Некоторые алгоритмы калибровки поляриметрических РСА при фарадеевском вращении плоскости поляризации

М.В. Сорочинский, А.И. Захаров

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Б.А. Введенского, 1
E-mail: smw@sunclass.ire.rssi.ru

Рассмотрены два алгоритма внешней калибровки поляриметрических радиолокаторов бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) с учетом фарадеевского вращения плоскости поляризации. Первый из них предусматривает использование эталонных точечных отражателей и дает возможность определить внутренние параметры РСА и фарадеевский угол поворота плоскости поляризации в месте выполнения калибровочных измерений. Второй алгоритм основан на применении естественных протяженных целей и также позволяет оценить угол поворота.

Two algorithms of polarimetric synthetic aperture radar (SAR) external calibration in the presence of Faraday rotation are discussed. One of them exploits ground reference point reflectors and allows the estimation of SAR internal parameters and Faraday rotation angle of polarization plane at the calibration site. Another one is based on a use of natural extended targets and allows the evaluation of the Faraday rotation angle too.

1. Применяемые в настоящее время практике дистанционного исследования Земли поляриметрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) аэрокосмического базирования значительно отличаются друг от друга по своим электрическим параметрам, влияющим на результат измерений. Кроме того, эти параметры подвержены временному дрейфу. Отмеченные обстоятельства затрудняют совместную интерпретацию результатов, полученных как различными аппаратами, так и одним и тем же аппаратом, но на продолжительном временном интервале. Данную проблему можно преодолеть, используя калибровку РСА.

Основополагающим моментом при выборе метода калибровки является выбор той или иной модели РСА, описывающей его характеристики. В достаточно общем виде алгоритм функционирования поляриметрического РСА может быть представлен соотношением [1]

$$\begin{Vmatrix} s_{hh}^m & s_{hv}^m \\ s_{vh}^m & s_{vv}^m \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} i_{hh} & i_{hv} \\ i_{vh} & i_{vv} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s_{hh}^c & s_{hv}^c \\ s_{vh}^c & s_{vv}^c \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{Vmatrix} \tag{1}$$

или

$$\mathbf{S}^m = \mathbf{I} + \mathbf{R}\mathbf{S}^c\mathbf{T}, \tag{2}$$

где $\mathbf{S}^m$ и $\mathbf{S}^c$ - матрица результатов измерений РСА и матрица рассеяния соответственно с элементами $s_{\xi\eta}^m$ и $s_{\xi\eta}^c$; $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ - матрицы с элементами $r_{\xi\eta}$ и $t_{\xi\eta}$, характеризующие искажения в приемном и передающем трактах радиолокатора; $\mathbf{I}$ - матрица с элементами $i_{\xi\eta}$, представляющая паразитные связи между каналами излучения и приема в отсутствие цели; $\xi,\eta = h$ или v и обозначает прием сигнала η -поляризации, когда излучение происходит на ξ -поляризации. Далее будем полагать, что уровень шумов мал, а матрица $\mathbf{I}$ известна. Ее элементы могут быть получены путем измерений в безэховой камере в наземных условиях или в условиях полета при ориентировании РСА на объект с низкой отражающей способностью, например, на спокойную водную поверхность. Следовательно, оказывается известной и матрица

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}^m - \mathbf{I}, \tag{3}$$

представляющая собой скорректированные результаты измерений, а соотношение (2) можно привести к виду

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

Таким образом, для исчерпывающего описания РСА необходимо измерять 8 параметров: 4 элемента каждой из матриц $\mathbf{T}$ и $\mathbf{R}$.

Однако, если в дальнейшем необходимо получить лишь значения элементов матрицы рассеяния цели $\mathbf{S}^c$, то для компенсации искажений, вносимых РСА, достаточно измерять элементы матрицы

$$\mathbf{C} = \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} r_{vv}t_{vv} & r_{vh}t_{hv} & r_{vv}t_{hv} & r_{vh}t_{vv} \\ r_{hv}t_{vh} & r_{hh}t_{hh} & r_{hv}t_{hh} & r_{hh}t_{vh} \\ r_{vv}t_{vh} & r_{vh}t_{hh} & r_{vv}t_{hh} & r_{vh}t_{vh} \\ r_{hv}t_{vv} & r_{hh}t_{hv} & r_{hv}t_{hv} & r_{hh}t_{vv} \end{Vmatrix}. \tag{5}$$

Из 16 элементов матрицы $\mathbf{C}$ независимыми оказываются лишь 7. Их выбор в достаточной мере произволен. Например, можно выбрать $c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{31}, c_{32}, c_{41}$ и c_{42} и через них выразить все остальные элементы. В свою очередь, величины $t_{\xi\eta}$ и $r_{\xi\eta}$ могут быть выражены через элементы c_{ij} $(i, j = 1, \ldots, 4)$ с точностью до некоторого масштабного коэффициента, который определить не удаётся. Тем не менее, это не препятствует полной компенсации искажений [2].

