

基于 Pauli 基分解的极化校准算法

何密¹, 李永祯¹, 王雪松¹, 肖顺平¹, 李志坚²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 南京电子设备研究所, 南京 210007)

摘要: 极化校准是现代雷达精确获取目标极化散射特性的前提和基础。为解决某全极化雷达的校准问题, 提出一种基于 Pauli 基分解的极化校准算法, 给出了算法的正交条件和相关推导, 可选择任意满足正交条件的三个目标做为定标体。对校准算法的误差来源和误差对校准结果的影响分别进行了理论分析和仿真分析。给出了不同条件下该校准算法和其它校准算法的仿真结果, 以及某全极化雷达校准试验数据分析结果。结果表明: 基于 Pauli 基分解的极化校准算法能有效消除天线的变极化效应, 可更准确地校准目标的极化散射矩阵, 并可应用于大型地基极化雷达、极化合成孔径雷达以及极化相控阵雷达等的极化校准。

关键词: 极化校准; 极化散射矩阵; 定标体; Pauli 基分解

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2011)12-2589-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.12.018

A Polarimetric Calibration Algorithm Based on Pauli-Basis Decomposition

HE Mi¹, LI Yong-zhen¹, WANG Xue-song¹, XIAO Shun-ping¹, LI Zhi-jian²

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanjing Electronic Equipment Institution, Nanjing 210007, China)

Abstract: Polarimetric calibration is a precondition and a basis to accurately acquire polarimetric scattering characteristics of targets for modern radars. To solve polarimetric calibration problem for some full polarimetric radar, a polarimetric calibration algorithm based on Pauli-basis decomposition is proposed in this paper. The orthogonal condition and the correlative derivation of the proposed algorithm are deduced. Any three targets satisfying the orthogonal condition can be chosen as calibrators. The error sources of calibration algorithms and the effect of these sources on the calibrated results are analyzed by using both theory and simulation respectively. Simulation results under different conditions, the comparison with some other calibration algorithms, and the calibration results of the experimental data of some full polarimetric radar are presented. The results show that the proposed algorithm based on Pauli-basis decomposition can remove the depolarization effect of antennas and calibrate scattering matrixes of targets more accurately than some other algorithms. The proposed method can be used in the polarimetric calibration of huge ground-based polarimetric radars, polarimetric synthetic aperture radars and polarimetric phased array radars.

Key words: Polarimetric calibration; Polarization scattering matrix; Calibrator; Pauli-basis decomposition

0 引言

目标极化散射特性的准确获取是目标极化检测、分类识别、极化抗干扰等应用的前提和基础。随着极化雷达系统的广泛应用^[1-6]以及对目标极化散射特

性获取误差来源的不断深入研究,极化校准已成为近年来广大学者和工程技术人员关注的热点问题。然而国内外现有的某些极化雷达(如荷兰的 TARA 极化气象雷达^[5]、我国的大型地基极化雷达 LM- $\times\times$ 等)尚未实现真正意义上的极化校准,因此研究雷达极化

收稿日期:2011-05-03; 修回日期:2011-07-27

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60736006);国家自然科学基金青年科学基金项目(60802078);湖南省优秀研究生创新资助项目(B090405)

校准技术具有重要的现实和工程意义。

雷达的极化校准包括内部校准和外部校准^[7-8]两个步骤。在进行外部校准之前,雷达系统应先通过内部校准使得发射信号幅度和相位不随发射频率变化、雷达系统性能稳定,并标定雷达各射频链路在频带内的增益和相位。内校准技术可通过向雷达链路中注入定标信号来校准,比较容易实现。然而实际雷达天线存在变极化效应,会使得各极化通道增益不平衡、产生交叉极化串扰等误差,必须通过外部校准(如放置定标体)来修正天线引入的误差。

