

四分束全 Stokes 同时偏振成像系统 波片快轴装调误差的分析及优化

殷玉龙^{1,2,3**}, 孙晓兵^{1,3*}, 宋茂新^{1,3}, 陈卫^{1,2,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 建立了包含 1/2 波片(HWP)和 1/4 波片(QWP)快轴装调误差的 Stokes 矢量测量误差方程。分析了波片快轴的装调误差对 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量测量精度的影响, 推导了任意入射光 Stokes 矢量测量误差的表征方法。仿真结果表明, 偏振度越大, 偏振测量误差越大, 选取入射光偏振度为 1 时的偏振测量精度评估系统性能。提出了一种波片快轴装调误差的优化方法, 当测量矩阵的条件数小于 1.84 时, 选取 0.772/0.228 的分束比可使波片快轴装调误差对系统偏振测量精度的影响最小。为满足 2% 的偏振测量精度, HWP 的快轴装调误差应在 $\pm 0.15^\circ$ 内, QWP 的快轴装调误差应在 $\pm 0.52^\circ$ 内。

关键词 测量; 偏振; 波片装调误差; 邦加球; 分束比; Stokes 矢量

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0112002

Alignment Error Analysis and Optimization of Wave Plate Fast Axis in Four-Path Full Stokes Simultaneous Polarization Imaging System

Yin Yulong^{1,2,3**}, Sun Xiaobing^{1,3*}, Song Maoxin^{1,3}, Chen Wei^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The Stokes vector measurement error equation including alignment errors of half-wave plate (HWP) and quarter-wave plate (QWP) fast axes is established. The influences of alignment errors of wave plate fast axes on Stokes vector measurement accuracy for seven typical incident lights are analyzed. A calibration method of Stokes vector measurement errors for any incident light is given. The simulation results show that the greater the degree of polarization is, the larger the polarization measurement error is. The polarization measurement accuracy is selected to evaluate the system performance when the degree of polarization for the incident light equals to 1. A method for optimizing the alignment errors of wave-plate fast axes is proposed. When the condition number of the measurement matrix is less than 1.84, the selection of splitting ratio 0.772/0.228 can minimize the influences of alignment errors of wave-plate fast axes on the polarization measurement accuracy. To ensure a polarization measurement accuracy of 2%, the alignment error of HWP fast axis should be within $\pm 0.15^\circ$ and that of QWP fast axis is within $\pm 0.52^\circ$.

Key words measurement; polarization; alignment error of wave plate; Poincaré sphere; splitting ratio; Stokes vector

OCIS codes 120.4640; 120.4570; 120.5410

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-08-04; 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0201400)、卫星应用共性关键技术项目(32-Y20A22-9001-15/17)、高分重大专项项目(GFZX04011805)、中国科学院合肥研究院重点项目(Y73H9P1801)

* E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn; ** E-mail: yinyulong_yyl@163.com

1 引 言

光与大气或地物目标相互作用时会改变其偏振态,光的偏振态的变化与大气和地物目标的本质属性密切相关,因此偏振探测被广泛用于大气探测及校正、生物医学、天文探测、目标识别等领域^[1-5]。利用偏振成像系统可获取目标的偏振信息,偏振成像系统可分为分时偏振成像系统和同时偏振成像系统。分时偏振成像系统中通常存在转动部件或分时调制器,无法探测快速变化的目标。在目标随时间变化或探测平台与目标相对移动的场合,常采用同时偏振成像方法,常用的同时偏振成像方法主要有分焦平面法与分振幅法。分焦平面偏振成像系统把微偏振片阵列直接集成到探测器的焦平面上,通过微偏振片阵列对入射光进行偏振调制,分焦平面偏振成像系统具有高实时性、高稳定性和小型化等优点^[6-7],但分焦平面偏振成像系统的空间失调会引入虚假偏振,并且微偏振片阵列的制造难度大。与分焦平面偏振成像系统相比,分振幅同时偏振成像系统没有时间和空间的失调,具有实时性好、空间分辨率高、精度高、制造难度低等优点,同时还能实现全 Stokes 参数的测量,具有很高的应用价值。国内外学者投入了大量精力研制同时偏振成像系统^[6-9]。Azzam^[8]提出了振幅分割法,利用镀膜分光器和 Wollaston 棱镜将入射光分为 4 束光,通过 4 个探测器实现了对入射光 Stokes 参数的线偏振分量的同时测量。Pezzaniti 等^[9]利用部分偏振分束器 (PPBS)、1/2 波片 (HWP)、1/4 波片 (QWP) 和两个偏振分束器 (PBS) 将入射光分为 4 束光,通过 4 个探测器实现了对入射光全 Stokes 参数的同时测量,对四分束全 Stokes 同时偏振成像系统进行了偏振定标和水面偏振测量实验。为保证偏振测量精度,国内研究者针对不同调制原理的同时偏振成像系统进行了偏振测量误差分析和系统参数优化等方面的研究^[10-11]。

在国内自主研制的高偏振测量精度的四分束全 Stokes 同时偏振成像系统中,波片快轴的装调误差对偏振测量精度的影响已成为急需解决的关键问题之一。而在如大气光学参数反演、目标偏振探测等实际应用中,通常利用入射光 Stokes 参数^[12]进行大气光学参数反演和目标偏振信息表征,此时更关心入射光 Stokes 参数的测量精度。因此,需要研究四分束全 Stokes 同时偏振成像系统中波片快轴装调误差对任意偏振态入射光的 4 个 Stokes 参数测

量精度的影响,并需要研究波片快轴装调误差的优化方法。

本文建立了包含波片快轴装调误差的 Stokes 矢量测量误差方程;仿真了波片快轴装调误差对自然光、 $0^\circ/45^\circ$ 线偏光、左旋圆偏光等 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量测量精度的影响,推导了任意入射光 Stokes 矢量测量误差的表征方法;利用邦加球采样法仿真了不同偏振度的 Stokes 矢量作为入射光时波片快轴装调误差对偏振测量精度的影响,根据仿真结果给出了用于评估系统的偏振测量精度的数学定义;研究了波片快轴装调误差的优化方法并给出了优化结果;为保证系统的偏振测量精度在 2% 内,给出了波片快轴的装调精度要求,这对系统参数设计、原理样机装调和研制具有重要意义。

2 四分束全 Stokes 同时偏振成像系统原理及误差建模

2.1 偏振成像系统调制原理

四分束全 Stokes 同时偏振成像系统由光学镜头、四分束偏振分析组件和 4 个电荷耦合器件 (CCD) 组成^[9]。四分束偏振分析组件由 PPBS、HWP、QWP、偏振分束器 1 (PBS1) 和偏振分束器 2 (PBS2) 组成。HWP 快轴与 x 轴正向的夹角 θ 为 -22.5° , QWP 快轴与 x 轴正向的夹角 θ 为 45° 。四分束全 Stokes 同时偏振成像系统原理图如图 1 所示,沿 z 轴方向传播的入射光通过光学镜头后,入射光在 PPBS 内被分成相互垂直的两路,一路是从 PPBS 透射的光束,它被 HWP 调制后由 PBS1 分离为振动方向互相垂直的 P 偏振光和 S 偏振光 (P 偏振光的振动方向平行于 xoz 面, S 偏振光的振动方向垂直于 xoz 面),其中 P 偏振光由电荷耦合器件 1 (CCD1) 接收, S 偏振光由电荷耦合器件 2 (CCD2) 接收。另一路是从 PPBS 反射的光束,被 QWP 调制后由 PBS2 分离为振动方向互相垂直的 P 偏振光和 S 偏振光,其中 P 偏振光由电荷耦合器件 3 (CCD3) 接收, S 偏振光由电荷耦合器件 4 (CCD4) 接收。

