

# 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真

胡巧云 杨伟锋\* 胡亚东 洪津

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

**摘要** 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像是针对同一目标不同偏振分量的同时探测技术,以双折射晶体作为调制元件,将 Stokes 参量  $S_0 \sim S_3$  调制在同一幅图像中,只一次采集便可获得包含 4 个 Stokes 参量的调制信息。分析空间调制型全 Stokes 偏振成像系统的探测原理和数学模型。阐明重构偏振图像  $S_0 \sim S_3$  的理论依据,并分析了系统参数的选择对图像重构效果的影响。根据实际系统参数,进行数值仿真模拟成像过程,获取调制图像,使用一种简单的频域解调算法,重构出  $S_0 \sim S_3$  的 4 幅偏振图像,得到比较满意的重构效果,不仅验证了方案的可行性,同时为仪器设计或器件选型提供参考。

**关键词** 成像系统;偏振成像;空间调制;Savart 偏光镜;仿真;重构

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0211004

## Principle and Simulation of a Spatially Modulated Full Stokes Parameters Polarization Imaging System

Hu Qiaoyun Yang Weifeng Hu Yadong Hong Jin

Anhui Institute of Optics and Fine Mechanic Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** This paper introduces a new polarization detecting method which uses a birefringent crystal to encode the two-dimensional Stokes quantities  $S_0 \sim S_3$  into an image, so that it obtains the information of four Stokes quantities with a single detection. The paper presents the working principle and mathematical model of the polarimeter. Also, the reconstructing method, as well as the effect of system parameters is theoretically demonstrated. The encoded image is obtained from numerical simulation according to real system configuration. By using a simple algorithm, we get acceptable reconstructed images which verifies the feasibility and provides references for the design.

**Key words** image systems; polarization imaging; spatial modulation; Savart polariscope; simulation; reconstruction

**OCIS codes** 110.3175; 110.3010; 070.2615

## 1 引言

偏振成像技术是近些年来在光学遥感领域中新发展的一种新兴探测技术,受到国内外研究者的重视,该技术已经在云和大气气溶胶的探测、环境监测、土壤分析、军事侦察等领域得到了重要应用。传统的偏振探测方式通过转动件实现分时测量或多个通道分孔径测量等探测方式,会带来结构的复杂度,震动噪声,像元对准等问题,对非静止目标的测量和实时测量具有局限性,且大部分采用这种探测方式的仪器只能进行线偏振态的测量。最新研究表明,圆偏振即 Stokes 参量中的第四个参量  $S_3$  在人造圆柱状目标、大气效应扣除等方面具备特定的应用效果。尽管各种偏振遥感仪器的光学方案各有特色,但是它们的偏振测量方法都是希望能同时测量同一目标或者准同时测量同一目标,也就是所谓的视场重合,更具体的就是像元对准

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-09-18

项目基金: 国家 863 计划

作者简介: 胡巧云(1989—),女,硕士研究生,主要从事检测技术与自动化装置方面的研究。E-mail: xingyeandhe@163.com

导师简介: 洪津(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感应用技术方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: wfyang@aiofm.ac.cn

问题,而像元失配导致的偏振测量精度下降是不能通过定标完全校正的。

2003年,Oka等<sup>[1]</sup>提出基于双折射楔形棱镜的成像偏振探测仪,实现了对同一目标不同偏振分量的同时探测。为了克服该装置不易安装及楔形棱镜固有的缺点<sup>[2]</sup>,Oka等<sup>[3]</sup>在2006年提出了基于Savart偏光镜的成像偏振探测仪,相比前一装置,具有更高精度,更易安装等优点。在DeHoog等<sup>[4]</sup>的进一步发展下,该装置已经于2009年成功应用于视网膜的病理检测。

本文在前人基础上设计了基于Savart偏光镜的空间调制型全Stokes参量偏振成像系统,采用Savart偏光镜、波片、偏振片构成空间调制模块将来自目标的偏振信息调制在其输出的强度谱中,用面阵图像传感器记录该强度谱,再通过相关的数字信号处理算法从强度谱中解调出目标的偏振信息,该获取方法只需进行一次测量即可得到目标的全偏振信息,很好地解决了时序测量和分孔径测量法存在的关键问题。这种全新的偏振成像技术的成像过程、信息获取原理需通过数学物理方法进行仿真从而为仪器设计、工程实施提供参考,并将仿真结果应用到设计、装调中,提高成像偏振信息的测量精度。

