

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104991

# 矢量网络分析仪极化特征参数测量校准方法研究\*

李秀娟<sup>1</sup> 刘永信<sup>2</sup> 黄平平<sup>3,4</sup> 苏耘<sup>3,4</sup>

(1. 内蒙古大学计算机学院 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学电子信息工程学院 呼和浩特 010021;

3. 内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010501; 4. 内蒙古自治区雷达技术与应用重点实验室 呼和浩特 010501)

**摘要:** 矢量网络分析仪的初始相位具有随机性, 利用其对极化特征参数  $H/\bar{\alpha}$  进行测量时会出现较大误差。本文提出了一种利用矢量网络分析仪进行全极化散射矩阵测量及校准, 准确获取极化特征参数  $H/\bar{\alpha}$  的方法。首先构建了全极化散射矩阵测量系统, 然后利用圆盘,  $0^\circ$  二面角和  $22.5^\circ$  二面角对测得的极化散射矩阵进行校准, 消除了矢量网络分析仪初始相位随机性带来的误差, 实现了极化特征参数  $H/\bar{\alpha}$  的准确测量。在微波暗室内对金属平板进行了实验验证, 结果表明, 通过极化校准得到的散射角  $\bar{\alpha}$  与理论值相比误差小于  $3^\circ$ , 说明了该方法通过测量和校准极化散射矩阵的幅度和相位, 能够准确地获得目标的极化特征参数  $H/\bar{\alpha}$ 。

**关键词:** 矢量网络分析仪; 极化特征参数; 极化散射矩阵; 极化校准

**中图分类号:** TN95; TP3      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.4099

## Full polarization data measurement and calibration method of vector network analyzer

Li Xiujian<sup>1</sup> Liu Yongxin<sup>2</sup> Huang Pingping<sup>3,4</sup> Su Yun<sup>3,4</sup>

(1. College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 4. Inner Mongolia Key Laboratory of Radar Technology and Application, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Due to the randomness of the initial phase of the vector network analyzer, there will be a large error when the polarization characteristic parameter  $H/\bar{\alpha}$  is measured by using it. In this paper, a method of measuring and calibrating the full polarization scattering matrix by using vector network analyzer is proposed to obtain the polarization characteristic parameter  $H/\bar{\alpha}$ . Firstly, the measurement system of the full polarization scattering matrix is constructed, then the polarization scattering matrix is calibrated by the disk,  $0^\circ$  and  $22.5^\circ$  dihedrals. Finally, the error caused by the randomness of the initial phase of the vector network analyzer is eliminated, and the accurate measurement of the polarization characteristic parameter  $H/\bar{\alpha}$  is realized. The results show that the error of the scattering angle  $\bar{\alpha}$  obtained by polarization calibration is less than 3 degrees compared with the theoretical value, which indicates that the polarization characteristic parameter  $H/\bar{\alpha}$  of the target can be accurately obtained by measuring and calibrating the amplitude and phase of the polarization scattering matrix.

**Keywords:** vector network analyzer; polarization characteristic parameters; polarization scattering matrix; polarization calibration

## 0 引言

极化特征参数是基于极化分解技术得到的反映目标

散射电磁波特征参数, 利用这些特征参数可以相对容易地解释电磁波与目标之间的相互作用<sup>[1-2]</sup>, 其中, 对后向散射矩阵进行  $H/\bar{\alpha}$  分解是由 Cloude 和 Pottier 提出的一种解译全极化数据散射机理的目标分解方法<sup>[3]</sup>, 得到

收稿日期: 2021-12-07      Received Date: 2021-12-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52064039)、内蒙古自治区科技创新项目(2019GG138, 2019GG139, 2020GG0073)、内蒙古自治区科技重大专项项目(2019ZD022)资助

的极化熵  $H$  反映了目标散射机理的随机性,而散射角  $\bar{\alpha}$  表征的是散射目标呈现出的散射特性,对散射目标的散射机理进行研究有助于分析目标散射特性,提高全极化数据的分类精度,因而得到广泛应用<sup>[4-8]</sup>。为了更好地开展目标散射特性的研究,在可控的测试环境下开展典型目标微波特性测量实验,可以有效提升微波电磁波与典型目标相互作用机理的认知水平<sup>[9]</sup>,而如何准确获取目标的极化特性信息,并加以有效利用,长期以来一直是雷达探测技术领域备受关注的前沿问题<sup>[10]</sup>。