20 世纪 80 年代末 90 年代初国外学者开始研究极化雷达的校准算法。美国麻省理工学院林肯实验室的 R. M. Barnes 等人于 1986 年首次提出了用内场反射器来校准极化雷达的方法^[9];K. Sarabandi 于 1990 提出高极化隔离度校准技术^[10],假设雷达天线收发共用,当测量系统的极化隔离度大于 -25dB 时,简化发射、接收失真矩阵;为了减小定标体摆放位置引入的误差,K. Sarabandi 针对高极化隔离度校准算法的缺点于 1990 年提出单目标校准技术^[11];Tzong-Jyh Chen 于 1997 年提出改进的三目标校准算法^[12];为了克服定标体摆放位置引入的校准误差,Christine 等人于 1994 年^[13],J. R. J. Gau 等人于 1995 年^[14]分别提出单二面角校准技术。2004 年,B. M. Welsh 等人提出了全极化校准技术^[15]。以上的算法仅适用于天线收发共用的情形,然而实际雷达系统的发射天线和接收天线有可能是分开的。为此 Whitt 等人于 1991 年提出广义极化校准算法^[16]可用于校准收发天线分置的情形,算法中采用三个定标体,用特征分解的方法求解失真矩阵,但该算法对定标体散射矩阵要求高,常用的定标体,如二面角、三面角不满足条件,因而该算法实用性不大;X. Fabregas 等人于 1995 年提出目标旋量校准算法(TSC)^[17],也可用于收发天线分置的情形,文献中给出了微波暗室实验的处理结果,然而外场试验、对于定标体旋转角度引入误差以及相应的算法性能分析未见报道。以上算法中用到的定标体通常为金属球、三面角、0°二面角和 45°二面角等具有特殊散射矩阵形式的情形,用以简化算法推出显式表达式。然而在实际外场实验中,由于受条件限制(如雷达机械性能引入发射极化角度改变等),通常难以得到 0°二面角和 45°二面角的定标体;为了

保证较高信杂比,要求定标体尺寸足够大,然而限于现有机械加工技术水平,满足条件的大尺寸金属球难以获得。

鉴于以上原因,本文提出一种基于 Pauli 基分解的极化校准算法,给出算法正交条件和相关推导,可选择任意三个满足正交条件的目标作为定标体,包括能够产生较大雷达散射截面(RCS)的有源定标体,分析了校准算法的误差来源及其在不同条件下算法的性能,使其能够更加广泛地适用于各种实际雷达的极化校准实验。最后通过仿真实验和外场实测数据验证了所提出算法的有效性。

文章结构如下:第 2 节简要分析极化散射矩阵测量误差模型,第 3 节介绍正交条件和基于 Pauli 基分解的极化校准算法,第 4 节给出在不同信噪比、不同误差角度、不同交叉极化电平下基于 Pauli 基分解的极化校准的性能仿真分析和外场实测数据校准结果,第 5 节给出全文总结。

1 极化测量误差模型

假设极化雷达的内部系统误差已由内部校准消除,雷达发射信号在工作带宽内的幅度和相位随频率近似线性变化,雷达能够稳定地工作。由于天线极化隔离度不理想和变极化作用引入的交叉极化串扰和极化增益失衡,需进一步通过外部定标体来校准雷达系统。完备的极化散射矩阵测量误差模型^[15]可以表示为:

$$\mathbf{S}^m = \mathbf{G} \odot [\mathbf{RST}] + \mathbf{I} \quad (1)$$

其中:

\mathbf{S} 是在后向散射约定下目标的极化散射矩阵;

\mathbf{S}^m 是在后向散射约定下实际测量的目标极化散射矩阵;

\mathbf{G} 是极化雷达接收通道增益矩阵;

\mathbf{T} 是包括发射天线交叉极化串扰的失真矩阵;

\mathbf{R} 是包括接收天线交叉极化串扰的失真矩阵;

\mathbf{I} 是包括测量噪声、杂波的误差矩阵;

