

光学学报

基于空间调制偏振成像的 Savart 棱镜参数标定

张紫杨^{1,3}, 叶松^{1,3*}, 熊伟², 罗炜¹

¹桂林电子科技大学, 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 为了减小在提取目标偏振信息时器件参数偏差引起的误差,需要对器件参数进行检测标定。提出了通过 Savart 棱镜的分光成像实验对 Savart 棱镜的参数进行了标定的方法。基于分振幅偏振相机进行仿真,使用计算结构相似度和最小二乘拟合法对解调效果进行定量分析。通过偏振成像实验对不同偏振状态下的解调图进行了对比。分析了参数误差对不同 Stokes 分量的影响并验证了参数标定方法的有效性。

关键词 成像系统; 偏振成像; 分光棱镜; 参数标定; 频域解调

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2111001

Parameter Calibration of Savart Prism Based on Spatially Modulated Polarization Imaging

Zhang Ziyang^{1,3}, Ye Song^{1,3*}, Xiong Wei², Luo Wei¹

¹Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

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

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

Abstract It is necessary to detect and calibrate the device parameters to reduce errors caused by device parameter deviation during the polarization information extraction of the target. In this paper, the parameters of the Savart prism are calibrated through the beam-splitting imaging experiment on the Savart prism. In addition, a simulation is carried out on the basis of the fractional amplitude polarization camera, and the demodulation effect is quantitatively analyzed by the calculation of the structural similarity and the least square fitting method. Finally, the demodulation diagrams under different polarization states are compared by polarization imaging experiments. The influence of parameter errors on different Stokes components is analyzed, and the effectiveness of the parameter calibration method is verified.

Key words imaging systems; polarization imaging; beam-splitting prism; parameter calibration; frequency-domain demodulation

1 引言

偏振、频率和强度都是光的重要属性,其中偏振信息能以不一样的视角提供更多信息,让人能够观察到正常情况下看不到的细节信息。因此偏振信息的获取一直是较为热门的研究方向,而偏振成像也因其对偏振信息的展示较为直观而受到广泛关注^[1-2],且在很多领域如遥感^[3-4]、环境监测^[5]、农业管理^[6]、军事侦察^[7-8]等都得到研究及应用。

空间调制全偏振成像是通过双折射晶体进行分光后再进行干涉成像并将偏振信息调制到干涉图中的成像方法,相比其他几种常见的偏振成像方法拥有独特的应用优势。空间调制全偏振成像相比分时和分振幅偏振成像方法拥有一次成像便获得目标全部偏振信息的优势,具有较好的实时性,可以应用于运动物体的偏振成像,相比分孔径和分焦平面偏振成像拥有成像光路装调简单和成像空间分辨率高的优势。2003年 Oka 等^[9]将双折射楔形棱镜应用到偏振成像后,空间调制

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-04-25; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41961050, 41975033)、广西科技基地和人才专项(桂科 AD19245117)、广西自然科学基金(2019GXNSFBA245048)、广西光电信息处理重点实验室基金(GD20104)、广西研究生创新项目(YCSW2020158)

通信作者: *yesong@guet.edu.cn

全偏振成像技术便登上了偏振成像的舞台,随后 Oka 等^[10]使用了 Savart 棱镜(SP)进行偏振成像,使得成像镜头组装更加简便。2008 年 Luo 等^[11]开发出了基于 Savart 棱镜的空间调制全偏振成像样机,并对汽车和建筑物进行了偏振成像实验。吴磊等^[12-15]通过改变 Savart 棱镜中单板光轴之间的方向,进一步提高了空间偏振成像的性能。胡巧云等^[16-18]对空间调制全偏振成像原理及数理模型进行了分析。强帆等^[19-21]分析了频域解调过程中偏振信息之间的串扰问题。王孙晨等^[22]提出了贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾优化解调算法,进一步提高了解调效果。成像系统中器件的参数在解调过程中发挥着重要的作用,因此参数存在误差时会对解调结果造成影响,需要对参数进行标定以提升解调效果。其中关键的器件是 Savart 棱镜,它的一些参数还会随环境的变化而改变,因此在应用中无法对每个参数进行精确单独标定,需要一种较为简单的实用的标定方法。

