

分振幅光偏振探测系统多点定标方法

汪方斌¹, 刘涛¹, 洪津², 朱达荣¹, 许露¹

- (1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽合肥 230601;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心, 安徽合肥 230031)

摘要: 探测性能决定了偏振遥感系统的解析精度, 但分振幅系统因多种因素引入的仪器偏振使解析精度的提高受到限制。在分析测量原理的基础上, 研究了分振幅光偏振探测系统测量矩阵的多点定标方法, 推导了偏振方位角等间隔取样偏振定标的条件; 通过平台搭建与比较实验, 利用多点定标方法测量了航空多角度偏振辐射计(AMPR)的穆勒矩阵, 分析了测量结果的不确定性。结果表明, 定标后的 AMPR 测量误差 < 0.5%、不确定度 < 0.5%, 满足遥感系统的探测要求, 证明了多点定标方法的可行性。

关键词: 多点定标; 偏振; 分振幅; 测量矩阵

中图分类号: TH744 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0517006

Multi-point calibration method for division-of-amplitude photopolarimetric detection system

Wang Fangbin¹, Liu Tao¹, Hong Jin², Zhu Darong¹, Xu Lu¹

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Optics Remote Sensing Center, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Analytical accuracy of polarization remote sensing system is determined by instrumental detection performance. However, it is limited for the instrumental polarization introduced by various factors. In this paper, a multi-point calibration method for measurement matrix of division-of-amplitude (DoA) photopolarimetric detection system had been proposed by analyzing the measurement principle, and the conditions to calibrate a DoA polarization detection system with interval sampling polarization azimuth angle had been derived. Through building a test platform and conducting comparative experiments, the measuring matrix of aviation multi-angular polarimetric radiometer (AMPR) had been determined using the multi-point calibration method mentioned above and the uncertainty had been investigated. The experiment results indicate the measurement error of AMPR is less than 0.5% and corresponding uncertainty is also less than 0.5%, which demonstrate the detection system requirements has been met for AMPR and the feasibility of multi-point calibration method is verified.

Key words: multipoint calibration; polarization; division-of-amplitude; measuring matrix

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(40971196, 61372094); 安徽省高校自然科学基金(KJ2017ZD42, KJ2015JD23); 安徽建筑大学博士启动基金(2015QD04)

作者简介: 汪方斌(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学偏振检测、偏振光学仪器、图像处理、智能系统与模式识别等方面的研究。

Email: wangfb@ahjzu.edu.cn

0 引言

偏振光探测不仅可以获得光强、偏振度、偏振角等多个参量,且偏振量为辐射分量的比值。因此,理论上可以获得非常高的解析精度及在目标特性反演时能够提供更多维的数据源,从而在遥感、材料分类、机器视觉、仿生导航等多个领域获得了广泛的应用^[1-7]。

光偏振探测仪器根据其探测方式有分时和同时两种模式,同时模式存在分振幅、分孔径、分焦平面三种实现方式。分振幅光偏振探测仪器因无运动部件,可靠性与稳定性好、分辨率高,但分光元件多、能量利用率低及光学元件非理想性、装调误差等因素会引入仪器偏振,制约了偏振解析精度的提高^[8-9]。国内外多个学者根据仪器偏振效应引入的主要因素推导仪器探测方程、求解仪器在不同状态下对同一信号的偏振定标系数求解方法,具有较好的效果,但定标参数有限且过程较为复杂^[10-13]。于是研究者提出了基于输入输出关系的定标方法,如四点定标法,它是分振幅光偏振测量仪的常用方法,可以简化定标程序,但四点定标法存在包含信息量少、系统误差大等不足。于是研究者在此基础上提出了六点定标法,改善了系统的定标精度,但定标偏振态的选择基于经验知识且包含信息量仍然有限,系统偏振定标精度有待进一步提高^[14-15]。

文中从偏振探测原理出发,研究分振幅光偏振测量系统多点定标方法,并对利用光源等间隔偏振方位角定标的约束条件进行了理论推导。在此基础上,通过对中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振辐射计 AMPR 偏振定标,对文中提出的多点定标、基于仪器探测方程定标、优化定标、六点定标方法的性能进行了对比,分析了 AMPR 测量结果的不确定性。

1 分振幅光偏振探测原理

分振幅光偏振测量系统由 Azzam 在 1982 年首次提出,可以探测入射光全 stokes 矢量 $S_{in}=[I_{in} \ Q_{in}$

$U_{in} \ V_{in}]^T$ (T 表示转置),其基本原理是通过偏振分析器将入射光投影到至少 4 个独立的基偏振态并通过光强传感器获得强度测量矢量 $L_{out}=[L_0 \ L_1 \ \dots \ L_{N-1}]$ (L 为基偏振态在 N 个不同方位探测器的 DN 值),然后得出入射光的解析偏振态 $S_{out}=[I_{out} \ Q_{out} \ U_{out} \ V_{out}]^T$,如图 1 所示。