极化数据的测量有很多种方法<sup>[11-12]</sup>,其中利用矢量网络分析仪的四通道测量功能是一种非常有效快捷的测量方法<sup>[13]</sup>。然而在实际应用中,由于设备限制,对于双端口矢量网络分析仪要实现全极化测量是一个具有挑战性的工作,并且在实际的测量过程中,大多数矢量网络分析仪在进行扫频测量过程中不同频率的初始相位并不相同,导致测量得到极化散射矩阵的相位具有随机性<sup>[14-15]</sup>。因此,利用这些数据进行特征值分解后的  $H/\bar{\alpha}$  参数并不准确,对测量目标散射机理分析以及应用极化参数进行分类等工作造成了很大的影响。

针对上述问题,本文提出了一种利用双端口矢量网络分析仪实现全极化数据测量的系统<sup>[16-18]</sup>,利用圆盘、 $0^\circ$ 二面角和  $22.5^\circ$ 二面角对极化数据进行校准,从而实现极化特征参数的准确测量。首先描述基于双端口矢量网络分析仪的极化散射矩阵扫频测量方法,接下来给出了采用 3 个标准体的极化校准方法,然后利用校准后的极化散射矩阵进行特征值分解得到  $H/\bar{\alpha}$  参数。实验结果表明,双天线测量系统通过三标准体进行极化校准后,可以有效对极化散射矩阵的幅度和相位进行校正,校准后的全极化数据进行特征值分解得到的散射角在  $3^\circ$  以内(理论值为  $0^\circ$ ),具有较高的校准精度,测量的全极化数据满足散射机理研究需求。

## 1 基于双端口矢量网络分析仪的全极化散射矩阵扫频测量方法

高性能矢量网络分析仪具有双通道测量功能,文中提出的具备全极化散射矩阵测量能力的双天线测量系统,是利用矢量网络分析仪的两个主端口:端口 1 和端口 2 进行 1 发 2 收的测量,系统搭建如图 1 所示:端口 1 的输出信号通过功率放大器后连接到天线方向转换器的发射天线上,端口 2 连接到天线方向转换器的接收天线上,通过控制天线方向转换器的方向,测量  $S_{21}$ ,记录矢量网 \* .s2p 数据,得到全极化散射数据,可实现全极化数据测量,具体测量过程如下:

1) 主控计算机通过网线将发射天线和接收天线水平

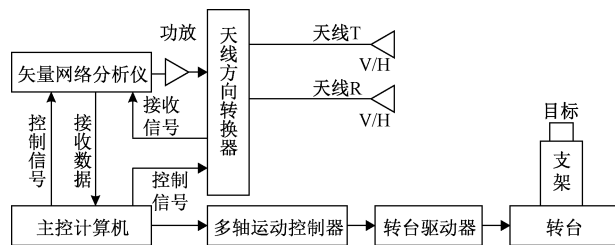


图 1 测量系统图

Fig. 1 Measuring system diagram

归位后,控制转台的转速及采样间隔,转台转动的同时通过触发线给矢量网络分析仪发送触发信号,矢量网络分析仪测量  $S_{21}$ ,得到每个测量角度目标对应 HH 极化后向散射数据;2) 发射天线保持水平方向不变,控制天线方向转换器,使接收天线旋转至垂直方向,按上述方法测量  $S_{21}$ ,得到每个测量角度目标对应的 VH 极化后向散射数据;3) 接收天线保持垂直方向不变,控制天线方向转换器,将发射天线旋转至垂直方向,然后测量  $S_{21}$ ,得到每个测量角度目标对应的 VV 极化后向散射数据;最后将发射天线保持垂直,接收天线旋转至水平方向,测量  $S_{21}$  得到各测量角度目标的 HV 极化后向散射数据。由此,通过上述 4 次测量采集了各测量角度下目标的全极化散射矩阵测量数据。系统在测量中采用频率步进的工作方式,可获取宽频带范围的测量数据。上述测量系统比传统的全极化数据测量方法可以提高效率  $n/4$  倍(其中  $n$  为测量角度数)。对于需要进行多个角度目标全极化散射矩阵的测量任务而言,可以极大的提高测量速度。

