^2 \sigma}{4\pi}},$$

где λ — длина волны зондирующего сигнала в метрах; γ — угол падения электромагнитной волны от горизонта; σ — ЭПР отражателя в квадратных метрах. Для расчёта ЭПР в децибелах, последнюю несложно выразить из (1).

Далее учтём смещение апертуры из центра координат в центр изображения отклика, а также пропорции пикселей:

$$X_i = \frac{X_{\text{ш}} \cdot L_H}{\text{Pix}W} + X_{\text{ср}};$$

$$Y_i = \frac{Y_{\text{ш}} \cdot L_H}{\text{Pix}H} + Y_{\text{ср}},$$

где X_i, Y_i — координаты углов апертуры в растре (в пикселях); $X_{\text{ср}}, Y_{\text{ср}}$ — координаты центра отклика в данном фрагменте изображения; $\text{Pix}W$ — ширина пикселя (вдоль X) в метрах, $\text{Pix}H$ — высота пикселя (вдоль Y) в метрах.

По полученным точкам можно построить шестиугольник, соответствующий эквивалентной апертуре ТУО в растре РЛИ. Полученная фигура в растре позволяет вычислить долю пикселя, занятую апертурой, для каждого пикселя исходного изображения. Полученное изображение подлежит дальнейшему нормированию:

$$\text{SrsImg}_{i,j} = K_{\text{si},j} \cdot \frac{\sum_i \sum_j \text{ResImg}_{i,j} - \text{Noise}}{\sum_i \sum_j K_{\text{si},j}},$$

где K_s — растр изображения эквивалентной апертуры (яркость от 0 до 1); Noise — средний уровень яркости подстилающей поверхности.

Таким способом обеспечивается неизменность количества энергии отклика исходного изображения по отношению к размытому. Примеры сформированных исходных изображений показаны на рис. 2а, г.

Рассмотрим второй этап — поиск ядра свёртки, который сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), описанных квадратной матрицей $n \times n$, где n — количество элементов в ядре. Сформулировать математическое выражение для формирования такой СЛАУ не представляется возможным, поэтому для понимания алгоритма её построения рассмотрим процесс свёртки как таковой. Ядро двумерной свёртки — это, как правило, прямоугольный массив коэффициентов с максимальным значением в центральном элементе. Положим для нашего случая размер ядра, равный размерам **SrsImg** и **ResImg**. Для вычисления значения некоторого пикселя размытого изображения используют фрагмент исходного изображения

размером с ядро размытия (свёртки). Ядро, как правило, имеет нечётное количество строк значений, как и нечётное количество столбцов. Поэтому, если в текущей итерации ищется значение размытого изображения в пикселе с адресом i, j , то необходимо выбрать фрагмент исходного изображения с центром в пикселе с тем же адресом. На практике чаще всего сумма коэффициентов, записанных в ядре, равна единице (нормированное ядро). Поэтому, когда коэффициенты ядра поэлементно перемножаются каждый с соответствующим пикселем исходного изображения, то фактически определяются взвешенные уровни сигнала, которые будут перенесены из каждого соседнего пикселя (из области, покрытой ядром) в текущий пиксель с адресом i, j результирующего изображения. Таким образом, просуммировав все эти значения, получим яркость результирующего изображения в пикселе с адресом i, j . При этом считается, что за пределами фрагмента изображения с откликом расположены только пиксели с нулевой яркостью.

Соответственно при формировании СЛАУ для поиска ядра полагаем, что вектор неизвестных — это элементы ядра, преобразованные в вектор-столбец, свободный член — это **ResImg**, аналогично преобразованный в вектор-столбец, а матрица коэффициентов **M** формируется построчно для каждого значения **ResImg**. Это происходит путём постолбцового копирования значений из **SrsImg** в пределах положения ядра, соответствующего данному пикселю **ResImg**, то есть свободному члену для текущей строки матрицы **M**. Когда матрица коэффициентов сформирована, можно записать выражение для поиска ядра в виде

$$\text{Core} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \text{SrsImg},$$

где **Core** — разыменованное (преобразованное в вектор-столбец) ядро; **M** — матрица коэффициентов.

Полученное ядро после постолбцового копирования в растр можно оценить по его ширине аналогично оценке ширины отклика на точечную цель, с тем отличием, что средняя яркость фона равна нулю. Примеры полученных ядер свёртки показаны на рис. 2б, д, а соответствующие им размытые изображения, полученные с КА, — на рис. 2в, е.