偏振成像系统中的 PPBS、PBS1 和 PBS2 的介质膜分光面能对入射光的偏振分量进行分配,可用于调制并解析入射光的偏振态。当分束面的分束比不理想时,对于单色应用可通过定标消除其对偏振精度的影响,对于宽谱应用可通过控制分束比误差及定标来保证一定的偏振精度。

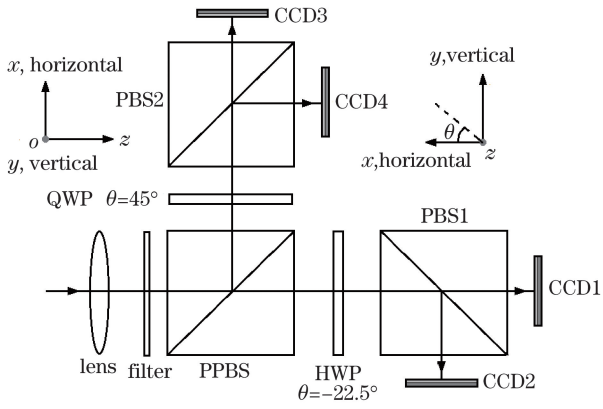


图 1 四分束全 Stokes 同时偏振成像系统原理图
Fig. 1 Schematic of four-path full Stokes simultaneous polarization imaging system

黎高平等^[13]研究了光学镜头对偏振度测量精度的影响,对于常用的玻璃,当入射角很小时(小于 5°),角度每相差 1°,偏振度测量偏差约为 0.01%~0.03%。这里研究的系统是小视场成像系统,入射

主光束的入射方向与光学镜头法线的夹角很小,故不考虑光学镜头的起偏效应。因此,入射光主要受四分束偏振分析组件的调制,四分束偏振分析组件 4 个通道的 Mueller 矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\text{path1}} = \mathbf{P}(1,0) \cdot \mathbf{R}(-22.5^\circ, 180^\circ) \cdot \mathbf{P}(T_p, T_s) \\ \mathbf{M}_{\text{path2}} = \mathbf{P}(0,1) \cdot \mathbf{R}(-22.5^\circ, 180^\circ) \cdot \mathbf{P}(T_p, T_s) \\ \mathbf{M}_{\text{path3}} = \mathbf{P}(1,0) \cdot \mathbf{R}(45^\circ, 90^\circ) \cdot \mathbf{P}(1-T_p, 1-T_s) \\ \mathbf{M}_{\text{path4}} = \mathbf{P}(0,1) \cdot \mathbf{R}(45^\circ, 90^\circ) \cdot \mathbf{P}(1-T_p, 1-T_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_p 和 T_s 分别为 PPBS 对入射光 P 分量和 S 分量的透射系数; $\mathbf{R}(\theta, \varphi)$ 为波片快轴与 x 轴正向夹角为 θ 时的 Mueller 矩阵, φ 为相位延迟量; $\mathbf{P}(T_p, T_s)$ 和 $\mathbf{P}(1-T_p, 1-T_s)$ 分别为 PPBS 透射和反射时的 Mueller 矩阵; $\mathbf{P}(1,0)$ 为 PBS1 和 PBS2 透射时的 Mueller 矩阵, $\mathbf{P}(0,1)$ 为 PBS1 和 PBS2 反射时的 Mueller 矩阵。

$\mathbf{R}(\theta, \varphi)$ 和 $\mathbf{P}(T_p, T_s)$ 的表达式分别为

$$\mathbf{R}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\varphi & \sin 2\theta\cos 2\theta - \sin 2\theta\cos 2\theta\cos\varphi & \sin\varphi\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta\cos 2\theta - \sin 2\theta\cos 2\theta\cos\varphi & \sin^2(2\theta) + \cos^2(2\theta)\cos\varphi & -\sin\varphi\cos 2\theta \\ 0 & -\sin\varphi\sin 2\theta & \sin\varphi\cos 2\theta & \cos\varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(T_p, T_s) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_p + T_s & T_p - T_s & 0 & 0 \\ T_p - T_s & T_p + T_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{T_p T_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{T_p T_s} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

入射光的 Stokes 矢量 $\mathbf{S}_{\text{in}}^\dagger = [S_0^\dagger, S_1^\dagger, S_2^\dagger, S_3^\dagger]^T$, 其中 T 代表求转置; 系统的测量矩阵为 \mathbf{M} , 则

CCD1~CCD4 中对应像元的光强度矢量 $\mathbf{I} = [I_{\text{path1}}, I_{\text{path2}}, I_{\text{path3}}, I_{\text{path4}}]^T$, 可表示为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} M_{\text{path1}}(1,1) & M_{\text{path1}}(1,2) & M_{\text{path1}}(1,3) & M_{\text{path1}}(1,4) \\ M_{\text{path2}}(1,1) & M_{\text{path2}}(1,2) & M_{\text{path2}}(1,3) & M_{\text{path2}}(1,4) \\ M_{\text{path3}}(1,1) & M_{\text{path3}}(1,2) & M_{\text{path3}}(1,3) & M_{\text{path3}}(1,4) \\ M_{\text{path4}}(1,1) & M_{\text{path4}}(1,2) & M_{\text{path4}}(1,3) & M_{\text{path4}}(1,4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0^\dagger \\ S_1^\dagger \\ S_2^\dagger \\ S_3^\dagger \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}^\dagger. \quad (4)$$

若已知测量矩阵 \mathbf{M} 和光强度矢量 \mathbf{I} , 则入射光的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{in}}^\dagger = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{R}' \cdot \mathbf{I}, \quad (5)$$

式中: 矩阵 \mathbf{R}' 为理论测量矩阵 \mathbf{M} 的逆矩阵。

2.2 波片快轴装调误差建模

PPBS 的分束比为 T_p/T_s 、HWP 和 QWP 快轴装调误差分别为 α 和 β 时的系统测量矩阵 \mathbf{M}^\dagger 为

$$\mathbf{M}^\dagger = \begin{bmatrix} \frac{(T_p + T_s) + \sin 4\alpha \cdot (T_p - T_s)}{4} & \frac{(T_p - T_s) + \sin 4\alpha \cdot (T_p + T_s)}{4} & -\frac{\sqrt{T_p \cdot T_s} \cdot \cos 4\alpha}{2} & 0 \\ \frac{(T_p + T_s) - \sin 4\alpha \cdot (T_p - T_s)}{4} & \frac{(T_p - T_s) - \sin 4\alpha \cdot (T_p + T_s)}{4} & \frac{\sqrt{T_p \cdot T_s} \cdot \cos 4\alpha}{2} & 0 \\ \frac{2 - (T_p + T_s) - \sin^2(2\beta) \cdot (T_p - T_s)}{4} & \frac{(T_s - T_p) - \sin^2(2\beta) \cdot (T_p + T_s - 2)}{4} & -\frac{\sqrt{(1-T_p) \cdot (1-T_s)} \cdot \sin 4\beta}{4} & \frac{\sqrt{(1-T_p) \cdot (1-T_s)} \cdot \cos 2\beta}{2} \\ \frac{2 - (T_p + T_s) + \sin^2(2\beta) \cdot (T_p - T_s)}{4} & \frac{(T_s - T_p) + \sin^2(2\beta) \cdot (T_p + T_s - 2)}{4} & \frac{\sqrt{(1-T_p) \cdot (1-T_s)} \cdot \sin 4\beta}{4} & -\frac{\sqrt{(1-T_p) \cdot (1-T_s)} \cdot \cos 2\beta}{2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当 CCD1~CCD4 中对应像元的光强度矢量为 \mathbf{I} 时,实际的测量矩阵是包含 HWP 和 QWP 快轴装调误差的测量矩阵 \mathbf{M}^\dagger ,则实际的入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}_{in} 为

