

基于孔径分割的全斯托克斯测量仪的误差分析

常凌颖, 赵俊香, 郑爱国, 杜 丹

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘 要: 基于孔径分割的全斯托克斯测量仪可以获取目标的全部偏振信息, 但是偏振探测器自身的误差会影响测量结果的准确度, 因此需要对测量仪获取斯托克斯矢量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 时的测量误差进行分析。首先, 研究了偏振光学中斯托克斯矢量相关理论; 其次, 介绍了基于孔径分割的全斯托克斯测量仪的工作原理和测量原理。然后, 分析了测量仪获取斯托克斯矢量时的误差源。最后, 仿真分析了该误差源对斯托克斯矢量和目标偏振信息(偏振度、椭率角和方位角)的影响。最终仿真结果表明: 波片相位延迟量 $\pm 5^\circ$ 时, 偏振度和椭率角的相对误差为 1.16%、4.55%, 波片快轴方向相对于 x 轴的角度为 $\pm 2^\circ$ 时, 方位角的相对误差为 7.68%; CCD 探测器的噪声信噪比为 40 dB 时, 偏振度、椭率角和方位角的相对误差约为 1%。分析结果为实验装置元件参数的选择提供参考依据, 为基于孔径分割的全斯托克斯测量仪的优化提供理论支持。

关键词: 孔径分割; 斯托克斯矢量; 偏振探测; 误差分析

中图分类号: O436.3; TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017004

Error analysis of the full-Stokes measuring instrument based on aperture division

Chang Lingying, Zhao Junxiang, Zheng Aiguo, Du Dan

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The whole Stokes measurement instrument based on aperture segmentation can obtain all polarization information of the target, but the polarization detector system has an effect on the measurement results. So it is necessary to analyze the measurement error of the Stokes vector $[S_0, S_1, S_2, S_3]$. First, the theory of Stokes vector was researched; next, the working and measuring principle of the full Stokes measuring instrument were introduced; then, the error sources were analyzed; last, the influences of the error sources were simulated. The final simulation results show that, the relative error of polarization and elliptical angle are 1.16% and 4.55% when the phase retardation is $\pm 5^\circ$, the relative error of azimuth angle is 7.68% when the fast axis direction of the wave plate is $\pm 2^\circ$ with respect to the x axis, and the relative error of polarization degree, elliptical angle and azimuth angle is about 1% when the signal-to-noise ratio of CCD detector is 40 dB. The analytical results provide reference for the selection of the component parameters of the experimental device, and support for the full Stokes measuring instrument based on aperture division.

Key words: aperture division; Stokes vector; polarization detection; error analysis

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475190)

作者简介: 常凌颖(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学设计与仪器研究方向的研究。Email: sophia_chang@126.com

通讯作者: 赵俊香(1991-), 女, 硕士生, 主要从事信息获取技术方面的研究。Email: 694168068@qq.com

0 引言

传统的光学系统根据光强来区分目标,但当背景环境复杂或光强差不明显时,利用光强来区分目标就比较困难,而利用光的偏振特性可以有效的解决这个问题进行目标识别。偏振是光固有的也是重要的自然属性之一,偏振探测把信息量从三维(光强、光谱和空间)扩展到七维(光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭率和旋转的方向),作为强度探测的补充^[1]。任何目标在反射、散射和电磁辐射过程中都会产生由他们自身性质和光学基本定律决定的偏振特性,即光束偏振特性的变化可以表征目标的物理信息。光的偏振态在各个领域都是很重要的参数,如在医学方面,偏振信息对微观结构很明显,可以检测癌细胞病变的位置^[2];在大气环境与海洋检测方面,通过偏振分析可以获得大气湿度和尘埃大小、浓度^[3]。此外,在偏振遥感^[4]、天文观测^[5]等其他方面也有重要应用。

近年来,偏振探测在目标识别方面的应用越来越广泛,如区分人造目标和自然背景、发现伪装目标^[6]等。偏振信息可以表征目标的物理信息,若在测量过程中某些因素影响偏振信息的测量,就不能有效的识别和观测目标,造成目标的伪识别。为了提高目标识别的准确度和复杂环境下检测出更多的有用信息,分析影响偏振信息测量的因素已成为关键。张绪国等^[7]定性分析了元件调整时误差及本身精度对整个系统误差的影响,该装置是利用双旋转波片技术通过 16 次测量获得目标的穆勒矩阵的,无法一次得到目标偏振特性且机械旋转会产生较大误差,降低测量精度;赵一鸣等^[8]在张绪国的装置基础上分析了误差来源并利用标准偏振度目标校准系统参数的方法,提高了测量精度。但仍需多次测量来获得目标的偏振信息,应采用通过一次测量得到目标的偏振特性,更有利于提高测量精度。

