

## 空间调制型全偏振成像系统的角度误差优化

刘震<sup>1,2,3</sup>, 洪津<sup>1,2,3</sup>, 龚冠源<sup>1,2,4</sup>, 郑小兵<sup>1,3</sup>, 杨伟锋<sup>1,3</sup>, 袁银麟<sup>1,3</sup>

(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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 空间调制型全偏振成像系统利用 Savart 偏光镜能够将被探测目标的 4 个 Stokes 参数  $S_0 \sim S_3$  调制在同一幅干涉图像中, 从而通过单次采集便可获得完整的偏振信息。在该系统中, 半波片和检偏器的角度误差对 Stokes 参数的测量精度有着不可忽略的影响。文中首先给出了包含上述两种角度误差的干涉强度调制方程, 根据实际系统参数, 在角度误差模型的基础上分析了当入射光为自然光、 $0^\circ/90^\circ$  线偏振光、 $45^\circ/135^\circ$  线偏振光和左/右旋圆偏振光时, 角度误差对空间调制型全偏振成像系统的 Stokes 参数测量精度的影响。利用这四种基态偏振光的偏振测量误差, 给出了任意偏振态和偏振度的入射光偏振测量误差的表征方法, 最后, 文中以系统测量矩阵条件数为优化目标函数, 经仿真计算得出当 Savart 板厚度为 23 mm 时系统测量矩阵条件取得最小值为 2.06, 半波片和检偏器耦合角度误差对系统偏振测量精度的影响程度最小。

**关键词:** 偏振; 偏振成像; 椭圆偏振测量法; 干涉测量法; Savart 偏光镜; 角度误差  
**中图分类号:** O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0117003

## Alignment error optimization of spatially modulated imaging polarimeter system

Liu Zhen<sup>1,2,3</sup>, Hong Jin<sup>1,2,3</sup>, Gong Guanyuan<sup>1,2,4</sup>, Zheng Xiaobing<sup>1,3</sup>, Yang Weifeng<sup>1,3</sup>, Yuan Yinlin<sup>1,3</sup>

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Spatially modulated imaging polarimeter (SMIP) system is able to modulate four Stokes parameters  $S_0 \sim S_3$  in a single interferogram by using Savart plate. Through sliding reconstruction method, the entire polarization information can be demodulated from the interference fringes. In this system, the alignment errors of the half wave plate (HWP) and the analyzer has a non-ignorable impact on the measurement accuracy of the Stokes parameters. A theoretical model including these two alignment errors were presented in this paper. Based on this model and parameters of the prototype SMIP, the Stokes

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家 703 计划(2014AA7031068)

作者简介: 刘震(1981-), 男, 博士生, 主要从事偏振测量技术、信号与系统分析等方面的研究。Email: lzhen@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪津(1969-), 男, 研究员, 主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术方面的研究。

Email: hongjin@aiofm.ac.cn

parameters measurement accuracy of unpolarized light,  $0^\circ/90^\circ$  linear polarized light,  $45^\circ/135^\circ$  linear polarized light and left/right circularly polarized light was analyzed. According to these four basic polarized lights, a method for solving Stokes parameters measurement error of incident light with any state of polarization (SOP) and degree of polarization (DOP) was given. In order to alleviate the influence of HWP and analyzer alignment errors, an optimization using condition number of measurement matrix as an objective function was given. It is shown that when the thickness of Savart plate is 23 mm, which is corresponding to the minimum condition 2.06, measurement errors induced by HWP and analyzer alignment errors can be effectively diminished.

**Key words:** polarization; polarimetric imaging; polarimetry; interferometry; Savart polariscope; alignment error

## 0 引言

偏振成像作为一种新兴的遥感探测技术,在获取目标强度信息的同时也能获取其偏振信息。基于目标与背景的偏振特性差异,便可以在复杂背景中凸显目标的粗糙度、纹理和轮廓等信息,在地物目标识别、大气环境监测、和天文观测等方面有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。光波的偏振态可以由 Stokes 矢量来表示,它包含 4 个 Stokes 参数  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ 。为了得到这 4 个参数,传统的偏振探测方式可分为两大类:分时探测和同时探测<sup>[3]</sup>。其中分时探测需要通过旋转偏振器件如偏振片和波片来获取偏振图像信息,这种探测方法的结构简单,但很难应用于对动态目标的偏振探测。传统的同时探测需要借助于分振幅、分孔径和分焦平面的方法才能实现,这就导致了仪器的结构设计和装调变得复杂。

