6. ТЕОРИЯ ВНЕШНЕЙ КАЛИБРОВКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННЙ АПЕРТУРОЙ

А.И. Захаров, М.В. Сорочинский, Ю.Г. Тищенко

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Аннотация. *Одним из основных назначений поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) является измерение матрицы рассеяния радиолокационной цели. Ввиду того, что при физическом осуществлении РСА неизбежны технические погрешности в его изготовлении, результаты измерений, получаемые непосредственно на выходе РСА, содержат систематические ошибки. Чтобы скомпенсировать эти ошибки, необходимо знание истинных значений некоторых внутренних электрических параметров РСА (или их комбинаций). Получить расчетным методом значения таких параметров представляется затруднительным, в связи с чем приходится определять их экспериментальным путем, что составляет проблему калибровки радиолокатора. Далее результаты калибровки используются при обработке измерений для коррекции технических погрешностей РСА, а также мониторинга его состояния в процессе полета носителя.*

ВВЕДЕНИЕ

Под калибровкой поляриметрического РСА будем понимать процедуру, позволяющую методически правильно и точно определять характеристики самих РСА и значения измеряемых параметров наблюдаемых объектов [1]. Здесь в принципе возможны два подхода. Первый из них предполагает измерение в отдельности всех параметров той или иной математической модели, характеризующей РСА, что необходимо прежде всего для контроля стабильности параметров радиолокатора в условиях полета носителя. Во втором подходе, когда ставится задача только коррекции искажений, вызываемых неидеальным исполнением РСА, может оказаться достаточным измерения лишь некоторых комбинаций таких параметров.

Существует два способа устранения или снижения неопределенности оценок неизвестных параметров РСА. Эти способы в современной теории и практике калибровки РСА известны как относительная и абсолютная калибровки [1]. В тех случаях, когда задача радиолокационной съемки с помощью РСА сводится к количественному сравнению и оценке различий отражающих характеристик отдельных участков в пределах одного радиолокационного изображения, то достаточно выполнить относительную калибровку, заключающуюся в применении расчетных методов или моделирования, или натурных измерений в меньшем объеме. Относительная калибровка дает возможность проводить измерения локальных контрастов в пределах снятых зон в относительных единицах.

Если же необходимо в процессе радиолокационного зондирования измерять абсолютные значения матрицы рассеяния, то в этом случае косвенных методов оценок параметров РСА оказывается недостаточно и необходимо выполнение специальных натурных измерений в полном объеме с использованием эталонов, что составляет предмет абсолютной калибровки. Абсолютная калибровка позволяет осуществить сравнение радиолокационных изображений (матриц рассеяния), полученных разными предварительно откалиброванными РСА или одним и тем же, но в разное время.

Практическая реализация процедуры калибровки осуществляется методами внутренней и внешней калибровки [1,2].

Внутренняя калибровка выполняется путем измерения параметров электронных элементов, составляющих тракты РСА, с помощью встроенных калибровочных цепей и эталонов с особо стабильными характеристиками, которые функционируют совместно с работой РСА в штатном режиме. Некоторые детали практического осуществления внутренней калибровки приведены в работах [1-3].

Хотя внутренняя калибровка и дает достаточно информации для калибровки изображений по собственным параметрам РСА, но она не лишена и ряда существенных недостатков. Поэтому точность определения абсолютных значений радиолокационных характеристик объектов наблюдения с применением метода только внутренней калибровки не для всех задач радиолокационной съемки может быть достаточной. Эти недостатки могут быть преодолены с помощью внешней калибровки. Внешняя калибровка предусматривает использование внешних источников эталонных сигналов, располагаемых по трассе полета в пределах зоны радиолокационного наблюдения. При внешней калибровке учитывается влияние практически всех возможных внешних и внутренних воздействий, способных исказить информацию об отражающих свойствах исследуемой поверхности.

В целом, калибровка РСА представляет собой сложную в научном и техническом отношении задачу. Она включает в себя в качестве основных этапов выбор соответствующей математической параметрической модели, описывающей РСА, разработку алгоритмов определения параметров по результатам измерений, выбор эталонных целей, разработку методики измерений, оснащение измерительного полигона необходимыми техническими средствами и, наконец, проведение самих измерений.

НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РСА

Приемо-передающий тракт РСА вследствие предъявляемых к нему весьма жестких требований в достаточно хорошем приближении по отношению к излучаемым и принимаемым сигналам можно считать линейным. Поэтому полной и исчерпывающей его характеристикой являются его амплитудно- и фазочастотные характеристики. Однако непосредственное их измерение, в особенности в условиях полета, практически неосуществимо. Это приводит к необходимости сводить задачу к измерению ряда параметров, выбор которых связан с подбором той или иной математической модели РСА, описывающей прохождение сигналов через ее тракты.

1. Одной из наиболее общих параметрических моделей РСА является модель, предложенная в работе [4] и дополненная слагаемым, учитывающим наличие шумов различной природы:

$$\begin{Vmatrix} s_{hh} & s_{hv} \\ s_{vh} & s_{vv} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} i_{hh} & i_{hv} \\ i_{vh} & i_{vv} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} & s^c_{hv} \\ s^c_{vh} & s^c_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{Vmatrix}$$

или

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} + \mathbf{R}\mathbf{S}^c\mathbf{T} + \mathbf{N}\,, \tag{1}$$

где матрица $\mathbf{S}$ с элементами $s_{\xi\eta}$ представляет собой результаты измерений матрицы рассеяния исследуемой цели $\mathbf{S}^c$ с элементами $s^c_{\xi\eta}$, выполненных с помощью РСА на борту носителя. Здесь и далее индексы ξ и η ($\xi,\eta = h$ или v) обозначают прием сигнала η-поляризации, когда излучение происходит на ξ-поляризации. Матрицы $\mathbf{R}$, $\mathbf{T}$ и $\mathbf{N}$ с элементами $r_{\xi\eta}$, $t_{\xi\eta}$ и $n_{\xi\eta}$ соответственно характеризуют искажения в приемном и передающем трактах радиолокатора и совокупные шумы различного происхождения. Матрица $\mathbf{I}$ с элементами $i_{\xi\eta}$ представляет паразитные связи между каналами излучения и приема в отсутствие цели.