对于上述提到的问题,本文首先对 Savart 棱镜的各参数在偏振成像和解调过程中的作用进行了分析。分别对两 Savart 棱镜进行分光成像实验,通过得到的图像中分光距离对 Savart 棱镜的参数进行标定。最后搭建空间调制全偏振成像系统进行偏振成像实验,分别使用标定前后的参数进行解调实验,通过对比分析解调结果验证参数标定方法的有效性。

2 基本原理

2.1 空间调制全偏振成像及解调原理

空间调制全偏振成像系统通过两个 Savart 棱镜[图 1(a)、(b)]对入射光进行分光后再进行干涉成像,得到包含偏振信息的干涉图。空间调制全偏振成像系统的光学分布图如图 1(c)所示,由平行镜头、滤光片、Savart 棱镜 1(SP1)、22.5°的半波片(HWP)、Savart 棱镜 2(SP2)、45°的检偏器、成像镜头、CCD 相机等组成。

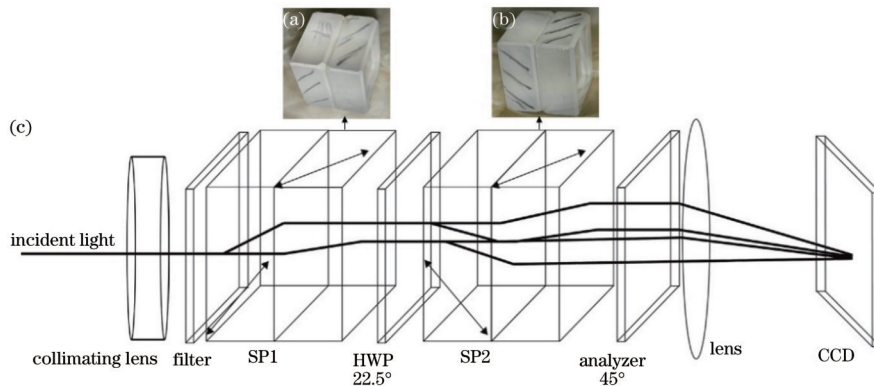


图 1 空间调制全偏振成像光学分布图及 SP1、SP2 实物图。(a) SP1 实物图;(b) SP2 实物图;(c) 空间调制全偏振成像系统的光学分布图

Fig. 1 Optical layout of spatially modulated full polarization imaging system and SP1 and SP2 objects. (a) SP1 object; (b) SP2 object; (c) optical layout of spatially modulated full polarization imaging system

入射光首先通过平行镜组的调制后变成垂直于入射面的平行光,滤波片允许特定波段的入射光透过,入射光在通过 SP1 时被分成两束存在偏离量的光;经过 22.5°半波片的调制后,两束光能再次被 SP2 分光成 4 束,这 4 束光经过 45°检偏器调制后成为相干光,通过成像镜头后进行干涉成像,得到含有目标偏振信息的干涉图像。本文使用 Stokes 矢量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 表示目标的全部偏振信息,最后得到的干涉图像强度公式可以表示为

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

其中

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

式中: $I(x, y)$ 为干涉图像各像素点的强度; $S_0(x, y)$ 、 $S_1(x, y)$ 、 $S_2(x, y)$ 和 $S_3(x, y)$ 为干涉图像各像素点的不同偏振强度; Ω 为调制偏振信息的载波频率; Δ 为 Savart 单板的横向剪切量; λ 为入射光的中心波长; f 为成像镜头的焦距。