## 2 探测原理

空间调制型全Stokes偏振成像系统的原理图如图1所示。系统由两块Savart偏光镜,滤光片,半波片(HWP,快轴与x轴成22.5°),检偏器(透过方向与x轴成45°),成像透镜及CCD构成。其中,Savart偏光镜由两块Savart单板组成组合而成,光轴方向如图中所示。一束光线经过滤光片入射到Savart偏光镜,发生双折射分裂成4束光线,经成像透镜会聚到CCD焦面上,发生干涉,通过CCD记录干涉强度图像<sup>[3]</sup>。

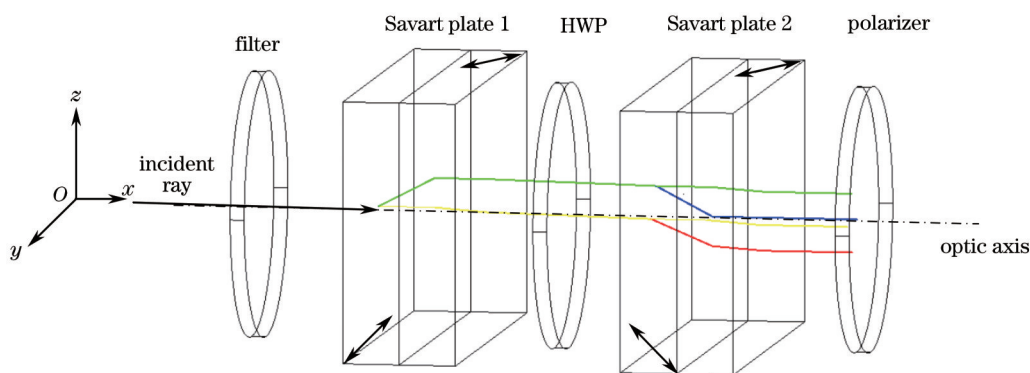


图1 空间调制型全Stokes偏振成像系统光学原理图

Fig.1 Optical principle of spatially modulated full Stokes polarization imaging system

图2给出光线在Savart偏光镜中的路径示意图,以入射点为原点,圆括号中的坐标分别表示光线在x轴和y轴方向的偏移量,通过光线追迹得到由一束光线分裂成的四条光线在Savart偏光镜出射面上的点列分

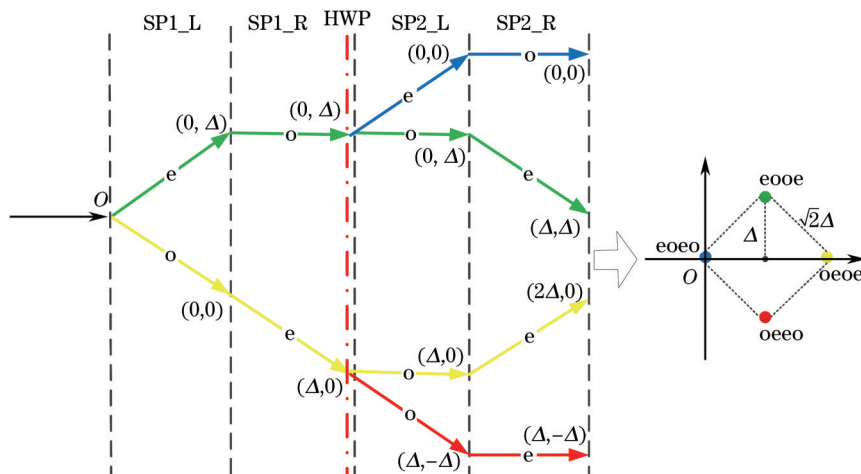


图2 光线追迹图

Fig.2 Ray tracing diagram

布。图中,SP1\_L和SP1\_R表示第一个 Savart 偏光镜的左单板和右单板,同理 SP2\_L和 SP2\_R表示第二个 Savart 偏光镜的左单板和右单板。 $\Delta$ 表示光线通过单个 Savart 板的偏移量。

