



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

Калибровка поляриметрического РСА при ограниченном количестве типов калибровочных целей и модифицированный алгоритм компенсации его аппаратурных искажений

М.В.СОРОЧИНСКИЙ, А.И.ЗАХАРОВ

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

Московская обл., г. Фрязино

E-mail: smw@sunclass.ire.rssi.ru



Постановка задачи

$$\begin{pmatrix} b_h \\ b_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{hh}^m & S_{hv}^m \\ S_{vh}^m & S_{vv}^m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_h \\ a_v \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_{hh}^m & S_{hv}^m \\ S_{vh}^m & S_{vv}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{hh} & i_{hv} \\ i_{vh} & i_{vv} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{hh}^c & S_{hv}^c \\ S_{vh}^c & S_{vv}^c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S}^m = \mathbf{I} + \mathbf{RS}^c\mathbf{T}$$

$$\mathbf{S}^c = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{S}^m - \mathbf{I})\mathbf{T}^{-1}$$



Решение задачи

1. Калибровка

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

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

$$\begin{vmatrix} m_{vv} & m_{hh} & m_{vh} & m_{hv} \end{vmatrix}^t = \mathbf{C} \cdot \begin{vmatrix} s_{vv}^c & s_{hh}^c & s_{vh}^c & s_{hv}^c \end{vmatrix}^t$$

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



Независимые элементы: $c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{31}, c_{32}, c_{41}, c_{42}$

Искомая матрица:

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} c_{11} & \frac{c_{32} \cdot c_{42}}{c_{22}} & \frac{c_{33} \cdot c_{42}}{c_{22}} & \frac{c_{11} \cdot c_{32}}{c_{33}} \\ \frac{c_{31} \cdot c_{41}}{c_{22}} & c_{22} & \frac{c_{33} \cdot c_{41}}{c_{11}} & \frac{c_{22} \cdot c_{31}}{c_{33}} \\ c_{11} & c_{22} & c_{11} & c_{33} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \frac{c_{31} \cdot c_{32}}{c_{33}} \\ c_{41} & c_{42} & \frac{c_{33} \cdot c_{41} \cdot c_{42}}{c_{11} \cdot c_{22}} & \frac{c_{11} \cdot c_{22}}{c_{33}} \end{vmatrix}$$



Вариант с целями, обладающими взаимностью

$$S_{vh} = S_{hv}$$

$$\begin{pmatrix} m_{vv}^{(i)} \\ m_{hh}^{(i)} \\ m_{vh}^{(i)} \\ m_{hv}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & (c_{13} + c_{14}) \\ c_{21} & c_{22} & (c_{23} + c_{24}) \\ c_{31} & c_{32} & (c_{33} + c_{34}) \\ c_{41} & c_{42} & (c_{43} + c_{44}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{vv}^{ci} \\ S_{hh}^{ci} \\ S_{vh}^{ci} \end{pmatrix} \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} S_{vv}^{c1} & S_{hh}^{c1} & S_{vh}^{c1} \\ S_{vv}^{c2} & S_{hh}^{c2} & S_{vh}^{c2} \\ S_{vv}^{c3} & S_{hh}^{c3} & S_{vh}^{c3} \end{pmatrix}$$

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

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



Определение элементов матрицы S по результатам калибровки

1. Матрицы рассеяния некоторых целей

А) трехгранный уголкового отражатель или сфера

$$S_{\text{тр}} = SO_{\text{тр}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Б) диполь или параболическая антенна с поляризационной решеткой

$$S_{\text{дип}} = SO_{\text{дип}} \begin{vmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{vmatrix}$$