为了解决传统偏振探测模式带来的技术问题,2003 年, Oka 等人研制出了一种基于双折射光楔的快照式工作方式空间调制型全偏振探测器<sup>[4]</sup>, 仪器体积小且不含运动部件。随后,针对该仪器中双折射光楔难以装调的问题,在 2006 年 Oka 和 Satio 又提出了基于 Savart 板的空间调整型全偏振探测器<sup>[5]</sup>。2009 年, Oka 等人将衍射透镜加入装置中,从而将探测器的光谱带宽增加到  $50\text{ nm}$ <sup>[6]</sup>。2012 年,曹奇志和张淳民等人对 Savart 偏光镜进行改进,将载波频率提高两倍,从而提高了仪器的信噪比<sup>[7]</sup>。2013 年, Satio 等人将一块半波片插入两块 Savart 板之间组成新的 Savart 偏光镜使得仪器的视场增大<sup>[8]</sup>。在提高基于 Savart 板的空间调制型探测器的测量精度方面,主要是针对调制元件 Savart 偏光镜

的相关方面研究<sup>[9-10]</sup>。然而,半波片和检偏器的角度误差也会影响空间调制型全偏振探测器的偏振测量精度。

文中首先介绍了空间调制型全偏振探测器的调制原理和解调算法,给出了包含两种角度误差的调制方程。用自然光、 $0^\circ/90^\circ$ 线偏振光、 $45^\circ/135^\circ$ 线偏振光和左/右旋圆偏振光作为入射光源,分析角度误差对系统 Stokes 参数测量精度的影响。在系统测量矩阵误差的原理上,提出了一种利用上述四种基态偏振光的测量误差来求解任意偏振态和偏振度的入射光的测量误差的方法。基于该方法,利用条件数作为目标函数对系统角度误差进行优化并给出了优化结果,这对于空间调制型全偏振探测器的设计、研制、调试和工程化有着重要的指导意义。

## 1 系统原理

### 1.1 调制原理

如图 1 所示,空间调制型全偏振成像系统由滤光片、Savart 偏光镜 1、半波片、Savart 偏光镜 2、检偏器、成像透镜及 CCD 阵面构成<sup>[4]</sup>。其中,半波片的快轴与  $x$  轴正向的夹角为  $22.5^\circ$ ,检偏器的透过轴与  $x$  轴正向的夹角为  $45^\circ$ 。Savart 偏光镜由两块等厚度的 Savart 板(单轴双折射晶体)构成,黑色箭头方向表示 Savart 板的光轴方向。附图(a)表明,沿  $z$  轴方向传播的入射光在 Savart 偏光镜 1 的左板内被分成振动方向相互垂直的  $o$  光(寻常光)和  $e$  光(非常光), $o$  光沿原方向传播, $e$  光在  $y$  轴方向产生偏移量  $\Delta$ ; 进入右板后,原  $o$  光和原  $e$  光互换角色,新  $e$  光在  $x$  轴方向产生偏移量  $\Delta$ 。如附图(b)所示, Savart 偏光镜 1 的

出射光为两束平行的线偏振光,两者之间的横向剪切距离为 $\sqrt{2}\Delta$ 。这两束线偏振光经半波片后,复振幅的振动方向被旋转了 $45^\circ$ ,因而可在 Savart 偏光镜 2 内进行分束和偏折。附图(c)给出了四束相互平行的线偏振光在  $xoy$  面的空间分布和彼此之间的横向偏移距离,从 $45^\circ$ 检偏器出射的四束偏振光复振幅振动方向一致,经成像透镜在 CCD 阵面上形成干涉图像。

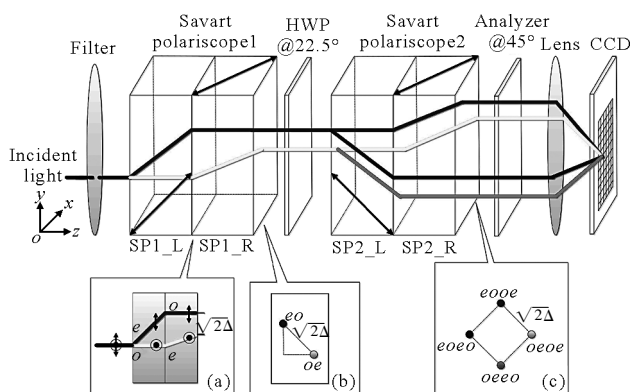


图 1 空间调制型全偏振成像系统原理图

Fig.1 Scheme of the SMIP optical layout

令干涉图像的调制强度为  $I(x,y)$ , 则干涉图像的调制强度可以写成:

$$I(x,y) = \frac{1}{2} \cdot S_0(x,y) + \frac{1}{2} \cos 2\pi\Omega(x+y) \cdot S_1(x,y) + \frac{1}{4} (\cos 4\pi\Omega x - \cos 4\pi\Omega y) \cdot S_2(x,y) + \frac{1}{4} (\sin 4\pi\Omega x + \sin 4\pi\Omega y) \cdot S_3(x,y), \Omega = \frac{\Delta}{\lambda f} \quad (1)$$

式中:  $(x,y)$  为像平面的空间位置坐标;  $S_0(x,y) \sim S_3(x,y)$  为 Stokes 参数;  $\Omega$  为调制载波频率, 它与横向偏移量  $\Delta$ 、入射光的波长  $\lambda$  和成像透镜的后焦距  $f$  成比例关系。当入射光为平行光且视场角很小的情况下, 横向偏移量  $\Delta$  可近似表示为  $t \cdot (n_o^2 - n_e^2 / n_o^2 + n_e^2)$ ,  $n_o$  为 o 光的主折射率;  $n_e$  为 e 光的主折射率;  $t$  表示单块 Savart 板的厚度。

### 1.2 空域解调算法

在 CCD 阵面上, 连续的光强度  $I(x,y)$  被离散采

$$E(x,y) = E_x(x,y) \left[ e^{j \cdot 4\pi\Omega x} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_w\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_p\right) + e^{j \cdot 2\pi\Omega(x-y)} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_w\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_p\right) \right] + E_y(x,y) \left[ \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_w\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_p\right) - e^{j \cdot 2\pi\Omega(x+y)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_w\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha_p\right) \right] \quad (4)$$

样。CCD 的像元尺寸越小, 则相邻像元的偏振态的变化就越小, 选取  $n=k \times k$  ( $k \geq 3$ ) 个像元作为领域模板, 在通常条件下, 可以忽略模板内各像元之间偏振态的细微差别。根据公式(1)得到如下超定方程组:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n0} & m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{in} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为光强度矢量;  $\mathbf{M}$  为测量矩阵;  $\mathbf{S}_{in}$  为入射光的 Stokes 向量。令  $\mathbf{R}$  表示测量矩阵  $\mathbf{M}$  的伪逆矩阵  $(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1} \cdot \mathbf{M}^T$ , 利用最小二乘法可求得入射光的 Stokes 参数为:

$$\mathbf{S}_{in} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I} \quad (3)$$

在实际应用中, 需要计算出 CCD 阵面上所有像元对应的 Stokes 向量。如图 2(a) 所示, 在  $9 \times 9$  的 CCD 阵面内选取  $3 \times 3$  的领域模板, 分别沿水平方向和垂直方向滑行 7 次, 每次滑动一个像元的距离并同时用最小二乘求解领域模板内每一个像元的 Stokes 向量。图 2(b) 给出了每一个像元上 Stokes 向量的计算次数, 取平均后即为该像元上 Stokes 向量的测量值。

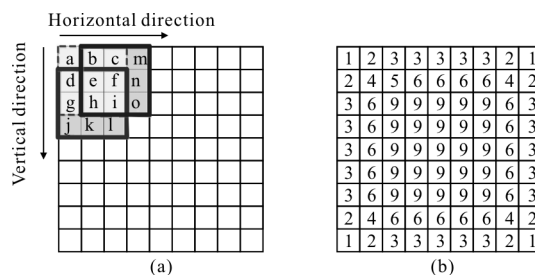


图 2 滑动空域解调算法

Fig.2 Sliding spatial reconstruction algorithm

## 2 角度误差模型

空间调制型全偏振成像系统在装调过程中, 半波片和检偏器难免会存在角度误差。假设系统中只存在角度误差, 设半波片的角度误差为  $\alpha_w$ , 检偏器的角度误差为  $\alpha_p$ , 则形成干涉条纹的四束线偏振光的总复振幅为:

式中:  $j$  为单位虚数;  $E_x(x,y)$  和  $E_y(x,y)$  分别为沿水平方向振动和垂直方向的振动的复振幅, 由公式(7)可知包含角度误差的调制强度  $I^\dagger(x,y)$  为:

$$I^\dagger(x,y) = \frac{1}{2} [1 - \cos 2\alpha_w \cdot \sin 2\alpha_p \cdot \cos 2\pi\Omega(x+y)] \cdot S_0(x,y) + \frac{1}{2} [\cos 2\alpha_w \cdot \cos 2\pi\Omega(x+y) - \sin 2\alpha_p] \cdot S_1(x,y) + \frac{1}{2} \cos 2\alpha_p \cdot \left[ \frac{1}{2} \cos 2\alpha_w \cdot (\cos 4\pi\Omega x - \cos 4\pi\Omega y) + \sin 2\alpha_w \cdot \cos 2\pi\Omega(x-y) \right] \cdot S_2(x,y) + \frac{1}{2} \cos 2\alpha_p \cdot \left[ \frac{1}{2} \cos 2\alpha_w \cdot (\sin 4\pi\Omega x + \sin 4\pi\Omega y) + \sin 2\alpha_w \cdot \sin 2\pi\Omega(x-y) \right] \cdot S_3(x,y) \quad (6)$$

用最小二乘法求得入射光的 Stokes 向量  $S_{in}^\dagger$  为:

$$S_{in}^\dagger = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}^\dagger = \mathbf{R} \cdot \mathbf{M}^\dagger \cdot S_{in} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{M}^\dagger$  为包含角度误差的测量矩阵, 令  $\Delta\mathbf{M}^\dagger = \mathbf{M}^\dagger - \mathbf{M}$  为误差矩阵, 则 Stokes 矢量的测量误差  $S_{err}$  为:

$$S_{err} = \begin{bmatrix} \Delta S_0 \\ \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \end{bmatrix} = S_{in}^\dagger - S_{in} = \mathbf{R} \cdot \Delta\mathbf{M}^\dagger \cdot S_{in} \quad (8)$$

### 3 角度误差仿真分析

由于空间调制型全偏振成像系统是线性空间不变系统, 为了便于分析角度误差对任意入射光的 Stokes 矢量的测量精度影响, 将 Stokes 矢量归一化, 分别用  $p_1, p_2, p_3$  表示任意入射光的 Stokes 参数  $S_1, S_2, S_3$  被归一化的绝对值  $|S_i|/|S_0|$  ( $i=1, 2, 3$ ), 则任意入射光归一化后的 Stokes 矢量可表示为:

$$S_{in} = (1-p_1-p_2-p_3) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + p_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \pm 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + p_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \pm 1 \\ 0 \end{bmatrix} + p_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由公式(9)可知, 任意入射光的 Stokes 矢量都可以分解成自然光、 $0^\circ/90^\circ$ 线偏振光、 $45^\circ/135^\circ$ 线偏振光、左/右旋圆偏振光这四种基态偏振光的线性组合。当偏振度  $Q=1$  时, 入射光的 Stokes 矢量不包含自然光分量; 当  $0 < Q < 1$  时, 入射光为部分偏振光,  $Q$  越大则其自然光分量所占的成分就越少, 反之亦然; 当  $Q=0$  时, 则入射光为自然光。分别用  $S_{err}^{(0)}$ 、 $S_{err}^{(1)}$ 、 $S_{err}^{(2)}$  和  $S_{err}^{(3)}$  表示四种基态偏振光的测量误差, 则任意入射光的 Stokes 矢量测量误差  $S_{err}$ :

$$S_{err} = (1-p_1-p_2-p_3) \cdot S_{err}^{(0)} + p_1 \cdot S_{err}^{(1)} + p_2 \cdot S_{err}^{(2)} + p_3 \cdot S_{err}^{(3)} \quad (10)$$

$$I^\dagger(x,y) = E(x,y) \cdot E^*(x,y) \quad (5)$$

式中:  $E^*(x,y)$  为复振幅  $E(x,y)$  的共轭。根据复振幅与 Stokes 的变换关系和欧拉方程  $e^{j\varphi} = \cos\varphi + j \cdot \sin\varphi$ , 可得:

当入射光为四种基态偏振光时, 根据公式(6)~(8)便可求出四种基态偏振光的 Stokes 矢量测量误差, 将它们代入公式(10)即可求出空间调制型全偏振成像系统在任意偏振光入射时的 Stokes 矢量测量误差。对于线性空间不变系统来说, 当系统中存在的角度误差是恒定的, 则偏振测量误差也是恒定的, 故根据上式即可求出空间调制型全偏振成像系统包含装调角度误差时任意 Stokes 矢量的偏振测量误差。根据表 1 所示的原理样机参数作为系统仿真参数, 用  $x$  轴表示半波片角度误差  $\alpha_w$ ,  $y$  轴表示检偏器角度误差  $\alpha_p$ ,  $z$  轴表示  $S_{in}(i)$  ( $i=0, 1, 2, 3$ ) 的测量误差  $\Delta S_i$ , 根据公式(8)求得仿真结果如图 3 所示(限于篇幅, 仅给出自然光、 $0^\circ$ 线偏振光、 $45^\circ$ 线偏振光和右旋圆偏振光的仿真图)。

表 1 系统设计参数

Tab.1 System design parameters

| Parameters                                  | Values      |
|---|-------------|
| Central Wavelength $\lambda/\text{nm}$      | 540         |
| Thickness of Savart plates $t/\text{mm}$    | 6           |
| Focal length $f/\text{mm}$                  | 165.8       |
| Lateral displacement $\Delta/\text{mm}$     | 0.656 8     |
| Carrier frequency $\Omega/\mu\text{m}^{-1}$ | 0.007 3     |
| CCD array detector                          | 1 024×1 024 |
| Pixel size/ $\mu\text{m}$                   | 12×12       |
| Local template                              | 3×3         |

由图 3 (a)~(d) 可知, 四种基态偏振光的 Stokes 参数测量误差随着角度误差的增大而增大。当入射光为自然光时,  $S_1$  分量的测量精度会受检偏器角度误差的影响; 当入射光为  $0^\circ/90^\circ$ 线偏振光时, 半波片的角度误差会影响  $S_1$  的测量精度; 当入射光为  $45^\circ/135^\circ$ 线偏振光和左/右旋偏振光时,  $S_0, S_1$  和  $S_2$  分量会被半波片角度误差所影响, 而  $S_1$  分量则同时被检偏器和半波片两种角度误差所影响。