$$\mathbf{S}_{in} = (\mathbf{M}^\dagger)^{-1} \cdot \mathbf{I}. \quad (7)$$

测量矩阵 \mathbf{M} 是不包含 HWP 和 QWP 快轴装调误差的理论测量矩阵,由(5)式可得入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}_{in}^\dagger . 入射光 Stokes 矢量的测量误差矩阵为

$$\mathbf{e}_S = \begin{bmatrix} e_{S_0} \\ e_{S_1} \\ e_{S_2} \\ e_{S_3} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{in}^\dagger - \mathbf{S}_{in} = \mathbf{R}' \cdot \mathbf{M}^\dagger \cdot \mathbf{S}_{in} - \mathbf{S}_{in} = (\mathbf{R}' \cdot \mathbf{M}^\dagger - \mathbf{E}) \cdot \mathbf{S}_{in}, \quad (8)$$

式中: e_{S_i} ($i=0,1,2,3$)为测量误差矩阵元; \mathbf{E} 为 4×4

单位矩阵。

对于入射光 Stokes 矢量,一般关心的是其光强的相对值^[12],故在误差分析中对入射光 Stokes 矢量进行归一化处理。

3 波片快轴装调误差的仿真及分析

3.1 基于典型基态入射光的波片快轴装调误差仿真及分析

任意入射光都可分解成 7 种典型基态入射光(自然光、 $0^\circ/90^\circ/45^\circ/135^\circ$ 线偏光、右旋和左旋圆偏振光)的线性组合,通过分析 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量测量误差便可求出任意入射光的 Stokes 矢量测量误差。

任意入射光归一化的 Stokes 矢量均可分解成 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量,即

$$\mathbf{S}_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ S_1/S_0 \\ S_2/S_0 \\ S_3/S_0 \end{bmatrix} = (1 - l_1 - l_2 - l_3 - l_4 - l_5 - l_6) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + l_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + l_2 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + l_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + l_4 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} + l_5 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + l_6 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中参数 $l_{2i-1} - l_{2i} = S_i/S_0$ 且 $l_{2i-1} \cdot l_{2i} = 0$ ($i=1, 2, 3$),其中 S_i 为 Stokes 参数。

由(8)式可求出 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量测量误差 $\mathbf{e}_S^{(0)} \sim \mathbf{e}_S^{(6)}$,结合(9)式可得任意入射光的 Stokes 矢量测量误差为

$$\mathbf{e}_S = (1 - l_1 - l_2 - l_3 - l_4 - l_5 - l_6) \cdot \mathbf{e}_S^{(0)} + l_1 \cdot \mathbf{e}_S^{(1)} + l_2 \cdot \mathbf{e}_S^{(2)} + l_3 \cdot \mathbf{e}_S^{(3)} + l_4 \cdot \mathbf{e}_S^{(4)} + l_5 \cdot \mathbf{e}_S^{(5)} + l_6 \cdot \mathbf{e}_S^{(6)}. \quad (10)$$

系统设计参数为^[9]:分束比 $T_p/T_s = 0.8/0.2$, HWP 和 QWP 快轴与 x 轴正向的夹角分别为 -22.5° 和 45° 。以系统设计参数进行仿真,图 2 所示为 7 种典型基态入射光 Stokes 参数测量误差的仿真结果, x 轴和 y 轴分别为 HWP 快轴装调误差

α 和 QWP 快轴装调误差 β , z 轴为入射光 Stokes 参数的测量误差 e_{S_k} ($k=0,1,2,3$)。

由图 2 可知,7 种典型基态入射光 S_0 分量和 S_1 分量的测量误差均为 0, S_2 分量的测量误差仅受 α 影响, S_3 分量的测量误差仅受 β 影响。

由图 2 和(10)式分析可知,当 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 存在时,任意入射光的 S_0 分量和 S_1 分量的测量误差均为 0,任意入射光 S_2 分量的测量精度仅受 α 影响,任意入射光 S_3 分量的测量精度仅受 β 影响。

3.2 基于邦加球采样的波片快轴装调误差仿真及分析

由(8)式可知,Stokes 矢量的测量误差随入射光

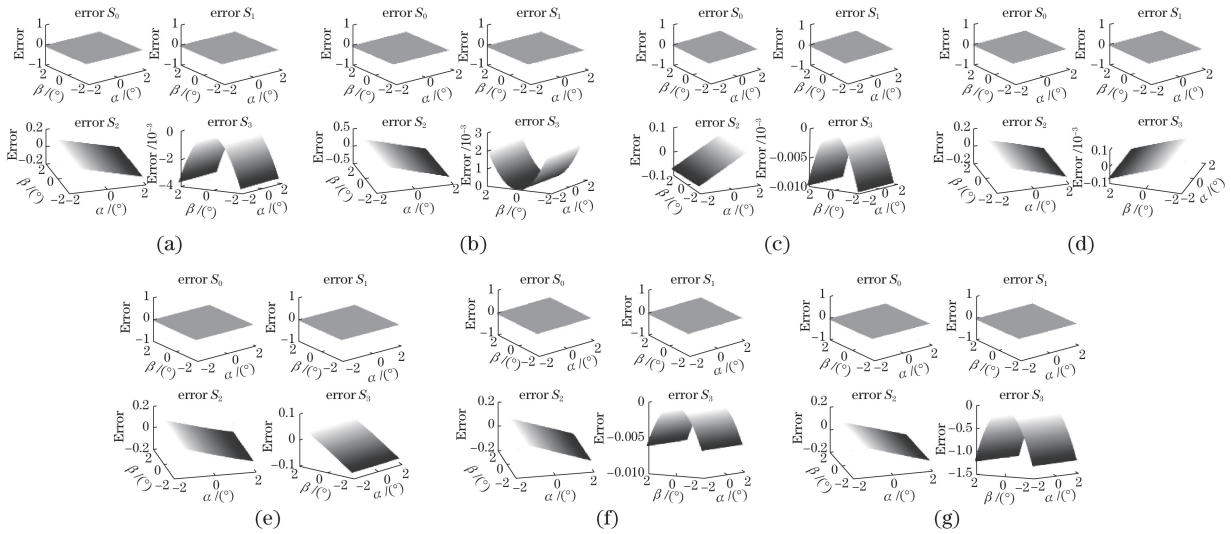


图 2 不同入射光下的 Stokes 参数测量误差。(a)自然光;(b) 0°线偏光;(c) 90°线偏光;
(d) 45°线偏光;(e) 135°线偏光;(f)右旋圆偏光;(g)左旋圆偏光

Fig. 2 Measurement errors of Stokes parameters for different incident lights. (a) Natural light; (b) 0° linearly polarized light; (c) 90° linearly polarized light; (d) 45° linearly polarized light; (e) 135° linearly polarized light; (f) right circularly polarized light; (g) left circularly polarized light

