

空间调制型全偏振成像系统的图像解调算法修正

叶松^{1,3}, 严浩方^{1,3}, 孙晓兵², 汪杰君^{1,3*}, 王新强^{1,3}, 王方原^{1,3}, 李树^{1,3}, 甘永莹¹, 张文涛^{1,3}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

³广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 空间调制型全偏振成像系统可实现目标全偏振参量的同步探测。现有解调算法仅适用于单色光的探测系统, 不适用于复色光的探测系统。通过寻找中心频谱位置获得实际载波频率的方式对偏振解调算法进行了修正。复色光偏振成像实验结果表明: 宽波段空间调制型全偏振成像系统通过修正的图像解调算法可以得到中心波长的偏振信息, 偏振探测误差小于 5%。研究结果为复色光全偏振成像系统的解调算法研究提供了参考。

关键词 成像系统; 复色光; 空间调制; 偏振成像; 算法修正; 仿真; 实验

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0607001

Modified Image Demodulation Algorithm for Spatially Modulated Full-Polarization Imaging Systems

Ye Song^{1,3}, Yan Haofang^{1,3}, Sun Xiaobing², Wang Jiejun^{1,3*}, Wang Xinqiang^{1,3},
Wang Fangyuan^{1,3}, Li Shu^{1,3}, Gan Yongying¹, Zhang Wentao^{1,3}

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China;

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³ Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Spatially modulated full-polarization imaging systems can achieve synchronous detection for full-polarization parameters of targets. The existing demodulation algorithms are only used in monochromatic light detection systems, and they are not suitable for polychromatic light detection systems. The polarization-demodulation algorithm can be modified by finding the position of the central spectrum to obtain the actual carrier frequency. The experimental results demonstrate that the polarization information of the central wavelength can be obtained by utilizing the modified image-demodulation algorithm in broadband spatially modulated full-polarization imaging systems with less than 5% polarization-detection error. The experimental results provide a guild for analyzing the demodulation algorithm of full polarization imaging systems with polychromatic light.

Key words imaging systems; polychromatic light; spatial modulation; polarization imaging; algorithm modification; simulation; experiment

OCIS codes 070.2615; 110.3010; 110.3175

1 引 言

偏振成像技术是一种可同时对目标物体的偏振态进行测量以及成像的新型探测技术, 该技术在空间遥感、环境监测、生物医学^[1]、高光谱成像^[2]等领域具有广阔的应用前景, 受到了国内外研究人员的重视。传统的分时偏振成像技术无法同时获取 4 个

Stokes 参量, 对非静止目标的测量和实时测量具有局限性, 且大部分只能进行线偏振态的测量。传统的同时偏振成像探测仪有多通道型^[3]、分振幅型^[4]、分孔径型以及分焦平面型。分振幅型偏振成像探测仪可同时成像, 且数据处理简单, 但体积较大; 分孔径型偏振成像探测仪结构紧凑, 但设计装调困难; 分焦平面型偏振成像探测仪具有高实时性、小型化和

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-01-12; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(41561079)、桂林电子科技大学优秀学位论文培育项目(16YJJPYSS24)

* E-mail: wangjiejun@guet.edu.cn

高稳定性等优势,但存在虚假偏振且阵列制造难度大的不足。直到 21 世纪初,空间调制型偏振成像探测仪以其可以同时获得多个 Stokes 参量、结构简单易于实现、可对动态目标成像、空间分辨率高等优点逐渐成为研究热点。

2003 年,Okamoto 等^[5]提出基于双折射楔形棱镜的偏振成像探测仪,可以实现对同一目标不同偏振参量的同时探测。之后,他们于 2006 年提出了基于 Savart 偏光镜型的准单色光偏振成像系统^[6]。2015 年,胡巧云等^[7]对空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理进行了研究。2016 年,曹奇志等^[8]提出了基于改进型 Savart 偏光镜的微型快拍成像测偏技术,该系统反演目标同一 Stokes 参量的数据面积较改进前提高了 4 倍,但该系统也仅限于准单色光成像,极大地限制了信噪比和对比度的提高。虽然 Cao 等^[9]通过在 Savart 偏光镜之间加入半波片提高了载波频率,Zhang 等^[10]通过和差重建改善了重构算法,但实际应用中仍迫切需要具有高对比度、高信噪比的宽波段空间调制型全偏振成像系统,通过复色光成像用于低可探测目标的获取。因而,宽波段空间调制型全偏振成像系统的图像重构问题已成为当前需要解决的关键核心问题。