Единственным существенным недостатком такого подхода является критичность к алгоритмам автофокусировки РЛИ. Как видно на рис. 2е, эквивалентная апертура отражателя больше соответствующего ей отклика, что приводит к плохой обусловленности матрицы **M** и, как следствие, высокой невязке решения. Величина невязки также зависит от отношения сигнал/шум и от размера фрагмента изображения с откликом. Поэтому в наиболее детальных режимах (например, Staring SpotLight), когда размеры пикселя меньше метра, этот метод работает только в случае небольших целей, так как отклики с высо-

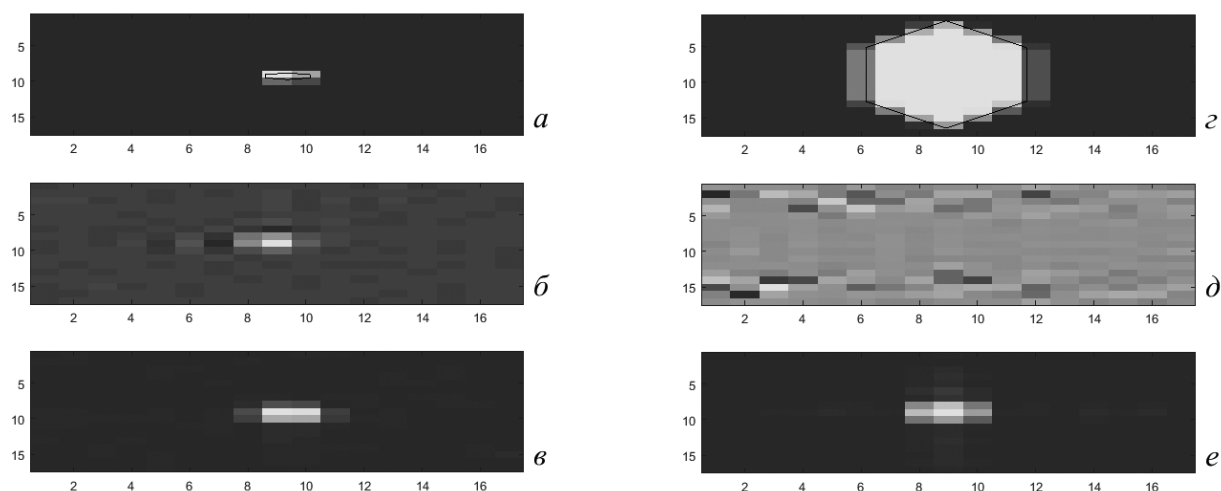


Рис. 2. Поиск ядер свёртки на примере двух целей: а, б, в — хорошо обусловленная цель; г, д, е — плохо обусловленная цель; а, г — исходное изображение и соответствующая ей эквивалентная апертура; б, д — найденное ядро размытия; в, е — размытое изображение, полученное с КА

кой невязкой отбрасываются. В менее детальных режимах (например, High Resolution Spotlight), когда размеры пикселя порядка метра, метод позволяет работать с большими целями, уровень отраженного сигнала которых достигает 40 дБ. Все полученные результаты сведены в табл. 2. Для сравнения с классическим подходом, зависимости ширины отклика от ЭПР отражателя приведены на рис. 3.

Из табл. 2 видно, что ширина отклика по поперечной дальности ниже, чем вычисленная при помощи классического метода, а ширина отклика по азимуту, как правило, существенно ниже заявленной. Очевидно, это связано с тем, что при лётных испытаниях КА были использованы средства с конкретным размером апертуры. Вероятное попадание отклика на границу пикселей является причиной систематической погрешности при многократных измерениях. Этот эффект более ярко выражен при определении ширины отклика по поперечной дальности, так как ей, как правило, соответствует меньшая сторона пикселя.

Кроме того, наблюдается обратная корреляция ширины отклика с ЭПР цели, особенно в случаях с низкой ЭПР. Это, по-видимому, объясняется высоким относительным уровнем шумов подстилающей поверхности, в частности, для случаев, когда вся энергия помещается в одном пикселе исходного изображения. В таких случаях найденная форма ядра в точности повторяет форму размытого изображения с точностью до зеркального отображения. Очевидно это и послужило второй причиной завышения значений ширины отклика для целей с низкой ЭПР, так как ширина отклика, найденная по размытому изображению, как правило, выше.