\odot 表示 Hadamard 积(或点积)运算。

测量噪声误差可通过数据平均、杂波可以通过背景矢量相减技术或距离多普勒域滤波部分消除^[4,14],因此上述测量误差模型可以简化为:

$$\mathbf{S}^m = \mathbf{G} \odot [\mathbf{RST}] \quad (2)$$

雷达极化学中,人们通常关心的是目标的相对

极化散射矩阵^[18],因此下文讨论的极化校准主要是针对相对极化散射矩阵。金属球的理论相对极化散射矩阵为二阶单位矩阵,不随入射波角度改变。入射波沿三面角对称轴入射时,三面角的理论相对极化散射矩阵也为二阶单位矩阵,且对入射波角度改变有较强稳健性。旋转角 θ° 二面角的理论相对极化散射矩阵为^[13]: $S_{d,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & -\tan(2\theta^\circ) \\ -\tan(2\theta^\circ) & -1 \end{bmatrix}$ 。

由于外场试验中二面角的旋转角不能完全精确控制,存在较小的误差,设误差角为 α° ,则实际测量 θ° 二面角真实的相对散射矩阵为: $\hat{S}_{d,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & -\tan(2(\theta^\circ + \alpha^\circ)) \\ -\tan(2(\theta^\circ + \alpha^\circ)) & -1 \end{bmatrix}$ 。目前

常用的有源定标体是转发器(又称为有源极化雷达校准器,PARC)^[6-8],由高增益放大器联接两个正交线性极化喇叭天线(接收天线和发射天线)以及内部延迟线构成,具有较大 RCS 值和较宽的波束宽度,通过旋转极化喇叭天线,可以获取任意极化散射矩阵。当接收、发射喇叭天线水平极化与来波水平极化的极化夹角为 θ° 时,定义 θ° 转发器的理论相对散射矩阵值为: $S_{T,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \tan(\theta^\circ) \\ \tan(\theta^\circ) & \tan^2(\theta^\circ) \end{bmatrix}$ 。特殊

地,当极化夹角为 45° 时, 45° 转发器的理论相对散射矩阵值为: $S_{T,45} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。设转发器的旋转误差角为 β° ,则实际测量中 θ° 转发器真实的相对散射矩阵为: $\hat{S}_{T,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \tan(\theta^\circ + \beta^\circ) \\ \tan(\theta^\circ + \beta^\circ) & \tan^2(\theta^\circ + \beta^\circ) \end{bmatrix}$ 。

2 基于 Pauli 基分解的极化校准算法

用于目标分解的四个 Pauli 基矩阵^[19]分别为:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, P_4 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}。$$

四个 Pauli 基对应于不同的实际散射机制: P_1 对应于平面一次散射、 P_2 和 P_3 对应于 45° 相对取向的二面角反射器的二次散射、 P_4 对应反对称分量。任意 2×2 复矩阵 A 的 Pauli 分解式为:

$$A = \sum_{i=1}^4 k_i P_i \quad (3)$$

其中, k_i 表示 A 在 Pauli 基 P_i 上的投影,用 Tr 表示

求矩阵迹,则 k_i 可表示为:

$$k_i = \frac{1}{2} \text{Tr}(A \cdot P_i) \quad (4)$$

对于大多数雷达目标而言,其理论后向散射矩阵均满足互易性定理^[19],因此理论后向散射矩阵在 Pauli 基 P_4 上的投影均为 0。于是对大多数雷达目标的理论后向散射矩阵,Pauli 分解的正交基为: P_1 、 P_2 、 P_3 。记目标理论相对散射矩阵 S_j 在正交基上的投影矢量为:

$$k_j = (k_{1j}, k_{2j}, k_{3j})^T \quad (5)$$

其中 T 表示转置。目标实际测量的相对散射矩阵不一定满足互易性定理,因此需要在四个 Pauli 基上进行分解。记目标实际测量的相对散射矩阵 S_j^m 在四个 Pauli 基上的投影矢量为:

$$k_j^m = (k_{1j}^m, k_{2j}^m, k_{3j}^m, k_{4j}^m)^T \quad (6)$$

若三个目标的投影矢量线性无关,则称这三个目标满足正交条件,均可选作定标体。记矩阵 $K = [k_1, k_2, k_3]$,矩阵 $K^m = [k_1^m, k_2^m, k_3^m]$,其中 k_j 表示第 j 个定标体的理论相对散射矩阵 S_j 在正交基上的投影矢量,因此 K 是 3×3 的矩阵, k_j^m 表示定标体实际测量的相对散射矩阵 S_j^m 在四个 Pauli 基上的投影矢量,因此 K^m 是 4×3 的矩阵。 K 与 K^m 满足如下关系:

$$K^m = C \cdot K \quad (7)$$

其中, 4×3 误差矩阵 C 包含失真矩阵 R 、 T 和增益矩阵 G 的全部信息。如果三个定标体满足正交条件,则 K 可逆,于是

$$C = K^m K^{-1} \quad (8)$$

由于任何矩阵右乘可逆矩阵后矩阵的秩不变^[20],列满秩矩阵 K^m 与 K^{-1} 的乘积 C 也是列满秩矩阵,从而矩阵 C 的左伪逆矩阵 L_c 存在^[20]。当定标体为金属球、 0° 二面角、 45° 二面角时, K 为单位矩阵,是本算法的特殊情况^[17]。

设待校准目标实际测量的相对散射矩阵为 S_0^m ,在四个 Pauli 基上的投影矢量为: $k_0^m = (k_{10}^m, k_{20}^m, k_{30}^m, k_{40}^m)^T$,则校准后的投影矢量为:

$$k_0^c = L_c k_0^m \quad (9)$$

根据散射矩阵与投影矢量的关系式(4),从而目标校准后的相对散射矩阵为:

$$S_0^c = \begin{bmatrix} 1 & \frac{k_{30}^c}{k_{10}^c + k_{20}^c} \\ \frac{k_{30}^c}{k_{10}^c + k_{20}^c} & \frac{k_{10}^c - k_{20}^c}{k_{10}^c + k_{20}^c} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 试验设计与结果分析

3.1 仿真试验与结果分析

仿真中任意选择 10°二面角、70°二面角、极化夹角为 45°的转发器做定标体,三者满足正交条件,待校准目标的理论相对散射矩阵为 $S_0 =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.4 \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \\ 0.4 \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} & 0.5 \end{bmatrix}$$

仿真参数设置如下:发射

天线和接收天线的失真矩阵不同,分别为 $T =$

$$\begin{bmatrix} 1 & I_p \cdot e^{-j\frac{\pi}{3}} \\ I_p \cdot e^{j\frac{\pi}{7}} & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & I_p \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \\ I_p \cdot e^{j\frac{\pi}{8}} & 1 \end{bmatrix}, \text{其中}$$

I_p 是交叉极化电平度,增益矩阵 $G = \begin{bmatrix} 1.2 & 0.8 \\ 0.9 & 1.3 \end{bmatrix}$ 。

蒙特卡洛仿真次数为 500 次。为了衡量角度误差等因素对校准算法的影响程度,下面给出幅度和相位的误差指标,定义最大幅度相对误差 e_A 和最大相位误差 e_P 分别为:

$$e_A = \max_{i,j=h \text{ 或 } v} \left(20 \lg \frac{||s_{ij}^c|| - ||s_{ij}^0||}{||s_{ij}^0||} \right) \quad (11)$$

$$e_P = \max_{i,j=h \text{ 或 } v} (|\text{angle}(s_{ij}^c) - \text{angle}(s_{ij}^0)|) \quad (12)$$

其中, s_{ij}^0 是待校准目标的理论相对散射矩阵元素值, s_{ij}^c 是校准后的相对散射矩阵元素值。当最大幅度相对误差小于 -20dB、最大相位误差小于 5°时,通常认为校准结果满足校准要求。

