第 12 期　　电　子　学　报　　Vol. 29　No. 12
2001 年 12 月　　ACTA ELECTRONICA SINICA　　Dec.　2001

雷达目标互易性的最小变质修正法

曾勇虎，王雪松，肖顺平，庄钊文
(国防科技大学电子科学与工程学院，湖南长沙 410073)

摘　要：针对雷达目标互易性修正问题，从极化测量误差模型出发，提出了基于最小变质准则的散射矩阵修正方法. 经过推导，把一个四维带约束非线性最优化问题转化为一个二维无约束非线性最优化问题，并给出了求解过程. 最后通过仿真实验比较了最小变质修正法和 Cameron 修正法的性能，验证了最小变质修正法的可行性和优越性.

关键词：极化散射矩阵；互易性修正；最小变质修正法
中图分类号：TN95　**文献标识码**：A　**文章编号**：0372-2112 (2001) 12-1611-04

Least Degradation Correction Algorithm on Radar Target′s Reciprocity

ZENG Yong-hu，WANG Xue-song，XIAO Shun-ping，ZHUANG Zhao-wen
(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: With the analysis of polarimetric measurement error model，a novel correction algorithm on radar target′s reciprocity is presented based on least degradation rule. After transforming the nonlinear optimal problem of four degrees of freedom with constraints to a nonlinear optimal problem of two degrees of freedom without constraints，the solution is given. Simulation results verify its feasibility and indicate its good performance.

Key words: polarization scattering matrix；correction on reciprocity；least degradation correction algorithm

1　引言

众所周知，单静态情况下线性目标的散射矩阵应当是对称的，即满足互易原理[1]. 在极化信息处理过程中，目标最佳极化、极化雷达目标识别等理论往往建立在散射矩阵为对称矩阵的基础上[2]. 然而目标极化散射测量实验表明[3,4]，通常情况下目标的实测极化散射矩阵都是非对称的，这意味着目标的互易性在测量过程中受到了破坏. 因此在对实测散射矩阵进行处理时，目标的互易性修正就成为必不可少的重要步骤.

迄今为止，关于目标互易性修正问题的研究成果很少见到报道. W. L. Cameron 在研究目标分解问题时提出了一种平均修正法[3]，即以散射矩阵的对称分量作为真实散射矩阵的估计. 文献[5]在研究基于伪本征极化的目标识别的过程中，提出了目标互易性修正的 Frobenius 范数法，其核心思想是基于散射矩阵的能量不变性假设，寻求一个使误差矩阵 Frobenius 范数达到最小的对称散射矩阵. 若把二阶复数矩阵 $C^{2\times2}$ 作为一个论域，满足互易原理的对称散射矩阵空间 $C_{rec}^{2\times2}$ 则为其中的一个子空间，实测散射矩阵 $S \in C^{2\times2}$，Cameron 修正法实质上就是在 $C_{rec}^{2\times2}$ 中寻找一个与 S 距离最小的点作为散射矩阵的估计[6]；而 Frobenius 范数修正法还需满足能量约束，实质上就是在 $C_{rec}^{2\times2}$ 中范数与 S 的范数相等的子集内寻找一个与 S 距离最小的点作为散射矩阵的估计[7]. 已经证明，这两种修正方法所得到的散射矩阵估计只相差一个标量因子，仿真实验已表明了其可行性以及不同测量条件下的性能.

上述两种散射矩阵修正方法均是根据 Frobenius 范数距离最小准则，在某一子空间或子集内寻找与实测散射矩阵最近的一个点作为散射矩阵的估计. 它们所应用的信息仅来自于实测散射矩阵，Frobenius 范数修正法应用了极化测量系统收、发天馈系统之间的幅相特性不一致时的极化测量误差模型，也只是为了说明进行散射矩阵修正时能量约束的必要性. 在没有其它关于极化测量过程先验知识的情况下，Cameron 修正法是最优的修正方法[6]，Frobenius 范数修正法则是能量约束条件下的局部最优修正方法[7]. 如果获得更多的先验知识，并加以充分利用，有可能找到更有效的修正方法. 本文正是在这一思想的指导下，提出一种基于最小变质准则的散射矩阵修正方法. 其核心思想是，从极化测量误差模型出发，在 $C_{rec}^{2\times2}$ 中寻找一个点，满足最小变质准则，即收、发天馈系统的极化基一致性最好，同时又满足能量约束，以此作为真实散射矩阵的估计.