本文在前人研究的基础上,首先对宽波段空间调制型全偏振成像系统进行数学建模。当复色光作为成像光源时,频域会出现通道混叠,造成载波频率的偏差,而载波频率是图像重构的关键因素,因此,对传统的空间调制型全偏振成像系统图像解调算法进行修正,以获得精确的实际载波频率。最后通过计算机模拟仿真和实验验证分析相结合的方式验证该修正图像解调算法的可行性与有效性,为后续复色光偏振成像探测与分析的进一步研究提供参考。

2 系统原理

2.1 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(SP1)、半波片(HWP,快轴与 x 轴成 22.5° 角)、Savart 偏光镜 2(SP2,光轴方向与 Savart 偏光镜 1 正交)、检偏器(其透过方向与 x 轴成 45° 角)、成像透镜及电荷耦合器件(CCD)面阵构成。其中,Savart 偏光镜由两块等厚度的 Savart 单板(单轴双折射晶体)构成,光轴方向如图 1 所示。入射光线经过滤光片后入射至 Savart 偏光镜 1,在 Savart 偏光镜 1 的作用下入射光线被剪切成为 o 光和 e 光。入射光依次经过 Savart 偏光镜 1、半波片、

Savart 偏光镜 2、检偏器实现双折射分光、电场矢量方向旋转,再次双折射分光后成为 4 束光线,之后经成像透镜会聚到 CCD 焦平面上发生干涉,CCD 记录干涉强度图像。

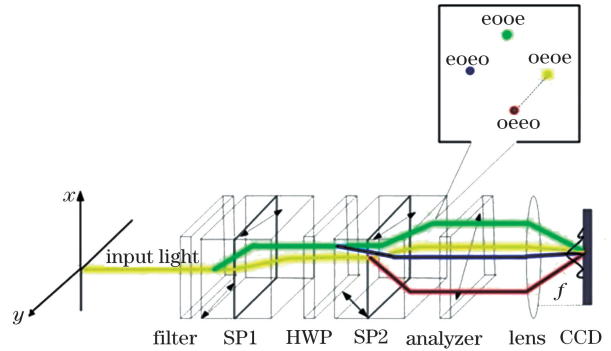


图 1 空间调制型全偏振成像系统的光学原理图

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

从 Savart 偏光镜 2 出射的光线经过检偏器后变成与偏振方向相同的线偏振光,如图 1 右上角插图所示,出射光为 $eoee$ 、 $eoee$ 、 $oeoe$ 、 $oeoe$ 线偏振光,彼此之间的距离为 $\sqrt{2}\Delta$ 。在成像透镜的作用下于焦平面处干涉成像,CCD 记录其强度分布。利用波动光学的相关理论知识推导出干涉光强与 Stokes 参量 $S_0 \sim S_3$ 的关系:

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

$$\Omega = \frac{\Delta}{\lambda f}, \quad (2)$$

式中: Ω 为载波频率; f 为成像透镜的后焦距; Δ 为 Savart 偏光镜引入的横向剪切量; λ 为入射光的中心波长; x 、 y 为像平面坐标。 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 通过干涉现象被分别调制在不同的载波频率上,干涉条纹的周期由载波频率决定,影响载波频率的参数有横向剪切量、入射波长和成像透镜后焦距。横向剪切量的计算与 Savart 单板厚度以及双折射晶体的双折射率有关^[11]。通常情况下,空间调制型全偏振成像系统的视场角很小,对于已知单波长的入射光,若波长在 $0.394 \sim 1.159 \mu\text{m}$ 之间,以冰洲石为材料的 Savart 单板对于该波长的主折射率可由经验公式计算得出^[12],加之 Savart 单板的厚度固定,考虑光线垂直入射的情况,横向剪切量可通过(3)式计算得出,其对于空间调制型全偏振成像系统的影响可以

忽略。在系统参数确定的前提下,入射波长 λ 成为干涉条纹混叠的主要因素。

$$\Delta = \left(\frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} \right) t, \quad (3)$$

式中: n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的主折射率; t 为 Savart 单板厚度。