文中分析的基于孔径分割的全斯托克斯测量仪通过一次测量得到目标的偏振特性,分析了基于孔径分割的全斯托克斯测量仪工作原理和测量原理,分析了光源均匀性误差、波片相位延迟量误差、波片和偏振片的角度误差和 CCD 探测器噪声对斯托克斯矢量和偏振度测量的影响并进行 MATLAB 仿真。

1 偏振测量理论

1.1 斯托克斯矢量

光的偏振态可以用电场矢量来表示,若光沿 z 轴方向传播时,电场只有 x, y 方向的分量,平面波可表示如下形式^[9]:

$$E = E_0 \cos(\tau + \delta_0) \quad (1)$$

式中: $\tau = \omega t - kz$ 。写成分量形式为:

$$E_x = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y)$$

$$E_z = 0 \quad (2)$$

式中: E_{0x} 、 E_{0y} 和 δ_x 、 δ_y 分别是 x, y 分量的振幅和相位。电场的振动方式决定了光的偏振态,光的偏振态包含线偏振、圆偏振和椭圆偏振。1852 年 George Gabriel Stokes^[9]提出四个参量(斯托克斯矢量)来描述光波的强度和偏振态。斯托克斯矢量都是光强的时间平均值定义为:

$$S_{(x,y)} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ(x,y)} + I_{90^\circ(x,y)} \\ I_{0^\circ(x,y)} - I_{90^\circ(x,y)} \\ I_{45^\circ(x,y)} - I_{135^\circ(x,y)} \\ I_{\text{Right}(x,y)} - I_{\text{Left}(x,y)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_0 为入射光的总光强; S_1 为 0° 和 90° 方向上的光强差; S_2 为 45° 和 135° 方向上的光强差; S_3 为右旋圆偏振光与左旋圆偏振光的光强差。

一般情况下光波的偏振态为椭圆偏振,线偏振和圆偏振均是其特例,即所有的偏振态可看成椭圆偏振来进行研究。在斯托克斯子空间(S_1, S_2, S_3)中,准单色光波偏振态是由一个极坐标为($P, \frac{\pi}{2}, -2\varepsilon, 2\theta$)的点表示,如图 1 所示。

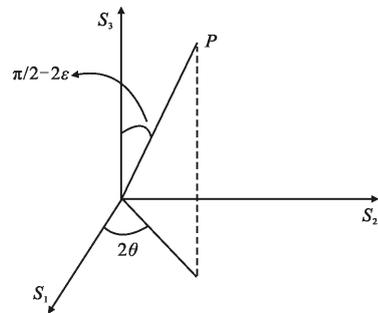


图 1 用斯托克斯子空间 S_1, S_2, S_3 中的点 P 表示部分偏振光
Fig.1 Partial polarized light showing in point P of Stokes space S_1, S_2, S_3

由斯托克斯矢量可以得到任意光的偏振态信息如下:

$$\begin{aligned} \tan 2\theta &= \frac{S_2}{S_1} \\ \varepsilon &= \frac{1}{2} \arcsin \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \\ P &= \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: θ 为椭圆的方位角, 表示偏振椭圆的长轴与 x 轴方向的夹角用以描述振动方向最强的方向与 x 轴方向的夹角; ε 为椭圆的椭率角, ε 表示偏振椭圆短轴与长轴之比, 其正负表征偏振光是右旋偏振光和左旋偏振光; P 为偏振度, 表示完全偏振光所占的比例, 是完全偏振光光强与总光强的比值。

从公式(4)可知, 描述目标偏振信息的三个参量均与斯托克斯矢量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 有关系, 若测量仪获取斯托克斯矢量时产生误差, 则最终获取目标的偏振信息准确度将降低。