Уравнение (1) описывает одну из возможных дискретных математических моделей РСА. Оно связывает выходные сигналы РСА с его входными через внутренние параметры РСА и матрицу рассеяния объекта. Модель полностью характеризуется 12-ю параметрами, которые могут быть при некоторых условиях определены экспериментально.

Так, элементы матрицы $\mathbf{I}$ могут быть получены в наземных условиях на этапе стендовых испытаний путем измерений в безэховой камере [5,6], где $\mathbf{S}^c = 0$, или уточнены в условиях полета при ориентировании антенной системы РСА на объект с очень малой отражательной способностью, например, на гладкую водную поверхность. Следовательно, без нарушения общности можно считать матрицу $\mathbf{I}$ известной. Далее будем считать, что уровень шумов мал по сравнению с полезным сигналом, и его можно не учитывать. Таким образом, оказывается известной и матрица

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{S}^{\mathbf{c}}\mathbf{T}. \tag{2}$$

Формула (2) является основополагающей для построения других моделей РСА. В частности, это соотношение используется при описании моделей в работах [7-13]. Модели этой группы относятся к моделям с абсолютными параметрами, так как для описания таких моделей необходимо знать все элементы матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$.

2. Если нет необходимости определять абсолютные значения элементов матрицы рассеяния цели $\mathbf{S}^c$, а достаточно сведений об их относительных соотношениях, то можно воспользоваться моделями с относительными параметрами. Нормируя матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ в равенстве (2) на r_{hh} и t_{vv}, имеем

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{Vmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} & s^c_{hv} \\ s^c_{vh} & s^c_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{Vmatrix}, \tag{3}$$

где

$$\delta_1 = r_{hv}/r_{hh}, \quad \delta_2 = r_{vh}/r_{hh}, \quad \delta_3 = t_{hv}/t_{hh}, \quad \delta_4 = t_{vh}/t_{hh} \tag{4}$$

- параметры, отражающие паразитное прохождение сигналов из канала в канал, а

$$f_1 = r_{vv}/r_{hh}, \quad f_2 = t_{vv}/t_{hh} \tag{5}$$

- коэффициенты, характеризующие асимметрию каналов при прямом прохождении [2,14]. В равенстве (3) коэффициент $r_{hh}t_{hh}$ опущен, так как это равенство будет применяться при относительных измерениях матрицы рассеяния, где его значение несущественно. Отметим, что основное достоинство модели (3) состоит в том, что для ее описания необходимо измерять шесть параметров вместо восьми, как это требуется в случае модели (2). Естественно, при этом процесс калибровки упрощается. Модели, основанные на формуле (3), находят довольно широкое применение [15-18].

3. Иногда бывает целесообразным разделить коэффициенты, характеризующие асимметрию каналов при прямом прохождении, и параметры, отражающие паразитное прохождение:

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2/f_1 & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} & s^c_{hv} \\ s^c_{vh} & s^c_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4/f_2 & 1 \end{Vmatrix} \qquad (6)$$

Модель (6) в ряде случаев позволяет упростить нахождение ее параметров.

4. При калибровке с использованием протяженных целей удобной оказывается модель, представленная в работах [13,19]:

$$\begin{Vmatrix} m_{hh} \\ m_{hv} \\ m_{vh} \\ m_{vv} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} k^2\alpha & vk & wk\alpha & vw \\ zk^2\alpha & k & wzk\alpha & w \\ uk^2\alpha & uvk & k\alpha & v \\ uzk^2\alpha & uk & zk\alpha & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} \\ s^c_{hv} \\ s^c_{vh} \\ s^c_{vv} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \alpha & v & w\alpha & vw \\ z\alpha & 1 & wz\alpha & w \\ u\alpha & uv & \alpha & v \\ uz\alpha & u & z\alpha & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} k^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} \\ s^c_{hv} \\ s^c_{vh} \\ s^c_{vv} \end{Vmatrix}, \qquad (7)$$

где

$$k = r_{hh}/r_{vv}, \quad \alpha = r_{vv}t_{hh}/r_{hh}t_{vv}, \quad u = r_{vh}/r_{hh}, \quad v = t_{vh}/t_{vv}, \quad w = r_{hv}/r_{vv}, \quad z = t_{hv}/t_{hh}, \qquad (8)$$

а m_{ij} и s^c_{ij} $(i, j = h$ или $v)$ – элементы матриц $\mathbf{M}$ и $\mathbf{S}^c$.

Если цель обладает симметричными свойствами, то $s^c_{hv} = s^c_{vh}$. Обычно в РСА хорошего качества уровень паразитного просачивания невелик, поэтому можно считать, что $u \ll 1$, $v \ll 1$, $w \ll 1$, $z \ll 1$, и $\alpha \sim 1$, поэтому из равенства (7) следует [19]:

$$\begin{Vmatrix} m_{hh} \\ m_{hv} \\ m_{vh} \\ m_{vv} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \alpha & v + w\alpha & vw \\ z\alpha & 1 & w \\ u\alpha & \alpha & v \\ uz\alpha & u + z\alpha & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} k^2 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} \\ s^c_{hv} \\ s^c_{vv} \end{Vmatrix}. \qquad (9)$$

5. Среди моделей с относительными параметрами особое место занимают модели, в явном виде учитывающие фарадеевское вращение плоскости поляризации как отдельный параметр. В этом классе моделей достаточно общей является модель, использованная в работах [14,20,21].