由于空间调制型全偏振成像系统是线性空间时不变系统,根据其非色散的数理关系,得到宽波段光干涉成像方程为

$$I(x, y) = \sum_{\lambda_i = \lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left\{ \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{2} S_1(x, y) \cdot 2\pi\Omega_i(x + y) + \frac{1}{4} S_2(x, y) \cdot \{ \cos[2\pi(2\Omega_i)x] - \cos[2\pi(2\Omega_i)y] \} + \frac{1}{4} S_3(x, y) \cdot \{ \sin[2\pi(2\Omega_i)x] + \sin[2\pi(2\Omega_i)y] \} \right\}, \quad (4)$$

式中: λ_i 为复色光入射波长; λ_{\max} 和 λ_{\min} 分别为复色光入射波长的最大值与最小值; Ω_i 为宽波段系统载波频率。

由(4)式可知,当宽波段空间调制型全偏振成像系统参数确定后,CCD 输出的干涉光强分布是 Stokes 参量 $S_0 \sim S_3$ 被调制后的叠加,其图像只与入射光的偏振状态有关,调制系数与载波频率、光线位置分布有关。

2.2 频域解调算法

频域解调算法的主要思想是用二维离散傅里叶变换将空间域的干涉条纹信息转换到频域中,采用低通滤波器求解出目标的 4 个 Stokes 参量信息^[7]。为了分析强度图像的频域特性,将(1)式写成如下形式:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{4} S_1(x, y) \cdot \{ \exp[i2\pi\Omega(x + y)] + \exp[-i2\pi\Omega(x + y)] \} + \frac{1}{8} [S_{23}^*(x, y) \exp(i4\pi\Omega x) + S_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega x) - S_{23}^*(x, y) \exp(-i4\pi\Omega y) - S_{23}(x, y) \exp(i4\pi\Omega y)]. \quad (5)$$

对(5)式进行二维离散傅里叶变换,变换结果如下:

$$\mathcal{F}[I(x, y)] = \frac{1}{2} \mathcal{F}_0(u, v) + \frac{1}{4} [\mathcal{F}_1(u - a, v - a) + \mathcal{F}_1(u + a, v + a)] + \frac{1}{8} [\mathcal{F}_{23}^*(u - 2a, v) + \mathcal{F}_{23}(u + 2a, v) - \mathcal{F}_{23}^*(u, v + 2a) - \mathcal{F}_{23}(u, v - 2a)], \quad (6)$$

式中: u, v 为频域坐标; $\mathcal{F}_0, \mathcal{F}_1, \mathcal{F}_{23}, \mathcal{F}_{23}^*$ 分别为 $S_0, S_1, S_{23}, S_{23}^*$ 所对应的傅里叶变换; S_{23}^* 为 S_{23} 的共轭复数; 位移量 $a = \Omega \cdot D \cdot W$, D 为 CCD 单个像素尺寸, W 为 CCD 行(列)包含的像素数(文中 CCD 行列像素数相等)。频谱示意图如图 2 所示,干涉强度图像的调制频谱是 $S_0 \sim S_3$ 参量频谱上的平移叠加,傅里叶变换后的幅度谱出现 7 个谱峰。

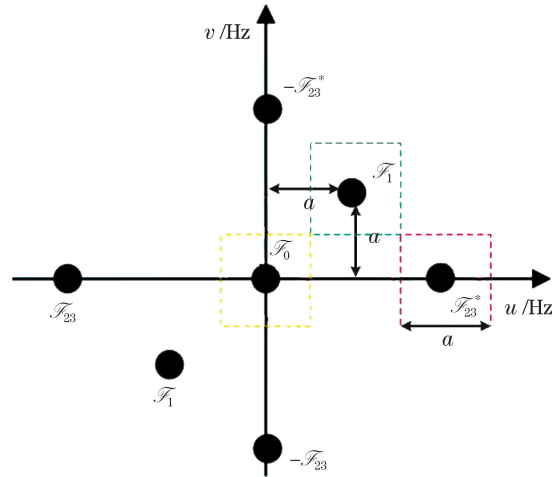


图 2 调制图像频谱示意图

Fig. 2 Modulated image frequency spectrum diagram

采用二维高斯低通滤波器的方式进行频域滤波,当滤波器的带宽超过 a 时,即图中虚框,解调图像将出现明显的混叠,须合理设置系统指标。通过二维离散傅里叶变换将空间域的干涉条纹信息转换到频域中,以二维高斯低通滤波器的方式进行频域滤波,获取 S_0, S_1, S_{23} 的相关频谱,根据相关的数学变换(7)式,重构出 $S_0 \sim S_3$ 参量。