Stokes 矢量的变化而变化,因此,需要分析不同偏振态的 Stokes 矢量作为入射光时波片快轴装调误差对 Stokes 矢量测量精度的影响。在邦加球的球面上^[11]或球内均匀地选取不同偏振态的 Stokes 矢

量作为入射光,以更完备地评估 HWP 和 QWP 快轴装调误差对系统偏振测量精度的影响。在邦加球球面上和球内均匀采样时任意偏振态的 Stokes 矢量^[12]为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_n = [1 & P \cos(2\chi_n) \cos(2\psi_n) & P \cos(2\chi_n) \sin(2\psi_n) & P \sin(2\chi_n)] \\ \chi_n = \frac{n \cdot \pi}{2 \cdot N_\chi \cdot N_\psi} - \frac{\pi}{4}; & \psi_n = \frac{n \cdot \pi}{N_\psi}; & n = 1, 2, \dots, N_\chi \cdot N_\psi; & \psi_n \in [0, \pi]; \chi_n \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right] \end{cases}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{S}_n 为第 n 个入射光采样点的归一化 Stokes 矢量; P 为偏振度; χ_n 和 ψ_n 分别为第 n 个入射光采样点的椭圆度角和偏振角; N_χ 为从邦加球的南极到北极围绕球体采样的圆周个数; N_ψ 为每个采样圆周上的采样点数。令 $P=1, N_\chi=20, N_\psi=50$, 则意味着在邦加球球面上均匀选取了 1000 个不同偏

振态的 Stokes 矢量作为入射光。图 3 所示为邦加球球面上 1000 个入射光采样点的三维分布和 Stokes 参数的数值分布。

令分束比 $T_p/T_s=0.8/0.2$, HWP 和 QWP 的快轴与 x 轴正向的夹角分别为 -22.5° 和 45° , 以图 3 所示的 1000 个采样点为入射光, 得到仅存在 1° 的

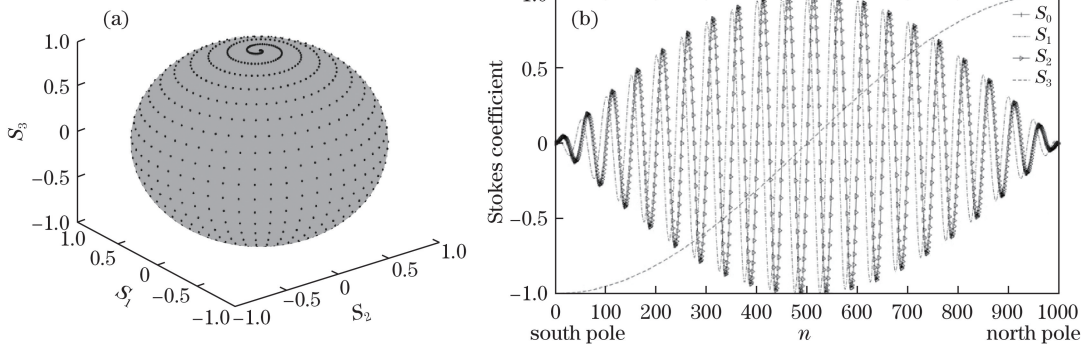


图 3 邦加球球面上选取 1000 个入射光采样点的 Stokes 参数分布。(a)三维分布;(b) Stokes 参数的数值分布

Fig. 3 Stokes parameter distributions of 1000 incident light sampling points selected on the Poincaré sphere. (a) 3D distribution; (b) Stokes parameter value

HWP 快轴装调误差和仅存在 1° 的 QWP 快轴装调误差时 1000 个入射光采样点的 Stokes 参数 $S_0 \sim S_3$ 测量误差如图 4(a)、(b) 所示。

由图 4(a) 可知, HWP 快轴装调误差仅影响入射光 S_2 分量的测量精度; 从邦加球的南极到赤道的采样过程中 S_2 分量测量误差的振幅逐渐增大, 从邦加球的赤道到北极的采样过程中 S_2 分量测量误差的振幅逐渐减小, 即入射光采样点的椭圆度角的绝对值减小, S_2 分量测量误差的振幅增大; 入射光采

样点的椭圆度角恒定时, S_2 分量的测量误差随入射光的偏振角的变化而变化; 在邦加球赤道处, S_2 分量测量误差受入射光偏振角的影响最大。

由图 4(b) 可知, QWP 快轴装调误差仅影响 S_3 分量的测量精度; 入射光采样点的椭圆度角的绝对值越小, S_3 分量测量误差的振幅越大; 入射光采样点的椭圆度角恒定时, S_3 分量测量误差随入射光偏振角的变化而变化; 在邦加球赤道处, S_3 分量测量误差受入射光偏振角的影响最大。

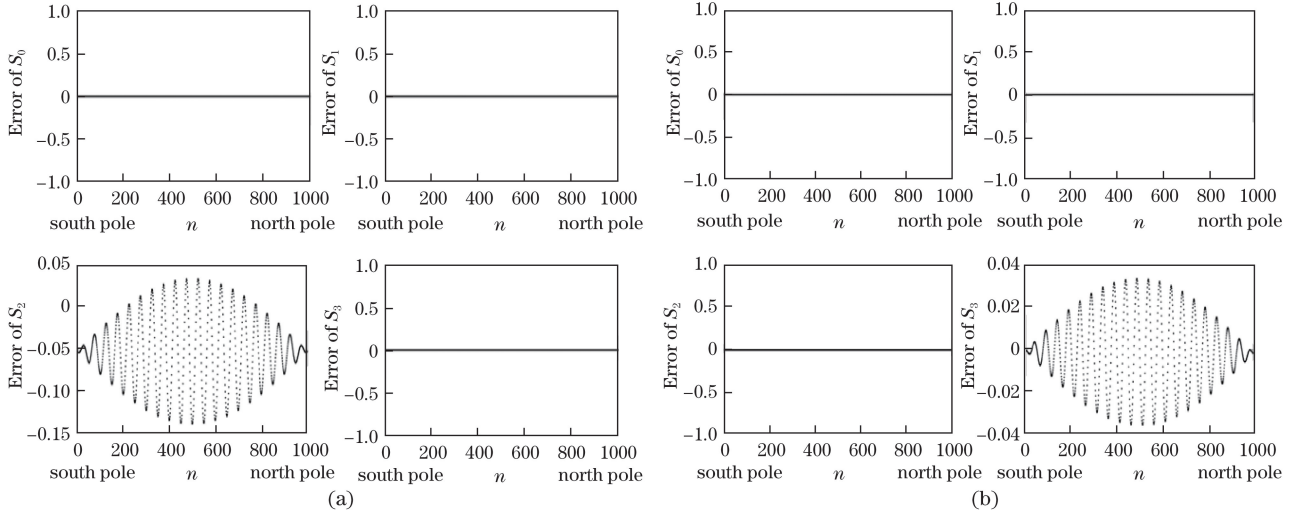


图 4 Stokes 参数测量误差。(a) 仅存在 1° 的 HWP 快轴装调误差; (b) 仅存在 1° 的 QWP 快轴装调误差

Fig. 4 Stokes parameter measurement errors. (a) Only 1° alignment error of HWP fast axis;