Здесь

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{RFS}^c\mathbf{FT} + \mathbf{N} =$$

$$= \begin{Vmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ \text{-}\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} & s^c_{hv} \\ s^c_{vh} & s^c_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ \text{-}\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{hh} \end{Vmatrix}, \qquad (10)$$

где $\bar{\mathbf{M}}$ - матрица измерений, $\mathbf{S}^c$ - истинная матрица рассеяния цели, $\mathbf{N}$ - матрица шумов, $\mathbf{T}$ и $\mathbf{R}$ - матрицы, характеризующие прохождение сигналов через передающий и приемный тракты РСА, $\mathbf{F}$ - матрица, учитывающая искажения, вызываемые фарадеевским вращением плоскости поляризации.

Отметим, что при замене $\mathbf{R}' = \mathbf{RF}$ и $\mathbf{T}' = \mathbf{FT}$ модель (10) переходит в модель (2).

Воспользовавшись матрицами $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$, выраженными через относительные параметры δ_i $(i = 1,\dots,4)$ и f_j $(j = 1,2)$ из соотношения (3), равенство (10) можно привести к виду [14]

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{Vmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ \text{-}\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s^c_{hh} & s^c_{hv} \\ s^c_{vh} & s^c_{vv} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ \text{-}\sin\Omega & \cos\Omega \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{hh} \end{Vmatrix}. \qquad (11)$$

Аналогичная модель используется в работах [22,23].

АЛГОРИТМЫ КАЛИБРОВКИ

Одним из определяющих этапов калибровки поляриметрического РСА наряду с выбором технических средств для ее осуществления является выбор алгоритма калибровки. Алгоритм калибровки в сильной степени зависит от той или иной модели, принятой для описания РСА исходя из требований, предъявляемых к конечному продукту радиолокационных измерений.

1. Достаточно общий алгоритм калибровки представлен в работе [9]. Он основан на применении модели (2) и предполагает использование 3-х точечных целей с заранее известными матрицами рассеяния

$$\mathbf{S}^{c1} = \begin{Vmatrix} s^{c1}_{hh} & s^{c1}_{hv} \\ s^{c1}_{vh} & s^{c1}_{vv} \end{Vmatrix}, \ \mathbf{S}^{c2} = \begin{Vmatrix} s^{c2}_{hh} & s^{c2}_{hv} \\ s^{c2}_{vh} & s^{c2}_{vv} \end{Vmatrix}, \ \mathbf{S}^{c3} = \begin{Vmatrix} s^{c3}_{hh} & s^{c3}_{hv} \\ s^{c3}_{vh} & s^{c3}_{vv} \end{Vmatrix} \qquad (12)$$

с последующим решением системы линейных уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \begin{Vmatrix} x_{hh} & x_{hv} \\ x_{vh} & x_{vv} \end{Vmatrix} = e^{i\varphi 1}\mathbf{R}\mathbf{S}^{c1}\mathbf{T} \\ \mathbf{Y} = \begin{Vmatrix} y_{hh} & y_{hv} \\ y_{vh} & y_{vv} \end{Vmatrix} = e^{i\varphi 2}\mathbf{R}\mathbf{S}^{c2}\mathbf{T}\,, \\ \mathbf{Z} = \begin{Vmatrix} z_{hh} & z_{hv} \\ z_{vh} & z_{vv} \end{Vmatrix} = e^{i\varphi 3}\mathbf{R}\mathbf{S}^{c3}\mathbf{T} \end{cases} \tag{13}$$

где матрицы $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Z}$ представляют собой результаты измерений, относительно нормированных элементов

$$r'_{hv} = r_{hv}/r_{hh}\,,\ r'_{vh} = r_{vh}/r_{hh}\,,\ r'_{vv} = \frac{r_{vv}}{r_{hh}},\ t'_{hv} = t_{hv}/t_{hh}\,,\ t'_{vh} = t_{vh}/t_{hh}\,,\ t'_{vv} = t_{vv}/t_{hh} \tag{14}$$

матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$.

Далее множители $e^{i\varphi k}$ ($k = 1,2,3$), связанные с фазовой задержкой при распространении сигнала в атмосфере от РСА до цели, можно отнести к матрице $\mathbf{R}$ (или $\mathbf{T}$). На выбор набора целей, используемых для калибровки, накладывается определенное ограничение. Чтобы однозначное решение системы уравнений (13) было возможным, необходимо выполнение условия [9]

$$\begin{vmatrix} s^{c1}_{hh} & s^{c2}_{hh} & s^{c3}_{hh} \\ s^{c1}_{hv} & s^{c2}_{hv} & s^{c3}_{hv} \\ s^{c1}_{vv} & s^{c2}_{vv} & s^{c3}_{vv} \end{vmatrix} \neq 0\,. \tag{15}$$

В работе [9] приведены расчетные соотношения, позволяющие определить нормированные элементы матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ по наборам из трех целей, составленных в различных комбинациях из ряда эталонных отражателей: цель общего вида, H- и V-диполи, трехгранный отражатель, цель с диагональной матрицей рассеяния.

2. Если ставится задача определить по результатам радиолокационных наблюдений только матрицу рассеяния неизвестной цели, то находить все элементы этих матриц по отдельности нет необходимости. В этой ситуации целесообразно воспользоваться подходом, предложенным в работе [4].