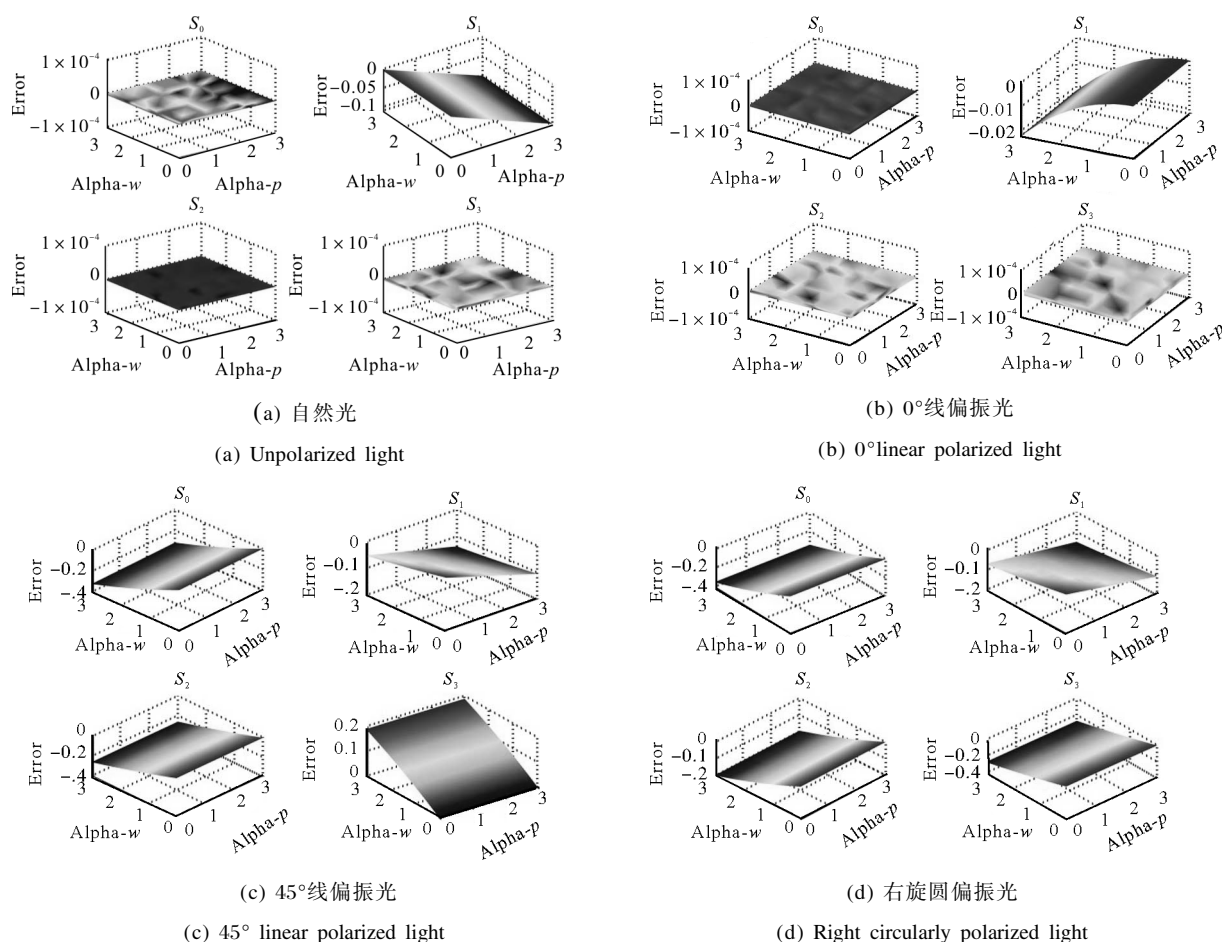


图 3 Stokes 参数的测量误差

Fig.3 Measurement error of Stokes components

### 4 角度误差优化

由于空间调制型全偏振成像系统是线性系统，故可以用矩阵范数的性质来探索优化角度误差的方法。对公式(8)两边同时取范数并根据范数性质可得：

$$\|S_{err}\| \leq \kappa \cdot \|\Delta M\| \cdot \|S_{in}\| \|M\| \quad (11)$$

式中： $\|\cdot\|$ 表示矩阵范数或向量的范数； $\kappa = \|M\| \cdot \|R\|$ 被称之为系统测量矩阵  $M$  的条件数，它的值大于 1。根据公式(11)可知，当减小测量矩阵的条件数  $\kappa$  时， $S_{err}$  的范数也会相应的减小。在研究过程中发现，当改变空间频率  $\Omega$  时，测量矩阵  $M$  的条件数  $\kappa$  会相应的改变。根据公式(1)可知， $\Omega$  与 Savart 单板厚度  $t$  成正比关系。因此，在入射光光波长、成像透镜后焦距和不变的情况下，Savart 单板的厚度  $t$  与空间频率  $\Omega$  成正比，所以改变 Savart 单板的厚度

$t$  即可改变测量矩阵的条件数  $\kappa$ ，图 4 给出了 Savart 单板的厚度  $t$  与条件数  $\kappa$  之间的变化关系。

图 4 中，横坐标表示 Savart 单板的厚度  $t$ ，纵坐标表示测量矩阵的条件数  $\kappa$  以 10 为底的对数，当  $t = 23 \text{ mm}$  时，测量矩阵  $M$  的条件数  $\kappa$  取最小值 2.06。为了检验最小条件数  $\kappa$  对应的测量矩阵  $M$  是否受半波

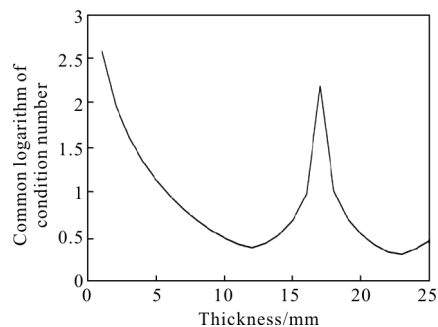


图 4 Savart 单板厚度  $t$  与条件数  $\kappa$  之间的关系

Fig.4 Dependence between the thickness  $t$  of the Savart plate and the condition number  $\kappa$

片和偏振片角度误差所带来的影响最小, 取 Savart 单板的厚度  $t$  分别为 6 mm, 12 mm 和 23 mm(它们对应的条件数分别为 9.26、2.47 和 2.06), 取偏振片和半波片的角度误差分别为  $(0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 1.2^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ)$ 。由于空间调制型全偏振成像系统的 Stokes 参数测量误差  $\Delta S_i$  的最大值均来自于四类基态偏振光, 所以可以选用它们的 Stokes 参数测量误差中最大的  $|\Delta S_i|$  表示系统的测量误差 err, 即  $err = \max\{|\Delta S_0|, |\Delta S_1|, |\Delta S_2|, |\Delta S_3|\}$ 。用  $x$  轴表示半波片的角度误差为  $\alpha_w$ ,  $y$  轴表示检偏器的角度误差为  $\alpha_p$ ,  $z$  轴表示空间调制型全偏振成像系统的测量误差 err, 仿真结果如图 5 所示。