$$\begin{cases} \mathcal{F}[S_0(x, y)] = \mathcal{F}_0(u, v) \leftrightarrow S_0(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}_0(u, v)] \\ \mathcal{F}\{S_1(x, y) \exp[i2\pi\Omega(x + y)]\} = \mathcal{F}_1(u - a, v - a) \leftrightarrow S_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}_1(u - a, v - a)] \exp[-i2\pi\Omega(x + y)] \\ \mathcal{F}[S_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega x)] = \mathcal{F}_{23}(u + 2a, v) \leftrightarrow S_{23}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}_{23}(u + 2a, v)] \exp(i4\pi\Omega x) \\ S_2(x, y) = \text{Re}[S_{23}(x, y)] \\ S_3(x, y) = \text{Im}[S_{23}(x, y)] \end{cases} \quad (7)$$

3 宽波段情况下图像解调算法的修正

空间调制型全偏振成像系统将 4 个 Stokes 参数信息融合在一张图像信息中,只需进行一次快拍式的采集即能完成目标全部偏振信息的探测。图像解调算法是空间调制的逆过程,用数值分析的方法将 Stokes 参量信息从干涉强度图像中解调出来。如图 2 所示,空间域的相移转换成频域的线性位移。载波频率的大小决定 7 个谱峰之间的离散程度。Stokes 参量在频域的位移与载波频率成正比,在系统参数 Δ 、 f 确定的条件下,位移量与波长成反比。对于具有一定波段的复色光,干涉条纹可见度随光谱带宽增加而下降,加之实际应用中由于实验仪器、实验条件和环境因素等的限制,调制图像的频谱会出现通道混叠,影响解调结果的准确性。

为了获得准确的 Stokes 参量的二维分布图,本课题组通过寻找最大频谱值位置以确定中心频谱位置,获取其实际的载波频率 Ω_i ($i=1,2$),然后确定对 S_1 、 S_2 进行处理的频域滤波器带宽 a_i ($i=1,2$),再利用修正后的二维高斯低通滤波器截取其低频分量,进行二维傅里叶逆变换,最后得到相应参量的二维分布。具体步骤如下:

1) 对输入图像进行二维离散傅里叶变换得到其调制图像频谱;

2) 根据系统设备参数确定频域滤波通道的大小,以各偏振态频谱为中心进行频域区域划分,分别寻找区域中最大频谱值的对应坐标,以确定中心频谱的位置,获得其精确的实际载波频率 Ω_i ;

3) 根据精确的实际载波频率 Ω_i 对所用的二维高斯低通滤波器带宽 a_i 进行修正;

4) 利用修正后的二维高斯低通滤波器分别对频谱图进行滤波处理;

5) 进行二维傅里叶逆变换,并根据实际载波频率 Ω_i 和修正图像解调算法所用的二维高斯低通滤波器带宽 a_i ,结合(7)式进行计算,得到目标图像的 Stokes 参量二维图像。

4 数值仿真与分析

为了验证宽波段情况下修正图像解调算法的有效性和可行性,采用 MATLAB 进行数值仿真。系统指标如表 1 所示。

Savart 偏光镜由两块厚度为 6 mm 的冰洲石组成,对于已知中心波长的入射光,Savart 单板对于该

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Central wavelength λ /nm	540
Bandwidth /nm	20
Thickness of a single SP t /mm	6
Focal length f /mm	165.8
Resolution / (pixel \times pixel)	1024 \times 1024
Pixel size / ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	12 \times 12

波长的 o 光和 e 光的主折射率 n_o 和 n_e 可由经验公式计算得到, $n_o=1.662$, $n_e=1.488$ 。采用图 3 所示的偏振态作为输入的原始偏振态进行数值仿真,其归一化偏振态 \mathbf{S} 为 $[1, 1, 0, 0]^T$ 。