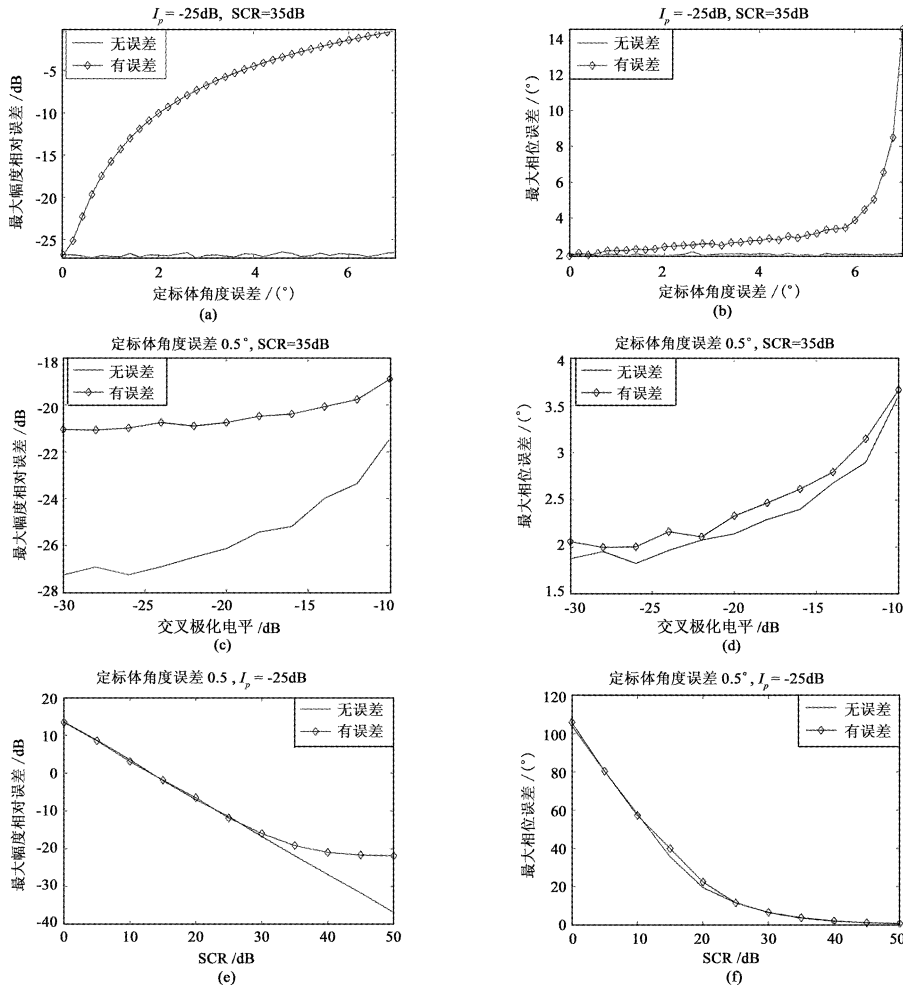


图 1 不同条件下校准算法性能的仿真结果

Fig. 1 Simulation results of the calibration-algorithm capability under different conditions

图 1 分别给出基于 Pauli 基分解的校准算法在不同天线交叉极化电平 (I_p)、不同信杂比 (SCR)、

不同误差角度下的仿真结果,其中“点线”表示存在旋转角度误差的情形,“线”表示不存在旋转角度误差

差的情形。

图 1(a)和(b)分别给出在雷达天线交叉极化电平为 -25dB,SCR 为 35dB 时,旋转角度误差从 0°到 7°变化时的最大幅度相对误差和最大相位误差,从中可以看出随着旋转角度误差的增加, e_A 和 e_P 均增大,当旋转角度误差小于 0.6°时,校准结果能满足要求。

图 1(c)和(d)分别是在 SCR 为 35dB、旋转角度误差 0.5°时,雷达天线交叉极化电平从 -30dB 到 -10dB 变化 e_A 和 e_P 的结果。从中可以看出当极化隔离度变差时, e_A 和 e_P 均变大,当交叉极化电平优于 -13dB 时能满足校准要求。

图 1(e)和(f)分别给出在雷达天线交叉极化电平为 -25dB、旋转角度误差为 0.5°时,SCR 从 0dB 到 50dB 变化 e_A 和 e_P 的结果。随着 SCR 的增加, e_A 和 e_P 减小,当 SCR 大于 35dB 时,校准结果可以满足要求。