## 2 三标准体极化校准算法

在上述测量系统中,利用矢量网络分析仪进行扫频测量时,由于矢量网络分析仪发射不同频率信号的初始相位具有随机性,导致利用测量的极化散射矩阵进行特征值分解得到的极化参数出现较大误差。不仅如此,测量的极化散射矩阵与真实的极化散射矩阵之间还存在着收发路径误差以及环境误差等因素,因此,需要对测量数据进行极化校准,测量散射矩阵  $S^m$  与目标真实散射矩阵  $S^c$  之间的关系为:

$$S^m = I + RS^cT \quad (1)$$

其中,  $I$  为加性误差系数矩阵,其包含馈源耦合、目标支架反射和微波暗室残余反射等;  $T, R$  为发射路径和接收路径的乘性误差系数矩阵,包含频响误差和交叉极化耦合误差,这些矩阵均为  $2 \times 2$  阶矩阵,式(1)可展开为:

$$\begin{bmatrix} S_{hh}^m & S_{hv}^m \\ S_{vh}^m & S_{vv}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{hh} & I_{hv} \\ I_{vh} & I_{vv} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} R_{hh} & R_{hv} \\ R_{vh} & R_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh}^c & S_{hv}^c \\ S_{vh}^c & S_{vv}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{hh} & T_{hv} \\ T_{vh} & T_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可见,目标真实的极化散射矩阵  $S^c$  的测量受  $I, T, R$  中 12 项误差系数的影响,对极化散射矩阵进行校准测量就要确定这些误差系数,以便由测量矩阵  $S^m$  准确地估算出  $S^c$ 。加性误差矩阵可以通过测量无目标空暗室、采用背景矢量相减技术来获得,而乘性误差矩阵  $T, R$  则需通过测量 3 种极化散射矩阵已知的精密金属标准体,再借助校准算法来确定<sup>[19]</sup>。

文中选用金属圆盘、 $0^\circ$ 二面角和  $22.5^\circ$ 二面角这 3 个标准体作为定标体,它们的极化散射矩阵分别为:

金属圆盘:

$$aS_1 = a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$0^\circ$ 二面角:

$$\beta S_2 = \beta \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$22.5^\circ$ 二面角:

$$\gamma S_3 = \gamma \begin{bmatrix} -\cos(2 \cdot \frac{\pi}{8}) & \sin(2 \cdot \frac{\pi}{8}) \\ \sin(2 \cdot \frac{\pi}{8}) & \cos(2 \cdot \frac{\pi}{8}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $a, \beta, \gamma$  由标准体的复 RCS 因子决定。其中,金属圆盘的表面法线方向与天线入射方向平行;二面角的角度是指在与入射方向垂直的平面内,二面角反射器的折线与水平面的垂线之间的夹角,而天线入射方向是与二面角反射器折线垂直的方向。

在定标体散射矩阵和其对应空暗室测量的散射矩阵已知的情况下,将式(3)~(5)代入到式(2)可以求出系统发射路径和接收路径的乘性误差系数矩阵,因此,在对其他被测目标进行测量时,可以用加性误差系数矩阵、乘性误差系数矩阵,通过下式计算得到目标准确的极化散射矩阵:

$$S^c = R^{-1}(S^m - I)T^{-1} \quad (6)$$

由上述过程可知,通过测量空暗室的后向散射可以确定加性噪声,利用 3 种标准体可以确定系统的乘性噪声,从而实现目标全极化测量的极化定标,校正环境和相位耦合产生的误差。

### 3 极化特征值参数计算

全极化数据比单极化和多极化数据能够更好地反映目标的结构特性、电磁特性和散射特性,适用于探测目标散射机理的研究,利用微波暗室进行全极化数据测量并对数据进行极化分解,是研究目标散射机理和特性的常用手段,其中  $H/\bar{\alpha}$  分解是一种解译全极化数据散射机理