由式(1)可知,目标的偏振信息在成像过程中被不同的载波频率调制到干涉图中,在空域中不同偏振信息混叠在一起,而在频域中不同偏振信息随着各自的载波频率分布在不同位置。因此,常将得到的干涉图进行傅里叶变换,使用频域解调的方法在频域中使用滤波器将不同偏振信息分离出来,傅里叶变换后的频域图如图 2 所示。

从图 2 中能看到不同偏振信息在频域中的分布情况,图 2(b)中还显示了不同偏振信息的相对位置,其中 a 为偏振信息 S_0 在频域中相对于中心位置的平移

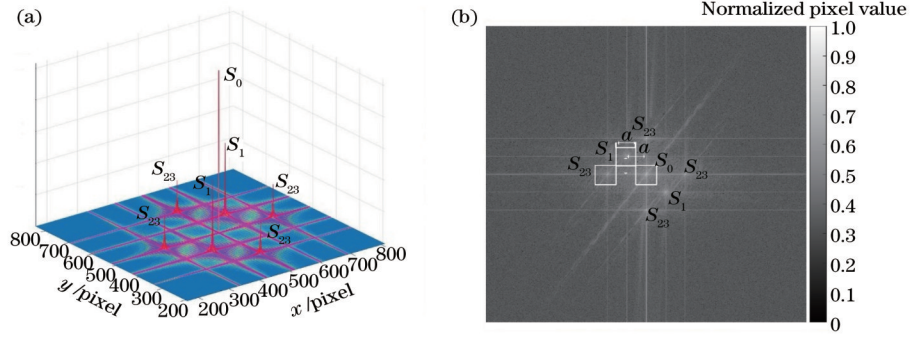


图 2 各 Stokes 信息在频域中的分布图。(a)三维分布图;(b)二维分布图

Fig. 2 Distribution diagrams of all Stokes vectors in frequency domain space. (a) Three-dimensional distribution diagram;(b) two-dimensional distribution diagram

量, a 不仅用来确定各偏振信息的位置, 还用来确定滤波器的窗口大小。滤波器窗口的大小决定得到的偏振信息的完整性, 窗口太大时会受到其他偏振信息的干扰, 窗口太小将会损失一些偏振信息。其中平移量 a 可以表示为

$$a = \Omega DN, \quad (3)$$

式中: D 为成像面像素尺寸; N 为成像面行(列)像素数。

从式(3)中可知: 在成像相机确定后成像面像素尺寸 D 和成像面行(列)像素数 N 为定值, 因此平移量 a

的准确性与载波频率相关, 而载波频率又由 Savart 棱镜的参数确定。后续对 Savart 棱镜进行分析。

2.2 Savart 棱镜的分光原理及参数分析

Savart 棱镜是空间调制全偏振成像系统中较关键的分光器件, 由两块厚度一致、光轴与入射面成 45° 且相互之间呈 90° 的冰洲石粘合在一起制作而成, 如图 1 (a)、(b) 所示。Savart 棱镜拥有较好的分光性能。两块 Savart 棱镜在偏振成像光路中起到的分光作用如图 3 所示。

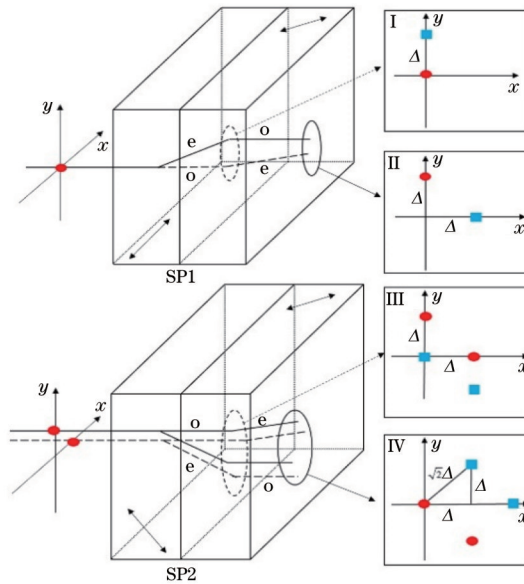


图 3 两块 Savart 棱镜在偏振成像系统中的分光示意图

Fig. 3 Beam splitting diagrams of two Savart prisms in polarization imaging system