В целях сравнения с классическим методом был произведен подсчет стандартной неопределенности типа А (U_a) для каждого сечения каждого снимка. Все результаты сведены в табл. 3. Из нее видно, что предложенный способ может давать более высокую неопределённость за счёт отбраковки плохо обусловленных отражателей и соответственно уменьшения количества из-

Таблица 2

| № снимка | Режим | РС по поперечной дальности, м | | РС по азимуту, м | | Коэффициент роста РС, м/дБ | | Угол падения электромагнитной волны, град. | Исключены ТУО с ЭПР, дБ: |
|----------|-------|-------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|--|--------------------------|
| | | заявленная | фактическая средняя | заявленная | фактическая средняя | по поперечной дальности | по азимуту | | |
| 1 | ST | 1,303 | 1,251 | 0,23 | 0,192 | $-2,102 \cdot 10^{-3}$ | $-9,013 \cdot 10^{-4}$ | 26,79 | Все, кроме 24,8–9,8 |
| 2 | ST | 0,764 | 0,673 | 0,23 | 0,218 | $-3,364 \cdot 10^{-3}$ | $-4,838 \cdot 10^{-3}$ | 50,39 | Все, кроме 24,8–9,8 |
| 3 | ST | 0,696 | 0,704 | 0,23 | 0,190 | $4,618 \cdot 10^{-4}$ | $-4,242 \cdot 10^{-3}$ | 57,77 | Все, кроме 24,8–14,8 |
| 4 | HS | 1,338 | 1,166 | 1,1 | 1,030 | $-6,532 \cdot 10^{-3}$ | $-4,81 \cdot 10^{-3}$ | 26,08 | 54,8–49,8; 39,8 |
| 5 | HS | 0,768 | 0,674 | 1,1 | 1,014 | $-3,293 \cdot 10^{-3}$ | $-4,127 \cdot 10^{-3}$ | 49,98 | 54,8–44,8 |