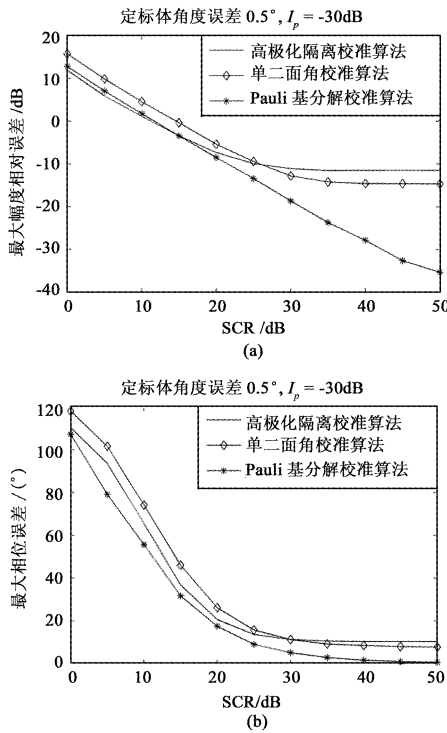


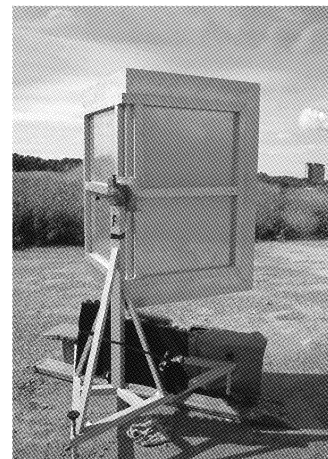
图 2 不同 SCR 下各种校准算法性能比较
Fig. 2 Capability comparison of various calibration algorithms in different SCR

为比较不同校准算法的性能,图 2 选择金属球、0°二面角、45°二面角作定标体,当雷达天线交叉极化电平为 -25dB、旋转角度误差为 0.5°时,SCR 从 0dB 到 50dB 变化(其他仿真条件不变) e_A (图 2

(a))和 e_P (图 2(b))的仿真结果。当 SCR 大于 35dB 时,高极化隔离算法和单二面角算法的最大幅度相对误差和最大相位误差趋于稳定,然而基于 Pauli 基分解的校准算法能继续降低,是因为高极化隔离算法和单二面角算法中假设发射天线交叉极化串扰的失真矩阵等于接收天线交叉极化串扰的失真矩阵的转置,一般对应于收发共天线的情形,然而仿真中发射、接收天线交叉极化串扰的失真矩阵不满足转置相等的条件。从仿真结果可以看出,基于 Pauli 基分解的校准算法较之高极化隔离算法和单二面角算法有更好的校准精度,能够在收发不共天线的情形下进行很好的校准。



(a) 安置在楼顶的 PARSAX 雷达
(a) PARSAX radar set on the roof



(b) 二面角正对 PARSAX 雷达的试验场景
(b) Test scene of one dihedral pointing to PARSAX radar

图 3 PARSAX 雷达外场校准试验

Fig. 3 Field calibration test of PARSAX radar

3.2 外场试验与结果分析

针对荷兰代尔夫特理工大学全极化调频连续波雷达 PARSAX (Polarimetric Agile Radar S- And X-

band) 雷达进行了外场实测校准试验(如图 3)。该极化雷达安置在 97 米高的楼顶上,目前工作波段为 S 波段,可同时发射、同时接收极化正交、波形正交的信号对,在一个频率调制周期内获取目标的极化散射矩阵。该极化雷达已经过内部校准,输出信号幅度稳定度为 0.1dB,相位稳定度为 1°。该极化雷达发射和接收天线分置,天线的通道隔离度均小于 -85dB。实验选择在晴朗天气,二面角放置在雷达天线远场的平坦地面上,二面角由三角架支撑,三角架上有可以调整二面角旋转角度的机械装置,三角架正对雷达的一面和附近地面布有吸波材料以进一步减小杂波和多径效应。反复调整雷达天线和二面角的俯仰角,使得雷达天线的主瓣中心轴和二面角的主瓣中心轴在一条直线上(如图 3(b)所示,二面角正对高楼顶上的雷达)。根据需要,将二面角固定在不同的旋转角度上,测量二面角的后向散射矩阵。由于三个不同旋转角度二面角的极化散射矩阵无法满足正交条件,因此