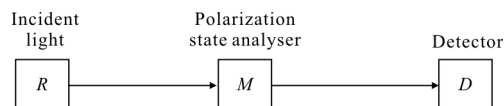


图 1 偏振探测系统框图

Fig.1 Block diagram of polarization dection system

理论上,强度测量矢量与入射光偏振矢量之间的关系为:

$$L_{out}=GS_{in} \quad (1)$$

式中: G 是探测仪器的测量矩阵。而强度测量矢量与解析偏振矢量之间的关系为:

$$S_{out}=KL_{out} \quad (2)$$

式中: K 为探测器响应矩阵。因此探测系统的穆勒(MUELLER)矩阵 M 为:

$$M=KG \quad (3)$$

探测仪器矩阵 M 的标准形式为 4×4 方阵,有 16 个元素,必须有 4 个不同独立偏振态的入射光方可进行求解,从而公式(1)可以改写为:

$$LI_{out}=G \cdot SI_{in} \quad (4)$$

SI_{in} 为不完全相同偏振态入射光 stokes 列矢量组成的 $4 \times NS$ 矩阵; LI_{out} 为不同偏振态入射光探测器响应获得的光强矩阵,相应的解析偏振矢量矩阵为 $4 \times NS$ 。结合公式(2)对公式(4)进行矩阵操作,可以获得由探测器强度求解出入射光的偏振态:

$$SI_{in}=M^+SI_{out} \quad (5)$$

M^+ 为探测仪器的 Moore-Penrose 伪随机逆矩阵,其表达式为:

$$M^+=M^T(MM^T)^{-1} \quad (6)$$

可见,当仪器偏振探测矩阵 M 已知时,即可通过公式(5)估计出入射光的解析 stokes 矢量 S_{in} ,获得其估计的线偏振度 P_{in} 与偏振角 γ_{in} (V 分量很小,通常可以忽略^[16])。

$$P_{in}=\sqrt{q_{in}^2+u_{in}^2}=\sqrt{Q_{in}^2+U_{in}^2}/I_{in}^2$$

$$\gamma_{in}=\begin{cases} 0.5\arctan(u_{in}/q_{in})=0.5\arctan(U_{in}/Q_{in}) & q_{in}>0 \\ 0.5\pi\text{sgn}(u_{in})+0.5\arctan(u_{in}/q_{in})=0.5\pi\text{sgn}(U_{in})+0.5\arctan(U_{in}/Q_{in}) & q_{in}<0 \end{cases} \quad (7)$$

2 多点偏振定标方法

2.1 定标模型

理论上, 通过合适选择仪器的光学元件与传感器, 可以计算出偏振探测矩阵 M 。但实际仪器的光学元件并非理想, 仪器装调误差及安装应力等原因使仪器本身就存在偏振效应, 并且这些因素在使用过程中可能会出现不同程度的变化, 因此需要及时对仪器矩阵 M 进行偏振定标。

根据矩阵最小二乘理论, 方程:

$$y = Ax + \sigma \quad (8)$$

其解为:

$$x = A^T(A^T A)^{-1}y, |A^T A| \neq 0 \quad (9)$$

式中: $y \in R^n$ 为观测向量; $x \in R^n$ 为未知向量; 矩阵 A 为建立测量关系的设计矩阵; σ 为残差矩阵。为对偏振探测系统进行偏振定标, 对公式(3)~(4)进行如下变换, 可得:

$$(SI_{out})^T = (MSI_{in})^T = SI_{in}^T M^T \quad (10)$$

将公式(10)代入公式(5)可得:

$$M = \left[(SI_{in} SI_{in}^T)^{-1} SI_{in} SI_{out}^T \right]^T = SI_{out} SI_{in}^T \left(SI_{in} SI_{in}^T \right)^{-1} \quad (11)$$

2.2 定标条件

由公式(11)可知, $SI_{in} SI_{in}^T$ 必须是非奇异性矩阵。假设 SI_{in} 是 $m \times n$ 矩阵, 由数学知识, 可以证明对任意 n 元列向量 x , $SI_{in} \cdot x = 0$ 和 $SI_{in}^T S(SI_{in} \cdot x) = 0$ 同解, 即:

$$\text{rank}(SI_{in} SI_{in}^T) = \text{rank}(SI_{in}^T SI_{in}) = \text{rank}(SI_{in}) \quad (12)$$