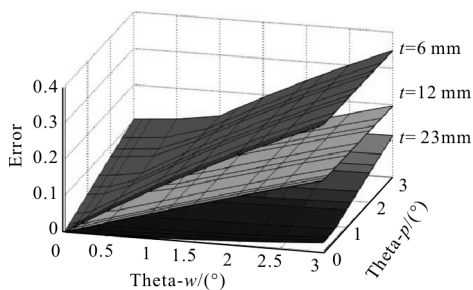


图 5 角度误差的优化

Fig.5 Optimization of alignment errors

从图 5 中可以看出, Savart 单板厚度为 23 mm 的系统能有效的减小角度误差所带来的影响。然而, 当系统中仅存在检偏器角度误差时, 选用 23 mm 的 Savart 板无法对角度误差进行优化。在这种情况下, 公式(8)中所有领域模板对应的矩阵  $R \cdot \Delta M$  都相同, 即  $S_{err}$  与条件数的值无关。然而, 当系统中存在半波片角度误差时, 或既存在检偏器角度误差又存在半波片角度误差时, 选用 23 mm 的 Savart 板时, 角度误差对系统测量精度影响较小。由此可见, 利用条件数为目标函数的这种优化方法虽然存在着一定的局限性, 但对既存在半波片又存在检偏器角度误差的空间调制型全偏振成像系统, 其优化效果显著。在实际系统中, 半波片和检偏器往往都会同时存在角度误差, 所以这种优化方法具有一定的可行性。

## 5 结论

文中在原有空间调制型全偏振成像系统的理想调制模型基础上, 给出了包含半波片和检偏器

角度误差的系统调制模型。利用角度误差模型对四种基态入射偏振光的 Stokes 参数测量误差进行仿真求解, 结果表明角度误差对系统的 Stokes 参数测量精度有影响。根据四种基态偏振光的 Stokes 参数的测量误差, 给出了求解任意偏振态和偏振度入射光的 Stokes 参数的误差方法, 从该方法中可以看出, 空间调制型全偏振成像系统的极大误差来源于四种基态偏振光作为入射光源时产生。使用测量矩阵的条件数作为目标优化函数, 发现当 Savart 单板厚度取 23 mm, 系统测量矩阵的条件数为 2.06 时, 系统可以有效地减小半波片角度误差以及半波片与检偏器的耦合角度误差对测量精度造成的影响。然而, 这种方法不能有效的消除仅存在检偏器角度误差时所带来的测量精度影响。该结果表明, 基于矩阵条件数的数学方法并不能完全解决光学系统中的误差问题, 需要进一步对系统的物理本质进行深入研究, 从而找到更加有效的角度误差优化方法。

## 参考文献:

- [1] Sun X, Qiao Y, Hong J. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 3: 5.
- [2] Li Yanan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, et al. Spectral polarization characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 205–210. (in Chinese).
- [3] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied optics*, 2006, 45(22): 5453–5469.
- [4] Oka K, Kaneko T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms [J]. *Optics Express*, 2003, 11(13): 1510–1519.
- [5] Oka K, Saito N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [C]//SPIE Optics Photonics, 2006, 6295: 629508.
- [6] Oka K, Suda R, Ohnuki M, et al. Snapshot imaging polarimeter for polychromatic light using Savart plates and diffractive lenses[J]. *Frontiers in Optics*, 2009: FThF4.
- [7] Cao Q, Zhang C, DeHoog E. Snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(24): 5791–5796.

- 
- [8] Saito N, Odate S, Otaki K, et al. Wide field snapshot imaging polarimeter using modified Savart plates [C]//SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics, 2013: 88730M.
- [9] Hanchen W J L. Influence of transmissivity in Savart polariscope on throughput of spatially modulated polarization interference imaging spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 1: 17.
- [10] Zhang ChunMin, Ren Wenyi, Mu Tingkui. Effects of optical axis direction on optical path difference and lateral displacement of Savart polariscope [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(2): 024202. (in Chinese)