2　极化散射测量系统模型

在单静态条件下，线性雷达目标在特定观测状态下的相干极化散射特性可以用一个 2 阶复数矩阵予以完全地表征，这个复矩阵称为目标的 Sinclair 极化散射矩阵，它充分地描述

收稿日期：2000-12-19；修回日期：2001-07-10
基金项目：国家自然科学基金(No. 69902010)；国防科技重点实验室基金

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了目标作为极化变换器的变极化效应[8]. 根据互易原理可知,在均匀、各向同性的传播介质中,线性目标的极化散射矩阵是一个对称矩阵[1]. 然而目标极化散射测量实验表明[3,4],通常情况下目标的实测极化散射矩阵都是非对称的,这意味着目标的互易性在测量过程中受到了破坏. 究其原因,主要有以下几个影响因素:首先,一般情况下的散射测量都是在准远场条件下进行的,这时目标处的入射波和接收天线处的散射波都不能视为严格的平面波;其次,大多数测量系统采用收发隔离天线,难以保证严格的单站条件;再次,由于极化散射矩阵测量系统的两个正交极化通道之间、以及收、发天馈系统之间的幅相特性很难做到完全一致,即使经过校准以后,仍会引入不容忽视的幅相误差,特别是在高频和宽带测量条件下,测量系统的幅相误差的影响变得尤为突出.

对于大多数极化散射测量系统,特别是微波暗室测量系统,通常都采用收发隔离体制,这对天线系统的极化正交性以及收、发天馈系统之间的极化一致性提出了很高的要求,换言之,在发射或接收过程中,不但要求两个正交极化天线具有很好的极化隔离度,同时还要求收、发正交极化天线之间具有良好的一致性. 但是在实际情况中,这两个条件通常是难以得到严格满足的[1,4].

假设待测目标在给定观测条件下的散射矩阵为 $S(HV)$,其为在水平、垂直极化基 (h, v) 上测量得到. 设实际测量系统的一对发射正交极化矢量为 h_{t1} 和 h_{t2},它们与真实的水平、垂直极化基 h、v 之间的过渡关系为

$$(h_{t1}, h_{t2}) = (h, v)U_t$$

其中 U_t 为一个满秩复阵. 若假设 h_{t1} 与 h_{t2} 之间的正交程度足够好,且均具有单位增益,那么 U_t 近似地为一个酉矩阵,特别地,当 $U_t = I_2$ 时(I_2 为 2 阶单位阵),h_{t1} 和 h_{t2} 就成为 h 和 v. 类似地,假设接收天线系统的一对正交极化矢量为 h_{r1} 和 h_{r2},其满足

$$(h_{r1}, h_{r2}) = (h, v)U_r$$

其中 U_r 为酉矩阵.

在实际的极化测量系统中,收、发天馈系统之间的幅相特性很难做到完全一致,特别是在高频和宽带测量条件下,这种不一致性程度尤为严重. 这就意味着,在目标极化散射矩阵的真实测量过程中,收、发天馈系统所用的极化基通常是不同的,换言之,即 $U_t \neq U_r \neq I_2$. 根据散射矩阵的测量方程[9],不难写出实测目标散射矩阵为

$$S = [h_{r1} \quad h_{r2}]^T S(HV)[h_{t1} \quad h_{t2}] = U_r^T S(HV) U_t \tag{1}$$

由此式可以看出,尽管 $S(HV)$ 是一个对称矩阵,但是由于收、发天馈系统所用极化基的不一致性,使得实测的散射矩阵 S 变为非对称的,也就是说破坏了目标的互易性.

3 目标互易性的最小变质修正法

3.1 最小变质修正法的物理涵义

前已述及,在目标散射矩阵的真实测量过程中,通常 $U_r \neq U_t \neq I_2$. 如果 $U_r = U_t = I_2$,则意味着测量条件为理想情况,即互易性没有遭到破坏,此时当然也用不着修正. 根据矩阵空间理论[10],Frobenius 范数 $\|U_i - I_2\|_F$ 表征了 $U_i(i = r, t)$ 与 I_2 的距离,即反映了酉变换矩阵对于单位矩阵的偏离程度,因而可以用来衡量收、发天馈系统的变质程度. $\|U_i - I_2\|_F$ 的值越大,则意味着变质程度越大. 在进行目标互易性修正时,除了已知 $S(HV)$ 的对称性以外,对于 $U_i(i = r, t)$ 通常并无任何先验知识,因此在修正过程中,我们将采用如下的最小变质准则.

