

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.2>

УДК: 621.396.96

РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е.А. Костюк¹, А.И. Захаров²

¹ НЦОМЗ АО «Российские космические системы»
127490, Россия, Москва, ул. Декабристов, 51/25

² ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
141190, Россия, Московская обл, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются общие методические подходы к радиометрической калибровке радиолокационных изображений, полученных с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой антенны, с использованием точечных и поверхностно – распределенных эталонных тест – объектов с известными отражательными характеристиками (эффективная поверхность рассеивания или удельная эффективная поверхность рассеивания). Дается понятие радиометрической калибровки радиолокационных изображений. На основании математического представления анализируются особенности формирования радиолокационных изображений точечных и поверхностно – распределенных объектов. Анализируется влияние функции точечного отклика сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой на процедуру калибровки. С учетом указанных особенностей рассматривается возможность оценки эффективной поверхности рассеивания сосредоточенных объектов или удельной эффективной поверхности рассеивания поверхностно – распределенных тест – объектов. Даются методические рекомендации по проведению

радиометрической калибровки радиолокационных изображений с помощью различных эталонных объектов с известными отражательными свойствами.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, радиометрическая калибровка, эффективная поверхность рассеивания.

Финансирование: работа выполнена частично в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Захаров Александр Иванович, aizakhar@fireras.su.

Введение

В общем случае радиометрическая калибровка сквозного тракта системы радиолокационного наблюдения заключается в установлении зависимости между выходными данными радиолокационной системы, измеряемыми в относительных единицах мощности отсчетов радиолокационного изображения (РЛИ) и входными (измеряемыми) величинами, измеряемыми в единицах эффективной поверхности рассеивания (ЭПР), обозначаемой $P(\sigma)$.

Термин «ЭПР цели» означает количественную меру отношения мощности сигнала, отраженного в направлении приемника радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), к плотности мощности излученных СВЧ-электромагнитных волн, падающих на цель (размерность м^2). Величина ЭПР зависит от длины волны, поляризационных характеристик антенны, а также от размеров и свойств цели. Термин «удельная эффективная площадь рассеяния» (УЭПР) означает ЭПР, приходящуюся на единицу площади (размерность $\text{м}^2/\text{м}^2$). УЭПР является усредненной характеристикой отражающих свойств однородных поверхностно-распределенных объектов. Амплитудная калибровка называется абсолютной, если учитывает с достаточной точностью все параметры радиолокационной системы, а также тракта распространения радиосигнала. При такой калибровке обеспечивается полное извлечение информации об эффективной поверхности рассеивания наблюдаемого объекта и возможность ее сопоставления с данными других РСА.

1. Варианты радиометрической калибровки

Теоретическое решение задачи радиометрической калибровки сквозного тракта РСА требует рассмотрения вопросов математического представления радиолокационных изображений отражающих поверхностей и описания их свойств, а также закономерностей формирования пространственно-временных сигналов, соответствующих данным поверхностям. При этом одним из широко распространенных подходов является представление их в виде совокупности точечных нефлюктуирующих отражателей, находящихся на большом удалении от РСА и разнесенных друг от друга по направлениям наклонной дальности и азимуту на величину межпиксельных расстояний. Размеры указанных отражателей принимаются значительно меньшими элемента разрешения РСА. В качестве характеристики отражательной способности точечных отражателей используется понятие ЭПР [1-3].

Если сосредоточенный объект состоит из достаточно большого числа рассеивателей, каждый из которых вносит незначительный вклад в общую мощность отраженного от указанного объекта сигнала, то амплитуды отраженного сигнала распределяются по рэлеевскому закону, фазы – по равномерному закону в пределах от $-\pi$ до $+\pi$, а мощность – по экспоненциальному закону [4-8].

