КОМПЕНСАЦИЯ АППАРАТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОГО РСА

А.И.Захаров, М.В.Сорочинский
Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
E-mail: smw@sunclass.ire.rssi.ru

В поляриметрических измерениях, неизбежно присутствуют ошибки, связанные с несовершенством поляриметрического РСА, которые искажают их результат. Одним из методов компенсации таких искажений является корректировка измерений. Корректировка может быть осуществлена путем умножения получаемых результатов на специальную корректирующую матрицу. Элементы такой матрицы определяются путем измерения отражений от эталонных калибровочных целей.

При исследованиях с помощью РСА свойств различных природных объектов существенную дополнительную информацию можно извлечь путем анализа их радиолокационных отражений с различными поляризациями. Поляризационные измерения предъявляют повышенные требования к техническим параметрам соответствующих РСА, которые крайне трудно реализовать чисто аппаратными средствами, вследствие чего возникают неизбежные погрешности, сильно искажающие результаты измерений. Эффективным способом борьбы с такими искажениями является их компенсация при обработке выходных данных, учитывающая фактические параметры радиолокационного комплекса, которые целесообразно измерять, выполняя его калибровку, после того как аппаратурные возможности окажутся исчерпанными [1]. Первые попытки осуществить калибровку поляриметрического РСА были связаны с применением искусственных целей с известными характеристиками, которые можно получить расчетным путем [2,3].

При калибровке без ущерба для общности можно полагать известными векторы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ с координатами (a_h, a_v) и (b_h, b_v), представляющими уровни сигналов на входах излучающих и выходах приемных антенн РСА соответственно с горизонтальными h и вертикальными v поляризациями. Связь между входными $\mathbf{A}$ и выходными $\mathbf{B}$ сигналами можно представить в виде матричного равенства

$$\begin{Vmatrix} b_h \\ b_v \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} s_{hh}^m & s_{hv}^m \\ s_{vh}^m & s_{vv}^m \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} a_h \\ a_v \end{Vmatrix}, \qquad (1)$$

где матрица $\mathbf{S}^m$ с элементами $s_{\xi\eta}^m$ ($\xi, \eta = h$ или v) характеризует возможные пути прохождения сигнала a_ξ на выход b_η с весовыми коэффициентами $s_{\xi\eta}^m$. Так как векторы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ полагаются известными, то, выбирая надлежащим образом режим работы РСА, нетрудно определить и элементы матрицы $\mathbf{S}^m$. Далее будем полагать, что $a_h = a_v = 1$. В противном случае отличия отнесем к коэффициентам $s_{\xi\eta}^m$. Ели бы аппаратная реализация РСА не вносила бы искажений, то матрица $\mathbf{S}^m$ совпала бы с истинной матрицей рассеяния $\mathbf{S}^c$ объекта.

Однако, на пути от входных зажимов излучающей антенны до объекта и от объекта до выходных зажимов приемной антенны сигналы претерпевают искажения, которые описываются матрицами $\mathbf{T}$ и $\mathbf{R}$ размером 2x2 с элементами $t_{\xi\eta}$ и $r_{\xi\eta}$. Кроме этого, существуют паразитные связи между каналами излучения и приема, что характеризуется матрицей $\mathbf{I}$ с элементами $i_{\xi\eta}$ [1].

В силу изложенных соображений матрицу $\mathbf{S}^m$ можно представить в виде

$$\mathbf{S}^m = \mathbf{I} + \mathbf{R}\mathbf{S}^c\mathbf{T} \qquad (2)$$

или

Матрицу рассеяния $\mathbf{S}^c$ исследуемого объекта, определение которой является конечной целью радиолокационных измерений при исследовании свойств природных объектов, нетрудно получить из соотношения (2), зная матрицы $\mathbf{I}$, $\mathbf{R}$, $\mathbf{T}$, характеризующие параметры РСА, и матрицу $\mathbf{S}^m$, представляющую результаты измерений:

$$\mathbf{S}^c = \mathbf{R}^{-1}\left(\mathbf{S}^m - \mathbf{I}\right)\mathbf{T}^{-1}. \tag{3}$$

При идеальном исполнении РСА матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ представляли бы собой единичные матрицы, а матрица $\mathbf{I}$ состояла бы из нулевых элементов, при этом, как это следует из формул (2) или (3), результаты измерений $\mathbf{S}^m$ совпали бы с истинными значениями матрицы рассеяния $\mathbf{S}^c$ наблюдаемого объекта. Как правило, при проектировании РСА не удается с надлежащей точностью рассчитать элементы матриц $\mathbf{T}$, $\mathbf{R}$ и $\mathbf{I}$, так что их приходится находить экспериментально, что, собственно, и составляет проблему калибровки.