(b) only 1° alignment error of QWP fast axis

当 HWP 和 QWP 的快轴装调误差分别为 α 和 β , 且入射光采样点 (采样总数为 $N_\chi \cdot N_\psi$) 的偏振度均为 P 时, 在 $N_\chi \cdot N_\psi$ 个入射光采样点中 S_i ($i=0, 1, 2, 3$) 分量测量误差绝对值的最大值 $M_i(\alpha, \beta, P)$ 为

$$\begin{cases} M_i(\alpha, \beta, P) = \max(|e_{S_i}(\alpha, \beta, P, n)|) \\ i=0, 1, 2, 3; n=1, 2, \dots, N_\chi \cdot N_\psi \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $e_{S_i}(\alpha, \beta, P, n)$ 为第 n 个入射光采样点的 S_i ($i=0, 1, 2, 3$) 分量的测量误差。与 (12) 式对应的偏振测量精度的定义为

$$A(\alpha, \beta, P) = \max[M_i(\alpha, \beta, P)] \times 100\%, \quad i=0, 1, 2, 3. \quad (13)$$

由图 (4) 可知, 仅存在 1° 的 HWP 快轴装调误差且入射光采样点均为完全偏振光 ($P=1$) 时, 偏振测量精度为 13.95%; 仅存在 1° 的 QWP 快轴装调误差且入射光采样点均为完全偏振光 ($P=1$) 时, 偏振测量精度为 3.58%。

令分束比 $T_p/T_s=0.8/0.2$, HWP 和 QWP 的快轴与 x 轴正向的夹角分别为 -22.5° 和 45° , 分别

令偏振度 $P=1, 0.8, 0.5, 0.2, 0.1$, 不同偏振度对应的采样总数均为 1000, 即 (11) 式中恒有 $N_\chi=20, N_\psi=50$, 则当入射光采样点分别为邦加球球面上的完全偏振光 ($P=1$) 和邦加球球内的部分偏振光 ($P<1$) 时, HWP 和 QWP 的快轴装调误差对偏振测量精度的影响如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 当偏振度 P 恒定时, $A(\alpha, \beta=0, P)$ 的值随 $|\alpha|$ 的增大而增大; 当 α 恒定时, $A(\alpha, \beta=0, P)$ 的值随偏振度 P 的增大而增大。由图 5(b) 可知, 当偏振度 P 恒定时, $A(\alpha=0, \beta, P)$ 的值随 $|\beta|$ 的增大而增大; 当 β 恒定时, $A(\alpha=0, \beta, P)$ 的值随偏振度 P 的增大而增大。由图 5(c) 可知, 当 α 和 β 恒定时, $A(\alpha, \beta, P)$ 的值随偏振度 P 的增大而增大。

由图 5 可知, 当系统中存在恒定的 HWP 快轴装调误差 α 或 QWP 快轴装调误差 β 时, 偏振度 $P=1$ 时对应的偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=1)$ 为最大值, 因此通过 $A(\alpha, \beta, P=1)$ 来评估系统的偏振测量精度。

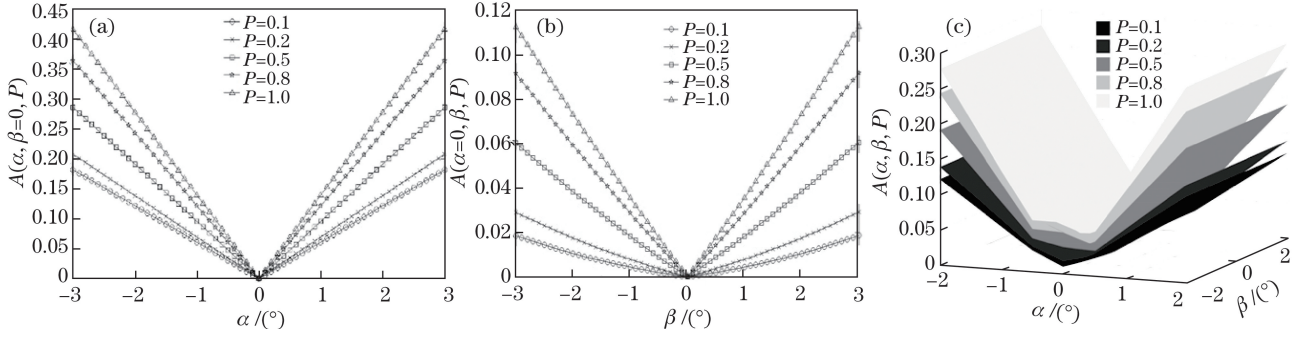


图 5 不同偏振度的采样点作为入射光时波片快轴装调误差对偏振测量精度的影响。(a)仅 HWP 快轴装调误差；(b)仅 QWP 快轴装调误差；(c) HWP 和 QWP 的快轴装调耦合误差

Fig. 5 Influences of alignment errors of fast axes on polarization measurement accuracy when sampling points with different degrees of polarization used as incident lights. (a) Only HWP fast axis; (b) only QWP fast axis; (c) alignment coupling error of HWP and QWP fast axes

1) 当 $\alpha \neq 0$ 且 $\beta = 0$ 时,系统的偏振测量精度为

$$A^{(\alpha)} = A(\alpha, \beta = 0, P = 1). \quad (14)$$

2) 当 $\alpha = 0$ 且 $\beta \neq 0$ 时,系统的偏振测量精度为

$$A^{(\beta)} = A(\alpha = 0, \beta, P = 1). \quad (15)$$

3) 当 $\alpha \neq 0$ 且 $\beta \neq 0$ 时,系统的偏振测量精度为

$$A^{(\alpha, \beta)} = A(\alpha, \beta, P = 1). \quad (16)$$

4 波片快轴装调误差优化及偏振度测量精度分析

4.1 波片快轴装调误差的优化

由系统偏振调制方程 $\mathbf{I} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_m^\dagger$ 可知,测量矩阵 \mathbf{M} 的 2-范数的条件数 κ 是 \mathbf{S}_m^\dagger 对测量矩阵 \mathbf{M} 和光强度矢量 \mathbf{I} 中数据有微小扰动时敏感性的一种度量。 κ 越小,测量矩阵的误差对入射光 Stokes 矢量测量误差的影响越小。图 6 所示为条件数 κ 关于 T_p 和 T_s 的变化关系。图 7 所示为 $\alpha = 1^\circ$ 且 $\beta = 1^\circ$ 时系统偏振测量精度关于 T_p 和 T_s 的变化关系。由图 6 和图 7 可知,通过改变分束比 T_p/T_s 可同时改变条件数 κ 和系统偏振测量精度。

通过改变 T_p 和 T_s 来优化 HWP 和 QWP 的快轴装调误差,为了确保测量矩阵是非病态的,需要确保测量矩阵的 2-范数的条件数小于阈值 κ_0 。HWP 和 QWP 快轴装调误差的优化方法为

$$\min f(T_p, T_s) = A_{(T_p, T_s)}^{(\alpha=1^\circ, \beta=1^\circ)} \text{ s.t. } \kappa(T_p, T_s) \leq \kappa_0, \quad 0 \leq T_p \leq 1, 0 \leq T_s \leq 1, \quad (17)$$

式中:目标函数 $f(T_p, T_s) = A_{(T_p, T_s)}^{(\alpha=1^\circ, \beta=1^\circ)}$ 表示分束比为 T_p/T_s 时的系统偏振测量精度; $\kappa(T_p, T_s)$ 表示分束比为 T_p/T_s 时测量矩阵 \mathbf{M} 的 2-范数的条件数;约束条件为 $\kappa(T_p, T_s) \leq \kappa_0, 0 \leq T_p \leq 1, 0 \leq T_s \leq 1$ 。