光线在通过 Savart 偏光镜时分别发生  $x$  向和  $y$  向偏移,如图 3 所示。

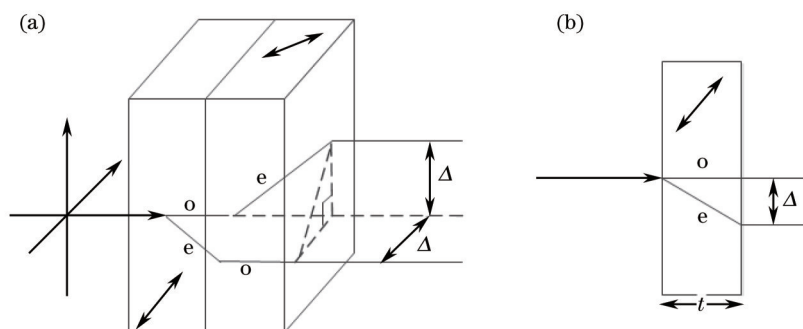


图 3 (a) Savart 偏光镜; (b) Savart 单板

Fig.3 (a) Savart polariscope; (b) single Savart plate

偏移量 $\Delta$ 的计算与光线入射角, Savart 单板厚度及双折射晶体的主折射率有关,考虑光线垂直入射的情况, $\Delta$ 可通过(1)式计算<sup>[5-7]</sup>:

$$\Delta = t \left\{ \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} + \sin \theta \left[ \frac{n_o n_e}{\left( \frac{n_o^2 + n_e^2}{2} \right)^{3/2}} - \frac{1}{n_o} \right] + \dots \right\}, \quad (1)$$

式中  $n_o, n_e$  分别是 o 光, e 光折射率,  $t$  为单个 Savart 板厚度,  $\theta$  为光线入射角。

通常情况下, 视场角一般很小, 这时  $\sin \theta$  的系数与常数项相比可以忽略,  $\Delta$  的表达式可以简化为

$$\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} t. \quad (2)$$

从 Savart 偏光镜出射的光线在经过检偏器后变成偏振方向相同的线偏振光, 经成像透镜会聚在 CCD 焦面上, 符合干涉法则, 发生干涉, CCD 记录干涉的强度分布。利用波动光学的相关知识, 推导出光强与 Stokes 参量  $S_0 \sim S_3$  的关系, 如(3)式所示<sup>[8]</sup>:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{2} S_1(x, y) \cos[2\pi\Omega(x + y)] + \frac{1}{4} |S_{23}(x, y)| \cos[4\pi\Omega x - \arg\{S_{23}(x, y)\}] - \frac{1}{4} |S_{23}(x, y)| \times \cos[4\pi\Omega y + \arg\{S_{23}(x, y)\}], \quad (3)$$

式中  $S_{23}(x, y) = S_2(x, y) + iS_3(x, y)$ ,  $\Omega = \frac{\Delta}{\lambda f}$ 。通常称  $\Omega$  为载波频率,  $f$  为焦距, 可以看出, CCD 输出的光强分布是 Stokes 参量  $S_0 \sim S_3$  被调制后的叠加, 调制系数与载波频率、光线位置分布有关。

### 3 图像重构方法

为了便于分析调制图像的频域特性, 将(3)式写成如下形式:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{4} S_1(x, y) \{ \exp[i2\pi\Omega(x + y)] + \exp[-i2\pi\Omega(x + y)] \} + \frac{1}{8} [S_{23}^*(x, y) \exp(i4\pi\Omega x) + S_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega x) - S_{23}^*(x, y) \exp(-i4\pi\Omega y) - S_{23}(x, y) \exp(i4\pi\Omega y)], \quad (4)$$

式中  $S_{23}^*(x, y)$  代表  $S_{23}(x, y)$  的共轭复数。

对(4)式进行离散傅里叶变换, 用  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  表示, 变换结果如下:

$$\mathcal{F}\{I(x, y)\} = \frac{1}{2} F_0(u, v) + \frac{1}{4} [F_1(u - \alpha, v - \alpha) + F_1(u + \alpha, v + \alpha)] + \frac{1}{8} [F_{23}^*(u - 2\alpha, v) + F_{23}(u + 2\alpha, v) - F_{23}^*(u, v + 2\alpha) - F_{23}(u, v - 2\alpha)], \quad (5)$$