1.2 斯托克斯矢量测量方法

由斯托克斯的表达式可知, 斯托克斯矢量是通过光束的光强值表示的, 实验中为了得到全斯托克斯矢量, 需要测量待测光通过至少四种不同偏振特性通道后的光强值。现有斯托克斯矢量测量的方法有分时法和同时法^[10]两种。分时法主要有三种形式: 一是旋转元件在不同的角度下依次获得不同偏振特性下的光强值; 二是加入调制器, 通过改变调制改变系统的偏振特性来获得不同的光强值; 三是多次测量目标, 但每次测量采用不同的偏振元件。同时法主要有分振幅, 分孔径, 分焦平面等。分振幅法是利用分束镜、偏振分束镜等分束光学器件将系统分成多个通道对同一目标测量, 每个通道中放置不同偏振元件, 需要多个 CCD 记录; 分孔径法是利用孔径分割的方法将整个系统分为多个子孔径系统, 每个子孔径系统中分别采用不同的偏振元件; 分焦平面法是将偏振元件集成到焦平面上去, 焦平面一个像元对应一个微偏振元件。

分时法测量是在不同时间获得不同偏振特性下的光强值, 无法快速直接输出斯托克斯矢量, 无法对变换的场景和移动的目标进行测量。同时法测量一次可以获得多个偏振特性下的光强值, 可直接测出斯托克斯矢量。分振幅法的系统成本高且光路复杂

难调制; 分焦平面法会损失空间分辨率且尺寸较小, 制作难度高, 分孔径法具有结构简单、紧凑和处理数据方便等优点, 虽然装调方面有一定困难, 总体来讲还是最优选择。

2 全 Stokes 测量仪实验装置和测量原理

2.1 全 Stokes 测量仪实验装置和工作原理

基于孔径分割的全斯托克斯测量仪装置如图 2 所示^[11], 由三个透镜 $L1$ 、 $L2$ 和 $L3$, 四象限波片数组 R , 标准偏振片 P , 四面角锥棱镜 PP 和四象限光电探测器 $Detector$ 组成。具有某种特定偏振态的待测细光束进入由 $L1$ 和 $L2$ 组成的前置准直系统, 使光束平行进入由四象限波片数组(R)和标准偏振片(P)组成的检偏通道, 再由四面角锥棱镜(PP)进行分割, 最终通过 $L3$ 将四束子光束聚焦在四象限探测器 ($Detector$)上, 采集到的光强值经过数学计算得到斯托克斯矢量和目标偏振信息(偏振度、椭率角和方位角)。

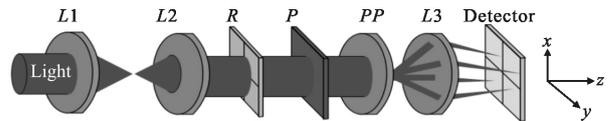


图 2 Stokes 测量仪装置

Fig.2 Stokes measuring device

文中要进行 Stokes 测量仪的误差分析, 则需已知偏振态的光源作为参考光进行验证, 采用的已知偏振态为 $S=[1, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^T$ 。偏振态发生器如图 3 所示^[12], 由激光器、两个消色差的 1/4 波片 ($R1$ 和 $R2$) 和偏振片 (P) 组成, 激光器发出的水平线偏振光经过 $R1$ (快轴方向与 x 轴成 45°) 变成圆偏振光, 转动 P 和 $R2$ 就可以产生任意状态的全偏振光。

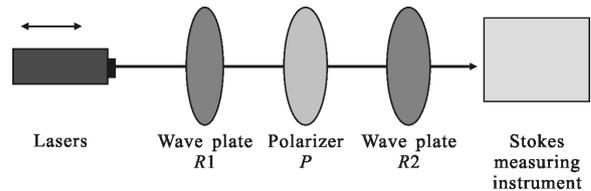


图 3 偏振态发生装置

Fig.3 Polarization generator

2.2 基于孔径分割测量仪的测量原理

如图 4 所示, R 是四象限波片数组、 P 是标准偏振片、 $Detector$ 是探测器。待测的偏振光进入相位延迟量

相同但快轴方向相对于 x 轴不同的波片数组 R , 透光轴沿着 x 轴的标准偏振片 P , 最后被 CCD 探测器接收。

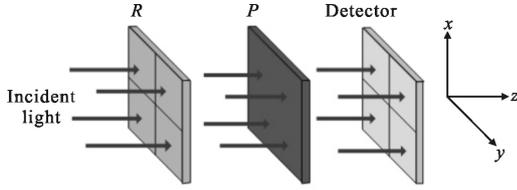


图 4 孔径分割原理结构图

Fig.4 Aperture segmentation principle diagram

$$M_{R(\theta, \delta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \delta \cdot \sin^2 2\theta & (1 - \cos \delta) \cdot \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta & -\sin \delta \cdot \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \cdot \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta & \cos \delta \cdot \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \cdot \sin \delta \\ 0 & \sin \delta \cdot \sin 2\theta & -\cos 2\theta \cdot \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: φ 为偏振片透光轴与 x 轴的夹角; δ 为波片相位延迟量; θ 为波片快轴方向与 x 轴的夹角。

