

Радиометрическая калибровка радиолокационных изображений

Е. А. Костюк¹, А. И. Захаров²

¹*НЦОМЗ АО «Российские космические системы»*

²*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

В общем случае радиометрическая калибровка сквозного тракта системы радиолокационного наблюдения заключается в установлении зависимости $P(\sigma)$ 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).

Теоретическое решение задачи радиометрической калибровки сквозного тракта РСА требует рассмотрения вопросов математического представления радиолокационных изображений отражающих поверхностей и объектов и описания их свойств и 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 (Бакут и др., 1980; Кондратенков и др., 1983; Реутов и др., 1970).

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 $-$ до $+$, а мощность — по экспоненциальному закону (Ахметьянов, Пасмуров, 1987; Орлов, Торгашин, 1978; Статистические..., 1984; Тихонов, 1982; Lindgust, Stateby, 1973).

Таким образом, с учетом дискретности радиолокационного изображения, функцию $\sigma(x,y)$, описывающую ЭПР пространственно-распределенного объекта размером $N\Delta x$, $M\Delta y$, 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 направлениям наклонной и азимутальной дальностей;

- координаты x, y соответствуют наклонной и азимутальной дальностям;

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

- $\Delta x, \Delta y$ — расстояния между отсчетами РЛИ соответственно по направлениям наклонной и азимутальной дальности;

- $\sigma(n\Delta x, m\Delta y), \sigma^0(n\Delta x, m\Delta y)$ — 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 (Радиолокационные..., 2008):

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

где: коэффициент K учитывает все преобразования мощности сигнала, происходящие в сквозном тракте РСА;

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

— $P_{\text{ш}}, P_{\text{ф}}$ - соответственно мощности шума и фона в отсчете РЛИ.

1. Рассмотрим вопросы определения отражательных характеристик точечных объектов по их РЛИ

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:

$$P_{y_0}(x, y) = K\sigma_T\Phi(x - n_1\Delta x, y - m_1\Delta y) + P_{\text{ш}} + P_{\text{ф}} \quad (3)$$

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:

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

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

$$\text{Clb}_T = (\text{Max}(P_{TЭ}) - P_{\text{ш}} - P_{\phi}) / \sigma_{TЭ} \quad (5)$$

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

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:

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

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

2. 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:

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

где σ_{ϕ}^0 — УЭПР одного отсчета РЛИ фоновой поверхности;

- Clb_{ϕ} — фоновый калибровочный коэффициент, равный:

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

- $E\{\dots\}$ — оператор усреднения по фрагменту РЛИ, 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 (7,8) 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 так:

$$\sigma^0 = \frac{E\{(P_{\phi} - P_{\text{ш}})\}}{Clb_{\phi} \Delta x \Delta y} \frac{G_{\text{И}}^2}{G_{\text{Э}}^2} \frac{R_{\text{И}}^3}{R_{\text{Э}}^3} \quad (9)$$

где коэффициенты $\frac{G_{\text{И}}^2}{G_{\text{Э}}^2}$, $\frac{R_{\text{И}}^3}{R_{\text{Э}}^3}$ учитывают влияние диаграммы направленности антенны РСА и наклонной дальности соответственно в местах расположения измеряемого и эталонного участка земной поверхности.

Необходимо отметить, 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 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 может быть сформирован 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 $\sigma_э$ по фрагменту РЛИ размером $N1, M1$, имеет вид:

$$Clb_{ит} = Clb_{\phi} = \left(\sum_{-\frac{N1}{2}}^{\frac{N1}{2}} \sum_{-\frac{M1}{2}}^{\frac{M1}{2}} P_{тэ}(n\Delta x, m\Delta y) - P_{\phi+ш} \right) / \sigma_э \quad (10)$$

где $P_{тэ}(x, y)$ — мощность отсчетов в фрагменте РЛИ размером $N1 \times M1$, соответствующем функции точечного отклика эталонного точечного отражателя.

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

$$\sigma_т = Clb_{\phi} = \left(\sum_{-\frac{N1}{2}}^{\frac{N1}{2}} \sum_{-\frac{M1}{2}}^{\frac{M1}{2}} P_{тэ}(n\Delta x, m\Delta y) - P_{\phi+ш} \right) / Clb_{ит} \frac{G_{и}^2}{G_э^2} \frac{R_{и}^3}{R_э^3} \quad (11)$$

3. Калибровка фоновых поверхностей по сигналу точечного отражателя.

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 $\text{Max}(P_{\text{тэ}})$.

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

$$\sum_{-\frac{N1}{2}}^{\frac{N1}{2}} \sum_{-\frac{M1}{2}}^{\frac{M1}{2}} P_{\text{тэ}}(\mathbf{n}\Delta x, \mathbf{m}\Delta y) = \text{Max}(P_{\text{тэ}}) \frac{\delta_a \delta_r}{\Delta x \Delta y} \quad (12)$$

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

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

$$\text{Clb}_{\text{ит}} = \text{Clb}_{\phi} = \left(\text{Max}(P_{\text{тэ}}) \frac{\delta_a \delta_r}{\Delta x \Delta y} - P_{\phi+\text{ш}} \right) / \sigma_{\text{э}} \quad (13)$$

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.

Заключение. Результатом рассмотренных выше вариантов калибровки является 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.

Литература

Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 70–81.

Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов. М.: Сов.радио, 1980. 288 с.

Кондратенков Г.С. и др. Радиолокационные станции обзора земли. М.: Радио и связь, 1983. 271 с.

Орлов Р.А., Торгашин Б.Д. Моделирование радиолокационных отражений от земной поверхности. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 148 с.

Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений/ Под редакцией Л.А. Школьного. Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2008 г. 531 с.

Реутов А.П., Кондратенков Г.С., Бойко Б.М. и др. Радиолокационные станции бокового обзора. М.: Сов. радио, 1970. 360 с.

Статистические методы обработки результатов наблюдений: учебник для ВВУЗов. Под общей редакцией д.т.н. проф. Р.М. Юсупова. МО СССР, 1984. 563 с.

Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

Lindquist T. Stateby G. Ground clutter model for radar applications// Int. Conf. on radar present and future. London, 1973. P. 233-238.