Таким образом, с учетом дискретности радиолокационного изображения, функцию $\sigma(x, y)$, описывающую ЭПР пространственно-распределенного объекта размером $N\Delta x \times M\Delta y$, можно представить в виде совокупности точечных отражателей, расположенных в центрах отсчетов РЛИ:

$$\sigma(x, y) = \sigma(n\Delta x, m\Delta y) = \sigma^0(n\Delta x, m\Delta y)\Delta x\Delta y, \quad (1)$$

где $n = 0, 1, \dots, N$, $m = 0, 1, \dots, M$ – номера отсчетов РЛИ, расположенных соответственно по наклонной дальности и азимуту;

x, y – координаты, соответствующие наклонной дальности и азимуту;

N, M – количество отсчетов РЛИ по направлениям наклонной и азимутальной дальности соответственно;

$\Delta x, \Delta y$ – расстояния между отсчетами РЛИ соответственно по наклонной дальности и азимуту;

$\sigma(n\Delta x, m\Delta y)$, $\sigma^0(n\Delta x, m\Delta y)$ – величины ЭПР и УЭПР в соответствующих отсчетах РЛИ.

Для простоты рассуждений на данном этапе рассмотрения размеры исследуемой области земной поверхности ограничим зоной, в пределах которой изменения наклонной дальности и диаграммы направленности антенны радиолокатора на РЛИ не проявляются.

Тогда распределение мощности по полю РЛИ при условии линейности передаточной характеристики РСА с точностью до постоянного коэффициента K описывается выражением дискретной двумерной свертки [9]:

$$P(x, y) = K \sum_{-N/2}^{N/2} \sum_{-M/2}^{M/2} \sigma^0(n\Delta x, m\Delta y) \Phi(x - n\Delta x, y - m\Delta y) \Delta x \Delta y + P_u + P_\phi, \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий все преобразования мощности сигнала, происходящие в сквозном тракте РСА;

$\Phi(x, y)$ – функция точечного отклика радиолокатора;

P_u, P_ϕ – мощности шума и фона в отсчете РЛИ, соответственно.

С учетом выражений (1) и (2) распределение мощности в РЛИ одиночного точечного отражателя, расположенного в точке с координатами $(n_1\Delta x, m_1\Delta y)$ и имеющего ЭПР, равную σ_T , будет описываться выражением

$$P_T(x, y) = K\sigma_T\Phi(x - n_1\Delta x, y - m_1\Delta y) + P_u + P_\phi, \quad (3)$$

где $\sigma_T = \sigma_T^0 \delta_a \delta_r$;

δ_a и δ_r – величины пространственного разрешения сигнала по направлениям азимута и наклонной дальности, соответственно.

При условии обеспечения оптимальности сжатия траекторного сигнала максимум яркости РЛИ точечного отражателя будет иметь координаты $(n_1\Delta x, m_1\Delta y)$ и определяться выражением:

$$\max(P_T) = P_T(n_1\Delta x, m_1\Delta y) + P_u + P_\phi = K\sigma_T\Phi(0, 0) + P_u + P_\phi = \sigma_T \text{Clb}_T + P_u + P_\phi, \quad (4)$$

где $\text{Clb}_T = K\sigma_T\Phi(0,0)$ – калибровочный коэффициент, который при наличии эталонного точечного отражателя с известной отражательной способностью $\sigma_{TЭ}$ (м^2) может быть определен по максимальному значению мощности его РЛИ как

$$\text{Clb}_T = \frac{\max(P_{TЭ}) - P_{ш} - P_{\phi}}{\sigma_{TЭ}}. \quad (5)$$

При работе с реальными изображениями практически всегда центр точечного отражателя не попадает в центр пиксела, что обуславливает необходимость интерполяции его изображения с целью определения максимального значения мощности отклика. Справедливость выражения (5) при этом сохраняется.

С учетом случайного характера величина $P_{ш} + P_{\phi}$ должна оцениваться путем усреднения измерений по некоторой окружающей окрестности точечного отражателя, обозначим ее в дальнейшем $P_{\phi+ш}$.

Из выражений (3) – (5) следует, что после определения численной величины калибровочного коэффициента Clb_T по РЛИ эталонного точечного отражателя он может использоваться для оценки ЭПР других точечных отражателей в соответствии с выражением:

$$\sigma_T = \frac{\max(P_{TЭ}) - P_{ш+\phi}}{\text{Clb}_T} \cdot \frac{G_T^2}{G_{TЭ}^2} \cdot \frac{R_T^3}{R_{TЭ}^3}, \quad (6)$$

где коэффициенты $\frac{G_T^2}{G_{TЭ}^2}$ и $\frac{R_T^3}{R_{TЭ}^3}$ учитывают влияние диаграммы направленности антенны РСА и величины наклонной дальности, соответственно, в местах расположения измеряемого и эталонного точечных отражателей.