的目标分解方法,可以从散射机理上反应目标的散射特性,标准体的散射特性具有特定属性,往往作为目标散射特性的衡量标准,例如平板的散射机制对应的是面散射,此时  $\bar{\alpha} = 0$ ,而散射机制只有一种,故  $H=0$ 。 $H/\bar{\alpha}$  极化特征数计算过程如下<sup>[20]</sup>:

目标的散射矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在单站后向散射体制下,满足互易性的极化散射矩阵为对称矩阵,即  $S_{HH} = S_{VV}$ ,因此利用 Pauli 基变换可得三维特征矢量为:

$$\underline{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (8)$$

由此得到相干矩阵  $T_3$  为:

$$T_3 = \langle \underline{k} \times \underline{k}^{*T} \rangle = \left\langle \begin{bmatrix} |k_1|^2 & k_1 k_2^* & k_1 k_3^* \\ k_2 k_1^* & |k_2|^2 & k_2 k_3^* \\ k_3 k_1^* & k_3 k_2^* & |k_3|^2 \end{bmatrix} \right\rangle \quad (9)$$

对于单一散射目标情况,根据平均相干矩阵  $T_3$  计算得到的特征矢量和特征值能够获得相干矩阵的一种对角化形式,该形式从本质上可以理解为一组目标矢量之间是统计独立的。相干矩阵  $T_3$  可以写成如下形式:

$$T_3 = U_3 \Sigma U_3^{-1} \quad (10)$$

式中:  $\Sigma$  是  $3 \times 3$  对角阵,其矩阵元素均为非负实数,对应的是  $T_3$  的特征值  $\lambda_i$ ,  $U_3 = [\underline{u}_1 \quad \underline{u}_2 \quad \underline{u}_3]$  是  $SU(3)$  群中的一个  $3 \times 3$  酉矩阵,其中  $\underline{u}_1, \underline{u}_2, \underline{u}_3$  分别是 3 个单位正交的特征向量。

这种情况下,散射体的统计模型可以认为是 3 个特征向量对应的模型的伯努利随机过程的叠加,即将目标建模为 3 个  $S$  矩阵的和。这 3 个  $S$  矩阵分别由  $3 \times 3$   $U_3$  矩阵的列矢量表示,其出现的伪概率  $P_i$  为:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k}, \quad \sum_{k=1}^3 P_i = 1 \quad (11)$$

其中,  $P_k$  对应于特征值  $\lambda_i$  获得的伪概率,这样,可从  $3 \times 3$  相干矩阵中,提取出主要散射机制所对应的参数,各单位矢量  $\underline{u}_i$  如下式所示:

$$\underline{u}_i = e^{j\varphi} \begin{pmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\delta_i} \\ \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\gamma_i} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\varphi$  实质上等于绝对相位。定义散射角  $\bar{\alpha}$  是用来识别主要散射机制的关键参数,并且它是旋转不变的。

$$\bar{\alpha} = \sum_{k=1}^3 p_k \alpha_k \quad (13)$$

为了从整体上描述各种不同散射类型在统计意义上

的无序性,提出了一个有效的、合适的、基本不变参数—极化熵  $H$ ,其公式如下:

$$H = - \sum_{k=1}^N P_k \log_N(P_k) \quad (14)$$

其中,  $N$  为对数的底数(单站情况下  $N=3$ )。由此根据以上公式计算特征值分解参数  $H$  和  $\bar{\alpha}$ ,它们对应了目标散射机制的随机特性和类型。

### 4 实验与分析

为了验证极化校准对特征值分解极化参数的影响,利用矢量网络分析仪对一块边长为 200 mm 金属平板进行测量,如图 2 所示,首先将转台初始位置转到  $180^\circ$ ,将平板法线方向与天线入射方向平行进行放置,然后从  $0^\circ$  开始转动转台一周进行测量。分别采用金属圆盘(直径 260 mm),  $0^\circ$  二面角,  $22.5^\circ$  二面角作为定标体,在定标体测量过程中,由于圆盘的测量数据精度直接影响校准精度,测量时要确定找到圆盘最大反射点,因此需要利用转台旋转进行多个角度的测量,通过对不同角度的数据进行分析比较,来确定响应最大入射角度,并利用该角度的数据对平板进行极化校准。矢量网络分析仪的测量频段为 8~12 GHz,扫频点数为 801,中频带宽为 1 kHz,发射功率为 0 dBm,加功率放大器后输出为 3 dBm。对定标体、平板及它们对应的空暗室进行全极化测量,获得各自的极化散射矩阵。