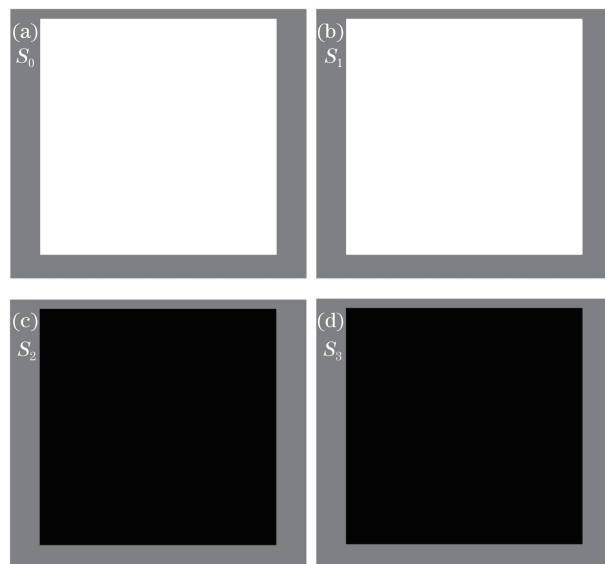


图 3 原始输入偏振态

Fig. 3 Original input polarization

根据(4)式进行数学建模,入射光采用以 540 nm 为中心波长、带宽为 20 nm 的均匀平面光。Stokes 参量在频域的位移量与载波频率成正比,当系统参数确定时,位移量与波长成反比。使用复色光作为成像光源时,会出现通道混叠,随着入射光谱宽度增加,干涉强度图像条纹的清晰度下降,进而影响目标偏振信息的重构效果。

分别采用传统解调算法与修正解调算法对宽波段空间调制型全偏振成像系统干涉强度图像进行重构处理,以二维高斯低通滤波器为例。根据系统参数计算中心波长对应的载波频率 $\Omega =$

$\frac{1}{135.49 \mu\text{m}} \approx \frac{1}{11 \times 12} \mu\text{m}^{-1}$, 因复色光入射造成通道混叠,故通过寻找中心频谱位置获得的实际载

波频率 $\Omega_1 \approx 0.0888 \times \frac{1}{12} \mu\text{m}^{-1}$ 。图 4(a)~(d) 为采用传统解调算法得到的重构偏振态图像, 图 4(e)~(h) 为采用修正解调算法得到的重构振

态图像, 可以看出, 虽然各参量图像边缘均出现了一定程度的模糊, 但修正解调算法解决了重构图像不均匀的现象, 重构效果明显优于传统的解调算法。

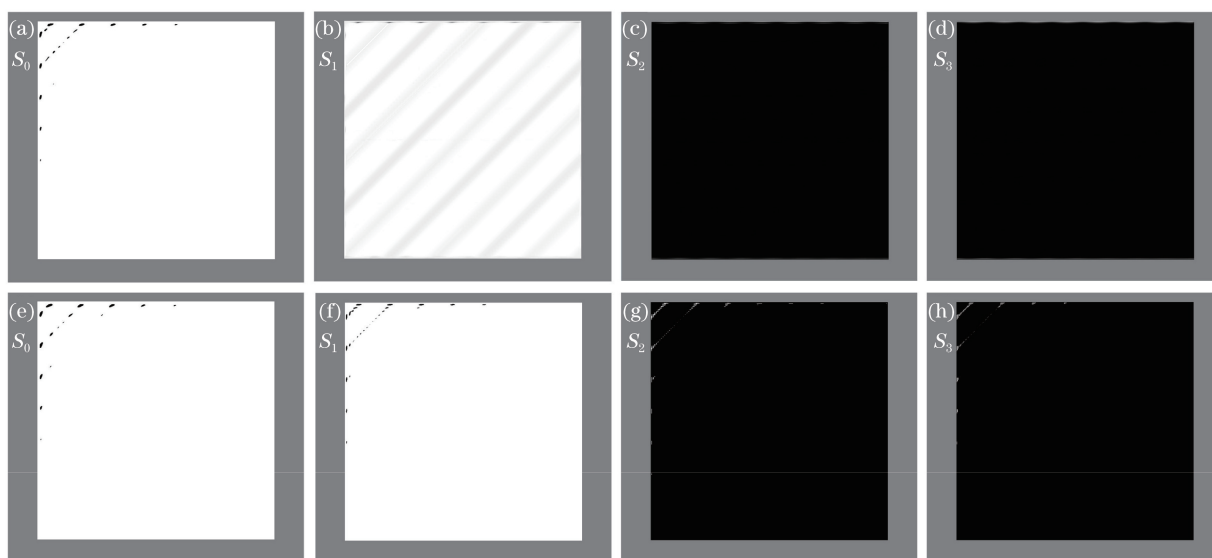


图 4 不同算法得到的重构图像。(a)~(d)传统解调算法;(e)~(h)修正解调算法

Fig. 4 Reconstruction images. (a)-(d) Traditional demodulation algorithm; (e)-(h) modified demodulation algorithm