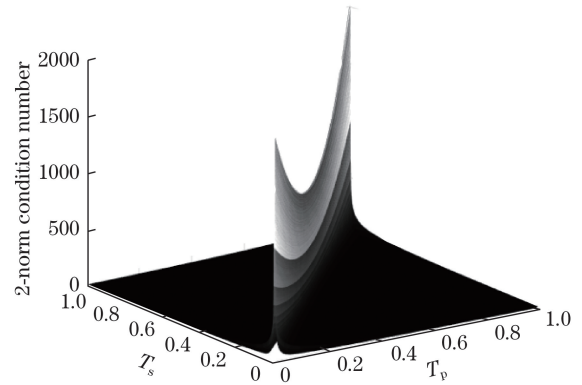


图 6 测量矩阵 \mathbf{M} 的 2-范数的条件数 κ 随 T_p 和 T_s 的变化
Fig. 6 2-norm conditional number κ of measurement matrix \mathbf{M} versus T_p and T_s

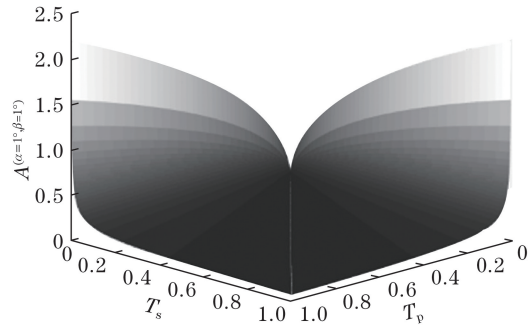


图 7 同时存在 1° 的 HWP 和 QWP 快轴装调误差时,系统偏振测量精度随 T_p 和 T_s 的变化

Fig. 7 Polarization measurement accuracy of system versus T_p and T_s under concurrence of 1° alignment errors of HWP and QWP fast axes

一般情况下,条件数 $\kappa \geq 10$ 就认为矩阵是病态的。为确保测量矩阵是非病态的,令 $\kappa_0 = 1.84$,根据(17)式进行优化,得到最优解为 $T_p^* = 0.772$ 、 $T_s^* = 0.228$ 。分别选取分束比为 $0.772/0.228$ 、 $0.80/0.20$ 和 $0.819/0.181$ (对应的条件数分别为

1.838, 1.768, 1.837), 选取 HWP 和 QWP 的快轴装调误差分别为 $-3^\circ \sim 3^\circ$, 由(16)式计算不同分束比 T_p/T_s 对应的系统偏振测量精度如图 8 所示。由图 8 可知, 分束比为 0.772/0.228 的系统可有效减小 HWP 和 QWP 快轴装调误差对系统偏振测量精度的影响。

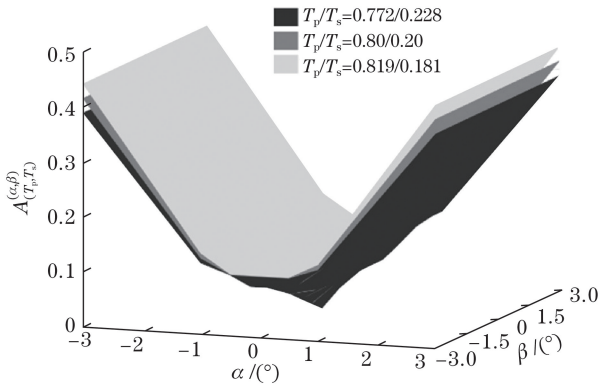


图 8 HWP 和 QWP 快轴装调误差的优化
Fig. 8 Optimization of alignment errors of HWP and QWP fast axes

系统偏振测量精度的值越大, 相应的系统偏振测量精度越低, 因此, 与分束比为 0.80/0.20 的系统相比, 分束比为 0.772/0.228 时系统偏振测量精度提高了 $\Delta A = A_{(T_p/T_s=0.8, T_s=0.2)}^{(\alpha, \beta)} - A_{(T_p/T_s=0.772, T_s=0.228)}^{(\alpha, \beta)}$, 图 9 所示为 ΔA 与 α, β 的变化关系。

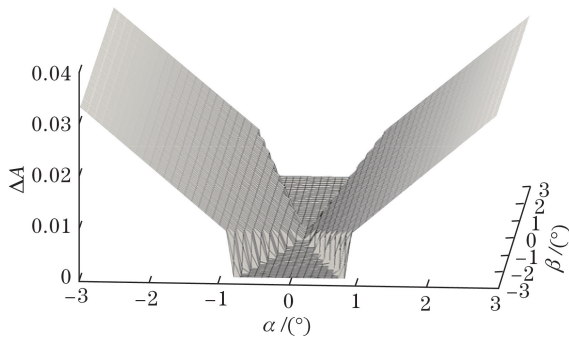


图 9 ΔA 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化关系

Fig. 9 ΔA versus alignment error α of HWP fast axis and alignment error β of QWP fast axis

由图 9 可知, 与分束比为 0.80/0.20 的系统相比, 分束比为 0.772/0.228 的系统对 HWP 快轴装调误差 α 或 QWP 快轴装调误差 β 的优化结果如下。

1) 当 $\alpha \neq 0$ 且 $\beta = 0$ 时, 分束比为 0.772/0.228 的系统可有效减小 α 对系统偏振测量精度的影响, ΔA 随 $|\alpha|$ 的增大而线性增大;

2) 当 $\alpha = 0$ 且 $\beta \neq 0$ 时, 分束比为 0.772/0.228 的系统无法对 β 进行优化;

3) 当 $\alpha \neq 0$ 且 $\beta \neq 0$ 时, 有 a) 和 b) 两种情况: a) 当 $3^\circ \geq |\alpha| \geq 0.9^\circ$ 且 $|\beta| \leq 3^\circ$ 或者 $0.9^\circ > |\alpha|$ 且 $|\beta| \leq 3.5|\alpha|$ 时, 分束比为 0.772/0.228 的系统可有效减小 α 和 β 对系统偏振测量精度的影响, ΔA 随 $|\alpha|$ 的增大而线性增大; b) 当 $0.9^\circ > |\alpha|$ 且 $3^\circ \geq |\beta| > 3.5|\alpha|$ 时, 分束比为 0.772/0.228 的系统无法对 α 和 β 进行优化。

实际系统中 HWP 和 QWP 往往同时存在装调误差, 在实际的装调过程中 HWP 和 QWP 的装调环境相同, 可确保 HWP 和 QWP 具有相同的装调精度(即 $|\alpha| \approx |\beta|$)。在这种情况下, 由图 9 可知, 选取分束比为 0.772/0.228 的系统可有效减小 HWP 和 QWP 快轴装调误差对系统偏振测量精度的影响。

4.2 系统的偏振度测量精度仿真及分析

偏振度的测量精度是评价四分束全 Stokes 同时偏振成像系统性能的重要指标, 偏振度 $P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$, 系统中同时存在 HWP 和 QWP 快轴装调误差时, 任意入射光的偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta)}$ 为

$$|\Delta P|^{(\alpha, \beta)} = \left| \sum_{i=0}^3 \frac{\partial P}{\partial S_i} \cdot \Delta S_i \right| = \left| \sum_{i=0}^3 \frac{\partial P}{\partial S_i} \cdot e_{S_i} \right| \quad (18)$$