每个子孔径的出射光根据穆勒矩阵写成如下公式:

$$S_{out} = M \cdot S_{in} \quad (8)$$

式中: S_{in} 为入射光的斯托克斯矢量; S_{out} 为出射光的斯托克斯矢量。

由于 CCD 探测器接收的是光强值, 即斯托克斯矢量的 S_0 , 则只与 M 的第一行有关, 记 $A = (1, 0, 0, 0)M$ 。要得到全斯托克斯矢量, 即把四个未知数全部解出来, 就要测出至少四种不同偏振调制通道下的光强值。由矩阵相乘可知, 测出的光强值与斯托克斯矢量有如下关系:

$$I^n = A^n \cdot S_{in} \quad (9)$$

式中: I^n 为由 CCD 探测器得到的光强值组成的列矩阵; A^n 为测量矩阵; 表征测量仪的偏振特性; S_{in} 为入射光的斯托克斯矢量。在文中所描述装置中 $n=4$, 具体表达形式如下:

$$I^n = [I_0 \ I_1 \ I_2 \ I_3]^T \quad (10)$$

$$S_{in} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T = [1, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^T \quad (11)$$

A 的四个元素分别为:

$$\begin{aligned} m_0 &= 1 \\ m_1 &= (\cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cdot \cos \delta) \cdot \cos 2\varphi + \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta \cdot (1 - \cos \delta) \cdot \sin 2\varphi \\ m_2 &= \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta \cdot (1 - \cos \delta) \cdot \cos 2\varphi + (\sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cdot \cos \delta) \cdot \sin 2\varphi \\ m_3 &= -\sin 2\theta \cdot \sin \delta \cdot \cos 2\varphi + \cos 2\theta \cdot \sin \delta \cdot \sin 2\varphi \end{aligned} \quad (12)$$

描述每个子孔径的偏振特性的矩阵形式:

$$M = M_{P(\varphi)} \cdot M_{R(\theta, \delta)} \quad (5)$$

式中: $M_{P(\varphi)}$ 和 $M_{R(\theta, \delta)}$ 分别是偏振片 P 和波片 R 的穆勒矩阵, 都是 4×4 的实矩阵, 具体形式如下:

$$M_{P(\varphi)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \sin 2\varphi \cdot \cos 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \sin 2\varphi \cdot \cos 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A^4 的形式如下:

$$A^4 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_0^0 & m_1^0 & m_2^0 & m_3^0 \\ m_0^1 & m_1^1 & m_2^1 & m_3^1 \\ m_0^2 & m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 \\ m_0^3 & m_1^3 & m_2^3 & m_3^3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据最小二乘法计算出射光的斯托克斯矢量:

$$S_{in}^e = A^{-1} \cdot I \quad (14)$$

式中: A^{-1} 是 A 的逆矩阵, 根据上述理论基础, 只需知道测量矩阵和探测器接收到的光强值, 便可计算出入射光的偏振态。

3 误差理论分析

为了分析基于孔径分割的全斯托克斯矢量测量仪获取斯托克斯矢量时的系统误差, 首先要分析误差的来源, 从全 Stokes 测量仪工作原理来分析, 仪器由偏振光的产生装置(图 3)、斯托克斯矢量获取装置(图 2 中波片 R 和偏振片 P 组成)和 CCD 接收装置三部分组成, 因而误差就来源于这三部分。偏振光产生装置中误差来源是光源均匀性, 斯托克斯矢量获取装置中误差来源是波片 R 和偏振片 P , 其包含波片相位延迟量、波片快轴方向与 x 轴的夹角和偏振片透光轴方向与 x 轴夹角; CCD 探测器接收装置中误差来源是 CCD 探测器的噪声。