需要再测量包含 P_1 基分量的定标体(如金属球、三面角、极化夹角为 45°的转发器等)的极化散射矩阵。此次外场极化校准试验选择 45°转发器,转发器安装在 PARSAX 雷达天线远场外的另一座高楼上,转发器内部有延迟线,可将其与周围的环境杂波区分开。为减小运动杂波的影响,在散射矩阵的求解过程中应考虑在距离-多普勒谱上滤波;为减小测量噪声的影响,散射矩阵应多次测量取平均值,具体的信号处理过程参见文献[3-4]。

由于 PARSAX 全极化气象雷达固有的机械特性,当雷达天线的主瓣中心轴对准二面角的主瓣中心轴时,雷达发射的水平极化偏离水平面 10.14°。因此当二面角固定在 0°、15°和 60°时,补偿偏离角后实际二面角的旋转角度为 10.14°、25.14°和 70.14°。对每个定标体的相对散射矩阵值发射接收 1500 个周期,然后对每个周期测得的散射矩阵取平均,试验结果如表 1。

表 1 目标相对散射矩阵理论值和测量值

Table 1 Theoretical and measured values of relative scattering matrixes of targets

目标体	相对散射矩阵理论值				相对散射矩阵测量值			
	hh	hv	vh	vv	hh	hv	vh	vv
10.14°二面角	1	0.3695	0.3695	-1	1	-0.0712 + 0.4493j	0.0736 - 0.4172j	0.0727 - 1.0403j
25.14°二面角	1	1.2037	1.2037	-1	1	-0.2586 + 1.3302j	0.1914 - 1.2085j	0.1005 - 1.1486j
70.14°二面角	1	-0.8301	-0.8301	-1	1	0.1422 - 0.8065j	-0.1415 + 0.7280j	0.0874 - 0.9992j
45°转发器	1	1	1	1	1	-0.1802 + 1.2825j	0.1956 - 1.1091j	-0.1195 + 1.1371j

选择旋转角 10.14°和 70.14°的二面角、45°转发器作为定标体,旋转角 25.14°的二面角作为待校准目标。利用表 1 中定标体相对散射矩阵的理论值和测量值,以及待测目标相对散射矩阵的测量值,按照第三节描述的基于 Pauli 基分解的极化校准算法求解可以得到修正后待测目标的相对散射矩阵值为 $\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.2115 + 0.0047j \\ 1.2115 + 0.0047j & -1.0746 - 0.0261j \end{bmatrix}$ 。对比其理论值,校准前最大幅度相对误差为 4.31dB 和最大相位误差为 133.77°,修正后的最大幅度相对误差为 -22.04dB 和最大相位误差为 1.40°,可以看出本文方法能够很好地校准极化雷达,校准结果满足校准要求。

4 结论

针对目标旋量校准方法^[17]中对定标体要求严格的限制,本文提出一种基于 Pauli 基分解的极化校

准算法,可以任意选择三个理论相对散射矩阵满足正交条件的目标作为定标体,并给出了校准算法的理论推导和算法的误差性能分析。通过蒙特卡洛仿真,分析了误差角度、信杂比、雷达天线交叉极化电平对算法校准效果的影响,并与其它校准算法进行了比较。雷达天线交叉极化电平对校准精度影响较小,当 SCR 大于 35dB、误差角度不超过 0.6°时,校准后的相对极化散射矩阵的最大幅度相对误差小于 -20dB 和最大相位误差小于 5°。基于 Pauli 基分解的极化校准算法优于高极化隔离校准算法、单二面角校准算法。用基于 Pauli 基分解的极化校准算法对全极化调频连续波雷达 PARSAX 的外场测试结果进行校准,校准后的相对极化散射矩阵的最大幅度相对误差为 -22.04dB 和最大相位误差为 1.40°,能够满足校准要求。因此,基于 Pauli 基分解的极化校准算法可应用于大型地基极化雷达、极化合成孔径雷达、极化相控阵等的极化校准问题。