入射光经过平行镜头后垂直 Savart 棱镜入射面传播, 进入 SP1 前单板后分成两束振动方向相互垂直的 o 光(ordinary wave)和 e 光(extraordinary wave)。其中 o 光沿着原来方向继续前进, 而 e 光则在 xy 平面内发生偏移, 离开 SP1 前单板时的光束位置如图 3 插图 I 所示, e 光沿 y 轴正方向偏移了 Δ , 其中圆形表示未发生偏移的光束, 方形表示发生偏移的光束。在光束进入 SP1 后单板时, 两束光的类型相对于后单板发生了

变化, 原来在前单板中的 o 光变成 e 光, 在前单板中的 e 光变成 o 光, 离开 SP1 后单板时的光束位置如图 3 插图 II 所示, 两束光相对于初始位置都偏移了 Δ 。两束光在经过 22.5° 的半波片的调制后, 光的电场方向旋转 45° , 使得两束光在进入 SP2 前单板后能再次分束成为 4 束光。4 束光离开 SP2 前单板时的位置如图 3 插图 III 所示, 两束 o 光保持不变, 两束 e 光沿 y 轴负方向偏移了 Δ 。进入 SP2 后单板的 4 束光的类型发生变化, 离开

SP2后单板的4束光分布情况如图3插图IV所示。4束光最后经过检偏器后变成4束相干光,用于干涉成像。在干涉成像以及后续的解调过程中,Savart单板的横向剪切量 Δ 都起到了很重要的作用,横向剪切量 Δ 可以表示为

$$\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} t, \quad (4)$$

式中: n_o 为o光在Savart棱镜中的折射率; n_e 为e光在Savart棱镜中的折射率; t 是Savart棱镜单板的厚度。其中o光和e光在Savart棱镜中的折射率 n_o 和 n_e 遵循Sellmeier经验公式,会随着环境条件的变化发生改变,而Savart棱镜单板的厚度 t 也会在生产加工过程中产生一定误差。因此通过厂家提供的参数计算得到的理论值会有一些偏差,需要对Savart棱镜的参数进行标定,进而计算修正值。增加修正值后的横向剪切量可以表示为

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_1 = \frac{(n_o + n_{o1})^2 - (n_e + n_{e1})^2}{(n_o + n_{o1})^2 + (n_e + n_{e1})^2} (t_0 + t_1) = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} (t_0 + t_1 + t_2) = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} (t_0 + t_3), \quad (5)$$

式中: Δ_0 为理论横向剪切量; Δ_1 为横向剪切量修正值; n_{o1} 为o光在Savart棱镜中的折射率修正值; n_{e1} 为e光在Savart棱镜中的折射率修正值; t_0 为Savart棱镜单板的理论厚度; t_1 为Savart棱镜单板的厚度修正值,是对单板制作中厚度误差的补偿; t_2 为Savart棱镜单板的厚度修正值,是对Savart棱镜折射率误差的补偿; $t_3 = t_1 + t_2$ 为Savart棱镜单板的整体厚度修正值。针对Savart棱镜各参数误差,对解调图误差的过程提供了误差传递流程图,如图4所示,折射率修正值 n_{o1} 和 n_{e1} 都折算成板厚度误差 t_2 和板厚度误差 t_1 ,二者构成板厚

度中误差 t_3 ,通过式(5)可计算出横向剪切误差 Δ_1 ,随后可得到频域平移量误差 a_1 和滤波器窗口值误差 a_2 ,这些误差最终影响到解调偏振图像的效果。