Представляя матрицы $\mathbf{M}$ и $\mathbf{S}$ в виде векторов-столбцов, уравнение (2) для k целей ($k = 1,2,\ldots$) можно записать в виде [4]

$$\begin{Vmatrix} m^{(k)}_{vv} & m^{(k)}_{hh} & m^{(k)}_{vh} & m^{(k)}_{hv} \end{Vmatrix}^t = \mathbf{C}.\begin{Vmatrix} s^{(ck)}_{vv} & s^{(ck)}_{hh} & s^{(ck)}_{vh} & s^{(ck)}_{hv} \end{Vmatrix}^t, \tag{16}$$

где

$$\mathbf{C} = \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} r_{vv}t_{vv} & r_{vh}t_{hv} & r_{vv}t_{hv} & r_{vh}t_{vv} \\ r_{hv}t_{vh} & r_{hh}t_{hh} & r_{hv}t_{hh} & r_{hh}t_{vh} \\ r_{vv}t_{vh} & r_{vh}t_{hh} & r_{vv}t_{hh} & r_{vh}t_{vh} \\ r_{hv}t_{vv} & r_{hh}t_{hv} & r_{hv}t_{hv} & r_{hh}t_{vv} \end{Vmatrix}, \tag{17}$$

а символ ^{t} обозначает транспонирование.

Система уравнений (16) 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. В частности, в работе [4] предложено в качестве независимых элементов выбрать $\mathbf{c}_{11}, \mathbf{c}_{22}, \mathbf{c}_{33}, \mathbf{c}_{31}, \mathbf{c}_{32}, \mathbf{c}_{41}, \mathbf{c}_{42}$, что дает

$$\mathbf{C} = \begin{Vmatrix} c_{11} & \dfrac{c_{32} \cdot c_{42}}{c_{22}} & \dfrac{c_{33} \cdot c_{42}}{c_{22}} & \dfrac{c_{11} \cdot c_{32}}{c_{33}} \\ \dfrac{c_{31} \cdot c_{41}}{c_{11}} & c_{22} & \dfrac{c_{33} \cdot c_{41}}{c_{11}} & \dfrac{c_{31} \cdot c_{22}}{c_{33}} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \dfrac{c_{32} \cdot c_{31}}{c_{33}} \\ c_{41} & c_{42} & \dfrac{c_{33} \cdot c_{41} \cdot c_{42}}{c_{11} \cdot c_{22}} & \dfrac{c_{11} \cdot c_{22}}{c_{33}} \end{Vmatrix}. \tag{18}$$

Чтобы определить неизвестные c_{ij} из системы уравнений (16), как и ранее, теоретически достаточно использовать две калибровочные цели $(k = 1, 2)$ 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 $\mathbf{S}^{c3}$. Если кроме линейной независимости на данные матрицы дополнительно наложить условие взаимности $s_{vh} = s_{hv}$, что довольно часто имеет место на практике для реальных радиолокационных целей, то система уравнений (16) упрощается. Таким образом, для k-ой цели $(i = 1, 2, 3)$ имеем

$$\begin{Vmatrix} m_{vv}^{(k)} \\ m_{hh}^{(k)} \\ m_{vh}^{(k)} \\ m_{hv}^{(k)} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} c_{11} & c_{12} & (c_{13} + c_{14}) \\ c_{21} & c_{22} & (c_{23} + c_{24}) \\ c_{31} & c_{32} & (c_{33} + c_{34}) \\ c_{41} & c_{42} & (c_{33} + c_{44}) \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} s_{vv}^{ck} \\ s_{hh}^{ck} \\ s_{vh}^{ck} \end{Vmatrix}. \tag{19}$$

Извлекая последовательно из системы (19) равенства, содержащие результаты измерений для трех целей на каждой из поляризаций vv, hh, vh и hv, 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 (19) лишь в сумме с коэффициентом c_{34}. Пусть

$$b_3 = c_{33} + c_{34}. \tag{20}$$

Из матрицы (18) видно, что

$$c_{34} = \frac{c_{32} \cdot c_{31}}{c_{33}}. \tag{21}$$

Подставляя соотношение (21) в формулу (20) и решая получившееся квадратное уравнение относительно c_{33}, имеем

$$c_{33} = \frac{b_3}{2} \pm \sqrt{\frac{b_3^2}{4} - c_{31}c_{32}}. \tag{22}$$

Таким образом, все независимые c_{ij} оказываются известными, а оставшиеся коэффициенты нетрудно вычислить, руководствуясь матрицей $\mathbf{C}$ из соотношения (18).

При необходимости через элементы c_{ij} матрицы $\mathbf{C}$ в формуле (17) можно выразить и элементы матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$, однако все их восемь элементов оказываются пропорциональными какому-нибудь одному из них, абсолютное значение которого при данном алгоритме найти невозможно. Как вариант, выбрав самый стабильный из этих элементов, следует измерить его величину при внутренней калибровке РСА.