设目标的修正散射矩阵为 $\hat{S}$,则目标互易性的最小变质修正法可以用如下的一个带约束最优化问题来描述:

$$\min\ g = \|U_r - I_2\|_F^2 + \|U_t - I_2\|_F^2 \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} S = U_r^T \hat{S} U_t \\ \hat{S}^T = \hat{S} \\ U_r^H U_r = I_2 \\ U_t^H U_t = I_2 \end{cases}$$

由式(2)可看出,最小变质修正法的物理涵义即为:在酉矩阵空间寻找两个酉变基矩阵 U_t 和 U_r,以在对称复矩阵空间中得到一个满足实际测量方程(1),且使 $g = \|U_r - I_2\|_F^2 + \|U_t - I_2\|_F^2$ 达到最小的散射矩阵 $\hat{S}$,从而使 $\hat{S}$ 到 S 的"变质"程度最小. 由约束条件 $S = U_r^T \hat{S} U_t$ 可知 $\hat{S}$ 满足 Frobenius 能量约束,即 $\|\hat{S}\|_F = \|S\|_F$.

3.2 最小变质修正法的解法

用 ρ_t 和 ρ_r 分别表征 U_t 和 U_r[9],即:

$$U_t = \frac{1}{\sqrt{1+|\rho_t|^2}}\begin{bmatrix} 1 & -\rho_t^* \\ \rho_t & 1 \end{bmatrix} \tag{3a}$$

$$U_r = \frac{1}{\sqrt{1+|\rho_r|^2}}\begin{bmatrix} 1 & -\rho_r^* \\ \rho_r & 1 \end{bmatrix} \tag{3b}$$

则有:

$$\begin{aligned} g &= \|U_t - I_2\|_F^2 + \|U_r - I_2\|_F^2 \\ &= 8 - \frac{4}{\sqrt{1+|\rho_t|^2}} - \frac{4}{\sqrt{1+|\rho_r|^2}} \end{aligned}$$

记 $\rho_t = \mathrm{Re}\rho_t + j\mathrm{Im}\rho_t$, $\rho_r = \mathrm{Re}\rho_r + j\mathrm{Im}\rho_r$, g 可写为

$$g = 8 - \frac{4}{\sqrt{1+\mathrm{Re}^2\rho_r + \mathrm{Im}^2\rho_r}} - \frac{4}{\sqrt{1+\mathrm{Re}^2\rho_t + \mathrm{Im}^2\rho_t}} \tag{4}$$

由 $S = U_r^T \hat{S} U_t$ 可得:

$$\hat{S} = (U_r^T)^H S U_t^H \tag{5}$$

其中:

$$(U_r^T)^H = \frac{1}{\sqrt{1+|\rho_r|^2}}\begin{bmatrix} 1 & -\rho_r \\ \rho_r^* & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_t^H = \frac{1}{\sqrt{1+|\rho_t|^2}}\begin{bmatrix} 1 & \rho_t^* \\ -\rho_t & 1 \end{bmatrix}$$

实测得到的变质极化散射矩阵和目标互易性修正散射矩阵分别记为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Re}s_{11} + j\mathrm{Im}s_{11} & \mathrm{Re}s_{12} + j\mathrm{Im}s_{12} \\ \mathrm{Re}s_{21} + j\mathrm{Im}s_{21} & \mathrm{Re}s_{22} + j\mathrm{Im}s_{22} \end{bmatrix}$$

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} \hat{s}_{11} & \hat{s}_{12} \\ \hat{s}_{21} & \hat{s}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Re}\hat{s}_{11} + j\mathrm{Im}\hat{s}_{11} & \mathrm{Re}\hat{s}_{12} + j\mathrm{Im}\hat{s}_{12} \\ \mathrm{Re}\hat{s}_{21} + j\mathrm{Im}\hat{s}_{21} & \mathrm{Re}\hat{s}_{22} + j\mathrm{Im}\hat{s}_{22} \end{bmatrix}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