多点定标通常通过不同偏振度下等间隔改变光源的偏振方位角来实现, 文中主要探讨线性偏振探测系统矩阵定标问题。假设公式(4)中的 SI_{in} 为 3×3 矩阵, 归一化的表达式为:

$$SI_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ p_1 \sin 2(\alpha - \theta) & p_2 \sin 2\alpha & p_3 \sin 2(\alpha + \theta) \\ p_1 \cos 2(\alpha - \theta) & p_2 \cos 2\alpha & p_3 \cos 2(\alpha + \theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 p_i ($i=1,2,3$) 为入射光的偏振度, $\alpha - \theta$ 、 α 、 $\alpha + \theta$ 为等间隔采样的偏振方位角, 则 SI_{in} 非奇异的条件为:

$$\det SI_{in} = (p_3 p_1 - p_1 p_2 - p_2 p_3) \sin 2\theta \neq 0 \quad (14)$$

即

$$\theta \neq 0$$

$$p_3 p_1 \neq p_1 p_2 + p_2 p_3 \quad (15)$$

因此, 线性偏振探测系统采用线偏振光源进行定标时需要提供 3 个以上满足公式(15)的偏振态。

3 多点偏振定标实验

3.1 大气多角度偏振辐射计

大气多角度偏振辐射计 AMPR 是参照美国 NASA 的 APS 探测原理研制的遥感设备, 其光学原理如图 2 所示。工作时, 入射光由前端正交扫描反射镜收集并通过通道成对的望远准直透镜后 (3 对 6 通道, 分别对应 490、665、960、555、865、1640 等 6 个波段), 被两个方位角相差 45° 的渥拉斯顿棱镜分成 2 对 2 束相互正交偏振的线偏振光, 再经分光片、滤光片、聚焦透镜后由二元探测器接收^[9,17-18]。文中以 555 nm 波段进行说明。

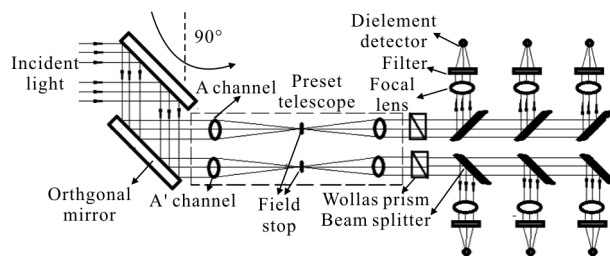


图 2 多角度偏振辐射计光学原理示意图

Fig.2 Schematic of AMPR

假设进入 AMPR 的入射光 stokes 矢量为 $S_{in} = [I_{in} \ Q_{in} \ U_{in}]^T$, 第四个分量 V 通常极小, 实际测量时可不予考虑, 仪器测量矩阵与响应矩阵分别为 G_{AMPR} 和 K_{AMPR} , 仪器探测的强度矢量为 $L_{out} = [L_0 \ L_{45} \ L_{90} \ L_{135}]^T$, 解析的入射光偏振态为 $S_{out} = [I_{out} \ Q_{out} \ U_{out}]^T$, 有下列关系成立:

$$S_{out} = M_{AMPR} S_{in} = K_{AMPR} G_{AMPR} S_{in} \quad (16)$$

$$S_{out} = K_{AMPR} L_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 10 & 10 \\ 10 & -10 \\ 0 & 10 & -1 \\ L_{135} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_0 \\ L_{45} \\ L_{90} \\ L_{135} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.2 定标实验方案

利用激光功率控制器高稳定性 (输出稳定性优于 5×10^{-4}) 的输出激光光源, 再经过扩束器入射到具有三自由度的玻片堆系统 (偏振盒) 变成具有一定偏振度的部分偏振光, 其偏振度与偏振方位角由玻片

堆控制系统进行调节。经过调节的部分偏振光从玻片堆出射进入到 AMPR 并要求充满视场,如图 3 所示,装置构成如图 4 所示。

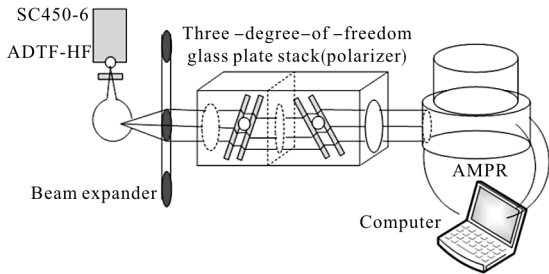


图 3 定标实验测量原理

Fig.3 Measurement principle of calibration experiment

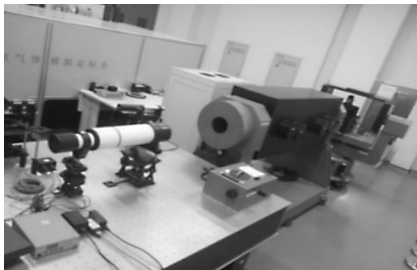


图 4 定标实验装置构成

Fig.4 Set-up of calibration experiment

试验中,保持光源发出的单色光通过扩束器后的光强不变,调节玻片堆控制系统控制偏振度、旋转玻片堆调节偏振方位角,从而得到给定偏振度 p 与偏振角 γ 的线偏振入射光,其偏振态为:

$$S_{in} = [I_0 \ I_0 p \cos 2\gamma \ I_0 p \sin 2\gamma]^T \quad (18)$$

式中: I_0 为总光强。由公式(18)可知,为使定标过程中入射光矩阵满足非奇异性条件,需同时改变偏振度 p 与偏振角,并满足公式(15)所要求的设定条件,构成入射光矩阵。