3.1 偏振光产生装置中的误差理论分析

由于激光器发出的光是脉冲波, 采集到的光强

会随时间有微小的变化,是一个乘性噪声。设采集到的光强值和标准的光强值相比,存在一个噪声因子 σ ,则定义为:

$$\sigma=1-\frac{I_t}{I_0} \quad (15)$$

式中: I_t 和 I_0 分别是采集到的光强值和标准的光强值。

于是公式(9)变为:

$$I'=(1-\sigma) \cdot A \cdot S_{in} \quad (16)$$

测量的斯托克斯矢量是:

$$S_e=A^{-1} \cdot I'=A^{-1} \cdot (1-\sigma) \cdot A \cdot S_{in} \quad (17)$$

则斯托克斯矢量误差是:

$$|\varepsilon_s|=\sigma \cdot S_{in} \quad (18)$$

3.2 斯托克斯矢量获取装置中的误差理论分析

如果考虑波片相位延迟量误差、波片的快轴方向与 x 轴夹角和偏振片通光方向与 x 轴夹角的误差,则公式(9)变为:

$$I'=A' \cdot S_{in} \quad (19)$$

测量的斯托克斯矢量是:

$$S_e=A^{-1} \cdot A' \cdot S_{in} \quad (20)$$

式中: A' 为当波片、偏振片存在误差时的测量矩阵,

则斯托克斯矢量误差是:

$$|\varepsilon_s|=S_e-S_{in}=A^{-1} \cdot \Delta A \cdot S_{in} \quad (21)$$

其中

$$\Delta A=A'-A \quad (22)$$

3.3 CCD 探测器接收装置中的误差理论分析

CCD 探测器测量的是总体光强,不需考虑光强分布,在记录光强时,只需计算视场内光强的平均值。在此只需考虑读出误差和外界环境噪声等因素,设 CCD 光强测量值为:

$$I'=I+\sigma \quad (23)$$

测量的斯托克斯矢量是:

$$S_e=A^{-1} \cdot I'=A^{-1} \cdot (I+\sigma) \quad (24)$$

则斯托克斯矢量误差是:

$$|\varepsilon_s|=A^{-1} \cdot \sigma \quad (25)$$

4 仿真和分析

参考文献[13-14]提出根据测量矩阵的条件数来判断偏振分析仪性能的优劣,条件数越小代表偏振分析仪的性能越好。

根据测量原理可知检测光的偏振态,其实就是

解线性方程组,从数学的角度出发,矩阵的条件数表示方程组的“病态”程度,一个矩阵的条件数最小为 1,越接近 1,线性方程组的解越精确,误差就越小。

4.1 全局最优下的偏振片和波片

Sabatke D S 等^[15]提出相位延迟量为 132° 且四象限波片数组的快轴方向分别与 x 轴夹角为 $(-51.7^\circ, -15.1^\circ, 15.1^\circ, 51.7^\circ)$ 时条件数 $k_{2(A)}=1.7378$ 最小,偏振测量仪的性能最好。偏振片通光轴方向和四象限波片数组的快轴方向如图 5 所示,其中偏振片通光轴方向与 x 轴的夹角为 0° ,四象限波片数组的快轴方向与 x 轴的夹角各不相同,由图中黑色箭头表示。

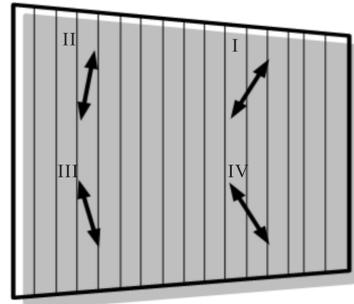


图 5 偏振片通光轴方向和波片的快轴方向

Fig.5 Polarizer passes through the optical axis direction and the wave plate fast axis direction

4.2 仿真结果

现在对偏振态 $S=[1, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^T$ 进行各个误差源下的偏振仿真。

4.2.1 光源均匀性

激光器产生的是脉冲波,采集到的光强会随时间的变化有微小误差,均匀性在 $(-0.08, 0.08)$ 变化时,斯托克斯矢量、偏振度、椭率角和方位角误差的仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)中,横坐标是光源均匀性,纵坐标是斯托克斯矢量强度误差,图 6(b)中横坐标是光源均匀性,纵坐标是目标偏振信息(偏振度、椭率角、方位角)的误差,其中黑色方块为偏振度误差、黑色圆点为椭率角误差和黑色正方形为方位角误差。

从仿真计算结果得到,光源均匀性对斯托克斯矢量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 强度误差的影响为 4.19%;光源均匀性对偏振度、椭率角、方位角误差的影响趋于 0。光源均匀性应控制在 $\pm 2\%$,对斯托克斯矢量强度测量值误差影响幅值在 1%内。