Далее рассмотрим способы, с помощью которых можно определить неизвестные матрицы $\mathbf{I}$, $\mathbf{R}$, и $\mathbf{T}$ опытным путем.

Элементы матрицы $\mathbf{I}$ могут быть определены с использованием безэховой камеры или путем ориентирования РСА на объект с весьма низкой ЭПР [1].

Далее, вводя квадратную матрицу $\mathbf{M}$ размером 2х2 с элементами $m_{\xi\eta}$

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}^m - \mathbf{I}, \tag{4}$$

из равенств (2) и (4) имеем

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{S}^c\mathbf{T}, \tag{4a}$$

и задача определения матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ сводится к определению 8-и неизвестных коэффициентов $r_{\xi\eta}$ и $t_{\xi\eta}$.

Чтобы найти эти коэффициенты, достаточно использовать две калибровочные цели с заранее известными матрицами рассеяния $\mathbf{S}^{c1}$ и $\mathbf{S}^{c2}$ и выполнить два соответствующих измерения матриц $\mathbf{S}^{m1}$ и $\mathbf{S}^{m2}$ при поочередном облучении горизонтально и вертикально поляризованными волнами каждой из них с последующей одновременной регистрацией отражений на обеих поляризациях. Элементы матриц легко находятся из уравнения (1). Пользуясь соотношением (4), нетрудно определить и матрицы

$$\mathbf{M}^{(1)} = \mathbf{R}\mathbf{S}^{c1}\mathbf{T}, \qquad \mathbf{M}^{(2)} = \mathbf{R}\mathbf{S}^{c2}\mathbf{T}. \tag{5}$$

При этом полагается, что элементы матрицы $\mathbf{I}$ предварительно были определены. Элементы матриц рассеяния $\mathbf{S}^{c1}$ и $\mathbf{S}^{c2}$ должны быть ненулевыми и удовлетворять условию линейной независимости [1].

Чтобы упростить решение относительно матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ системы (5), выполним перемножение матриц в соотношении (5) и развернем матрицы $\mathbf{M}$ и $\mathbf{S}^c$ в виде столбцов:

$$\left\| m_{vv} \quad m_{hh} \quad m_{vh} \quad m_{hv} \right\|^t = \mathbf{C} \cdot \left\| s_{vv}^c \quad s_{hh}^c \quad s_{vh}^c \quad s_{hv}^c \right\|^t, \tag{6}$$

где

$$\mathbf{C} = \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} r_{vv}t_{vv} & r_{vh}t_{hv} & r_{vv}t_{hv} & r_{vh}t_{vv} \\ r_{hv}t_{vh} & r_{hh}t_{hh} & r_{hv}t_{hh} & r_{hh}t_{vh} \\ r_{vv}t_{vh} & r_{vh}t_{hh} & r_{vv}t_{hh} & r_{vh}t_{vh} \\ r_{hv}t_{vv} & r_{hh}t_{hv} & r_{hv}t_{hv} & r_{hh}t_{vv} \end{Vmatrix}, \tag{7}$$

а символ t обозначает транспонирование. С учетом обозначения (7) равенство (6) приобретает вид

$$\mathbf{M} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{S}^c. \qquad (8)$$

Система уравнений (8) содержит 16 неизвестных c_{ij}, $i, j = 1,\ldots,4$ вместо первоначальных восьми, составляющих матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$. Тем не менее, сопоставляя произведения $r_{\xi\eta} \cdot t_{\xi\eta}$ и коэффициенты c_{ij}, можно убедиться, что девять коэффициентов c_{ij} выражаются через семь других аналогичных, причем такая связь имеет много вариантов. Предпочтительным является тот вариант, при котором в качестве исходных независимых c_{ij} выбираются такие, точность измерений которых выше. Целесообразно полагать

$$\mathbf{C} = \begin{Vmatrix} c_{11} & \dfrac{c_{32}c_{42}}{c_{22}} & \dfrac{c_{33}c_{42}}{c_{22}} & \dfrac{c_{11}c_{32}}{c_{33}} \\ \dfrac{c_{31}c_{41}}{c_{11}} & c_{22} & \dfrac{c_{33}c_{41}}{c_{11}} & \dfrac{c_{22}c_{31}}{c_{33}} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \dfrac{c_{31}c_{32}}{c_{33}} \\ c_{41} & c_{42} & \dfrac{c_{33}c_{41}c_{42}}{c_{11}c_{22}} & \dfrac{c_{11}c_{22}}{c_{33}} \end{Vmatrix}. \qquad (9)$$

В данном случае выбор элементов $c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{31}, c_{32}, c_{41}, c_{42}$ в качестве независимых оправдан тем, что при вычислении оставшихся деление производится на элементы главной диагонали, которые, как правило, существенно превышают остальные, и, следовательно, могут быть определены точнее.