高精度起偏玻片堆由四片平板玻璃组成。根据两片平板玻璃的起偏原理,可以依次得到入射光透过四片平板玻璃后的线性偏振度。如果四片平板玻璃的材料及倾斜角度相同,则可得到出射光的总线性偏振度^[9]。

3.3 实验结果

实验在暗室内进行,探测器多次测量(>200次)。以测量获得的 DN 值平均值为信号, DN 值随机波动的均方根为噪声。入射光偏振方位角范围 $0^\circ \sim 175^\circ$, 偏振度分别取 0、0.013 7、0.057 0、0.135 4、0.256 9、0.455 5、0.625 2、0.720 4 这 8 个等级,测量时玻片堆以 5° 为间隔进行旋转并由系统采样^[9,11]。定标时,利用每个偏振度等级在偏振方位角为 15° 的整数倍处获取数据(96点),依据公式(11)计算穆勒矩阵,然后将剩下实验数据通过公式(5)对穆勒矩阵进行测试。同时为衡量文中提出方法的性能,取 0.0137° 、 0.05745° 、 0.135445° 、 0.256945° 、 0.455590° 、 0.7204135° 这 6 个成对偏振度与偏振方位角测量值进行六点定标。利用六点定标法得到的穆勒矩阵、参考文献[9]与参考文献[11]给出的定标参数与系统传输方程解析试验测量值偏振态。解析所得偏振度、 q 及 u 分量与设定理论值之间的偏差如图 5~7 所示。图中 Paras1 点线、Paras2 虚线、6-

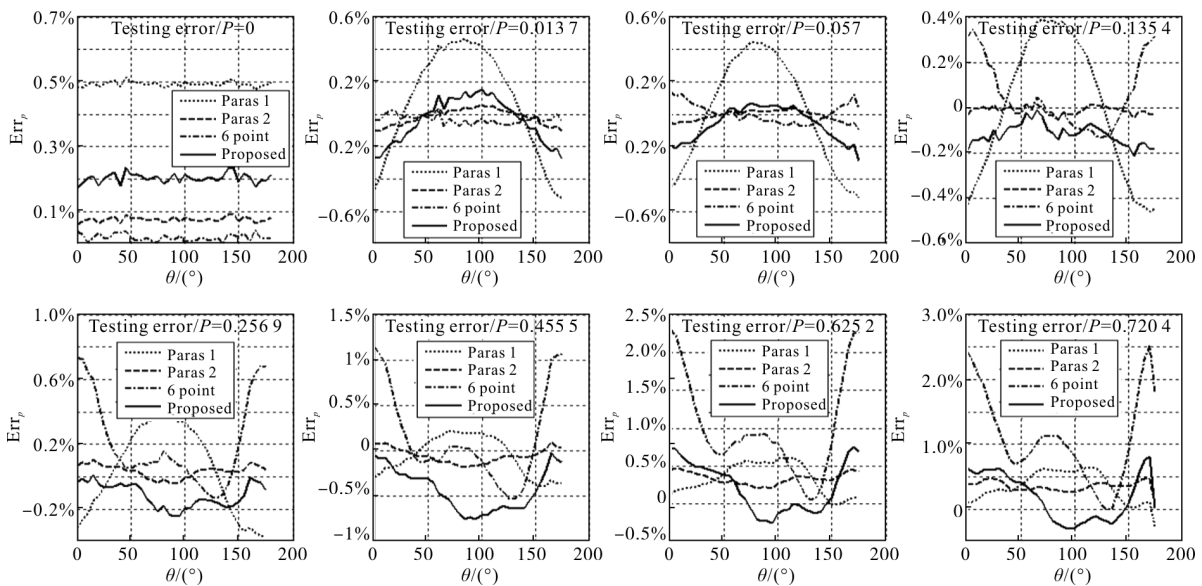


图 5 偏振度测试误差

Fig.5 Testing error of degree of polarization

point 点划线、proposed 实线分别代表参考文献[9]、参考文献[11]、参考文献[15]及文中提出方法结果显示曲线。表 1 与表 2 列出了上述方法解析测量值得到的最大偏振误差与平均误差。