由图 2 可知, 系统中同时存在 HWP 和 QWP 快轴装调误差时, 任意入射光 S_0 分量的测量误差 e_{S_0} 和 S_1 分量的测量误差 e_{S_1} 均为 0。因此(18)式可简化为

$$|\Delta P|^{(\alpha, \beta)} = \left| \frac{\partial P}{\partial S_2} \cdot e_{S_2} + \frac{\partial P}{\partial S_3} \cdot e_{S_3} \right| = \left| \frac{S_2 \cdot e_{S_2} + S_3 \cdot e_{S_3}}{S_0 \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \right| \quad (19)$$

令分束比 $T_p^*/T_s^* = 0.772/0.228$, HWP 和 QWP 的快轴与 x 轴正向的夹角分别为 -22.5° 和 45° , 分别令偏振度 $P = 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0.1$, 不同偏振度对应的入射光采样总数均为 1000 (即恒有 $N_x = 20, N_\psi = 50$)。对于偏振度均为 P 的 1000 个入射光采样点, 选择偏振度测量误差的绝对值的最大值作为入射光偏振度为 P 时的偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P)}$, 仿真结果如图 10 所示。可以看出, 当 α 和 β 恒定时, 入射光的偏振度 P 越大, 则偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P)}$ 的值越大, 因此选择入射光的偏振度 $P = 1$ 时对应的偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 来评估系统的偏振度测量精度。

令分束比 $T_p^*/T_s^* = 0.772/0.228$, HWP 和 QWP

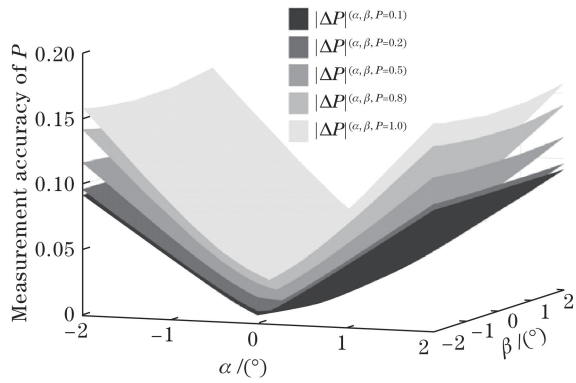


图 10 入射光的偏振度分别为 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0.1 时, 偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P)}$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化关系

Fig. 10 Polarization measurement accuracy $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P)}$ versus alignment error α of HWP fast axis and β of QWP fast axis for different degrees of polarization of 1, 0.8, 0.5, 0.2 and 0.1

的快轴与 x 轴正向的夹角分别为 -22.5° 和 45° , 令偏振度 $P=1, N_x=20$ 和 $N_\psi=50$ (即在邦加球球面

上选取 1000 个不同偏振态的 Stokes 矢量作为入射光), 表 1 和表 2 所示分别为系统的偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 和系统偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=1)$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化关系。

由表 1 和表 2 可知, 当同时存在 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 时, 恒有 $A^{(\alpha, \beta)} > |\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$, 因此, 只要保证 $A^{(\alpha, \beta)}$ 在测量精度指标 δ 以内, 即可保证 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 也在测量精度指标 δ 以内。当系统中存在 HWP 和 QWP 快轴装调耦合误差时, 为保证 $A^{(\alpha, \beta)}$ 和 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 均在 2% 以内, HWP 快轴装调误差应在 $\pm 0.15^\circ$ 内, QWP 快轴装调误差应在 $\pm 0.52^\circ$ 内。

实际应用中, 考虑地物的偏振度通常只有百分之几, 假设入射光的偏振度为 5%, HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 对偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ 和偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ 的影响分别如表 3 和表 4 所示。

表 1 系统偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化

Table 1 Variation in polarization measurement accuracy $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ of system with alignment error α of HWP fast axis and alignment error β of QWP fast axis

$\beta / (^\circ)$	$ \Delta P ^{(\alpha, \beta, P=1)} / \%$								
	$\alpha = -0.3^\circ$	$\alpha = -0.2^\circ$	$\alpha = -0.15^\circ$	$\alpha = -0.1^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 0.1^\circ$	$\alpha = 0.15^\circ$	$\alpha = 0.2^\circ$	$\alpha = 0.3^\circ$
-1.2	3.48	2.96	2.75	2.54	2.18	2.48	2.70	2.93	3.44
-0.6	2.65	2.01	1.73	1.46	1.07	1.46	1.72	2.01	2.65
-0.52	2.56	1.91	1.61	1.34	0.92	1.33	1.60	1.90	2.56
-0.2	2.33	1.59	1.23	0.88	0.35	0.88	1.23	1.59	2.33
0	2.28	1.52	1.14	0.76	0	0.76	1.14	1.52	2.28
0.2	2.33	1.59	1.23	0.88	0.35	0.88	1.23	1.59	2.33
0.52	2.57	1.91	1.60	1.33	0.92	1.34	1.61	1.91	2.57
0.6	2.64	2.01	1.72	1.45	1.07	1.47	1.72	2.02	2.64
1.2	3.43	2.92	2.69	2.49	2.20	2.52	2.73	2.97	3.48

表 2 系统偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=1)$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化

Table 2 Variation in polarization measurement accuracy $A(\alpha, \beta, P=1)$ of system with alignment error α of HWP fast axis and alignment error β of QWP fast axis

$\beta / (^\circ)$	$A(\alpha, \beta, P=1) / \%$								
	$\alpha = -0.3^\circ$	$\alpha = -0.2^\circ$	$\alpha = -0.15^\circ$	$\alpha = -0.1^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 0.1^\circ$	$\alpha = 0.15^\circ$	$\alpha = 0.2^\circ$	$\alpha = 0.3^\circ$
-1.2	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30
-0.6	3.85	2.57	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.57	3.85
-0.52	3.85	2.57	1.93	1.83	1.83	1.83	1.93	2.57	3.85
-0.2	3.85	2.57	1.93	1.29	0.70	1.29	1.93	2.57	3.85
0	3.85	2.57	1.93	1.29	0	1.29	1.93	2.57	3.85
0.2	3.85	2.57	1.93	1.29	0.70	1.29	1.93	2.57	3.85
0.52	3.85	2.57	1.93	1.83	1.83	1.83	1.93	2.57	3.85
0.6	3.85	2.57	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.57	3.85
1.2	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30

表 3 系统偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化
 Table 3 Variation in polarization measurement accuracy $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ of system with alignment error α of HWP fast axis and alignment error β of QWP fast axis

$\beta / (^{\circ})$	$ \Delta P ^{(\alpha, \beta, P=5\%)} / \%$						
	$\alpha = -0.5^{\circ}$	$\alpha = -0.4^{\circ}$	$\alpha = -0.1^{\circ}$	$\alpha = 0^{\circ}$	$\alpha = 0.1^{\circ}$	$\alpha = 0.4^{\circ}$	$\alpha = 0.5^{\circ}$
-2.5	2.43	2.01	0.89	0.62	0.88	2.01	2.44
-2.4	2.41	1.99	0.85	0.58	0.84	1.99	2.42
-1.0	2.28	1.83	0.48	0.15	0.48	1.83	2.28
-0.5	2.27	1.82	0.47	0.06	0.47	1.82	2.27
0	2.27	1.82	0.45	0	0.45	1.82	2.27
0.5	2.27	1.82	0.47	0.06	0.47	1.82	2.27
1.0	2.28	1.83	0.48	0.15	0.48	1.83	2.27
2.4	2.42	1.99	0.84	0.58	0.85	1.99	2.42
2.5	2.43	2.01	0.88	0.62	0.89	2.01	2.44