注意到目标互易性修正散射矩阵 $\hat{S}$ 应为对称矩阵,即应有 $\hat{s}_{12}=\hat{s}_{21}$. 将 S 和 $\hat{S}$ 的表达式代入式(5)可得:

$$\begin{bmatrix}\hat{s}_{11} & \hat{s}_{12}\\ \hat{s}_{21} & \hat{s}_{22}\end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{1+|\rho_r|^2}\sqrt{1+|\rho_t|^2}}\begin{bmatrix}1 & -\rho_r\\ \rho_r^* & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s_{11} & s_{12}\\ s_{21} & s_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & \rho_t^*\\ -\rho_t & 1\end{bmatrix}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{1+|\rho_r|^2}\sqrt{1+|\rho_t|^2}}\cdot\begin{bmatrix}s_{11}-\rho_r s_{21}-\rho_t s_{21}+\rho_t\rho_r s_{22} & \rho_t^* s_{11}-\rho_t^*\rho_r s_{21}+s_{12}-\rho_r s_{22}\\ \rho_r^* s_{11}+s_{21}-\rho_t\rho_r^* s_{12}-\rho_r s_{22} & \rho_t^*\rho_r^* s_{11}+\rho_t^* s_{21}+\rho_r^* s_{12}+s_{22}\end{bmatrix}\tag{6}$$

由 $\hat{s}_{12}=\hat{s}_{21}$,得:

$$\rho_t^* s_{11}-\rho_t^*\rho_r s_{21}+s_{12}-\rho_r s_{22}=\rho_r^* s_{11}+s_{21}-\rho_t\rho_r^* s_{12}-\rho_t s_{22}\tag{7}$$

视 $\mathrm{Re}\rho_t$、$\mathrm{Im}\rho_t$ 为变量,$\mathrm{Re}\rho_r$、$\mathrm{Im}\rho_r$ 为参量,由式(7)的实部和虚部相等可得关于 $\mathrm{Re}\rho_t$、$\mathrm{Im}\rho_t$ 的两个方程,联立解之可得:

$$\begin{cases}\mathrm{Re}\rho_t=\dfrac{e(a-c)-f(d+b)}{(a+c)(a-c)-(d+b)(d-b)}\\[2ex] \mathrm{Im}\rho_t=\dfrac{f(a+c)-e(d-b)}{(a+c)(a-c)-(d+b)(d-b)}\end{cases}\tag{8}$$

其中:

$$\begin{cases}a=\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Re}s_{12}+\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Im}s_{12}+\mathrm{Re}s_{22}\\ b=\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Re}s_{12}-\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Im}s_{12}-\mathrm{Im}s_{22}\\ c=\mathrm{Re}s_{11}-\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Re}s_{21}+\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Im}s_{21}\\ d=\mathrm{Im}s_{11}-\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Re}s_{21}-\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Im}s_{21}\\ e=\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Re}s_{11}+\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Im}s_{11}+\mathrm{Re}s_{21}-\mathrm{Re}s_{12}+\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Re}s_{22}-\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Im}s_{22}\\ f=\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Im}s_{11}-\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Re}s_{11}+\mathrm{Im}s_{21}-\mathrm{Im}s_{12}+\mathrm{Re}\rho_r\mathrm{Im}s_{22}+\mathrm{Im}\rho_r\mathrm{Re}s_{22}\end{cases}\tag{9}$$

将式(8)代入式(4),g 为关于 $\mathrm{Re}\rho_r$ 和 $\mathrm{Im}\rho_r$ 的二元函数,记为 $F(\mathrm{Re}\rho_r,\mathrm{Im}\rho_r)$,最优化问题式(2)转化为:

$$\min\ g=F(\mathrm{Re}\rho_r,\mathrm{Im}\rho_r)\tag{10}$$

这是一个二维无约束非线性最优化问题. 二维无约束非线性最优化问题有多种解法,在本文的仿真实验中采用的是单纯形法[11]. 单纯形法是一种直接方法,不需要求解梯度. 在二维空间中,单纯形是一个三角形,搜索的每一步产生一个新的点在单纯形内或附近,计算目标函数在这个点上的值并和单纯形顶点上的值比较,通常,单纯形上的某个顶点将被这个新点代替,产生一个新的单纯形. 重复这个步骤直到单纯形的直径小于指定误差.