从图 5~7 及表 1~2 中可以得出结论：

(1) 文中提出的多点定标法，测量获得的偏振度、归一化 stokes 参数 q 、 u 整体上与设定的理论值最为接近。测量点误差基本保持在 0.5% 以内，个别

超出 0.5%，但也小于 1%，满足系统设计使用要求。从定标过程来看，偏振度、归一化 stokes 参数 q 、 u 测量精度较高。一方面，定标过程中使用了非常多的定标偏振态，包含了更多的仪器信息；另一方面，将仪器本身看成一个整体，从输入输出关系出发进行定标，当定标偏振态精度越高、数量多、偏振度与偏振方位角取样间隔越小，定标精度越高。

(2) 通过仪器探测方程求解偏振定标系数来解

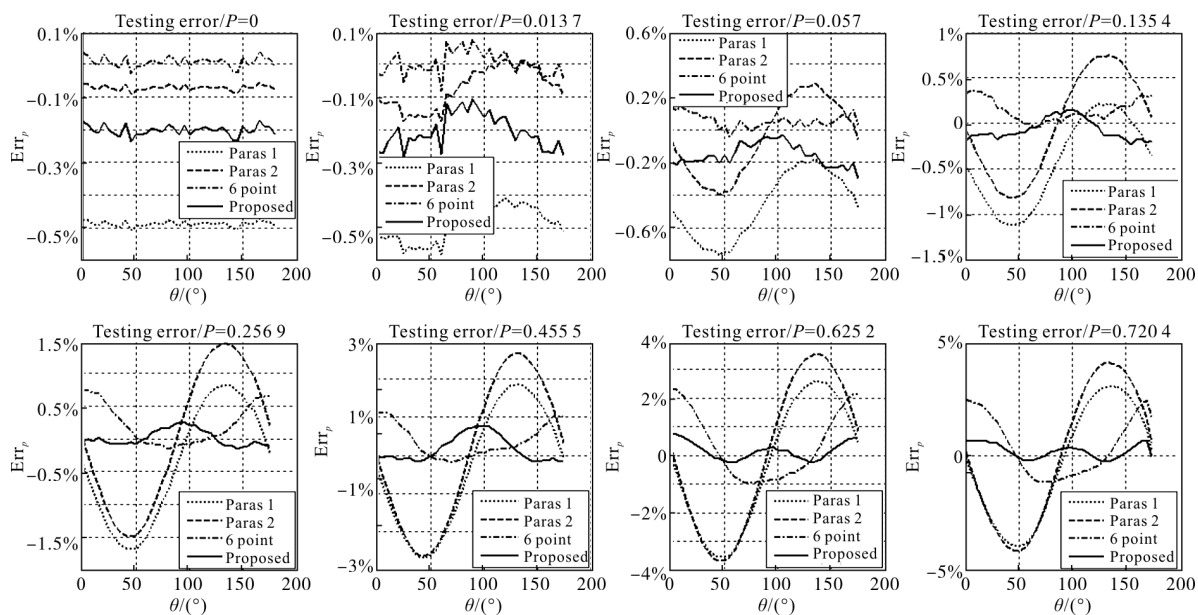


图 6 q 分量测试误差

Fig.6 Testing error of q component

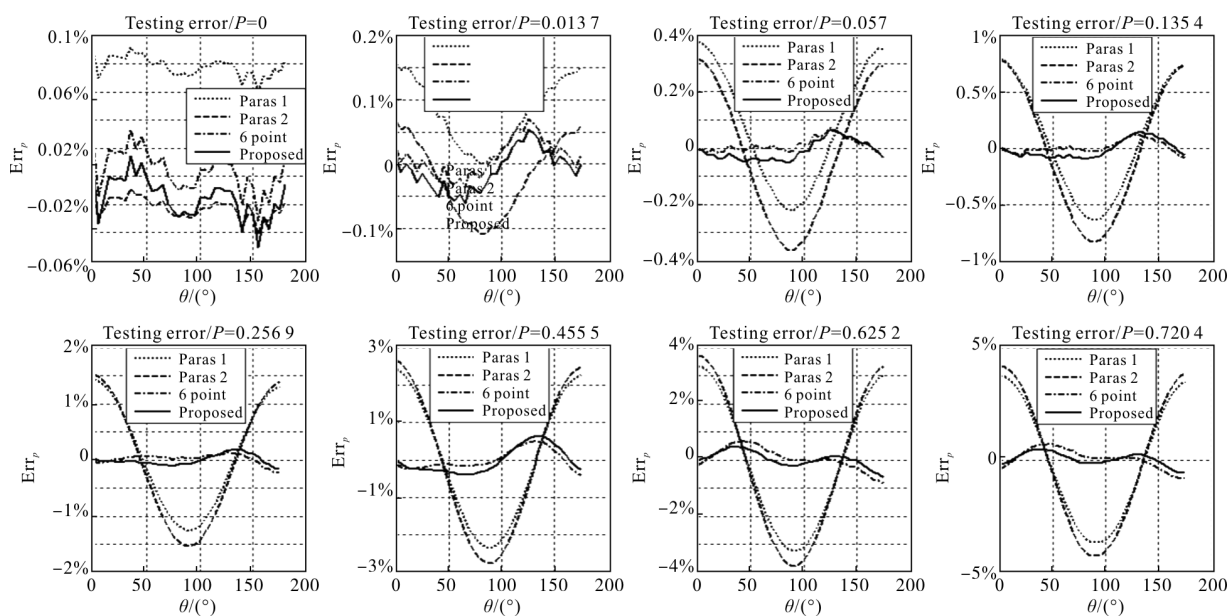


图 7 u 分量测试误差

Fig.7 Testing error of u component

表 1 最大偏振定标误差(绝对值%)

Tab.1 Maximum polarization calibration error (absolute value%)

Calibration method	Testing error of dop	0	1.37	5.7	13.54	25.69	45.55	62.52	72.04
Ref.[9]	q	0.505 7	0.581 0	0.768 5	1.115 1	1.678 8	2.673 8	3.559 1	3.979 6
	u	0.091 8	0.156 7	0.376 5	0.790 2	1.434 9	2.430 6	3.352 9	3.747 6
	p	0.513 4	0.521 2	0.521 0	0.457 1	0.391 8	0.387 5	0.615 9	0.648 3
Ref.[11]	q	0.090 7	0.175 0	0.401 6	0.814 6	1.482 0	2.656 1	3.678 2	4.167 0
	u	0.041 1	0.108 9	0.363 6	0.836 9	1.535 7	2.75 32	3.777 9	4.248 1
	p	0.092 1	0.105 3	0.099 8	0.049 2	0.108 1	0.181 1	0.467 9	0.477 3
Six-point calibration method	q	0.030 3	0.069 7	0.141 7	0.356 6	0.746 6	1.115 1	2.275 5	2.377 7
	u	0.033 5	0.069 6	0.073 3	0.118 7	0.236 2	0.501 4	0.821 0	0.843 0
	p	0.035 8	0.072 6	0.128 0	0.347 2	0.726 8	1.071 3	2.274 9	2.522 6