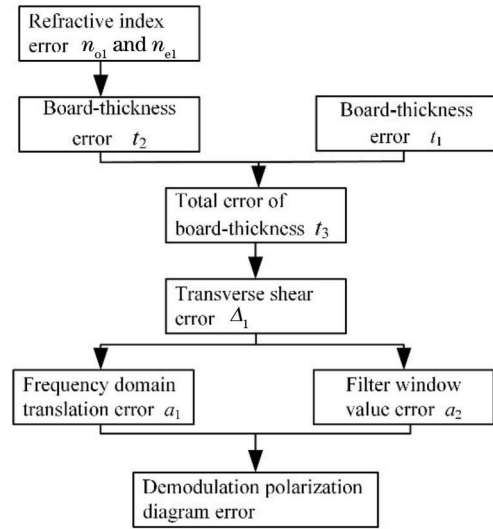


图4 器件参数误差传递流程图

Fig. 4 Flow chart of device parameter error transfer

3 实验结果与分析

3.1 基于Savart棱镜的分光成像实验

第2节将对Savart棱镜单板参数折射率的标定以单板的厚度修正值进行表示,这简化了实验过程。在对式(5)进行分析研究后,可以通过Savart棱镜的横向剪切量和o光、e光在Savart棱镜中的理论折射率 n_o 和 n_e 计算得到Savart棱镜单板厚度修正值 t_3 。对此通过Savart棱镜的分光成像实验进行验证分析,实验光路如图5所示。

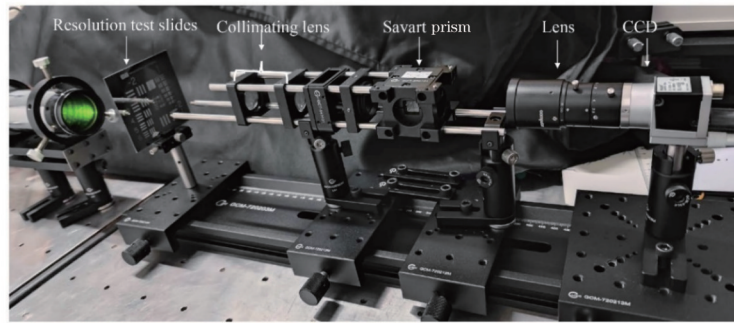


图5 基于Savart棱镜的分光成像实验装置

Fig. 5 Experimental setup of beam splitting imaging based on Savart prism

从图5中可知Savart棱镜的分光成像实验系统主要由分辨率板 USAF-1951-1X、平行镜头、Savart棱镜、成像镜头和CCD相机组成。其中入射光的中心波长 $\lambda=532\text{ nm}$,成像镜头的焦距 $f=70\text{ mm}$ 。相机的参数为像元尺寸 $D=3.45\text{ }\mu\text{m}$,行(列)像素数 $N=2048$ 。在设计过程中确定的Savart棱镜的参数为通光面尺寸为 $12.5\text{ mm}\times 12.5\text{ mm}$,单板厚度 $t=6\text{ mm}$ 。入射光透射过分辨率板后,通过平行镜头的调制垂直入射到

Savart棱镜进行分光后成像,如图6所示。

分别用SP1和SP2对分辨率板进行分光成像,分光偏移过程如图3所示。在SP1中光束先向上偏移,然后向右偏移;在SP2中光束先向下偏移,然后向右偏移;偏移的距离都是横向剪切量 Δ 。从图6中的分光图局部放大图发现,在-1组5号线对的偏移量正好为其线宽。查找USAF-1951-1X分辨率板的各组线对的线宽表后可知,-1组5号线对的线宽为 0.62996 mm ,即