致谢:作者何密郑重感谢荷兰代尔夫特理工大学 IRCTR 提供的全极化调频连续波雷达外场校准测试数据以及在荷兰 Delft 理工大学联合培养期间全体工作人员给予的无私帮助。

参 考 文 献

- [1] Keenan T, Glasson K, Cummings F. The BMRC/NCAR C-band polarimetric (C-POL) radar system[J]. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 1998, 15(4): 871 - 886.
- [2] Bringi V N, Chandrasekar V. *Polarimetric doppler weather radar* [M]. Cambridge University Press, 2001.
- [3] Babur G. *Processing of dual-orthogonal CW polarimetric radar signal*[D]. Netherlands: TU Delft, 2009.
- [4] Figueras i Ventura J. *Design of a high resolution X-band Doppler polarimetric weather radar*[D]. Netherlands: TU Delft, 2009.
- [5] Dufournet Y. *Ice crystal properties retrieval*[D]. Netherlands: TU Delft, 2010.
- [6] Titin-Schnaider C, Attia S. Calibration of the MERIC full-polarimetric radar: theory and implementation [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(8): 633 - 640.
- [7] Nutten B, Hauser D, Roux F, et al. The RONSARD radars; internal calibration techniques using coherent and noise sources [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1979, 17(4):288 - 295.
- [8] Hong J, Zang B R, Wang H Q. The progress of the airborne SAR calibration techniques in China[C]. *IGARSS'99, Proceedings 1999 IEEE International*, 1:422 - 424, 1999.
- [9] Barnes R M. *Polarimetric calibration using in-scene reflectors* [R]. MIT, Lincoln Lab., Lexington, MA, 1986.
- [10] Sarabandi K, Ulaby F T, Tassoudji M A. Calibration of polarimetric radar systems with good polarization isolation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1): 70 - 75.
- [11] Sarabandi K, Ulaby F T. A Convenient technique for polarimetric calibration of single antenna radar systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(6): 1022 - 1033.
- [12] Chen T J, Hsiung T. Calibration and measurement of a wideband six-port polarimetric measurement system [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1997, 37(7): 1080 - 1085.
- [13] Unal C M H, Niemeijer R J, van Sinttruyen J S, et al. Calibration of a polarimetric radar using a rotatable dihedral corner reflector[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1994, 32(4): 837 - 845.
- [14] Gau J R J, Burnalde W D. New polarimetric calibration technique using a single calibration dihedral [J]. *IEE Proc of Microwave, Antennas and Propagation*, 1995, 142(1): 19 - 25.
- [15] Welsh B M, Kent B M, Buterbangh A L. Full polarimetric calibration for radar cross-section measurements: performance analysis[J]. *IEEE Trans on AP*, 2004, 52(9):2357 - 2365.
- [16] Whitt M W, Ulaby F T, Polatin P, et al. A general polarimetric radar calibration technique[J]. *IEEE Trans. on AP Antenna and Propagation*, 1991, 39(1):62 - 67.
- [17] Fabregas X, Romeu J, Broquetas A, et al. Target spinor calibration (TSC) for polarimetric radar cross-section measurements[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(19):1694 - 1695.
- [18] 庄钊文,肖顺平,王雪松. *雷达极化信息处理及其应用*[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [19] Cameron W L, Leung L K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition [C]. *IEEE International Radar Conference*, Arlington, VA, May 7 - 10, 1990.
- [20] 张贤达. *矩阵分析与应用*[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

作者简介:何密(1982 -),女,博士生,主要从事雷达极化信号处理,极化校准,天线空域极化特性,极化杂波抑制方面的研究。

通信地址:长沙国防科技大学四院一所感知室(410073)

电话:(0731)84573487

E-mail:hmcherry@126.com

(编辑:余 未)