式中  $F_0, F_1, F_{23}, F_{23}^*$  分别为  $S_0, S_1, S_{23}, S_{23}^*$  的傅里叶变换, 平移量  $\alpha = \Omega \cdot D \cdot N$ ,  $D$  为 CCD 单个像素尺寸,  $N$  为 CCD 行(列)包含的像素数(此处认为 CCD 行列像素数相等)。(5)式表明, 调制图像的频谱是  $S_0 \sim S_3$  分量频谱空间上的平移叠加, 调制图像傅里叶变换后的幅度谱将出现 7 个波峰, 位置如图 4 所示。

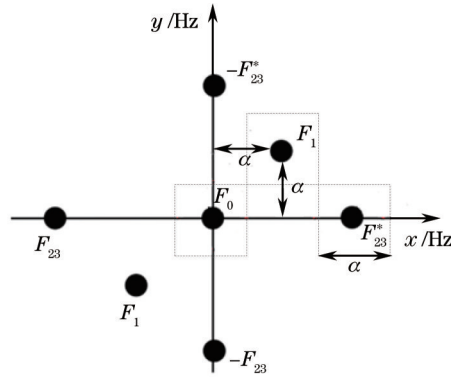


图 4 调制图像频谱示意图

Fig.4 Spectrum of modified image

考虑采用频域滤波器的方式进行解调, 当滤波器带宽超过  $\alpha$ , 即超出图中虚框的范围, 该分量的频谱会被其他分量频谱严重覆盖, 重构图像将出现明显的混叠。因此必须限制滤波器的带宽, 而带宽限制必然造成图像高频信息的损失, 图像分辨率降低。因此, 合理设置系统指标, 将影响滤波器带宽选择, 提升图像重构效果。此处以二维高斯滤波器为例进行频域滤波, 获取  $S_0, S_1, S_{23}$  的频谱, 根据(6)~(9)式, 重构出  $S_0 \sim S_3$  分量。

$$F\{S_0(x, y)\} = F_0(u, v) \leftrightarrow S_0(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F_0(u, v)\}, \quad (6)$$

$$F\{S_1(x, y)\exp[i2\pi\Omega(x + y)]\} = F_1(u - \alpha, v - \alpha) \leftrightarrow S_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F_1(u - \alpha, v - \alpha)\}\exp[-i2\pi\Omega(x + y)], \quad (7)$$

$$F\{S_{23}(x, y)\exp[-i4\pi\Omega x]\} = F_{23}(u + 2\alpha, v) \leftrightarrow S_{23}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F_{23}(u + 2\alpha, v)\}\exp[i4\pi\Omega x], \quad (8)$$

$$S_2(x, y) = \text{Re}[S_{23}(x, y)], \quad S_3(x, y) = \text{Im}[S_{23}(x, y)], \quad (9)$$

式中  $\text{Re}(\cdot)$  表示取实部,  $\text{Im}(\cdot)$  表示取虚部。

## 4 数值仿真

### 4.1 仿真参数选择

探测器选用加拿大 Dalsa 公司的 1M30 数字相机, 像元数为 1024 pixel×1024 pixel, 像元大小为 12  $\mu\text{m}$ ×12  $\mu\text{m}$ , 由几何光学知识可以计算出装置中的成像系统焦距为 165.8 mm, 具体参数如表 1 所示。

表 1 系统指标

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Central wavelength	540 nm
Bandwidth	20 nm
Angle of view	6°
Resolution	1024 pixel×1024 pixel
Pixel size	12 $\mu\text{m}$ ×12 $\mu\text{m}$
Frequency	6 pixel/fringe
Focal length	165 mm

Savart 偏光镜的厚度和材料直接决定光线偏移量  $\Delta$ , 进而影响载波频率, 为了符合载波频率的要求, 选择 2 块厚度为 6 mm 的冰洲石组成 Savart 偏光镜, 主折射率  $n_o = 1.662$ ,  $n_e = 1.488$ , 计算偏移量  $\Delta \approx 0.661$  mm。