Рассмотрим вопросы определения отражательных характеристик однородных фоновых поверхностей по их РЛИ.

С учетом выражения (2) распределение мощности по полю РЛИ однородной фоновой поверхности будет иметь вид:

$$P_{\phi}(x, y) = \sigma_{\phi}^0 \sum_{-N/2}^{N/2} \sum_{-M/2}^{M/2} \Phi(x - n\Delta x, y - m\Delta y) \Delta x \Delta y + P_{ш} = \sigma_{\phi}^0 \text{Clb}_{\phi} \Delta x \Delta y + P_{ш}, \quad (7)$$

где σ_ϕ^0 – УЭПР одного отсчета РЛИ фоновой поверхности;

Clb_ϕ – фоновый калибровочный коэффициент:

$$\text{Clb}_\phi = K \sum_{-N/2}^{N/2} \sum_{-M/2}^{M/2} \Phi(x - n\Delta x, y - m\Delta y) = \frac{E\{P_\phi - P_u\}}{\sigma_\phi^0 \Delta x \Delta y}, \quad (8)$$

$E\{\dots\}$ – оператор усреднения по фрагменту РЛИ, в пределах которого проводятся измерения.

С учетом наличия спекл-шумов, измерения по РЛИ мощности фона и мощности шумов должны осуществляться по некоторой области РЛИ с последующим усреднением по данной области.

Из выражений (7) и (8) следует, что после определения численной величины фонового калибровочного коэффициента Clb_ϕ по РЛИ эталонной однородной поверхности он может использоваться для оценки УЭПР σ^0 других однородных поверхностей в соответствии с выражением:

$$\sigma^0 = \frac{E\{P_\phi - P_u\}}{\text{Clb}_\phi \Delta x \Delta y} \cdot \frac{G_H^2}{G_3^2} \cdot \frac{R_H^3}{R_3^3}, \quad (9)$$

где коэффициенты $\frac{G_H^2}{G_3^2}$ и $\frac{R_H^3}{R_3^3}$ учитывают влияние диаграммы направленности антенны РСА и наклонной дальности, соответственно, в местах расположения измеряемого и эталонного участка земной поверхности.

Мощность шумов P_u необходимо измерять по участкам РЛИ, строго говоря, не содержащим отраженного сигнала (радиолокационные тени или тестовые области РЛИ, сгенерированные без излучения зондирующего сигнала РСА). При отсутствии такой возможности измерения допускается проводить по слабо отражающим участкам РЛИ (спокойная водная поверхность, песок, бетон, асфальт).

Необходимо отметить такую важную особенность, упомянутую выше, что, в соответствии с выражением (7), мощность каждого отсчета РЛИ однородной поверхности формируется как сумма отражений от отсчетов функции ЭПР

земной поверхности, удаленных от данного отсчета на расстояние, не превышающее размеры главного лепестка функции точечного отклика, и взвешенных в соответствии с ее значением для каждого отсчета. Указанная сумма может рассматриваться как интегральная мощность, рассеиваемая точечным отражателем. В соответствии с указанными выражениями фоновый калибровочный коэффициент формируется аналогичным образом путем суммирования мощности, рассеиваемой точечным отражателем. При этом, как известно, функция точечного отклика может быть получена по РЛИ точечного отражателя. Из этого следует важный вывод, что калибровка РЛИ однородной поверхности может осуществляться с использованием не только эталонных однородных поверхностей, но и эталонных точечных отражателей с использованием общего фонового (интегрального) калибровочного коэффициента.