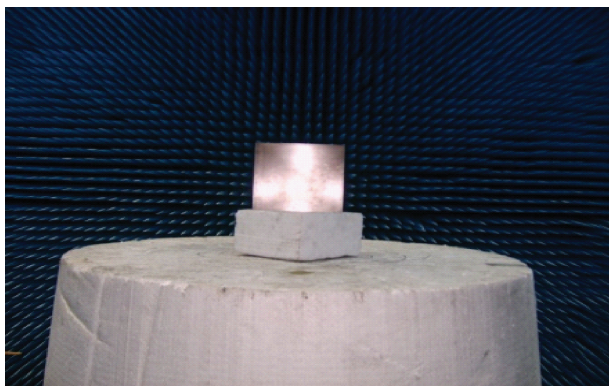


图 2 金属平板

Fig. 2 Metal plate diagram

然后,将三定标体校准算法应用于测量得到的全极化数据,利用定标体和空暗室的散射矩阵测量出来的误差矩阵对平板的散射矩阵进行校准后,得到平板校准前后各角度处的曲线如图 3、4 所示。

理想情况下,平板的散射矩阵元素为  $S_{HH} = 1, S_{HV} = 0, S_{VH} = 0, S_{VV} = 1$ ,因此理论上测量得到的数据应该满足如下关系式:

$$S_{HH} = S_{VV}, S_{HV} = S_{VH} \text{ 且 } S_{HH} \gg S_{HV}$$

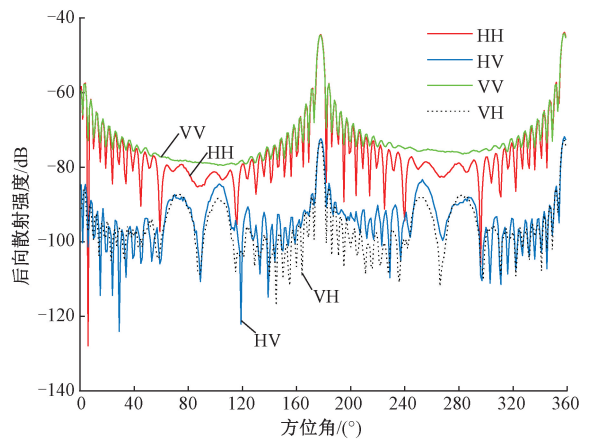


图 3 未校准的平板极化散射随角度变化曲线  
Fig. 3 Uncalibrated plate polarization scattering curve as a function of angle

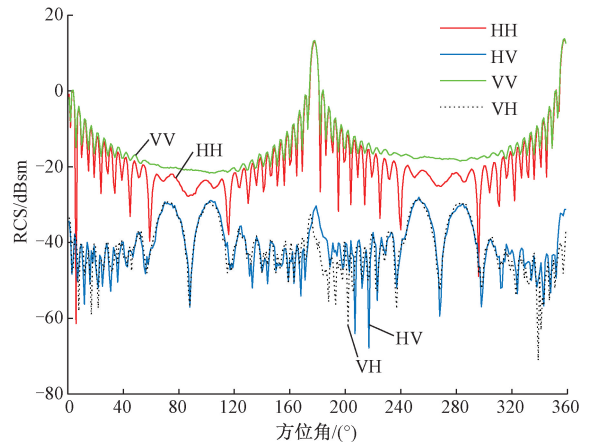
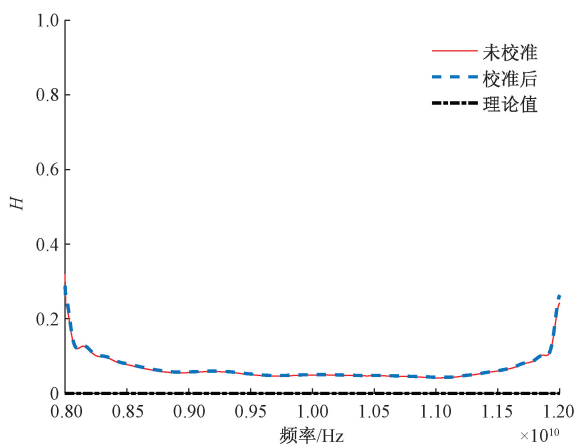
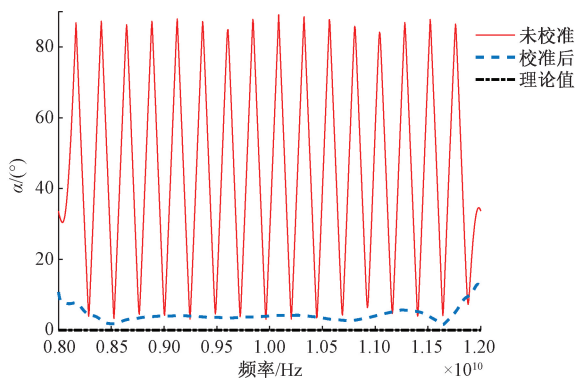