根据理论计算, 可以得到载波频率  $\Omega = \frac{1}{135.49 \mu\text{m}} \approx \frac{1}{11 \times 12} \mu\text{m}^{-1}$ , 一对干涉条纹占 11 pixel, 平移量  $\alpha = \Omega \cdot D \cdot N \approx 93$ 。

4.2 仿真结果及分析

图 5(a)~(d)分别为 4 幅输入的测试图像,图 5(e)~(h)为重构后的图像,图像分辨率为 1024 pixel×1024 pixel。从重构图中可以看出,各分量图像边缘均出现一定程度的模糊。为了直观地表现重构图像出现的边缘模糊(此处不考虑相位谱混叠造成的影响),采用如图 6(a)~(d)所示的测试图作为输入图像进行仿真,重构结果如图 6(b)~(h)所示。选取测试图像和重构图像中间一列像素作为样本,统计其灰度变化,归一化后做出灰度变化曲线,如图 7 所示。测试图像中,在图中的边界处灰度呈阶跃型变化,而重构图中,边界处灰度变化趋势变缓,出现边缘模糊。

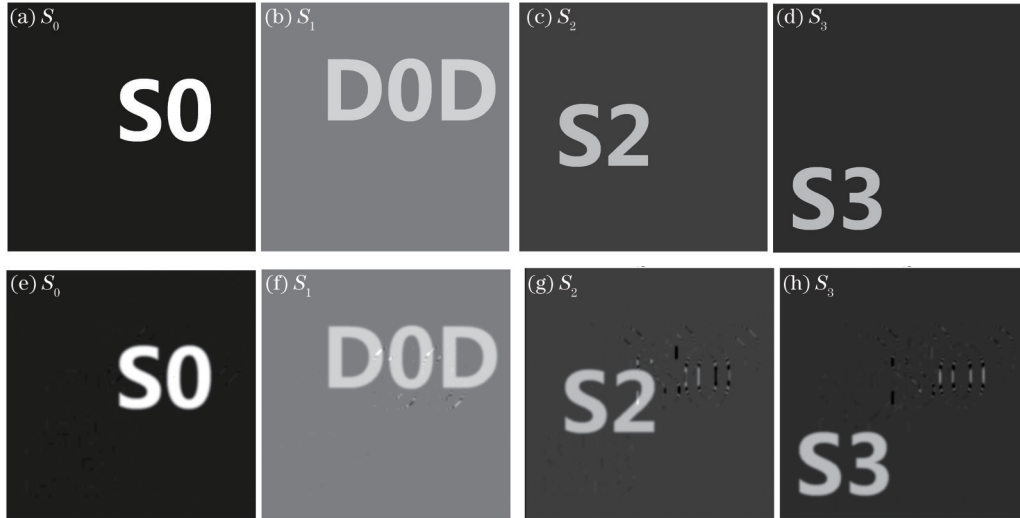


图 5 测试结果。(a)~(d)测试图像( $S_0\sim S_3$ ); (e)~(h)重构图像( $S_0\sim S_3$ )

Fig.5 Test results. (a)~(d) Test images ( $S_0\sim S_3$ ); (e)~(h) reconstructed images ( $S_0\sim S_3$ )