В процессе калибровки для нахождения матрицы $\mathbf{C}$ необходимо использовать три разнотипные точечные эталонные цели и далее осуществить расчеты по методике [1].

В низкочастотной области радиодиапазона (например, в L-диапазоне) падающий и отраженный от цели сигналы испытывают фарадеевское вращение плоскости поляризации, в связи с чем соотношение (4) приобретает вид

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}^{\Phi}\mathbf{S}^c\mathbf{T}^{\Phi}, \tag{6}$$

где

$$\mathbf{R}^{\Phi} = \begin{Vmatrix} r_{hh}^{\Phi} & r_{hv}^{\Phi} \\ r_{vh}^{\Phi} & r_{vv}^{\Phi} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix}, \tag{7}$$

$$\mathbf{T}^{\Phi} = \begin{Vmatrix} t_{hh}^{\Phi} & t_{hv}^{\Phi} \\ t_{vh}^{\Phi} & t_{vv}^{\Phi} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{Vmatrix}, \tag{8}$$

где Ω - фарадеевский угол вращения плоскости поляризации [3], который необходимо измерять в дополнение к ранее упомянутым семи параметрам.

Если теперь воспользоваться при калибровке методикой [1], то вместо истинных внутренних параметров РСА (матрицы $\mathbf{T}$, $\mathbf{R}$ и $\mathbf{C}$), получим матрицы $\mathbf{T}^{\Phi}$, $\mathbf{R}^{\Phi}$ и $\mathbf{C}^{\Phi}$ соответственно, которые зависят от угла вращения Ω. Однако, разности

$$\begin{aligned} &c_{11}^{\Phi} - c_{12}^{\Phi} = c_{11} - c_{12} = d_{11}, \qquad && c_{13}^{\Phi} + c_{14}^{\Phi} = c_{13} + c_{14} = d_{12}, \\ &c_{21}^{\Phi} - c_{22}^{\Phi} = c_{21} - c_{22} = d_{21}, && c_{23}^{\Phi} + c_{24}^{\Phi} = c_{23} + c_{24} = d_{22}, \\ &c_{31}^{\Phi} - c_{32}^{\Phi} = c_{31} - c_{32} = d_{31}, && c_{33}^{\Phi} + c_{34}^{\Phi} = c_{33} + c_{34} = d_{32}, \end{aligned} \tag{9}$$

$$c_{41}^{\phi}-c_{42}^{\phi}=c_{41}-c_{42}=d_{41}, \qquad c_{43}^{\phi}+c_{44}^{\phi}=c_{43}+c_{44}=d_{42}.$$

от Ω не зависят, поэтому [4]

$$\begin{cases} c_{11}c_{22}-c_{32}c_{42}-d_{11}c_{22}=0, \\ c_{33}^2c_{42}+c_{11}c_{22}c_{32}-d_{12}c_{22}c_{33}=0, \\ c_{31}c_{41}-c_{11}c_{22}-d_{21}c_{11}=0, \\ c_{33}^2c_{41}+c_{11}c_{22}c_{31}-d_{22}c_{11}c_{33}=0, \\ c_{31}-c_{32}-d_{31}=0, \\ c_{33}^2+c_{31}c_{32}-d_{32}c_{33}=0, \\ c_{41}-c_{42}-d_{41}=0, \\ c_{11}^2c_{22}^2+c_{33}^2c_{41}c_{42}-d_{42}c_{11}c_{22}c_{33}=0. \end{cases} \tag{10}$$

Система (10) состоит из восьми уравнений и содержит семь неизвестных. Для ее решения достаточно отобрать семь уравнений, например, первые из этой системы. Воспользовавшись численными методами, можно определить неизвестные параметры $c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{31}, c_{32}, c_{41}$ и c_{42}.

Для определения фарадеевского вращения существует несколько соотношений. В частности,

$$\Omega=\operatorname{arctg}\left(\frac{c_{22}c_{33}^{\phi}-c_{22}^{\phi}c_{33}}{c_{23}c_{33}^{\phi}+c_{22}^{\phi}c_{32}}\right). \tag{11}$$