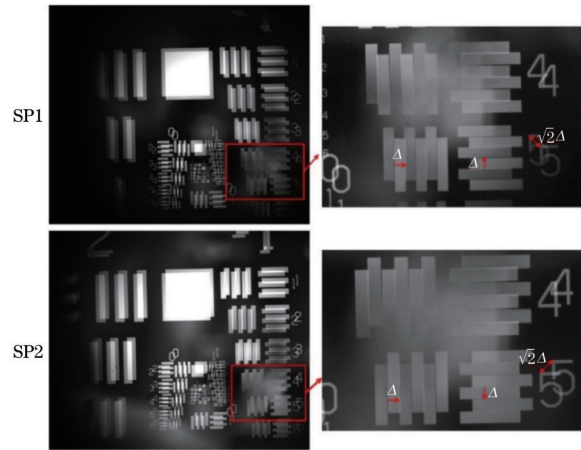


图 6 两个 Savart 棱镜对分辨率板的分光成像图

Fig. 6 Beam splitting diagrams of two Savart prism on resolution test slides

横向偏移量 $\Delta=0.62996$ mm。通过计算得到相应的修正量, Savart 棱镜的相关参数的设计值、器件标注值和标定值如表 1 所示。表 1 中设计值表示在理论分析中确定的 Savart 棱镜的参数, 器件标注值表示器件在

制作过程中产生的一些误差, 标定值表示在器件标注值的基础上通过分光成像实验对参数误差标定的值。将标定后的值代入后续的解调过程, 能提升解调结果的质量。

表 1 基于 Savart 棱镜参数的设计值、器件标注值和标定值

Table 1 Design values, device labeling values, and calibration values based on Savart prism parameters

Savart prism parameter	Design value	Device labeling value	Calibration value
Incident surface / (mm × mm)	12.5 × 12.5	12.4 × 12.4	12.4 × 12.4
n_o	1.662	1.662	1.662
n_e	1.488	1.488	1.488
t_0 / mm	6	6	6
t_1 / mm	0	-0.05	-0.05
t_2 / mm	0	0	-0.2304
t_3 / mm	0	-0.0500	-0.2804
t / mm	6.0000	5.9500	5.7196
Δ_0 / mm	0.66084	0.66084	0.66084
Δ_1 / mm	0	-0.00551	-0.03088
Δ / mm	0.66084	0.65533	0.62996

3.2 基于仿真对解调结果的定量分析研究

在 3.1 节中通过分光成像实验分析了 Savart 棱镜参数的标定情况, 接下来需要对使用标定前后参数的解调效果进行分析研究。通过使用分振幅偏振相机获得不同偏振方向的图像, 进行计算后可获得作为标准对比组的各 Stokes 分量图和偏振度 (DOP) 图, 如图 7 (a) 所示。采用 3.1 节中的器件参数和偏振成像原理公式模拟获得干涉图, 分别使用标定前和标定后的参数进行频域解调, 可分别获得标定前后的解调结果, 如图 7 (b)、(c) 所示。通过与标准对比组 [图 7 (a)] 比较后可以发现, 使用未标定参数获得的解调结果 [图 7 (b)] 受到较为明显的干扰, 而通过标定后的解调结果 [图 7 (c)] 受到的干扰较少。其中解调结果 S_0 并不受参数误差的影响, 因其在偏振成像调制过程并未被调制, 在频域中表现为 S_0 的偏振信息处在频域中心位置, 如图 2 (b) 所示。

通过图 7 能非常直观地观察到标定前后解调结果之间的差别。为了能从数值上对解调效果进行对比分析、明确参数标定对解调的影响, 采用计算解调图像与标准图之间的结构相似度 (SSIM) 和最小二乘拟合法两种方法对此进行定量分析。其中结构相似度 SSIM 是从亮度、对比度和结构三方面衡量两幅图像的相似程度, SSIM 的取值范围为 [0, 1], SSIM 值越大代表两幅图像相似的部位和参量越多, 对图 7 中的两种解调结果进行计算, 得到的结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看到参数标定前后各解调图与标准图之间的相似程度, 其中 S_0 偏振图的结构相似度都在 0.95 以上, 表示参数的误差对 S_0 的解调过程没有造成太多干扰。而 S_1 、 S_2 和 S_3 的偏振图的解调过程会受到参数误差的影响, 参数标定前的结构相似度都在 0.70 左右, 参数标定后的结构相似度都可以达到 0.95 以上, 偏振度图也会受到参数误差的影响。