Proposed calibration method	q	0.244 9	0.292 9	0.307 9	0.234 5	0.238 3	0.762 6	0.733 4	0.672 9
	u	0.054 7	0.065 4	0.063 1	0.134 3	0.176 6	0.618 2	0.640 7	0.599 6
	p	0.246 0	0.282 6	0.295 2	0.209 1	0.226 9	0.728 8	0.764 8	0.838 2

表 2 偏振定标平均误差(绝对值%)

Tab.2 Average error of polarization calibration (absolute value%)

Calibration method	Testing error of dop	0	1.37	5.7	13.54	25.69	45.55	62.52	72.04
Ref.[9]	q	0.487 2	0.488 9	0.469 9	0.506 1	0.833 1	1.434 2	1.980 5	2.236 7
	u	0.077 8	0.083 0	0.194 3	0.451 2	0.844 9	1.496 6	2.057 3	2.418 6
	p	0.493 4	0.294 9	0.295 2	0.270 8	0.242 2	0.193 7	0.333 1	0.373 2
Ref.[11]	q	0.071 9	0.075 4	0.211 9	0.499 3	0.941 5	1.682 6	2.327 9	2.600 9
	u	0.022 9	0.051 5	0.213 7	0.508 6	0.957 7	1.698 2	2.330 6	2.746 1
	p	0.075 9	0.044 5	0.028 7	0.015 3	0.046 3	0.080 0	0.339 5	0.353 2
Six-point calibration method	q	0.013 3	0.028 6	0.057 2	0.148 2	0.282 8	0.444 4	1.068 1	1.221 8
	u	0.011 3	0.024 2	0.018 6	0.040 4	0.069 2	0.228 1	0.300 5	0.349 7
	p	0.019 2	0.035 5	0.049 0	0.116 9	0.241 7	0.377 7	1.021 4	1.135 8
Proposed calibration method	q	0.211 2	0.215 7	0.165 9	0.126 7	0.101 2	0.267 6	0.272 7	0.295 5
	u	0.021 6	0.029 7	0.034 7	0.071 6	0.078 2	0.306 4	0.211 2	0.235 7
	p	0.212 6	0.128 1	0.100 8	0.112 5	0.107 0	0.419 9	0.317 3	0.344 0