2. Частные случаи калибровки

А) Один трехгранный уголкового отражателя

$$c_{11} + c_{22} = \frac{m_{vv}^{(тр)}}{SO_{тр}} \quad c_{21} + c_{22} = \frac{m_{hh}^{(тр)}}{SO_{тр}} \quad c_{31} + c_{32} = \frac{m_{vh}^{(тр)}}{SO_{тр}} \quad c_{41} + c_{42} = \frac{m_{hv}^{(тр)}}{SO_{тр}}$$

$$c_{11} + c_{12} = r_{vv} t_{vv} + r_{vh} t_{hv}$$

$$c_{21} + c_{22} = r_{hv} t_{vh} + r_{hh} t_{hh}$$

$$c_{31} + c_{32} = r_{vv} t_{vh} + r_{vh} t_{hh}$$

$$c_{41} + c_{42} = r_{hv} t_{vv} + r_{hh} t_{hv}$$



Б) Трехгранный уголкового отражатель и антенна с решеткой

при $\alpha = 0$

$$c_{11} = \frac{m_{vv}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$

$$c_{22} = \frac{m_{hh}^{(\text{тр})}}{SO_{\text{тр}}} - \frac{m_{hh}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$

$$c_{31} = \frac{m_{vh}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$

$$c_{32} = \frac{m_{vh}^{(\text{тр})}}{SO_{\text{тр}}} - \frac{m_{vh}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$

$$c_{41} = \frac{m_{vh}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$

$$c_{42} = \frac{m_{hv}^{(\text{тр})}}{SO_{\text{тр}}} - \frac{m_{hv}^{(\text{дип } 0)}}{SO_{\text{дип}}}$$



В) Трехгранный уголкового отражателя и две антенны с решеткой

при $\alpha = 0$ и $\alpha = 45^\circ$

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

$$c_{33}^2 - c_{33}(c_{33} + c_{34}) + c_{31}c_{32} = 0$$



2. Модификация алгоритма компенсации искажений

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

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

$$\begin{bmatrix} m_{vv} & m_{hh} & m_{vh} & m_{hv} \end{bmatrix}^t = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} s_{vv}^c & s_{hh}^c & s_{vh}^c & s_{hv}^c \end{bmatrix}^t$$

$$\begin{bmatrix} s_{vv}^c & s_{hh}^c & s_{vh}^c & s_{hv}^c \end{bmatrix}^t = \mathbf{C}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} m_{vv} & m_{hh} & m_{vh} & m_{hv} \end{bmatrix}^t$$

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

$$\begin{bmatrix} s_{vv}^c & s_{hh}^c & s_{vh}^c & s_{hv}^c \end{bmatrix}^t = \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} m_{vv} & m_{hh} & m_{vh} & m_{hv} \end{bmatrix}^t$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{F}$$



Корректирующая матрица

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

где

$$D = \frac{c_{11}c_{12}}{(c_{11}c_{22} - c_{31}c_{42}) \cdot (c_{11}c_{22} - c_{32}c_{41})}$$



Результат коррекции

1. Общий случай

$$S_{vv}^c = D(c_{22}m_{vv} + c_{12}m_{hh} - c_{42}m_{vh} - c_{32}m_{hv})$$

$$S_{hh}^c = D(c_{21}m_{vv} + c_{11}m_{hh} - c_{41}m_{vh} - c_{31}m_{hv})$$

$$S_{vh}^c = D(-c_{24}m_{vv} - c_{14}m_{hh} + c_{44}m_{vh} + c_{34}m_{hv})$$

$$S_{hv}^c = D(-c_{23}m_{vv} - c_{13}m_{hh} + c_{43}m_{vh} + c_{33}m_{hv})$$



2. Случай симметричной цели

$$S_{vh}^c = S_{hv}^c$$

$$W = S_{vh}^c S_{hv}^c$$

$$S_{vh}^c = S_{hv}^c = \sqrt{W}$$



Особенности алгоритма компенсации

1. Простота программирования
2. Возможность оценки систематической погрешности измерений, обусловленной неидеальным исполнением элементов РСА, или обоснования требований к параметрам РСА
3. Возможность измерения отдельных параметров матрицы рассеяния цели в условиях неполной калибровки РСА