Чтобы определить неизвестные c_{ij} из системы уравнений (8), как и ранее, теоретически достаточно использовать две калибровочные цели с четырьмя линейно независимыми коэффициентами $s_{\xi\eta}$ каждая. Однако, достаточно простых объектов, удовлетворяющих данному условию, не существует, поэтому необходимо воспользоваться тремя калибровочными целями с матрицами рассеяния $\mathbf{S}^{c1}$, $\mathbf{S}^{c2}$ и $\mathbf{S}^{c3}$. Кроме линейной независимости на данные матрицы еще дополнительно налагается условие взаимности $s_{vh} = s_{hv}$. Это позволяет упростить систему уравнений (8). Таким образом, для i-ой цели (i =1,2,3) имеем

$$\begin{Vmatrix} m_{vv}^{(i)} \\ m_{hh}^{(i)} \\ m_{vh}^{(i)} \\ m_{hv}^{(i)} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & (c_{13} + c_{14}) \\ c_{21} & c_{22} & (c_{23} + c_{24}) \\ c_{31} & c_{32} & (c_{33} + c_{34}) \\ c_{41} & c_{42} & (c_{43} + c_{44}) \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s_{vv}^{ci} \\ s_{hh}^{ci} \\ s_{vh}^{ci} \end{Vmatrix}. \qquad (10)$$

Извлекая последовательно из системы уравнений (10) равенства, содержащие $m_{vv}^{(i)}$, при i =1,2,3 нетрудно получить

$$\begin{Vmatrix} m_{vv}^{(1)} & m_{vv}^{(2)} & m_{vv}^{(3)} \end{Vmatrix}^t = \mathbf{V} \cdot \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} + c_{14} \end{Vmatrix}^t, \qquad (11)$$

где

$$\mathbf{V} = \begin{Vmatrix} s_{vv}^{c1} & s_{hh}^{c1} & s_{vh}^{c1} \\ s_{vv}^{c2} & s_{hh}^{c2} & s_{vh}^{c2} \\ s_{vv}^{c3} & s_{hh}^{c3} & s_{vh}^{c3} \end{Vmatrix}.$$

Система уравнений (11) является линейной и легко может быть разрешена относительно неизвестных c_{ij} при условии, что

$$\det \mathbf{V} \neq 0. \tag{12}$$

Неравенство (12) накладывает ограничения на параметры матриц рассеяния калибровочных целей. Так, например, если все три цели не создают перекрестных отражений, то $s_{vh}^{c1} = s_{vh}^{c2} = s_{vh}^{c3} = 0$, и определитель $\det \mathbf{V}$ системы (11) оказывается равным нулю, что делает ее решение невозможным, а задачу калибровки с этими целями невыполнимой. К аналогичному результату приводит пропорциональность любых двух строк или столбцов матрицы $\mathbf{V}$.

При решении системы (11) в первую очередь интерес представляет коэффициент c_{11}. Далее, извлекая последовательно из системы (10) равенства, содержащие результаты измерений для трех целей на каждой из оставшихся поляризаций hh, vh и hv, и поступая аналогичным образом, можно найти коэффициенты $c_{22}, c_{31}, c_{32}, c_{41}$ и c_{42}.

Что касается коэффициента c_{33}, то он может быть определен из решения системы уравнений (10) лишь в сумме с коэффициентом c_{34}. Пусть

$$b_3 = c_{33} + c_{34}. \tag{13}$$

Из матрицы (9) видно, что

$$c_{34} = \frac{c_{31}c_{32}}{c_{33}}. \tag{14}$$

Подставляя соотношение (14) в формулу (13) и решая получившееся квадратное уравнение относительно c_{33}, имеем

$$c_{33} = \frac{b_3}{2} \pm \sqrt{\frac{b_3^2}{4} - c_{31}c_{32}}. \tag{15}$$

Знак в формуле (15) может быть определен исходя из условия $|c_{33}| >> |c_{34}|$ или из сравнения углов $\angle c_{33} \approx \angle b_3$, что имеет место для радиолокационных систем с преобладающими значениями элементов на главной диагонали и высокой поляризационной развязкой [1].