图 4 校准后平板极化散射随角度变化曲线  
Fig. 4 Calibrated plate polarization scattering curve as a function of angle

由图 3、4 可见,  $180^\circ$  处对应的是天线的垂直入射方向,具有最大响应值,此处的 4 个极化通道的测试的数据应满足上述关系式,因此要通过极化校准使得该处的交叉极化与水平极化的相差倍数变大,利用三标准体校准算法可以将校准后的极化纯度提高 20 dB 左右。

为了验证极化校准对矢量网络分析仪的初始相位随机性引起的极化参数误差的校准效果,接下来对极化校准前后的数据进行特征值分解,得到的  $H$  和  $\bar{\alpha}$  分别如图 5、6 所示。从图 5 可以看到,极化校准前后极化熵  $H$  变化较小。其原因在于  $H$  的计算是对特征值取模运算得到的,表征的是散射机制所呈现的随机性的描述,在极化校准过程中,各极化通道的幅度校正比例相当,因此,各散射机制分量所占的比例没有变化,所以极化校准对熵  $H$  的影响较小。

图 5 金属平板极化校准前后  $H$  值Fig. 5  $H$  before and after the polarization calibration of the metal plate图 6 金属平板极化校准前后  $\bar{\alpha}$  值Fig. 6 The value of the metal plate before and after  $\bar{\alpha}$  calibration

从图 6 的结果可以看到, 散射角  $\bar{\alpha}$  的值在极化校准之前呈现不规则的起伏, 这主要是因为  $\bar{\alpha}$  的计算与相位有关系, 因此矢量网络分析仪的初始相位随机性对散射角  $\bar{\alpha}$  影响较大。经过极化校准后得到的  $\bar{\alpha}$  值在  $3^\circ$  左右, 与理论值  $0^\circ$  基本接近, 说明了极化校准对于获取极化特征参数—散射角  $\bar{\alpha}$  的准确性非常重要。

需要注意的是, 熵  $H$  和散射角  $\bar{\alpha}$  的数据由于受到校准后频域数据有效范围减小的影响, 频谱两端的数据出现波动, 在实际应用中可以将两端的数据舍去。

## 5 结 论

本文针对矢量网络分析仪初始相位具有随机性会导致极化特征参数  $H/\bar{\alpha}$  测量时出现较大误差的问题, 提出了一种双端口矢量网络分析仪全极化散射矩阵测量方

法, 利用金属圆盘、 $0^\circ$  二面角和  $22.5^\circ$  二面角这 3 个标准体对误差进行了消除。校准后可以发现不同频率下极化散射矩阵的相位能够基本一致, 从而保证了对极化散射矩阵进行特征值分解得到的  $H/\bar{\alpha}$  参数的准确性。并且由上面的工作和讨论可知, 利用微波暗室测量数据分析目标散射机制之前, 对测量数据进行极化校准可以有效的提高数据的极化纯度, 校正 4 个极化通道之间的相对相位关系。利用校准之后散射矩阵的相干矩阵进行特征值分解, 可以校正测量数据在进行目标散射机理分解中的误差, 从而为微波暗室测量手段进行目标散射机理的分析提供有效数据保障。