由式(10)可得 $\mathrm{Re}\hat{\rho}_r$、$\mathrm{Im}\hat{\rho}_r$,代入式(8)可得 $\mathrm{Re}\hat{\rho}_t$、$\mathrm{Im}\hat{\rho}_t$,由此即得 $\hat{\rho}_t=\mathrm{Re}\hat{\rho}_t+\mathrm{Im}\hat{\rho}_t$ 和 $\hat{\rho}_r=\mathrm{Re}\hat{\rho}_r+\mathrm{Im}\hat{\rho}_r$;再把 $\hat{\rho}_t$、$\hat{\rho}_r$ 分别代入式(3a)和式(3b)得 $\hat{U}_t$、$\hat{U}_r$,由 $\hat{U}_t$、$\hat{U}_r$ 及式(5)即得最小变质修正散射矩阵 $\hat{S}$.

4　实验结果及结语

针对因收、发天馈系统极化基不一致而造成的散射矩阵变质情况,文中进行了目标互易性修正的计算机仿真实验,对变质散射矩阵分别采用最小变质法和 Cameron 平均法进行修正,并比较它们的修正性能.

在实验中,首先产生一个真实散射矩阵 S_0,然后按照式(1)对其做变基处理,从而得到实测的变质散射矩阵 S,再分别对 S 做最小变质法修正和 Cameron 平均法修正,得到 $\hat{S}$ 和 S_C. 定义

$$\xi=PSD(P_C,P_0)-PSD(\hat{P},P_0),$$
$$\gamma=\|S_C-S_0\|_F-\|\hat{S}-S_0\|_F$$

其中 P_0、P_C、$\hat{P}$ 分别为 S_0、S_C、$\hat{S}$ 的最大特征极化[9],PSD 为两个极化间的极化状态距离[2]. 显然,ξ 反映了两种修正法修正散射矩阵的最大特征极化与真实散射矩阵的最大特征极化的接近程度:ξ 越接近于 0,说明两种修正法性能越接近;$\xi<0$,则表明 Cameron 修正散射矩阵的最大特征极化与真实散射矩阵的最大特征极化更接近;反之,若 $\xi>0$,则表明最小变质修正散射矩阵的最大特征极化与真实散射矩阵的最大特征极化更接近. γ 则可以用来衡量 $\hat{S}$ 和 S_C 与真值 S_0 的接近程度:γ 越接近于 0,说明两种修正法性能越接近;若 $\gamma<0$,则表明 Cameron 修正散射矩阵更接近于真实值;若 $\gamma>0$,则表明最小变质修正散射矩阵更接近于真实值.

表 1 给出了部分计算机仿真实验结果. 其中 ρ_t 和 ρ_r 分别为 U_t、U_r 的表征参量. 通常情况下,应当有 $|\rho|\ll 1$,这意味着收、发天馈系统的极化基与水平、垂直极化基的偏离程度不是很大,换言之,即收、发天馈系统的极化纯度不是很低. 此外,表 1 中参数 ξ、γ、$\hat{\rho}_t$ 和 $\hat{\rho}_r$ 均为经 5000 次实验得到的统计平均值,而 $N\xi$、$N\gamma$ 分别为 ξ、γ 大于 0 的次数,$N\xi\%$、$N\gamma\%$ 则为 $N\xi$、$N\gamma$ 除以 5000 的结果. 由前面的定义不难得知 $N\xi\%$、$N\gamma\%$ 大于 50 %或小于 50 %所代表的含义.

由实验结果可见,在选取的这几组 ρ_t、ρ_r 中,最小变质修正法的性能似乎更为优良一些,尤其是从 γ 和 $N\gamma\%$ 两个指标来看;同时,最小变质修正法在修正的同时还得到了表征收、发天馈系统的重要参量 $\hat{\rho}_t$ 和 $\hat{\rho}_r$. 当然,这里选取的几组 ρ_t、ρ_r 并不代表普遍的情况,在更普遍的情况下考察散射矩阵修正法的性能是一个值得研究的问题;另外,如何定义衡量修正方法性能优劣的指标或者在不同的场合选取不同的指标也是一个需要认真考虑的问题.