Соответственно, интегральный (он же фоновый) калибровочный коэффициент, полученный путем оценки всей мощности, рассеянной эталонным точечным отражателем с ЭПР σ_{Σ} по фрагменту РЛИ размером $N_1 \times M_1$ имеет вид:

$$\text{Clb}_{IT} = \text{Clb}_{\phi} = \left(\sum_{-N_1/2}^{N_1/2} \sum_{-M_1/2}^{M_1/2} P_{T\Sigma}(n\Delta x, m\Delta y) - P_{\phi+u} \right) / \sigma_{\Sigma}, \quad (10)$$

где $P_{T\Sigma}(x, y)$ – мощность отсчетов в фрагменте РЛИ размером $N_1 \times M_1$, соответствующем площади главного лепестка функции точечного отклика эталонного точечного отражателя на уровне половины максимального значения отклика РСА.

При этом, как следует из выражения (10), интегральный калибровочный коэффициент может также использоваться для оценки ЭПР точечных отражателей σ_T в соответствии с выражением:

$$\sigma_T = \text{Clb}_{\phi} = \left(\sum_{-N_1/2}^{N_1/2} \sum_{-M_1/2}^{M_1/2} P_{T\Sigma}(n\Delta x, m\Delta y) - P_{\phi+u} \right) \cdot \frac{G_H^2}{G_{\Sigma}^2} \cdot \frac{R_H^3}{R_{\Sigma}^3} / \text{Clb}_{IT}. \quad (11)$$

Рассмотрим еще один методический подход к определению УЭПР равномерной фоновой поверхности, но теперь уже с использованием измеренной (или определенной в результате интерполяции) максимальной (пиковой) величины мощности эталонного точечного отражателя $\max(P_{TЭ})$.

Интегральную мощность эталонного точечного отражателя в выражении (10) можно представить так:

$$\sum_{-N_1/2}^{N_1/2} \sum_{-M_1/2}^{M_1/2} P_{TЭ}(n\Delta x, m\Delta y) = \max(P_{TЭ}) \frac{\delta_a \delta_r}{\Delta x \Delta y}. \quad (12)$$

Здесь δ_a, δ_r – величины пространственного разрешения по направлениям азимута и наклонной дальности, соответственно, определяемые по уровню половины максимального значения отклика РСА на точечную цель по мощности.

С учетом (12) выражение (10) можно представить как

$$Clb_{ИТ} = Clb_{\phi} = \left(\max(P_{TЭ}) \frac{\delta_a \delta_r}{\Delta x \Delta y} - P_{\phi+ш} \right) / \sigma_{\varepsilon}. \quad (13)$$

Все вышеизложенные рассуждения и выводы осуществлялись при условии линейности зависимости $P(\sigma)$ между выходными данными радиолокационной системы и измеряемыми входными величинами. Их справедливость продолжает оставаться в силе также и в случае представления указанной зависимости в виде степенного полинома вида:

$$P(\sigma) = \sum_{n=0}^N a_n \sigma^n, \quad (14)$$

где для определения коэффициентов a_n используется набор эталонных точечных отражателей или эталонных поверхностно-распределенных участков.

Заключение

Рассмотренные общие методические вопросы радиометрической калибровки с привлечением точечных и поверхностно-распределенных эталонных тест-объектов с известными отражательными характеристиками

показывают возможность получения радиолокационных изображений с достоверными радиофизическими характеристиками отражающих объектов.

Финансирование: Работа выполнена частично в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов. – Советское радио, 1980.
2. Кондратенков Г.С. Радиолокационные станции обзора Земли. – Радио и связь, 1983.
3. Реутов А.П. и др. Радиолокационные станции бокового обзора // М.: Сов. радио. – 1970. – Т. 360.
4. Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – №. 1. – С. 70-81.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – 1982.
6. Lindgust T. Stateby G. Ground clutter model for radar applications // Int. Conf. on radar present and future. London. – 1973. – P. 233-238.
7. Орлов Р.А., Торгашин Б.Д. Моделирование радиолокационных отражений от земной поверхности // А.А. Капустина. –Л.: Изд-во ЛГУ. – 1978.
8. Юсупов Р.М. и др. Статистические методы обработки результатов наблюдений. – 1984.
9. Школьный Л.А. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений // М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского. – 2008.

Для цитирования:

Костюк Е.А., Захаров А.И. Радиометрическая калибровка радиолокационных изображений // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.2>