Существует множество различных вариантов представления искомых элементов. Так, в частности, выбирая в качестве независимого элемента r_{hh}, нетрудно получить

$$r_{hh} = r_{hh} \qquad r_{hv} = \frac{c_{23}}{c_{22}} \cdot r_{hh}, \qquad r_{vh} = \frac{c_{32}}{c_{22}} \cdot r_{hh}, \qquad r_{vv} = \frac{c_{33}}{c_{22}} \cdot r_{hh}; \tag{23}$$

$$t_{hh} = \frac{c_{22}}{r_{hh}}, \qquad t_{hv} = \frac{c_{42}}{r_{hh}}, \qquad t_{vh} = \frac{c_{24}}{r_{hh}}, \qquad t_{vv} = \frac{c_{44}}{r_{hh}}. \tag{24}$$

3. Большой интерес представляет использование естественных пространственно протяженных объектов для калибровки поляриметрического радиолокатора, не создающих проблем, связанных с использованием искусственных точечных отражателей. Это оказывается возможным при выполнении определенных ограничений, касающихся свойств протяженной цели, предполагающих ее азимутальную симметрию, а также малый уровень паразитных связей между каналами РСА [19].

Основываясь на модели (2) РСА и некоторых статистических характеристиках эталонной протяженной цели, по взаимной корреляции результатов измерений можно определить все элементы c_{ij} матрицы $\mathbf{C}$ с точностью до постоянного множителя $r_{22}t_{22}$, который по данной методике определить нельзя.

4. Одной из основных областей применения результатов калибровки является коррекция аппаратурных искажений, вызываемых РСА, с целью получения истинного значения матрицы рассеяния $\mathbf{S}^c$ исследуемого объекта, применительно к которому алгоритм коррекции сразу следует из соотношения (16):

$$\mathbf{S}^c = \left\| s^c_{vv} \quad s^c_{hh} \quad s^c_{vh} \quad s^c_{hv} \right\|^t = \mathbf{C}^{-1} \cdot \left\| m_{vv} \quad m_{hh} \quad m_{vh} \quad m_{hv} \right\|^t, \tag{25}$$

где символ $^{-1}$обозначает обращение матрицы. Так как матрица $\mathbf{C}$ является квадратной, то при $\det \mathbf{C} \neq 0$ она может быть обращена, и соотношение (25) оказывается корректным.

При обработке результатов с применением данных в цифровом виде пользование формулой (25) (или аналогичной процедурой решения системы линейных уравнений) 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 [24,25].

Непосредственное обращение матрицы $\mathbf{C}$ размером 4x4 в аналитическом виде представляет собой довольно трудоемкую процедуру, поэтому воспользуемся искусственным приемом. Из соотношения (2) следует

$$\mathbf{S}^c = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{T}^{-1}. \tag{26}$$

Матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ имеют размер 2x2 и поэтому легко обращаются аналитически. После обращения этих матриц и последующего перемножения всех трех матриц в равенстве (26) получившееся после громоздких тождественных преобразований произведение может быть представлено в виде двух сомножителей:

$$\mathbf{S}^c = \left\| s_{vv}^c \quad s_{hh}^c \quad s_{vh}^c \quad s_{hv}^c \right\|^t = \mathbf{G}.\left\| m_{vv} \quad m_{hh} \quad m_{vh} \quad m_{hv} \right\|^t, \tag{27}$$

где $\mathbf{G}$ - некоторая квадратная матрица. Из сравнений равенств (25) и (27) следует, что

$$\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{G}.$$

Таким образом, вид обратной матрицы оказывается установленным. После всех преобразований окончательно получаем [24,25]

$$\mathbf{C}^{-1} = D \cdot \begin{Vmatrix} c_{22} & c_{12} & -c_{42} & -c_{32} \\ c_{21} & c_{11} & -c_{41} & -c_{31} \\ -c_{24} & -c_{14} & c_{44} & c_{34} \\ -c_{23} & -c_{13} & c_{43} & c_{33} \end{Vmatrix}, \tag{28}$$

где

$$D = \frac{c_{11}c_{22}}{\left(c_{11}c_{22} - c_{31}c_{42}\right) \cdot \left(c_{11}c_{22} - c_{32}c_{41}\right)}. \tag{29}$$

Заметим, что матрица $\mathbf{C}^{-1}$ в равенстве (28) состоит только из тех же самых элементов, что и матрица $\mathbf{C}$, и поэтому, несмотря на то, что при калибровке РСА с использованием данного алгоритма возможно лишь определение относительных значений элементов матриц $\mathbf{R}$ и $\mathbf{T}$ [соотношения (23) и (24)], коррекция искажений радиолокатора при этом осуществляется точно [соотношение (25)].

Таким образом, если известна матрица измерений $\mathbf{S}$ и корректирующая матрица $\mathbf{C}^{-1}$, то в соответствии с формулой (25) и с учетом равенств (28) и (29) получаем истинные значения элементов матрицы рассеяния цели $\mathbf{S}^c$ [24,25]

$$s_{vv}^c = D \cdot \left(c_{22}m_{vv} + c_{12}m_{hh} - c_{42}m_{vh} - c_{32}m_{hv}\right), \tag{30а}$$

$$s_{hh}^c = D \cdot \left(c_{21}m_{vv} + c_{11}m_{hh} - c_{41}m_{vh} - c_{31}m_{hv}\right), \tag{30б}$$

$$s_{vh}^{c} = D \cdot \left(-c_{24} m_{vv} - c_{14} m_{hh} + c_{44} m_{vh} + c_{34} m_{hv}\right), \tag{30в}$$

$$s_{hv}^{c} = D \cdot \left(-c_{23} m_{vv} - c_{13} m_{hh} + c_{43} m_{vh} + c_{33} m_{hv}\right). \tag{30г}$$

Соотношения (30) в принципе дают возможность по заданной погрешности измерений $\mathbf{S}$ оценить требования, которые необходимо предъявить к внутренним параметрам РСА, чтобы в той или иной мере снизить требования к точности калибровки и, наоборот, по возникающим погрешностям калибровки оценить погрешности измерений.