表 1　散射矩阵修正性能比较结果

ρ_t	0.1	0.1	0.1 + 0.1 j	0.1 j	0.3	0.01
ρ_r	0.01	- 0.1	- 0.1 + 0.1 j	- 0.1	0.1 + 0.2 j	- 0.3
ξ	- 0.0002	- 0.0011	0.0057	0.0107	- 0.0029	- 0.0043
$N\xi\%$	37.24 %	64.90 %	60.50 %	40.27 %	20.20 %	19.23 %
γ	0.0001	- 0.0036	0.0779	0.0258	0.0158	0.0059
$N\gamma\%$	65.40 %	53.03 %	87.87 %	51.20 %	40.27 %	85.10 %
$\hat{\rho}_t$	0.0442 + 0.0001 j	0.0975 + 0.0002 j	0.0964 + 0.0248 j	0.0429 + 0.0442 j	0.0968 - 0.0223 j	0.1473 + 0.0004 j
$\hat{\rho}_r$	- 0.0442 + 0.0002 j	- 0.0974 - 0.0002 j	- 0.0965 + 0.0264 j	- 0.05488 - 0.0292 j	- 0.0938 + 0.0475 j	- 0.1482 + 0.0006 j

随着极化信息在现代雷达技术领域中的应用日益深入广泛,雷达目标极化特性的研究已经受到国内外学术界的普遍重视,作为目标极化特性研究的信息获取手段和理论验证工具,目标极化散射矩阵精确测量技术也成为一个研究热点. 在目标极化散射矩阵测量过程中,对于大多数待测目标而言,散射矩阵的对称性是极为重要的先验信息,因而目标互易性修正就成为测量校准过程的一个不可或缺的重要环节.

本文提出了基于模型的互易性修正的最小变质修正法. 同目标互易性修正的最优算法 —Cameron 平均法相比,最小变

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

质修正法在某些性能指标上具有更为优良的性能. 同时,最小变质修正法从极化测量模型出发,物理涵义非常明显,这也为散射矩阵的互易性修正问题开辟了一条新的思路. 应该指出,本文中的极化测量误差模型主要是考虑了极化测量系统中收、发天馈系统之间的幅相特性不一致的情况,因而不可避免地具有一定的局限性. 在实际的极化散射矩阵测量过程中,导致目标互易性受到破坏的因素很多、也很复杂,往往难以用统一的模型来描述,这就需要针对不同的情况具体分析散射矩阵的变质原因,建立相应的数学模型,进而得到有效的修正算法.

参考文献:

[1] [美]H Mott 著,林昌禄等译. 天线和雷达中的极化 [M]. 成都:电子科技大学出版社,1989.

[2] 肖顺平. 宽带雷达极化目标识别的理论与应用 [D]. 博士学位论文. 长沙:国防科技大学研究生院,1995.

[3] WL Cameron,L KLeung. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition [A]. Rec. of 1990 Inter. Conf. on Radar [C],1990:549 - 557.

[4] W Wiesbeck,S Rigger. A complete error model for free space polarimetric measurements [J]. IEEE Trans., 1991, AP-39 (8): 1105 - 1111.

[5] 肖顺平,郭桂蓉,庄钊文,王雪松. 基于本征极化的雷达目标识别 [J]. 国防科技大学学报,1995(4):43 - 50.

[6] 王雪松,肖顺平,庄钊文. 论目标互易性 Cameron 修正法的最优性 [J]. 电子学报,1999,27(6):33 - 35.

[7] 王雪松,李永祯,徐振海,肖顺平. 雷达目标互易性的 Frobenius 范数修正法 [J]. 电子学报,2000,28(3):30 - 42.

[8] Sinclair G. The transmission and reception of elliptically polarized waves [J]. Proc. IRE,1950,38(2).

[9] A B Kostinski,W M Boerner. On foundations of radar polarimetry [J]. IEEE Trans.,1986,AP-34(12):1395 - 1404.

[10] 王朝瑞,史荣昌. 矩阵分析 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1989.

[11] Lagarias J C,et al. Convergence properties of the Nelder-Mead Simplex algorithm in low dimensions [J]. SIAM Journal of Optimization,1997.

作者简介:

曾勇虎　男. 1972 年 12 月生于江西赣州. 分别于 1994 年、1997 年在国防科技大学电子工程学院获学士学位和硕士学位,1997 年至 2000 年在酒泉卫星发射中心任职工程师,现为国防科技大学博士研究生. 已在国际、国内期刊及会议上发表论文近 20 篇. 研究兴趣为:雷达信号处理、极化信息处理和综合电子战等.

王雪松　男. 1972 年 10 月生于内蒙古包头. 1994 年毕业于国防科技大学电子技术系,1999 年 6 月于国防科技大学获博士学位,博士学位论文被评为 2000 年度"全国百篇优秀博士学位论文". 已在国际、国内期刊及会议上发表论文 50 余篇,获部委级科技进步二、三等奖各 1 项. 研究兴趣为:雷达极化信息处理、目标检测与识别和综合电子战等.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net