利用峰值信噪比 (PSNR) 分别对传统解调算法与修正解调算法的解调结果与原始输入图像进行分析。峰值信噪比是指最大值信号与图像差异间的比率^[13], 采用(8)式定量表达。峰值信噪比是衡量图像失真的客观标准, 两图像间的峰值信噪比越大, 两图像就越相似。

$$f_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{L^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y) - I'(x, y)]^2}, \quad (8)$$

式中: M 、 N 分别为图像的长和宽; L 为图像中像素的最大灰度值; I 为原始输入图像的光强值; I' 为重构图像的光强值。表 2 为两种解调算法重构图像与原始输入图像的峰值信噪比, 可见, 修正解调算法的结果明显优于传统解调算法。

表 2 传统解调算法、修正解调算法与测试图像的峰值信噪比
Table 2 PSNR between test image and traditional demodulation algorithm or modified demodulation algorithm

Algorithm	S_0	S_1	S_2	S_3
Traditional algorithm	30.8855	32.2614	30.2483	31.4429
Modified algorithm	31.8174	34.3212	31.8032	32.2331

5 实验验证与分析

利用空间调制型全偏振成像实验设备进行实验

验证。探测器选用加拿大 Dalsa 公司的 1M30 数码相机, 其像元数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像元大小为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 。该相机具有电子快门控制电路、动态范围宽、无须外加机械快门、高灵敏度、低暗电流等优点。如图 5 所示, 1M30 相机在 $400 \sim 720 \text{ nm}$ 波长范围内具有良好的响应度, 可以满足实验需要。设备成像系统的后焦距为 165.8 mm , Savart 单板厚度为 10 mm 。成像光源是中心波长为 540 nm 、带宽为 20 nm 的均匀平面光, 输入归一化偏振态分别为 $[1, 1, 0, 0]^T$ 与 $[1, 0, 0, 0]^T$ 。宽波段空间调制型全偏振成像系统获得的干涉图像如图 6(a) 与图 6(b) 所示。

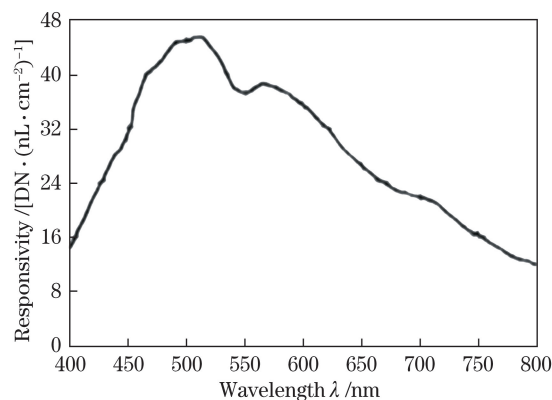


图 5 CCD 光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response curve of CCD

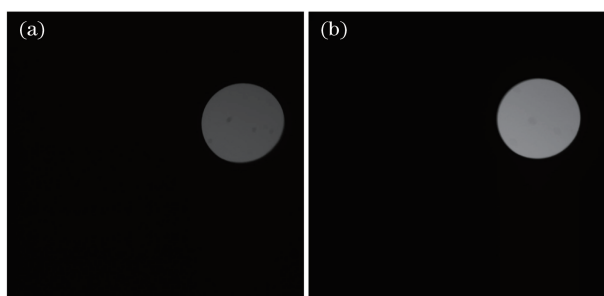


图 6 干涉图像。(a) $[1, 1, 0, 0]^T$; (b) $[1, 0, 0, 0]^T$
 Fig. 6 Interferograms. (a) $[1, 1, 0, 0]^T$;
 (b) $[1, 0, 0, 0]^T$

利用修正图像解调算法对干涉图像进行重构处理,以二维高斯低通滤波器为例。根据系统参数计

算中心波长对应的载波频率 $\Omega = \frac{1}{81.30 \mu\text{m}} \approx \frac{1}{6.5 \times 12} \mu\text{m}^{-1}$, 因复色光入射造成通道混叠, 故通过寻找中心频谱位置获得的实际载波频率 $\Omega_1 \approx 0.1476 \times \frac{1}{12} \mu\text{m}^{-1}$ 。图 7 为输入偏振态为 $[1, 1, 0, 0]^T$ 时重构得到的 Stokes 参量 $S_0 \sim S_3$ 与其偏振度(DOP)图像。图 8 为输入偏振态为 $[1, 0, 0, 0]^T$ 时重构得到的 Stokes 参量 $S_0 \sim S_3$ 与其偏振度图像。可以看出, 虽然修正解调算法得出的重构图像边缘存在一定程度的模糊, 但较好地解决了传统解调算法存在的图像不均匀现象, 重构效果优于传统解调算法。