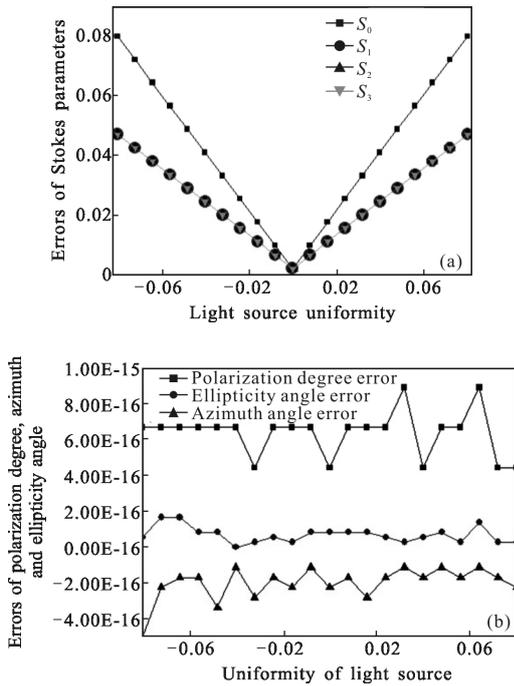


图 6 (a)光源均匀性对 Stokes 矢量强度误差的影响,(b)光源均匀性对偏振度、椭圆率角、方位角的误差影响

Fig.6 (a)Influence of the uniformity of light source on the Stokes vector intensity error, (b) influence of the uniformity of the light source on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

4.2.2 波片相位延迟量

由于入射光的入射角和波段会带来波片相位延迟量的误差,若波片相位延迟量误差在(-5°, 5°)变化时,斯托克斯矢量、偏振度、椭圆率角和方位角误差的仿真结果如图 7 所示。

图 7(a)中,横坐标是波片相位延迟量误差,纵坐标是斯托克斯矢量强度误差,图 7(b)中横坐标是波片相位延迟量误差,纵坐标是目标偏振信息(偏振度、椭圆率角、方位角)的误差,其中黑色方块为偏振度误差、黑色圆点为椭圆率角误差和黑色正方形为方位角误差。

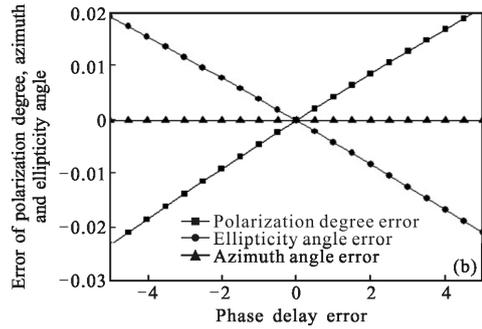
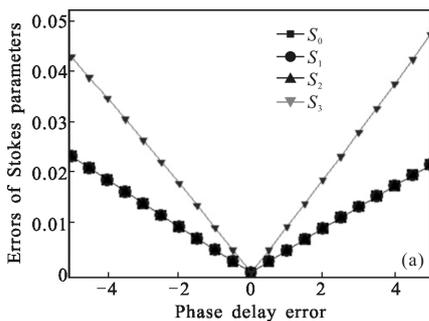


图 7 (a)波片相位延迟量误差对 Stokes 矢量强度误差的影响,(b)波片相位延迟量误差对偏振度、椭圆率角、方位角的误差影响

Fig.7 (a)Influence of retardation error of wave plate on Stokes vector intensity errors, (b)influence of retardation error of wave plate on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

从仿真计算结果得到,波片相位延迟量误差对斯托克斯矢量中的 S₃ 参量影响最大为 4.11%,波片相位延迟量误差对偏振度、椭圆率角和方位角的影响分别为 1.16%、4.55%和 1×10⁻¹⁵%。

4.2.3 波片快轴角度

由于安装存在一定误差,若波片快轴角度误差在(-2°, 2°)变化时,斯托克斯矢量、偏振度、椭圆率角和方位角误差的仿真结果如图 8 所示。

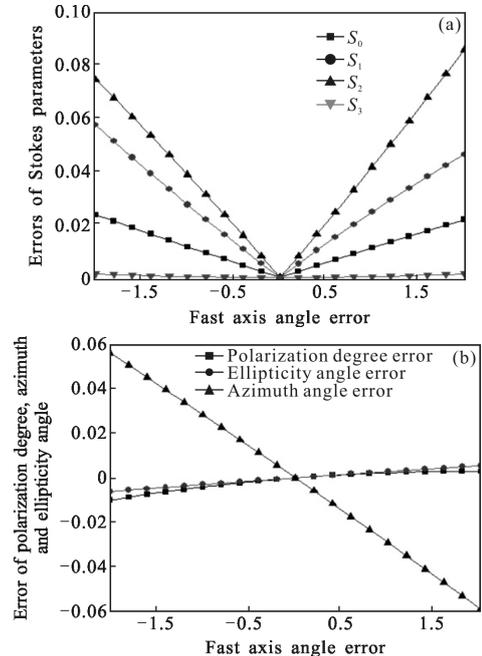


图 8 (a)波片快轴角度误差对 Stokes 矢量强度误差的影响,(b)波片快轴角度误差对偏振度、椭圆率角、方位角的误差影响

Fig.8 (a) Influence of angular error of fast axis of wave plate on Stokes vector intensity errors, (b) influence of angular error of fast axis of wave plate on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