析偏振测量,偏振度误差较小,而 q 、 u 分量较大,这对于应用 q 、 u 分量的场合是不利的。分析其原因,一方面,仪器方程仅包含了已知可通过数学方式表达的仪器参数,可能忽略了其他某个次要因素引起的仪器偏振,这一点从误差曲线呈正余弦形状、优化定标方法偏振度测试误差相对较小等可以看出;另一方面,基于仪器探测方程进行定标,从其过程看,侧重于偏振度的测量精度,而实际上, q 、 u 分量测试

误差与定标入射光的偏振态即与 q 、 u 分量本身有关,即使在偏振度定标误差较小的情况下,也有可能出现 q 、 u 分量测试误差较大。

(3) 六点定标法获得的偏振度、 q 、 u 分量测试误差相对于仪器探测方程定标较小,但与文中提出的方法相比还显得较大,如偏振度测量误差最大为2.5%、平均误差为1.13%。通过分析可知,测量误差较小,这与实验过程中对定标偏振态进行选择、仪器

偏振及定标过程噪声有关;另一方面,六点定标法虽然本质上与文中方法相同,且形式上仅体现在定标偏振态数量较少,但实际上,后者包含的仪器信息较多,对仪器偏振、定标过程噪声敏感性降低,相对误差较小。

3.4 不确定性分析

由公式(5)可知,测量获得的 stokes 参数方差可以表示为:

$$\sigma_{S_{in,i}}^2 = \sum_{j=1}^N t_{ij}^2 \sigma_{out,j}^2 \quad (19)$$

式中: σ_{out}^2 、 $\sigma_{S_{in}}^2$ 为仪器测量时由于环境、量化等解析偏振噪声与入射光偏振态计算方差; t_{ij} ($i \in [0,3]$,

$j \in [0,N-1]$) 为仪器偏振探测矩阵伪随机逆矩阵 M^+ 的元素。为讨论归一化 stokes 参数 p, q, u 的不确定度,采用如下公式进行计算:

$$\langle \Delta q \rangle = \sqrt{\langle \Delta q \rangle^2} \approx \sqrt{(1+q^2) \frac{\langle \Delta I_0^2 \rangle + \langle \Delta I_{90}^2 \rangle}{I^2}}$$

$$\langle \Delta u \rangle = \sqrt{\langle \Delta u \rangle^2} \approx \sqrt{(1+u^2) \frac{\langle \Delta I_{45}^2 \rangle + \langle \Delta I_{135}^2 \rangle}{I^2}} \quad (20)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 与 Δ 分别表示平均与差分操作。考虑到 q, u 的正交性,有:

$$\Delta p = \sqrt{\langle \Delta p \rangle^2} \approx \sqrt{\langle \Delta q \rangle^2 + \langle \Delta u \rangle^2} \quad (21)$$