Следует обратить внимание, что s_{vv}^{c}, s_{hh}^{c} и D из соотношений (30а), (30б) и (29) не зависят от коэффициента c_{33}. Следовательно, если в результате калибровки этот коэффициент определить не удастся, с помощью формул (30а) и (30б) параметры цели s_{vv}^{c} и s_{hh}^{c} восстанавливаются точно в отличие от использования непосредственно алгоритма (25), для реализации которого в цифровом виде требуется вычисление обратной матрицы $\mathbf{C}^{-1}$, что невозможно, если не все элементы матрицы $\mathbf{C}$ известны.

КАЛИБРОВКА ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОГО РСА ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ЧИСЛЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ ЦЕЛЕЙ

Первые попытки осуществить калибровку поляриметрического РСА были связаны с применением искусственных целей с известными характеристиками, которые можно получить расчетным путем. Однако, набор таких целей ограничен. К ним, в первую очередь, относятся трехгранный и двухгранный уголковые отражатели, сфера, диполь и параболическая антенна с поляризационной решеткой в фокальной плоскости [26,27]. Их матрицы рассеяния имеют вид:

- для трехгранного уголкового отражателя или сферы [2]

$$\mathbf{S}_{\text{тр}} = S0_{\text{тр}} \left\| \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\|, \tag{31}$$

- для двухгранного уголкового отражателя [2]

$$\mathbf{S}_{\text{дв}} = S0_{\text{дв}} \begin{Vmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{Vmatrix}, \tag{32}$$

- для диполя [2] и параболической антенны с поляризационной решеткой

$$\mathbf{S}_{\text{дип}} = S0_{\text{дип}} \begin{Vmatrix} \cos^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha \\ \sin\alpha\cos\alpha & \sin^2\alpha \end{Vmatrix}, \tag{33}$$

где $S0_{\text{тр}}$, $S0_{\text{дв}}$ и $S0_{\text{дип}}$ - масштабные коэффициенты, зависящие от геометрических размеров отражателей, α - угол поворота двугранного уголкового отражателя или поляризационной решетки.

Чтобы получить дополнительные шесть уравнений и произвести полную калибровку, достаточно воспользоваться, например, одним трехгранным отражателем и двумя диполями или двумя антеннами с решеткой. Возможны и другие комбинации, включающие двугранные углы. Детально требования, предъявляемые к набору пассивных отражателей, применяемых для калибровки РСА, рассмотрены в работе [9].

Если число искусственных целей меньше трех, то полная калибровка РСА невозможна, хотя некоторые его характеристики все же можно получить, что важно для контроля стабильности работы бортового радиолокатора [28].

1. Предположим, что оказывается доступным лишь один трехгранный уголковый отражатель. Пользуясь изложенной выше методикой, по наземным измерениям $m_{\xi\eta}^{(\text{тр})}$ можно получить только суммы некоторых элементов матрицы $\mathbf{C}$:

$$c_{31} + c_{32} = \frac{m_{vh}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}}, \quad c_{41} + c_{42} = \frac{m_{hv}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}}. \tag{34}$$

2. Если в дополнение к трехгранному уголковому отражателю имеется один диполь или антенна с решеткой, круг определяемых параметров существенно расширяется. В результате расчета можно показать, что в этой ситуации

$$c_{11} = \frac{m_{vv}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}}, \qquad c_{22} = \frac{m_{hh}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}} - \frac{m_{hh}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}}, \qquad c_{31} = \frac{m_{vh}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}},$$

$$c_{32} = \frac{m_{vh}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}} - \frac{m_{vh}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}}, \qquad c_{41} = \frac{m_{vh}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}}, \qquad c_{42} = \frac{m_{hv}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}} - \frac{m_{hv}^{(\text{дип0})}}{S0_{\text{дип}}}. \tag{35}$$

При выводе этих формул полагалось, что угол ориентации решетки (диполя) $\boldsymbol{\alpha}=0$, а отражения от нее отмечены верхним индексом $^{\text{дип0}}$. Таким образом, по двум наземным целям из семи необходимых параметров можно определить шесть. Однако седьмой параметр c_{33} определить невозможно. Аналогичные результаты получаются и при ориентации с $\alpha = 90^\circ$. Заметим, что при ориентации решетки с $\alpha = 45^\circ$ невозможно раздельное определение ни одного из параметров, так что применение ее в данном случае является бесполезным.

3. Тем не менее, в заключение следует отметить, что конфигурация «трехгранный уголковый отражатель – антенна с решеткой при $\alpha = 0$ – антенна с решеткой при $\alpha = 45^\circ$» позволяет найти все семь параметров. При этом все формулы (35) остаются в силе и лишь дополняются равенством

$$c_{33} + c_{34} = \frac{2m_{vh}^{(\text{дип}45)}}{S0_{\text{дип}}} - \frac{m_{vh}^{(\text{тр})}}{S0_{\text{тр}}}, \tag{36}$$

из которого по рассмотренной выше методике можно определить c_{33}. Здесь отражение от антенны с решеткой при $\alpha = 45^\circ$ отмечено верхним индексом $^{\text{дип}45}$.