2. Альтернативу приведенному выше алгоритму может составить алгоритм, основанный на использовании для калибровки естественных пространственных целей, например, лесных массивов и др. [5], однако он не учитывает эффект Фарадея и поэтому нуждается в доработке. Этот алгоритм основан на вычислении корреляционной матрицы $\mathbf{Q}$ размером 4х4

$$\mathbf{Q}=\left\langle \mathbf{M}\mathbf{M}^{*t}\right\rangle, \tag{12}$$

где $*$, ^{t} и $\langle\ \rangle$ – символы комплексного сопряжения, транспонирования и усреднения по участку поверхности протяженной цели соответственно. Здесь матрица $\mathbf{Q}$ состоит из элементов в виде коэффициентов взаимной корреляции q_{ij} ($i, j=1,2,\ldots,4$), а матрица $\mathbf{M}$ представляет собой матрицу-столбец скорректированных результатов измерений (3)

$$\mathbf{M}=\left\| m_{vv} \quad m_{hv} \quad m_{vh} \quad m_{hh} \right\|^t. \tag{13}$$

Пространственная цель, обладающая симметрией $s_{hv}^c=s_{vh}^c$, может быть представлена вектором

$$\mathbf{S}^{cs}=\left\| s_{vv}^{cs} \quad s_{hv}^{cs} \quad s_{hh}^{cs} \right\|^t. \tag{14}$$

Если согласованные и перекрестные отражения от цели некоррелированы, так что $\left\langle s_{\xi\xi}^{cs}s_{\xi\eta}^{cs*}\right\rangle=0$ при $\xi\neq\eta$, то ее отражательные свойства будут полностью характеризоваться корреляционной матрицей [5]

$$\mathbf{R}_{cS}=\begin{Vmatrix} \sigma_{vv} & 0 & \rho \\ 0 & \sigma_{hv} & 0 \\ \rho^* & 0 & \sigma_{hh} \end{Vmatrix}, \tag{15}$$

где $\rho = \left\langle s_{vv}^{cs} s_{hh}^{cs*} \right\rangle$ и $\sigma_{\xi\eta} = \left\langle \left| s_{\xi\eta}^{cs} \right|^2 \right\rangle$.

При малых уровнях перекрестного просачивания и симметричной цели уравнение (4) можно привести к виду

$$\left\| m_{vv} \quad m_{hv} \quad m_{vh} \quad m_{hh} \right\|^t = \mathbf{C}_S \cdot \left\| s_{vv}^{cs} \quad s_{hv}^{cs} \quad s_{hh}^{cs} \right\|^t, \tag{16}$$

где

$$\mathbf{C}_S = Y \begin{Vmatrix} \alpha & v+\alpha w & vw \\ \alpha u & \alpha & v \\ \alpha z & 1 & w \\ \alpha uz & u+\alpha z & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} k^2 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}, \tag{17}$$

где $u = r_{hv}/r_{vv}$, $v = t_{hv}/t_{hh}$, $w = r_{vh}/r_{hh}$, $z = t_{vh}/t_{vv}$ - относительные коэффициенты просачивания; $Y = r_{hh}t_{hh}$ - общее усиление в hh-канале; $k = r_{vv}/r_{hh}$ - дисбаланс в приемном тракте; $\alpha = \dfrac{t_{vv}/t_{hh}}{r_{vv}/r_{hh}}$ - отношение дисбалансов в передающем и приемном трактах.

Следовательно, и при таком способе описания характеристик РСА необходимо в процессе калибровки определять также семь параметров. Величины, u, v, w, z и α могут быть оценены по коэффициентам взаимной корреляции. Для того, чтобы определить k, дополнительно требуется знание параметров цели σ_{vv} и ρ [5]. Что же касается Y, то данная методика позволяет найти лишь $|Y|$.

При наличии фарадеевского вращения применение этой же методики приводит к получению величин

$$u^\Phi = (ku - \mathrm{tg}\Omega)/(k - w\,\mathrm{tg}\Omega), \tag{18}$$

$$v^\Phi = (\alpha k\,\mathrm{tg}\Omega + v)/(\alpha kz\,\mathrm{tg}\Omega + 1), \tag{19}$$

$$w^\Phi = (k\,\mathrm{tg}\Omega + w)/(ku\,\mathrm{tg}\Omega + 1), \tag{20}$$

$$z^\Phi = (\alpha kz + \mathrm{tg}\Omega)/(\alpha k + v\,\mathrm{tg}\Omega) \tag{21}$$

вместо искомых внутренних параметров. Эти величины, в отличие от внутренних параметров, зависят от значения Ω в месте проведения измерений.

Если по результатам калибровки внутренние параметры u, v, w, z РСА были определены, то, например, из уравнений (18) и (20) нетрудно найти угол Ω в месте проведения измерений

$$\Omega = \mathrm{arctg}\left(\sqrt{\left(u^\Phi - u\right)\left(w - w^\Phi\right) / \left(u^\Phi w - 1\right)\left(uw^\Phi - 1\right)} \right) \tag{22}$$

и значение внутреннего параметра

$$k = \sqrt{\left(u^\Phi w - 1\right)\left(w - w^\Phi\right) / \left(uw^\Phi - 1\right)\left(u^\Phi - u\right)}. \tag{23}$$

Также можно показать, что

$$\alpha = \left(u^\Phi - u\right)\left(1 - vz^\Phi\right) / \left(z^\Phi - z\right)\left(u^\Phi w - 1\right), \tag{24}$$

причем для определения u, v, w, z, u^Φ, v^Φ, w^Φ и z^Φ никаких численных характеристик протяженной цели не требуется.