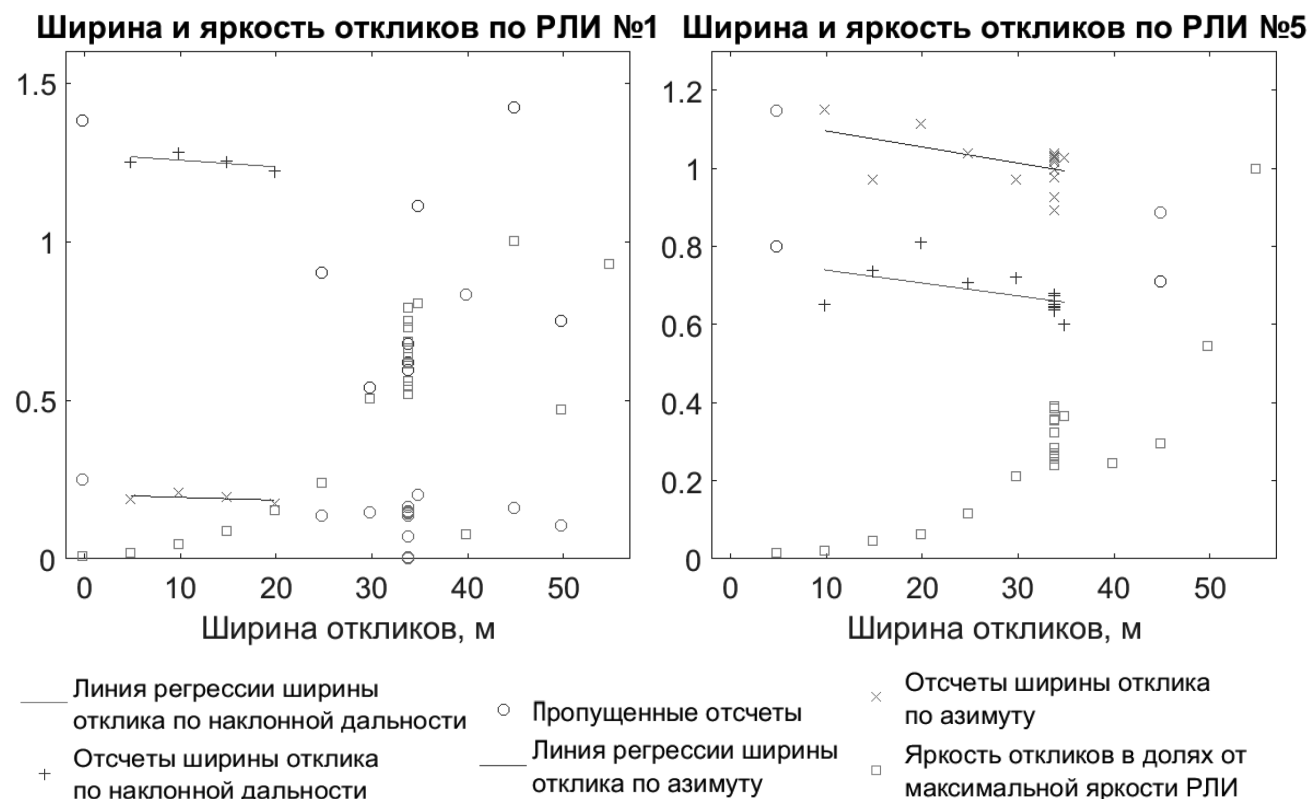


Рис. 3. Зависимости ширины отклика на точечную цель по двум измерениям и яркости откликов на РЛИ от ЭПР соответствующих отражателей, полученные альтернативным способом

Таблица 3

| № снимка | U_a классического метода, м | | Количество целей | U_a для альтернативного метода, м | | Количество целей | U_a классич. метода по целям альтернативного, м | | Шир. отклика на точ. цель классич. метода по целям альт., м | | Размер пикселя, м | |
|----------|-------------------------------|--------|------------------|-------------------------------------|--------|------------------|---|--------|---|--------|-------------------|--------|
| | попер. дальность | азимут | | попер. дальность | азимут | | попер. дальность | азимут | попер. дальность | азимут | высота | ширина |
| 1 | 0,026 | 0,005 | 20 | 0,012 | 0,007 | 4 | 0,024 | 0,004 | 1,298 | 0,242 | 0,181 | 0,946 |
| 2 | 0,008 | 0,004 | 20 | 0,017 | 0,019 | 5 | 0,021 | 0,004 | 0,691 | 0,27 | 0,186 | 0,521 |
| 3 | 0,008 | 0,003 | 20 | 0,003 | 0,015 | 4 | 0,017 | 0,006 | 0,746 | 0,22 | 0,164 | 0,548 |
| 4 | 0,017 | 0,017 | 20 | 0,015 | 0,016 | 17 | 0,019 | 0,018 | 1,404 | 1,133 | 0,875 | 1,040 |
| 5 | 0,011 | 0,014 | 21 | 0,012 | 0,015 | 17 | 0,013 | 0,017 | 0,819 | 1,115 | 0,863 | 0,604 |

мерений. По этой же причине результаты альтернативного метода по первым трем снимкам можно считать не показательными, так как в них используются не более пяти отражателей с разной ЭПР. В то же время предложенный способ, в сравнении с классическим, показывает меньшие значения неопределенности для одинаковой выборки целей (пригодной для модифицированного метода), в особенности на четвертом и пятом снимках.

Выводы

Предложен новый способ оценки разрешающей способности космического радиолокацион-

ного изображения, а также проведено сравнение с наиболее распространенным из существующих способом. Преимущество представленного способа заключается в свободе выбора размера эталонного отражателя и в более высокой точности. Единственное ограничение для наиболее детальных режимов работы РСА заключается в необходимости доступа к параметрам алгоритма автофокусировки. Кроме того, представленный способ при измерении разрешающей способности позволяет совершить переход от одного или нескольких дорогостоящих транспондеров к большой выборке трёхгранных уголковых отражателей. Это, в свою очередь, позволяет не только увеличивать точность измерений путём усреднения, но и про-

изводить измерения для разных участков снимка и при различных сопутствующих условиях.

Список литературы

1. Портал Комитета по спутникам космического землеобзора. URL: <http://calvalportal.ceos.org/> (дата обращения: 27.09.2017).
2. Список организаций-членов комитета CEOS. URL: <http://ceos.org/about-ceos/agencies/> (дата обращения: 27.09.2017).
3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования: монография. Москва: Радиотехника, 2010. 680 с.
4. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: учеб. для вузов. Изд. 2-е. Москва: Радио и связь, 1983. 536 с.
5. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели: монография. Москва: Сов. радио, 1975. 248 с.
6. Энциклопедия физики и техники: разрешающая способность. URL: http://femto.com.ua/articles/part_2/3288.html (дата обращения: 27.09.2017).

Статья рекомендована к публикации доктором физико-математических наук, профессором Н.Г. Кодицем