Однако, если заведомо известно, что матрица рассеяния исследуемой цели обладает симметрией с $s_{vh}^c = s_{hv}^c$, то полное определение всех ее параметров возможно и без измерения величины c_{33}, для чего достаточно всего двух калибровочных целей. В самом деле, перемножая равенства (30в) и (30г), имеем

$$s_{vh}^c s_{hv}^c = w\,. \tag{37}$$

В многочлен w, образовавшийся после перемножения, входят слагаемые вида $c_{ij}c_{kl}m_{pq}m_{st}$ ($i,i,k,l = 1,\ldots,4$, $p,q,s,t = h$ или v), содержащие результаты измерения в виде произведений $m_{pq}m_{st}$ с коэффициентами $c_{ij}c_{kl}$. При тех сочетаниях индексов i,j,k,l, которые встречаются в многочлене w, все находящиеся там произведения $c_{ij}c_{kl}$ не зависят от неизвестной в данном случае величины c_{33}. Например, принимая во внимание равенство (18), для произведения $c_{24}c_{43}$ получаем

$$c_{24}c_{43} = \frac{c_{22}c_{31}}{c_{33}} \cdot \frac{c_{33}c_{41}c_{42}}{c_{11}c_{22}} = \frac{c_{31}c_{41}c_{42}}{c_{11}},$$

куда входят лишь непосредственно измеряемые величины c_{11}, c_{31}, c_{41} и c_{42}. Аналогичным образом можно убедиться, что и остальные произведения $c_{ij}c_{kl}$ из многочлена w, а также множитель D из определения (29) не зависят от c_{33}.

Теперь элементы $s_{vh}^c = s_{hv}^c$ матрицы рассеяния легко находится из равенства (37):

$$s_{vh}^{c} = s_{hv}^{c} = \sqrt{w}\,. \qquad (38)$$

Рассмотренный подход может оказаться особенно полезным, если третья калибровочная цель оказалась поврежденной или имели место ошибки при ее наведении в момент калибровочного сеанса.

ЭТАЛОННЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ ПОЛИГОНЫ

К эталонным отражателям, применяющимся при внешней калибровке РСА, предъявляются весьма жесткие требования в отношении стабильности их характеристик, точности изготовления и уровню отраженного сигнала, который должен быть достаточно высоким и в ряде случаев регулируемым. Кроме того, отражатели должны обладать довольно широкой диаграммой направленности. В качестве эталонных находят применение пассивные точечные отражатели в виде двух- и трехгранных уголков, зеркальные полноповоротные антенны, линзы Люнеберга и т.п.[29], а также и участки земной поверхности, удовлетворяющие определенным требованиям, и некоторые строения [30]. Особое место занимают активные калибраторы (транспондеры) [7,31,32], обладающие широкими функциональными возможностями и обеспечивающие большие значения эквивалентной эффективной поверхности рассеяния, что весьма важно для уменьшения шумовой составляющей погрешности измерения параметров РСА при калибровке вследствие более высокого отношения сигнал/шум при измерениях. Следует отметить, что практическое использование указанных средств при проведении внешней калибровки РСА требует разработки детальной и обстоятельной методики, что составляет отдельную проблему.

В качестве примера организации полигона для калибровки может служить полигон, описанный в работе [7]. Там же представлены и результаты по экспериментальным исследованиям эффективности поляриметрической калибровки, выполнявшиеся в 1988 году применительно к РСА, установленному на самолете. Измерительный комплекс был расположен на дне высохшего озера в Голдстоуне (США, штат Калифорния) и включал в себя 25 трех- и 6 двухгранных отражателей, 6 активных калибраторов, 7 пассивных приемников и 2 двухчастотных генератора. Дальнейшее развитие эти работы получили в 1994 году в ходе миссии «Шаттл», когда по всему миру было создано 14 калибровочных районов, на которых было развернуто около 150 уголковых отражателей, 70 активных калибраторов и 50 приемников [15].

Особенности калибровки РСА RADARSAT-2 даны в работе [33]. Эксперименты по калибровке космического РСА PALSAR на полигоне ОКБ МЭИ «Медвежьи Озера» представлены в работе [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К наиболее общим параметрическим моделям РСА принадлежит модель, рассмотренная Висбеком (Wiesbeck) [4]. Она характеризуется восемью внутренними параметрами, для определения которых при проведении поляриметрической калибровки РСА необходимо иметь три эталонных калибровочных цели с известными матрицами рассеяния, удовлетворяющими определенным ограничениям. При этом оказывается, что любые семь из восьми параметров, определяемых с применением рассмотренного в статье [4] алгоритма калибровки, пропорциональны оставшемуся, абсолютное значение которого при данном алгоритме определить невозможно. Тем не менее, получаемых данных достаточно, чтобы скомпенсировать вносимые РСА искажения при измерении матрицы рассеяния изучаемого объекта. В данной модели может быть в принципе учтен и эффект Фарадея.

Если доступно меньшее число эталонных отражателей (один или два), то возможно определение лишь отдельных параметров или их комбинаций, что может оказаться полезным при мониторинге состояния РСА в условиях полета. В случае измерения матрицы рассеяния цели, обладающей симметричными отражательными характеристиками, для полной компенсации аппаратурных искажений необходимо иметь лишь две эталонные цели.

Алгоритм компенсации аппаратурных искажений РСА, заданный в явной аналитической форме, дает возможность оценить систематическую погрешность измерений, обусловленную неидеальным исполнением элементов радиолокатора. Он также может быть использован для обоснования требований к параметрам такого устройства. В условиях неполной калибровки РСА в ряде случаев с помощью данного алгоритма могут быть скомпенсированы аппаратурные искажения при измерении отдельных параметров матрицы рассеяния измеряемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белокуров А.А., Глыбовский С.И. Методы и средства калибровки радиолокационных систем дистанционного наблюдения земной поверхности //Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – №2. – С. 19-31.