图 8(a)中,横坐标是波片快轴角度误差,纵坐标是斯托克斯矢量强度误差,图 8(b)中横坐标是波片快轴角度误差,纵坐标是目标偏振信息(偏振度、椭率角、方位角)的误差,其中黑色圆点为偏振度误差、黑色方块为椭率角误差和黑色正方形为方位角误差。

从仿真计算结果得到,波片快轴角度误差对斯托克斯矢量中的 S_2 参量影响最大为 7.30%,波片快轴角度误差对偏振度、椭率角和方位角的影响分别为 0.34%、1.33%和 7.68%。

4.2.4 偏振片透光轴角度

由于安装存在一定误差,若标准偏振片透光轴角度误差在 $(-2^\circ, 2^\circ)$ 变化时,斯托克斯矢量、偏振度、椭率角和方位角误差的仿真结果如图 9 所示。

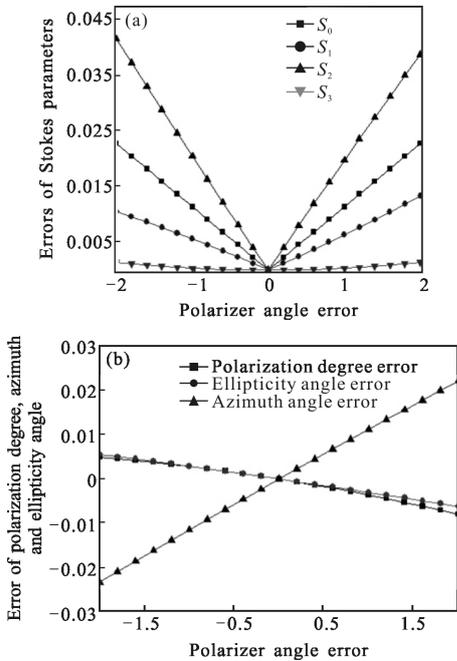


图 9 (a)偏振片透光轴角度误差对 Stokes 矢量强度误差的影响, (b)偏振片透光轴角度误差对偏振度、椭率角、方位角的误差影响

Fig.9 (a) Influence of polarizer through the optical axis angle error on Stokes vector intensity errors, (b) influence of polarizer through the optical axis angle error on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

图 9(a)中,横坐标是偏振片透光轴角度误差,纵坐标是斯托克斯矢量强度误差,图 9(b)中横坐标是偏振片透光轴角度误差,纵坐标是目标偏振信息(偏振度、椭率角、方位角)的误差,其中黑色圆点为偏振度误差、黑色方块为椭率角误差和黑色正方形为方位角误差。

位角误差。

从仿真计算结果得到,偏振片透光轴角度误差对斯托克斯矢量中的 S_2 参量影响最大为 3.66%,偏振片透光轴角度误差对偏振度、椭率角和方位角的影响分别为 0.34%、1.33%和 3.02%。

4.2.5 CCD 噪声

只考虑读出误差和外界环境噪声,若公式(25)中噪声信噪比在(15dB, 40dB)变化时,斯托克斯矢量、偏振度、椭率角和方位角误差的仿真结果如图10所示。

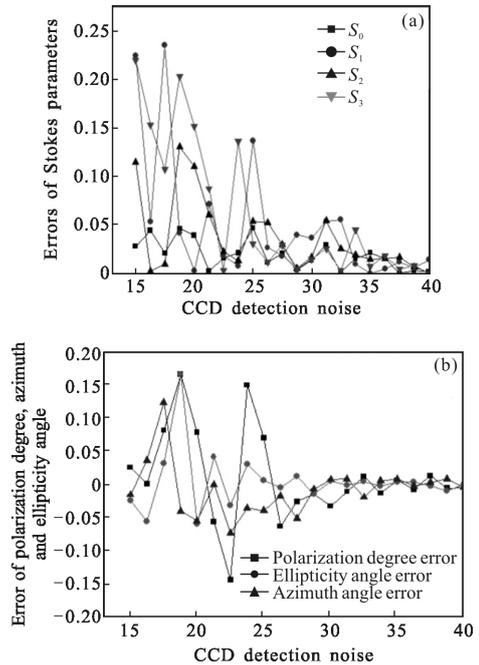


图 10 (a)CCD 探测器噪声对 Stokes 矢量强度误差的影响, (b)CCD 探测器噪声对偏振度、椭率角、方位角的误差影响

Fig.10 (a) Influence of CCD detector noise on Stokes vector intensity errors, (b) influence of CCD detector noise on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