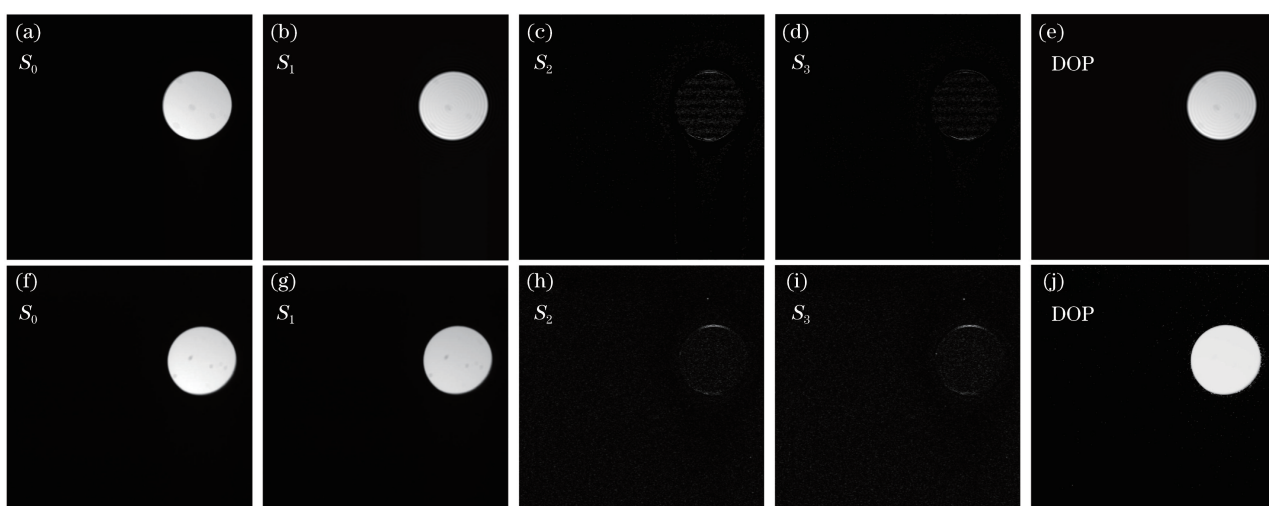


图 7 输入偏振态为 $[1, 1, 0, 0]^T$ 时不同算法得到的重构图像。(a)~(e)传统解调算法;(f)~(j)修正解调算法
 Fig. 7 Reconstruction images obtained by different algorithms for input polarization state $[1, 1, 0, 0]^T$.
 (a)-(e) Traditional demodulation algorithm; (f)-(j) modified demodulation algorithm