**致 谢** 此次微波暗室实验的数据获取得到了西北工业大学胡楚锋教授的大力支持, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] 王宇, 禹卫东, 刘秀清. 基于极化特征参数和极化干涉最优参数的改进四元素分解方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2881-2888.  
WANG Y, YU W D, LIU X Q. An improved four-component decomposition method based on the characteristic of polarization and the optimal parameters of PolInSAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(12): 2881-2888.
- [2] 王庆, 曾琪明, 廖静娟. 基于极化分解的极化特征参数提取与应用[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(3): 103-110.  
WANG Q, ZENG Q M, LIAO J J. Extraction and application of polarimetric characteristic parameters based on polarimetric decomposition [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, 24(3): 103-110.
- [3] 郭交, 尉鹏亮, 周正舒, 等. 基于时变特征的多时相 PolSAR 农作物分类方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 174-182.  
GUO J, WEI P L, ZHOU ZH SH, et al. Crop classification method with differential characteristics based on multi-temporal PolSAR images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 174-182.
- [4] 李洋, 王官云, 王彦平, 等. 多角度极化 SAR 图像散射特征分解及 SVM 分类[J]. 电波科学学报, 2019, 34(6): 771-777.  
LI Y, WANG G Y, WANG Y P, et al. Scattering feature decomposition and SVM classification of multi-angle polarimetric SAR images [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(6): 771-777.
- [5] 王晶晶, 刘峥, 谢荣, 等. 联合 Cameron 分解和融合 RKELM 的全极化 HRRP 目标识别方法[J]. 雷达学

- 报, 2021, 10(6): 944-955.
- WANG J J, LIU ZH, XIE R, et al. HRRP target recognition method for full polarimetric radars by combining Cameron decomposition and fusing RKELM[J]. Journal of Radars, 2021, 10(6): 944-955.
- [ 6 ] FENG X, YU Y, LIU C, et al. Combination of H-Alpha decomposition and migration for enhancing subsurface target classification of GPR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4852-4861.
- [ 7 ] ZHAO J P, DATCU M, ZHANG Z H, et al. Contrastive-regulated CNN in the complex domain: A method to learn physical scattering signatures from flexible PolSAR images [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(12): 10116-10135.
- [ 8 ] 赵泉华, 王肖, 李玉, 等. 基于散射梯度矢量的 PolSAR 数据舰船检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 39-48.
- ZHAO Q H, WANG X, LI Y, et al. PolSAR ship detection method based on the scattering gradient vector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 39-48.
- [ 9 ] 邵芸, 宫华泽, 田维, 等. 微波目标散射特性全要素测量试验[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 323-331.
- SHAO Y, GONG H Z, TIAN W, et al. Experiment of measuring targets' full-parameters microwave properties[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 323-331.
- [ 10 ] 代大海, 廖斌, 肖顺平, 等. 雷达极化信息获取与处理的研究进展[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 143-155.
- DAI D H, LIAO B, XIAO SH P, et al. Advancements on radar polarization information acquisition and processing[J]. Journal of Radars, 2016, 5(2): 143-155.
- [ 11 ] BAI Y, YIN H C, DONG C Z. Computational research on calibration target for full-polarimetric scattering measurement [ C ]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cairns, QLD, Australia, 2016.
- [ 12 ] LI C, YANG Y, WANG X S, et al. Moving target scattering matrix measurement using the three polarizations scheme[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(10): 1555-1559.
- [ 13 ] 胡楚锋, 周洲, 李南京, 等. 具有极化特征的植被相干散射模型及参数反演[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 227-232.
- HU CH F, ZHOU ZH, LI N J, et al. Coherent scattering model and parameter inversion algorithm of vegetation with polarization characteristics[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 227-232.
- [ 14 ] 刘巧玲, 李超, 庞晨, 等. 系统频率偏差对同时全极化测量的影响及其校准[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 115-122.
- LIU Q L, LI CH, PANG CH, et al. Influence of frequency deviation on simultaneous polarization measurement and its calibration [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 115-122.
- [ 15 ] 尤嘉, 宣银良. 矢量网络分析仪校准和验证的常见误区[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 1-6.
- YOU J, XUAN Y L. Common misconceptions of vector network analyzer calibration and validation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(4): 1-6.
- [ 16 ] 李婵娟, 傅世强, 邵特. 用于智能天线测试的低成本可调功分移相电路设计[J]. 电子测量技术, 2016(4): 101-104.
- LI CH J, FU SH Q, SHAO T. Design of a low-cost adjustable power divider and phase shifter circuit for smart antenna testing [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2016(4): 101-104.
- [ 17 ] 黄瑞龙, 刘桂雄, 黄坚, 等. 基于扫频调谐预扫描的快速 EMI 测试关键技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1269-1274.
- HUANG R L, LIU G X, HUANG J, et al. Research on key technology of rapid EMI measurement method based on swept-tuned pre-scanning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1269-1274.
- [ 18 ] 严冬, 程亚军, 汪朋, 等. 基于结构合成法的微型化双频 WLAN 印刷天线设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1421-1432.
- YAN D, CHENG Y J, WANG P, et al. Design of miniaturized dual-band WLAN printed antenna based on structural synthesis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1421-1432.
- [ 19 ] HUANG P K, NING C, XU X J, et al. Solution for polarimetric radar cross section measurement and calibration [ J ]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(2): 211-216.
- [ 20 ] GUO J, WEI P L, LIU J, et al. Crop classification based on differential characteristics of H/ $\alpha$  scattering parameters for multitemporal quad- and dual-polarization SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(10): 6111-6123.