Таким образом, все независимые c_{ij} оказываются известными, а оставшиеся коэффициенты нетрудно вычислить, руководствуясь матрицей $\mathbf{C}$ из соотношения (9). Если элементы матриц $\mathbf{T}$ и $\mathbf{R}$ в отдельности интереса не представляют, а необходимо лишь знание истинной матрицы рассеяния $\mathbf{S}^c$ наблюдаемого объекта, то соответствующий алгоритм коррекции измерений следует из равенств (8) и (4):

$$\mathbf{S}^c = \mathbf{C}^{-1} \cdot \left(\mathbf{S}^m - \mathbf{I}\right), \tag{16}$$

где, как и ранее, $\mathbf{S}^m$- матрица результатов измерений, $\mathbf{C}$ и $\mathbf{I}$ - корректирующие матрицы, учитывающие аппаратурные погрешности РСА.

При обработке результатов с применением данных в цифровом виде пользование формулой (16) не вызывает затруднений. Однако, когда необходимо провести анализ влияния параметров РСА на погрешность измерения отдельных элементов истинной матрицы рассеяния, необходимо знать обратную матрицу $\mathbf{C}^{-1}$ в аналитическом виде. Существует множество способов обращения матриц. В нашем случае задача существенно упрощается в связи с тем, что элементы матрицы $\mathbf{C}$ не независимы, а связаны между собой. Это дает возможность получить компактный результат. Опуская промежуточные выкладки, приведем лишь конечную формулу:

$$\mathbf{C}^{-1} = D \cdot \begin{Vmatrix} c_{22} & c_{12} & -c_{42} & -c_{32} \\ c_{21} & c_{11} & -c_{41} & -c_{31} \\ -c_{24} & -c_{14} & c_{44} & c_{34} \\ -c_{23} & -c_{13} & c_{43} & c_{33} \end{Vmatrix}, \tag{17}$$

где

$$D = \frac{c_{11}c_{22}}{\left(c_{11}c_{22} - c_{31}c_{42}\right)\cdot\left(c_{11}c_{22} - c_{32}c_{41}\right)}. \tag{18}$$

Далее будем полагать, что элементы матрицы $\mathbf{I}$ известны Обозначим

$$\mathbf{S}^0 = \mathbf{S}^m - \mathbf{I}. \tag{19}$$

Разворачивая матричное равенство (16), с учетом формул (17) и (19), имеем

$$\begin{aligned} s_{vv}^c &= D\cdot\left(c_{22}s_{vv}^0 + c_{12}s_{hh}^0 - c_{42}s_{vh}^0 - c_{32}s_{hv}^0\right) \\ s_{hh}^c &= D\cdot\left(c_{21}s_{vv}^0 + c_{11}s_{hh}^0 - c_{41}s_{vh}^0 - c_{31}s_{hv}^0\right) \\ s_{vh}^c &= D\cdot\left(-c_{24}s_{vv}^0 - c_{14}s_{hh}^0 + c_{44}s_{vh}^0 + c_{34}s_{hv}^0\right) \\ s_{hv}^c &= D\cdot\left(-c_{23}s_{vv}^0 - c_{13}s_{hh}^0 + c_{43}s_{vh}^0 + c_{33}s_{hv}^0\right). \end{aligned} \tag{20}$$

Как указывалось выше, для того чтобы определить все коэффициенты c_{ij} $(i, j = 1,\ldots,4)$, в системе уравнений (20) на этапе калибровки необходимо иметь три калибровочные цели со специальными характеристиками. Однако, как можно показать, при наличии лишь двух целей (например, трехгранного уголкового отражателя и диполя или антенного рефлектора [4]) компоненты s_{vv}^c и s_{hh}^c матрицы рассеяния можно измерить точно. Что же касается компонент s_{vv}^c и s_{vv}^c, то для их определения необходимая полная калибровка РСА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wiesbeck W., Riegger S. A complete error model for free space polarimetric measurements//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - 1991. - Vol. 39, № 8. – P.1105-1111.

2. Fujita M., Masuda T., Fujino Y., and Satake M. Polarimetric calibration of the SIR-C C-band channel using active radar calibrators and polarization selective dihedrals//IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. - 1998. - Vol. 36, № 6. – P. 1872-1878.

3. Yueh S.H., Kong J.A., Barnes R. M. and Shin R.T. Calibration of polarimetric radars using in-scene reflectors//Journal of Electromagnetic Waves and Applications. - 1990. - Vol. 4, № 1. – P. 27-48.

4. Захаров А.И., Жердев П.А., Борисов М.М., Соколов А.Б. Радиометрическая и фазовая стабильности зеркальных антенн как калибровочных целей для космических РСА//Радиотехника. - 2003. - № 8. – С.60-62.