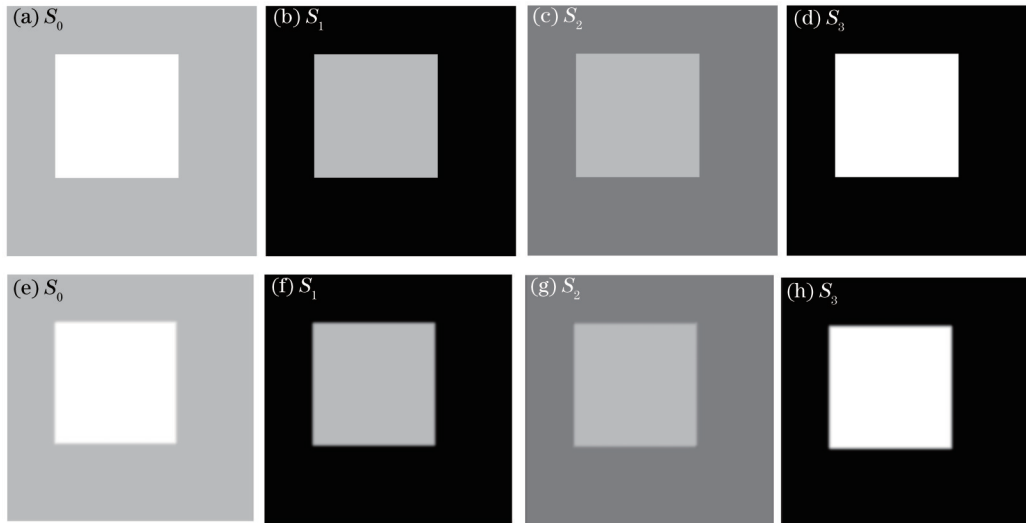


图 6 测试结果。(a)~(d)测试图像( $S_0\sim S_3$ ); (e)~(h)重构图像( $S_0\sim S_3$ )

Fig. 6 Test results. (a)~(d) Test images ( $S_0\sim S_3$ ); (e)~(h) reconstructed images ( $S_0\sim S_3$ )

另外,从图 6 中可以看出  $S_0$  分量的重构效果最好,  $S_0$  的重构图中没有明显的其他分量的信息,而  $S_1, S_2, S_3$  的重构图像中均引入了  $S_0$  分量的部分高频信息,在  $S_2, S_3$  重构图中尤为明显。

根据图像频域分析的相关知识,可以将以上问题的原因归结为:

1) 滤波器带宽限制,图像傅里叶变换的幅度谱反映各频率分量所占比重的大小,而相位谱则包含灰度的空间分布信息<sup>[9]</sup>。本仿真实验中采用的频域滤波器带宽有限,造成图像高频信息的损失,故重构出的  $S_0\sim S_3$  各分量边缘部分出现模糊。

2) 频谱混叠,根据调制图像频谱中各偏振分量的频谱分布情况(图 4),各分量的高频成分受其他分量影

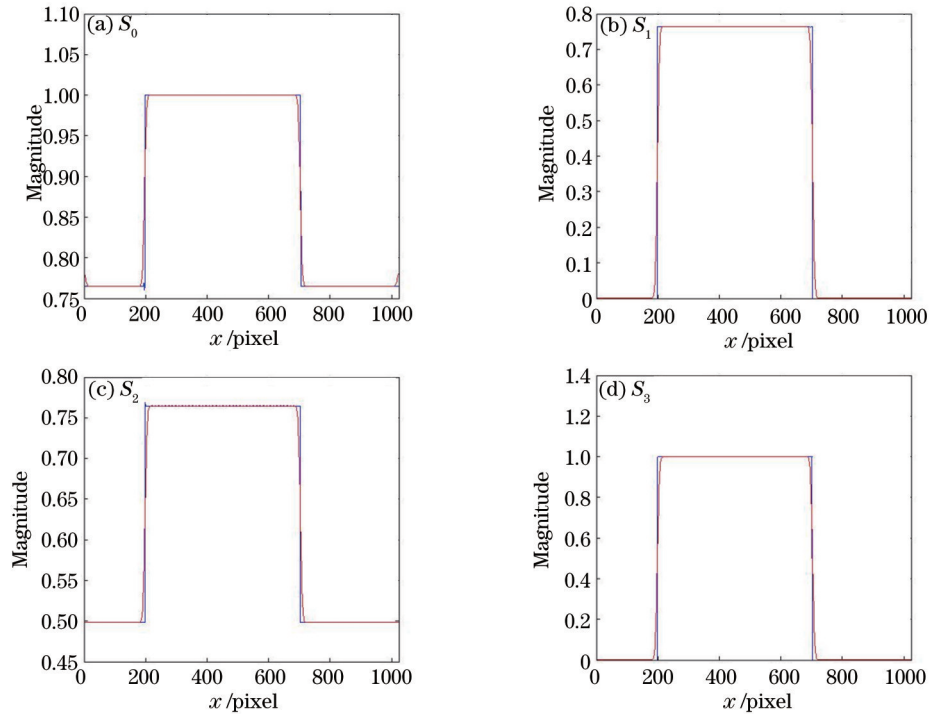


图7 边缘模糊效果

Fig.7 Edge blurring

响较大。另外,根据(5)式, $S_0$ 分量的系数为  $1/2$ ,在频谱中所占的比重最大, $S_1$ 次之, $S_2$ 、 $S_3$ 所占比重最小。因此, $S_2$ 、 $S_3$ 相比于 $S_1$ ,更容易受 $S_0$ 相位谱的影响,从 $S_2$ 、 $S_3$ 重构图像中可以大致看出 $S_0$ 的轮廓。