表 4 偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ 随 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的变化关系
 Table 4 Variation in polarization measurement accuracy $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ with alignment error α of HWP fast axis and alignment error β of QWP fast axis

$\beta / (^{\circ})$	$A(\alpha, \beta, P=5\%) / \%$						
	$\alpha = -0.5^{\circ}$	$\alpha = -0.4^{\circ}$	$\alpha = -0.1^{\circ}$	$\alpha = 0^{\circ}$	$\alpha = 0.1^{\circ}$	$\alpha = 0.4^{\circ}$	$\alpha = 0.5^{\circ}$
-2.5	2.47	2.02	0.93	0.93	0.93	2.02	2.47
-2.4	2.47	1.99	0.87	0.87	0.87	1.99	2.47
-1.0	2.47	1.98	0.49	0.25	0.49	1.98	2.47
-0.5	2.47	1.98	0.49	0.11	0.49	1.98	2.47
0	2.47	1.98	0.49	0	0.49	1.98	2.47
0.5	2.47	1.98	0.49	0.11	0.49	1.98	2.47
1.0	2.47	1.98	0.49	0.25	0.49	1.98	2.47
2.4	2.47	1.99	0.87	0.87	0.87	1.99	2.47
2.5	2.47	2.02	0.93	0.93	0.93	2.02	2.47

由表 3 和表 4 可知,当系统中存在 HWP 和 QWP 快轴装调耦合误差时,为保证 $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ 和 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ 均在 2% 以内, HWP 快轴装调误差应在 $\pm 0.4^{\circ}$ 内, QWP 快轴装调误差应在 $\pm 2.4^{\circ}$ 内。

5 结 论

通过研究系统的偏振调制原理,建立了包含 HWP 和 QWP 快轴装调误差的 Stokes 矢量测量误差模型。仿真了 7 种典型基态入射光的 Stokes 矢量测量误差,给出了求解任意入射光 Stokes 矢量测量误差的方法。当同时存在 HWP 和 QWP 快轴装调误差时,任意入射光的 S_0 分量和 S_1 分量的测量误差均为 0, S_2 分量的测量误差仅受 HWP 快轴装调误差影响, S_3 分量的测量误差仅受 QWP 快轴装调误差的影响。在邦加球的球面和球内选取不同偏

振度的 Stokes 矢量作为入射光,仿真了不同偏振度的入射光下 HWP 和 QWP 装调误差对偏振测量精度的影响,仿真结果表明,当 HWP 和 QWP 装调误差恒定时,偏振测量精度的值随偏振度的增大而增大,因此,选取偏振度为 1 时对应的偏振测量精度来评估系统。研究了 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 的优化方法,仿真结果表明,当 $3^{\circ} \geq |\alpha| \geq 0.9^{\circ}$ 且 $|\beta| \leq 3^{\circ}$ 或 $0.9^{\circ} > |\alpha|$ 且 $|\beta| \leq 3.5|\alpha|$ 时,分束比为 0.772/0.228 的系统可有效减小 α 和 β 对系统偏振测量精度的影响。在 HWP 和 QWP 具有相同装调精度(即 $|\alpha| \approx |\beta|$) 的实际装调情况下,可通过选取分束比为 0.772/0.228 的系统实现对波片快轴装调耦合误差 α 和 β 的优化。为保证系统偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=1)$ 和偏振度测量精度 $|\Delta P|^{(\alpha, \beta, P=1)}$ 均在 2% 内, HWP 装调误差 α 应在 $\pm 0.15^{\circ}$ 内, QWP 装调误差 β 应在 $\pm 0.52^{\circ}$ 内。此时,

HWP 和 QWP 快轴装调误差的上限分别为 $\alpha^{\text{up}} = 0.15^\circ$ 和 $\beta^{\text{up}} = 0.52^\circ$, 满足波片快轴装调误差的优化条件 $0.9^\circ > |\alpha^{\text{up}}|$ 且 $|\beta^{\text{up}}| \leq 3.5 |\alpha^{\text{up}}|$, 进一步验证了所提优化方法具有一定的可行性。分析了当入射光的偏振度为 5% 时 HWP 快轴装调误差 α 和 QWP 快轴装调误差 β 对偏振度测量精度 $|\Delta P|_{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ 和偏振测量精度 $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ 的影响。仿真结果表明, 为保证 $A(\alpha, \beta, P=5\%)$ 和 $|\Delta P|_{(\alpha, \beta, P=5\%)}$ 均在 2% 以内, HWP 快轴装调误差应在 $\pm 0.4^\circ$ 内, QWP 快轴装调误差应在 $\pm 2.4^\circ$ 内。

研究的内容可为系统光学参数的设计、HWP 和 QWP 快轴装调的精度要求提供理论指导。然而, 在实际装调中总会存在 HWP 和 QWP 快轴装调误差, 结合所建立的包含 HWP 和 QWP 快轴装调误差的 Stokes 矢量测量误差模型, 通过偏振定标可对波片快轴装调误差进行修正, 因此, 系统的偏振定标是下一步要进行的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Tao F, Hong J, Song M X, *et al.* Geometric calibration data processing and software design of directional polarization camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091005.
陶菲, 洪津, 宋茂新, 等. 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091005.
- [2] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312003.
康晴, 袁银麟, 李健军, 等. 大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证实验研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312003.
- [3] Bu M, Hu S S, Tao Z H, *et al.* Scattering characteristics of leukocytes on polarized light and relationship between scattering characteristics and cell structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1007001.
卜敏, 胡双双, 陶兆禾, 等. 白细胞对偏振光的散射特性及散射特性与细胞结构的关系[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1007001.
- [4] Wang G C, Wang J L, Zhang Z D, *et al.* Polarization analysis of the telescope system used for space target polarization detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1211003.
王国聪, 王建立, 张振铎, 等. 用于空间目标偏振探测的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1211003.
- [5] Li Y, Zhang W J, Chen J Y. Modeling and simulation for target detection in polarization scene[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2233-2243.
李岩, 张伟杰, 陈嘉玉. 偏振场景目标探测的建模与仿真[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2233-2243.
- [6] Peng Y, Feng B, Shi Z L, *et al.* Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404004.
彭勇, 冯斌, 史泽林, 等. 微偏振片阵列成像的非均匀校正研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0404004.
- [7] Feng B, Shi Z L, Liu H Z, *et al.* Polarized-pixel performance model for DoFP polarimeter[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(6): 065703.
- [8] Azzam R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1982, 29(5): 685-689.
- [9] Pezzaniti J L, Chenault D, Roche M, *et al.* Four camera complete Stokes imaging polarimeter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6972: 69720J.
- [10] Li C L, Sun X B, Wang H, *et al.* Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412004.
李翠丽, 孙晓兵, 王涵, 等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412004.
- [11] Liu Z, Yang W F, Ye Q H, *et al.* Alignment error analysis of the snapshot imaging polarimeter[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(8): 1934-1940.
- [12] Liao Y B. Polarization of optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 45-63.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 45-63.
- [13] Li G P, Wang L, Xie Y. Research on measurement technology for degree of polarization of optical lens[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2009, 29(5): 55-57, 66.
黎高平, 王雷, 谢毅. 光学镜头偏振度测试技术研究[J]. *宇航计测技术*, 2009, 29(5): 55-57, 66.