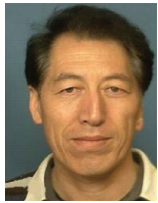
作者简介



李秀娟,2003 年于内蒙古工业大学获得学士学位,2006 年于天津大学获得硕士学位,目前博士在读,就读于内蒙古大学计算机学院,主要研究方向为遥感智能信息处理、微波遥感应用。

E-mail: lxjimpu@163.com

Li Xiujuan received her B. Sc. degree in 2003 from Inner Mongolia University of Technology, received her M. Sc. degree in 2006 from Tianjin University. Now she is a Ph. D. candidate in Inner Mongolia University. Her main research interests include remote sensing intelligent information processing and microwave remote sensing application.



刘永信(通信作者),1980 年于内蒙古大学获得学士学位,1994 年于内蒙古大学获得硕士学位,2002 年于北京理工大学获得博士学位,现为内蒙古大学教授,主要研究方向为模式识别与智能系统、模式识别与图像处理、遥感智能信息处理。

E-mail: yxliu@imu.edu.cn

Liu Yongxin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1980 from Inner Mongolia University, received his M. Sc. degree in 1994 from Inner Mongolia University, received his Ph. D. degree in 2002 from Beijing Institute of Technology. Now he is a professor in Inner Mongolia University. His main research interests include pattern recognition and intelligent system, pattern recognition and image processing, remote sensing

intelligent information processing.



黄平平,2003 年于山东理工大学获得学士学位,2007 年于内蒙古工业大学获得硕士学位,2010 年于中国科学院电子学研究所获得博士学位,现为内蒙古工业大学教授,主要研究方向为新体制雷达系统设计、雷达信号处理、微波遥感应用。

E-mail: hpp2304092@163.com

Huang Pingping received his B. Sc. degree in 2003 from Shandong University of Technology, received his M. Sc. degree in 2007 from Inner Mongolia University of Technology, received his Ph. D. degree in 2010 from Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences. Now he is a professor in Inner Mongolia University of Technology. His main research interests include new system radar system design, radar signal processing and microwave remote sensing application.



苏耘,2010 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2013 年于北京交通大学获得硕士学位,现为内蒙古工业大学教师,主要研究方向为遥感图像处理、目标检测。

E-mail: suyun1331@163.com

Su Yun received his B. Sc. degree in 2003 from Harbin Institute of Technology, received his M. Sc. degree in 2013 from Beijing Jiaotong University. Now he is a lecturer in Inner Mongolia University of Technology. His main research interests include remote sensing image processing and target detection.