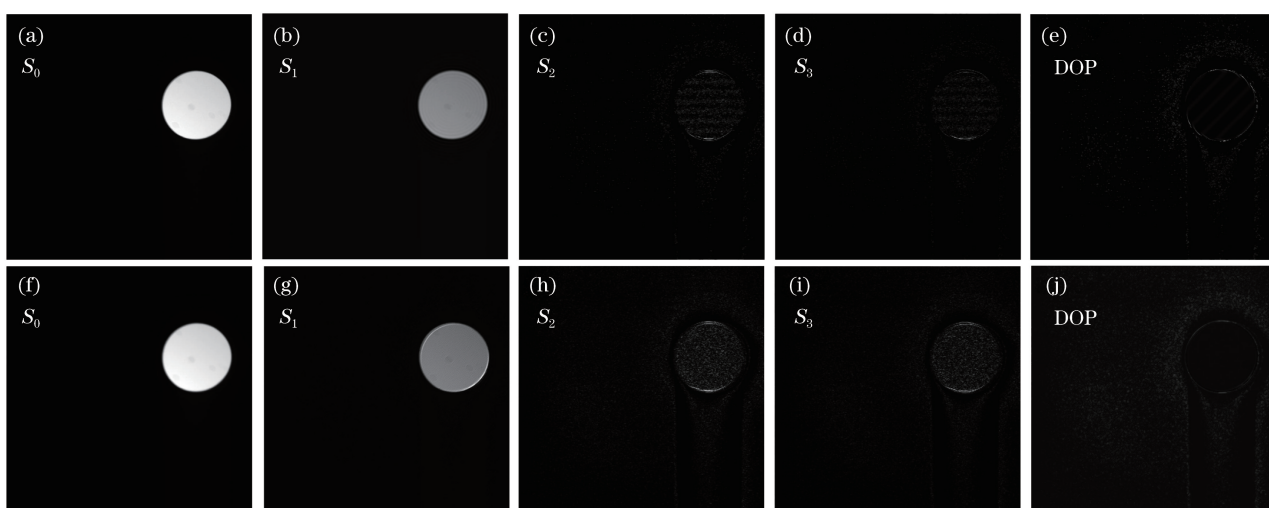


图 8 输入偏振态为 $[1, 0, 0, 0]^T$ 时不同算法得到的重构图像。(a)~(e)传统解调算法;(f)~(j)修正解调算法
 Fig. 8 Reconstruction images obtained by different algorithms for input polarization state $[1, 0, 0, 0]^T$.
 (a)-(e) Traditional demodulation algorithm; (f)-(j) modified demodulation algorithm

根据 $f_{\text{DOP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$ 计算偏振度,表 3 为

相关解调算法重构图像的偏振度计算结果。重构图像的 Stokes 参量探测误差小于 5%,能较好地获得目标图像的偏振信息,符合理论推导结果。

表 3 不同算法重构图像的偏振度

Table 3 DOP of images reconstructed by different algorithms

Algorithm	DOP	
	$[1,1,0,0]^T$	$[1,0,0,0]^T$
Traditional algorithm	0.8792	0.0589
Modified algorithm	0.9842	0.0353

6 结 论

本课题组根据准单色光空间调制型全偏振成像系统的基本结构,通过对宽波段空间调制型全偏振成像系统进行数学建模,分析了以复色光作为成像光源时通道混叠的主要原因。通道混叠会造成载波频率偏差,进而影响图像重构。据此通过寻找中心频谱位置以获得实际载波频率的方式对传统的图像解调算法进行修正。通过数值模拟和实验验证可知,在以复色光作为成像光源时,宽波段空间调制型全偏振成像系统通过修正的图像解调算法可以得到中心波长的偏振信息,偏振探测误差小于 5%,验证了修正图像解调算法的可行性与有效性。此方法可为后续复色光偏振成像探测与分析的进一步研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] DeHoog E, Luo H T, Oka K, *et al.* Snapshot polarimeter fundus camera[J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1663-1667.
- [2] Bai C X, Li J X, Xu Y X, *et al.* Compact birefringent interferometer for Fourier transform hyperspectral imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1703-1725.
- [3] Liu C M, Li J X, Zhu R H, *et al.* Interferometric imaging spectropolarimeter using dual-channel lateral shearing beam splitter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1011002.
刘成森, 李建欣, 朱日宏, 等. 基于双通道剪切干涉的高光谱偏振成像方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1011002.
- [4] Tao F, Song M X, Hong J, *et al.* Polarization calibration method for simultaneous imaging polarimeter based on off-axis three-mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0912005.
陶菲, 宋茂新, 洪津, 等. 基于离轴三反的同时全偏振成像仪的偏振定标方法[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912005.
- [5] Oka K, Kaneko T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms[J]. Optics Express, 2003, 11(13): 1510-1519.
- [6] Oka K, Saito N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6295: 629508.
- [7] Hu Q Y, Yang W F, Hu Y D, *et al.* Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211004.
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211004.
- [8] Cao Q Z, Zhang J, DeHoog E, *et al.* Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 050702.
曹奇志, 张晶, Edward DeHoog, 等. 空间调制稳态微型快照成像测偏技术研究[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 050702.
- [9] Cao Q Z, Zhang C M, DeHoog E. Snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes[J]. Applied Optics, 2012, 51(24): 5791-5796.
- [10] Zhang J, Yuan C G, Huang G H, *et al.* Acquisition of a full-resolution image and aliasing reduction for a spatially modulated imaging polarimeter with two snapshots[J]. Applied Optics, 2018, 57(10): 2376-2382.
- [11] Wu L, Zhang C M, Yuan Y, *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.
- [12] Chen X Y, Shan M. Dispersion formula of calcite[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 38-42.
陈西园, 单明. 方解石晶体色散方程的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 38-42.
- [13] Qiang F, Zhu J P, Zhang Y Y, *et al.* Reconstruction of polarization parameters in channel modulated polarization imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 130202.
强帆, 朱京平, 张云尧, 等. 通道调制型偏振成像系统的偏振参量重建[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 130202.