高频损失和频谱混叠是频域滤波难以避免的问题,滤波器的带宽限制与 $S_0$ ~ $S_3$ 分量的频谱分布及平移量 $\alpha$ 直接相关。 $S_0$ ~ $S_3$ 分量的频谱分布的越近,滤波器的带宽限制得越小,高频信息损失越严重。设计人员可通过合理的设计和选型,调节光学系统的焦距 $f$ 、光线剪切量 $\Delta$ ,探测器像素尺寸 $D$ 及像素数 $N$ 等参数,来实现合理的带宽选择,得到满意的重构图像。Cao等<sup>[10]</sup>在 Savart 偏光镜之间加入半波片,提高了载波频率,改善了各偏振分量在频谱中的分布,减少高频信息的损失。

## 5 结 论

介绍了空间调制型全 Stokes 偏振成像系统的探测原理和数学模型,并在此基础上,根据实际系统参数进行仿真,通过一种简单的频域滤波算法重构出 $S_0$ ~ $S_3$  4幅偏振图像。结果显示,通过该数学模型和重构方法实现一次曝光获取4幅偏振图像是可行的。通过光学系统的合理设计和探测器选型,可以达到一定的解调精度,得到较为满意的重构图像。然而,滤波器带宽限制是频域重构方式难以避免的局限性,带来高频信息的损失。再者, $S_0$ ~ $S_3$ 各分量在频谱中所占比重不均,不同偏振分量受其他分量影响程度不同,如上文提到的,重构出的 $S_2$ 、 $S_3$ 图像受 $S_0$ 影响更为明显。同时,由于滤波片具有的一定带宽,光线入射角度等因素都会引起载波频率的变化,给偏振图像的重造成困难,这些都是研究人员需要解决的问题。

## 参 考 文 献

- 1 K Oka, T Kaneko. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms [J]. Opt Express, 2003, 11(13): 1510-1519.
- 2 Haitao Luo. Snapshot Imaging Polarimeter Using Spatial Modulation [D]. Arizona: University of Arizona, 2008. 66-67.
- 3 K Oka, N Saito. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [C]. SPIE, 2006, 6295: 629508.
- 4 E DeHoog, H Luo, K Oka, et al.. Snapshot polarimeter fundus camera [J]. Appl Opt, 2009, 48(9): 1663-1667.
- 5 Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Ren Wenyi, et al.. Design and analysis of a polarization inference imaging spectrometer with expanded field of view [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 070704.

- 穆廷魁, 张淳民, 任文艺, 等. 偏振干涉成像光谱仪的视场展宽设计与分析[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 070704.
- 6 Wu Lei, Zhang Chunmin, Yuan Yan, *et al.*. Exact calculation of the lateral displacement and optical path difference of Savart polariscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7): 885–890.
- 吴 磊, 张淳民, 袁 艳, 等. 萨伐尔偏光镜横向剪切量和光程差的精确计算[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 885–890.
- 7 Shen Weimin, Shao Zhongxing. Dispersion between ordinary ray and extraordinary ray in uniaxial crystals for any orientation of optical axis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002. 22(6): 765–768.
- 沈为民, 邵中兴. 单轴晶体中光轴任意取向时寻常光与非寻常光间的离散[J]. 光学学报, 2002. 22(6): 765–768.
- 8 H Luo, K Oka, E DeHoog, *et al.*. Compact and miniature imaging polarimeter [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(27): 4413–4417.
- 9 Zhang Zheng, Wang Yanpin, Xue Guixiang. Digital Image Processing and Computer Vision [D]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2010. 195–198.
- 张 铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉 [D]. 北京: 人民邮电出版社, 2010. 195–198.
- 10 Cao Qizhi, Zhang Chunmin, Edward Dehoog. Snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(24): 5791–5796.

栏目编辑: 何卓铭