计算结果如图 8 所示,可知系统不确定度较小,不超过 0.5%,满足系统设计要求。

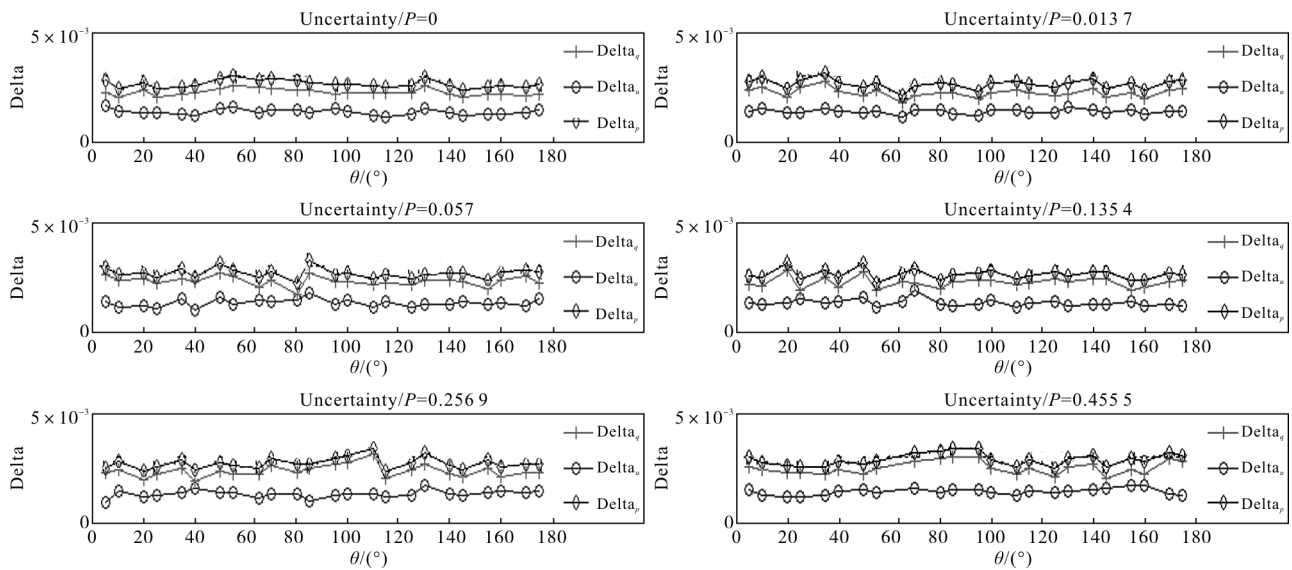


图 8 Stokes 参数 p, q, u 不确定度

Fig.8 Uncertainties of stokes parameters q, u and p

4 结论

文中根据偏振探测的基本原理,研究了分振幅光偏振探测系统测量矩阵多点定标方法。通过理论分析,给出了该方法实现的定标点约束条件;同时通过选择符合该条件的不同偏振态,对多角度偏振辐射计进行了多点(96点)定标实验。实验结果表明,该方法定标能够使 AMPR 达到 0.5%的线偏振检测精度、偏振检测的不确定度小于 0.5%,满足该仪器系统的应用要求,验证了分振幅光偏振探测系统仪器矩阵应用多点定标法的可行性。另一方面,通过对比分析可得,该方法在偏振测试性

能方面要优于六点定标法,而相对通过仪器探测方程求解偏振定标方法,能够使 q, u 分量解析具有较高的精度。

该方法通过设定光源偏振态并利用检测数据直接反演仪器的探测矩阵,其中系统噪声对定标结果的精度影响显著,因此还需要对检测数据处理提出新的方法与理论;另外,文中在实验时参照相关文献选择采样间隔为 5° 、偏振度为 8 个等级,但如何从理论上说明偏振态选择与定标结果之间的关系是今后工作需要关注的一项重要内容;同时,文中方法实验测试是在室内静态环境下进行的,至于实际仪器在探测过程中如何实现系统矩阵的实时定标有待下一步深入研究。

参考文献:

- [1] Ren Bo, Shi Longfei, Wang Guoyu. Polarimetric target detection using statistic of the degree of polarization [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2016, 46: 143–152.
- [2] Xian Zhiwen, Hu Xiaoping, Lian Junxiang, et al. A novel angle computation and calibration algorithm of bio-inspired sky-light polarization navigation sensor [J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 17068–17088.
- [3] Knobelspiessel K, Cairns B, Redemann J, et al. Simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties during the MILAGRO field campaign [J]. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(13): 6245–6263.
- [4] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781–792.
- [5] Wang Fangbin, Hong Jin, Sun Xiaobin, et al. Prediction of polarization pattern by SVM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2914–2922. (in Chinese)
- [6] Twietmeyer K M, Chipman R A, Elsner A E, et al. Mueller matrix retinal imager with optimized polarization conditions [J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 21339–21354. (in Chinese)
- [7] Wang Yi, Hong Jin, Luo Donggen, et al. Influence of field of view alignment on division of time polarimetry accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 606–610. (in Chinese)
- [8] Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Review of imaging polarimetry based on Stokes Vector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 39(1): 56–62. (in Chinese)
- [9] Song Maixin, Sun Bin, Sun Xiaobin, et al. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1153–1158. (in Chinese)
- [10] Cairns B, Chowdhary J. Aerosol and cloud environmental data records, aerosol polarimetry sensor, algorithm theoretical basis document[B]. SDRL, 2003, 1: 020.
- [11] Wang Fangbin. Study on optimal polarization calibration for multi-angle polarimetric radiometer [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [12] Shao Weidong, Wang Peigang, Zheng Qingbo, et al. Polarimetric calibration on airborne remote sensing polarimeter [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(2): 137–140. (in Chinese)
- [13] Yu Ye, Zhang Yangan, Yuan Xueguang, et al. A LabVIEW-based real-time measurement system for polarization detection and calibration [J]. *Optik*, 2014, 10(125): 2256–2260. (in Chinese)
- [14] Wang Yonghui, Zheng Chunlong, Zhao Zhentang. Multi-point calibration method based on stokes ellipsometry system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 163–167. (in Chinese)
- [15] Mishchenko M I, Rosenbush V K, Kiselev N N, et al. Polarimetric remote sensing of solar system objects [J]. *Solar System Research*, 2012, 22(11): 11060013.
- [16] Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, et al. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003. (in Chinese)
- [17] Wang Yi, Hong Jin, Yang Weifeng, et al. Light resource of on-board calibration for multi-angle polarized radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2480–2483. (in Chinese)
- [18] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, et al. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 176–186. (in Chinese)