С использованием методики, предложенной в работе [2], и значениях параметров, измеренных в месте калибровки, можно скомпенсировать искажения, вносимые РСА, и получить истинные значения элементов матрицы рассеяния исследуемого объекта:

$$s_{vv}^{c} = D_0^{\Phi}\left(m_{vv} + v^{\Phi} w^{\Phi} m_{hh} - v^{\Phi} m_{vh} - w^{\Phi} m_{hv}\right) \Big/ \alpha^{\Phi}\left(k^{\Phi}\right)^2, \tag{25}$$

$$s_{hh}^{c} = D_0^{\Phi}\left(u^{\Phi} z^{\Phi} m_{vv} + m_{hh} - u^{\Phi} m_{vh} - z^{\Phi} m_{hv}\right), \tag{26}$$

$$s_{vh}^{c} = D_0^{\Phi}\left(-z^{\Phi} m_{vv} - w^{\Phi} m_{hh} + m_{vh} + w^{\Phi} z^{\Phi} m_{hv}\right) \Big/ k^{\Phi}, \tag{27}$$

$$s_{hv}^{c} = D_0^{\Phi}\left(-u^{\Phi} m_{vv} - v^{\Phi} m_{hh} + u^{\Phi} v^{\Phi} m_{vh} + m_{hv}\right) \Big/ \alpha^{\Phi} k^{\Phi}, \tag{28}$$

где $s_{\xi\eta}^{c}$ и $m_{\xi\eta}$ - элементы матрицы рассеяния наблюдаемой цели и матрицы результатов измерений соответственно,

$$D_0^{\Phi} = \left(1 + \mathrm{tg}^2\,\Omega\right) \Big/ Y\left(1 + uk\,\mathrm{tg}\,\Omega\right)\left(1 - \alpha kz\,\mathrm{tg}\,\Omega\right)\left(1 - v^{\Phi} z^{\Phi}\right)\left(1 - u^{\Phi} w^{\Phi}\right),$$

$$\alpha^{\Phi} = \left(1 + uk\,\mathrm{tg}\Omega\right)\left(\alpha k + v\,\mathrm{tg}\Omega\right) / \left(1 - \alpha k\,\mathrm{tg}\Omega\right)\left(k - w\,\mathrm{tg}\Omega\right),\ k^{\Phi} = \left(k - w\,\mathrm{tg}\Omega\right) / \left(ku\,\mathrm{tg}\Omega + 1\right).$$

Параметр Y не удается определить с помощью методики [3], поэтому необходимо дополнительно воспользоваться каким-нибудь точечным эталонным отражателем.

3. Таким образом, калибровка по точечным отражателям позволяет определить внутренние параметры РСА, не зависящие от места нахождения носителя, в любом месте проведения измерений несмотря на наличие там эффекта Фарадея. К недостатку данного алгоритма следует отнести необходимость использования специального калибровочного полигона с размещенным на нем набором искусственных эталонных точечных отражателей.

Использование второго алгоритма дает возможность оценить внутренние параметры радиолокатора по естественным протяженным целям только в тех местах, где отсутствует эффект Фарадея. Однако помощью данного алгоритма при известных внутренних параметрах РСА может быть измерено фарадеевское вращение в любой точке земной поверхности и, следовательно, может быть осуществлена и калибровка радиолокатора.

Литература

1.Wiesbeck W. and Riegger S. A complete error model for free space polarimetric measurements, IEEE Trans. Antennas Propag., vol.39, no.8, pp.1105-1111, 1991.

2.Захаров А.И., Сорочинский М.В. Внешняя калибровка поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой при ограниченном числе типов эталонных отражателей // Радиотехника и электроника. – 2010.- Т. 55, № 10. – С. 1178- 1184.

3.Kimura H. Calibration of ALOS/PALSAR polarimetric data affected by Faraday rotation // Proc. IGARSS’05. Seoul, Korea, 25-29 July 2005. - Piscataway NJ, USA: IEEE, 2005. - V. 5. - P. 3369-3372.

4.Захаров А.И., Сорочинский М.В. Калибровка поляриметрических РСА с учетом фарадеевского вращения плоскости поляризации // Космическая радиолокация. [Электронный ресурс]: Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сб. докладов научно-практической конференции (Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г.). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2010.– С. 101-105. CD-ROM.

5.Quegan S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data - theory and observation. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.–1994. – Vol.32, № 1. –P. 89-99.