图 10(a)中,横坐标是 CCD 探测器的噪声信噪比,纵坐标是斯托克斯矢量强度误差,图 10(b)中横坐标是 CCD 探测器的噪声信噪比,纵坐标是目标偏振信息(偏振度、椭率角、方位角)的误差,其中黑色方块为偏振度误差、黑色圆点为椭率角误差和黑色正方形为方位角误差。

结合图 10 和表 1,CCD 探测器的噪声信噪比为 40 dB 时对斯托克斯矢量强度、偏振度、椭率角和方位角的影响约为 1%,故在实验中最好采用噪声信噪

比大于 40 dB 的探测器。

表 1 CCD 探测器噪声对偏振度、椭率角、方位角的误差影响

Tab.1 Influence of CCD detector noise on the error of the polarization degree, the ellipticity angle and the azimuth angle

Noise signal to noise ratio	15 dB	20 dB	25 dB	30 dB	35 dB	40 dB
Dop	13.63%	7.75%	4.66%	2.64%	1.36%	1.24%
ϵ	26.03%	17.71%	8.19%	4.58%	3.28%	1.63%
θ	21.16%	9.71%	8.78%	3.71%	3.03%	1.22%

5 结论

根据仿真分析结果可得，在基于孔径分割的全斯托克斯测量仪中，光源均匀性应控制在 $\pm 2\%$ ，对斯托克斯矢量强度测量值误差影响幅值在 1% 内；波片需要有极高的延迟精度，波片较小的相位延迟误差对偏振度和椭率角有较大的影响；波片快轴角度和偏振片通光轴角度与 x 轴夹角应有较高精度，否则会导致较大误差降低测量的可信度；CCD 探测器的噪声信噪比为 40 dB 时对目标偏振信息(偏振度、椭率角、方位角)影响约为 1%，建议选择噪声信噪比大于 40 dB 的 CCD 探测器以确保测量精度。

参考文献：

[1] Wang Xia, Chen Mingyang, Chen Zhenyue, et al. An overview of systematic structure of active polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (8): 2244–2251. (in Chinese).

[2] Du E, He H, Zeng N, et al. Mueller matrix polarimetry for differentiating characteristic features of cancerous tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(7): 1729–1733.

[3] Wu P J, Walsh J T. Stokes polarimetry imaging of rat-tail tissue in a turbid medium using incident circularly polarized light [J]. *Lasers in Surgery & Medicine*, 2005, 37(5): 396–406.

[4] Giakos G C, Fraiwan L, Patnekar N, et al. A sensitive

optical polarimetric imaging technique for surface defects detection of aircraft turbine engines [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2004, 53(1): 216–222.

[5] Horvath G, Hegedus R, Barta A, et al. Imaging polarimetry of the fogbow polarization characteristics of white rainbows measured in the high Arctic [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (28): F64–F71.

[6] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Target detection experiment using mid-wave infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 7–11. (in Chinese)

[7] Zhang Xuguo, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Optimization and error analysis of optical components in laser remote sensing polarization imaging system [J]. *Journal of the Optical*, 2008, 28(6): 1191–1196. (in Chinese)

[8] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo. Laser polarization active detection and imaging system error research and system improvement [J]. *Optical Technology*, 2009, 35(6): 851–858. (in Chinese)

[9] Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Tianjin: Science Press, 2003. (in Chinese)

[10] He Hucheng. Study on optical system of simultaneous and complete polarization imaging [D]. Suzhou: Suzhou University, 2014. (in Chinese)

[11] Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Li Qiwei, et al. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10822–10835.

[12] He Chao, Chang Jintao, Wang Yong. A stokes vector measuring instrument based on four-quadrant detector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35 (1): 57–62. (in Chinese)

[13] Ambirajan A, Look D C. Optimum angles for a polarimeter: part I [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1651–1655.

[14] Tyo J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(4): 619–630.

[15] Sabatke D S, Descour M R, Dereniak E L, et al. Optimization of retardance for a complete Stokes polarimeter [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 802–804.