2. Freeman A. SAR calibration: an overview //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1992. – V. 30. – № 6. – P.1107-1121.
3. Zink M., and Bamler R. X-SAR radiometric calibration and data quality //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1995. – V. 33. – № 4. – P. 840-847.
4. Wiesbeck W. and Riegger S. A complete error model for free space polarimetric measurements //IEEE Trans. Antennas Propag. – 1991. – V. 39. – № 8. – P. 1105-1111.
5. Wiesbeck W. and Kähny D. Single reference, three target calibration and error correction for monostatic, polarimetric free space measurements //Proc. IEEE. – 1991. – V. 79. – № 10. – P. 1551-1558.
6. Риггер С., Висбек В. Широкополосная поляриметрия и комплексные сигнатуры эффективных площадей отражения радиолокационных целей //ТИИЭР. – 1989. – Т. 77. – № 5. – С. 19-29.
7. Freeman A., Chen Y., and Werner C.L. Polarimetric SAR calibration experiment using active radar calibrators //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1990. – V. 28. – № 2. – P. 224-240
8. Sheen D.R., Freeman A., and Kasischke E.S. Phase calibration of polarimetric radar image //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1989. – V. 27. – № 6. – P. 719-731.
9. 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. – V. 4. – № 1. – P. 27-48.
10. Klein J.D. and Freeman A. Quadropolarization SAR calibration using target reciprocity //Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 1991. – V. 5. – № 7. – P. 735-751.
11. Sarabandi K. Calibration of a polarimetric synthetic aperture radar using a known distributed target //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1994. – V. 32. – № 3. – P. 575-582.
12. 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. – V. 36. – № 6. – P. 1872-1878.
13. Ainsworth T.L. and Lee J.S. A new method for a posteriori polarimetric SAR calibration //Proc. IGARSS'01. Sydney, Australia. 9-13 July, 2001. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2001. CD-ROM.
14. Moriyama T. Polarimetric calibration and validation for ALOS/PALSAR //Proceedings 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto. Kyoto, Japan. 19-23 November, 2007. Chofu, Tokyo, Japan: JAXA, 2007. – P. SCV01.
15. Freeman A., Alves M., Chapman B., Cruz J., Kim Y., Shaffer S., Sun J., Turner E., and Sarabandi K. SIR-C data quality and calibration results //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1995. – V. 33. – № 4. – P. 848-856.
16. Freeman A. A new system model for radar polarimeters //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1991. – V. 29. – № 5. – P. 761-767.
17. Freeman A., van Zyl J.J., Klein J.D. Zebker A., Shen Y. Calibration of Stokes and scattering matrix format polarimetric SAR data //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1992. – V. 30. – № 3. – P.531-539.
18. Shimada M., Tadono T., and Watanabe T. Determination of polarimetric calibration parameters of L band SAR using uniform forest data //Proc. IGARSS'04. Anchorage, Alaska. 20–24 September, 2004. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2004. CD-ROM.

19. Quegan S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data - theory and observation //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1994. – V. 32. – № 1. – P. 89-99.
20. 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. CD-ROM.
21. Kimura H. Polarimetric calibration using polarization orientation angles of built-up areas //Proceedings 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto. Kyoto, Japan. 19-23 November, 2007. Chofu, Tokyo, Japan: JAXA, 2007. – P. SCV03.
22. Freeman A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – V. 42. – № 8. – P. 1617-1624.
23. Fukuchi H., Furuya T., Noda H., and Satake M. New polarimetric calibration proposal and its evaluation using ALOS PALSAR calibration campaign measurements //Proc. IGARSS'07. Barcelona, Spain. 23-27 July, 2007. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2007. CD ROM.
24. Захаров А.И., Сорочинский М.В. Компенсация аппаратурных искажений поляриметрического РСА //Доклады на III Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 26 – 30 октября, 2009 г. – М.: ИРЭ РАН, 2009. – Т. 2. - С. 220-224.
25. Сорочинский М.В., Захаров А.И. Модифицированный алгоритм компенсации аппаратурных искажений измерений поляриметрического РСА //Тезисы докладов на VII Всероссийской открытой ежегодной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса”, Москва, 16-20 ноября, 2009. – М.: ИКИ РАН, 2009. – CD-ROM.
26. 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.
27. Захаров А.И., Жердев П.А., Борисов М.М., Соколов А.Б. Калибровка современных космических РСА с помощью наземных антенных рефлекторов //Вторая Всероссийская научная конференция «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», С.-Петербург, 16-18 июня, 2004. – Сборник докладов. – Т. 3. – С. 110-114.
28. Сорочинский М.В., Захаров А.И Калибровка поляриметрического РСА при ограниченном количестве типов калибровочных целей //Тезисы докладов на VII Всероссийской открытой ежегодной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса”, Москва, 16-20 ноября, 2009. – М.: ИКИ РАН, 2009. – CD-ROM.
29. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975..
30. Захаров А.И., Жердев П.А., Соколов А.Б. Синило В.П., Сорочинский М.В., Чимитдоржиев Т.Н. Результаты калибровки японского РСА PALSAR с помощью наземных искусственных и естественных пассивных отражателей в 2006-2009 гг. //Тезисы докладов на VII Всероссийской открытой ежегодной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса”, Москва, 16-20 ноября, 2009. – М.: ИКИ РАН, 2009. – CD-ROM.
31. Hounam D. and Wägel K.-H. A technique for identification and localization of SAR targets using encoding transponders //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2001. – V. 39. – № 1. – P. 3-7.

32. Shimada M., Oaku H., and Nakai M. SAR calibration using frequency-tunable active radar calibrators //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1999. – V. 37. – № 1. – P. 564-573.
33. Luscombe A.P., Chotoo K., and Huxtable B.D. Polarimetric calibration for RADARSAT-2 //Proc. IGARSS'00. Hilton Hawaiian Village Honolulu, Hawaii. 24-28 July, 2000. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2000. CD-ROM.