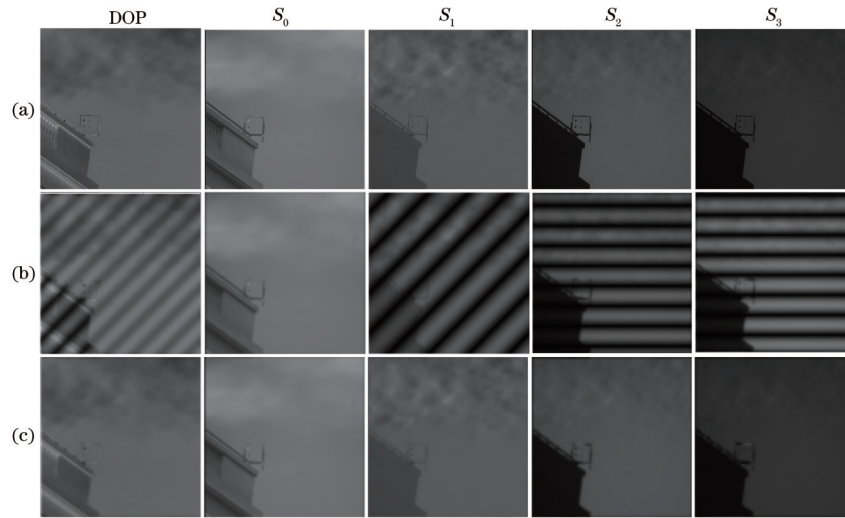


图 7 基于分振幅偏振相机的仿真解调结果。(a) 仿真标准图; (b) Savart 棱镜参数标定前的解调图; (c) Savart 棱镜参数标定后的解调图

Fig. 7 Simulation demodulation results based on fractional amplitude polarization camera. (a) Simulation standard diagrams; (b) demodulation diagrams of Savart prism parameters before calibration; (c) demodulation diagrams of Savart prism parameters after calibration

表 2 标定前后的结构相似度
Table 2 SSIM before and after calibration

Savart prism parameter	DOP	S_0	S_1	S_2	S_3
Before calibration	0.93274	0.97295	0.71149	0.71008	0.70574
After calibration	0.97317	0.96729	0.95765	0.96954	0.98592

为了能更精确地评定参数标定前后的解调结果,

表 3 拟合曲线的斜率 k_s
Table 3 Slope k_s of fitted curve

Savart prism parameter	DOP	S_0	S_1	S_2	S_3
Before calibration	0.383600	1.026750	0.068187	0.390390	0.194090
After calibration	1.002400	1.024890	1.025100	1.002080	0.996840

表 4 拟合曲线的截距 b_s
Table 4 Intercept b_s of fitted curve

Savart prism parameter	DOP	S_0	S_1	S_2	S_3
Before calibration	0.71976	-0.01046	0.31199	0.19201	0.09641
After calibration	0.00004	-0.00971	-0.00756	0.00133	0.00147

$|k_s - 1|$ 和 $|b_s|$ 的值越小, 表示拟合对象之间的相似程度越高, 即表示解调图和标准图之间的误差越小。从表 3 和表 4 可以发现, 参数标定后的解调图与标准图相似程度更高。这也进一步证明了通过分光实验对参数标定的方法的正确性和可行性。

为了更好地分析 Savart 棱镜厚度的误差对解调结果造成的影响, 模拟仿真了不同误差情况下的解调情况, 以结构相似度表示解调结果随参数误差的变化趋势, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看到解调图与标准图之间的 SSIM 值随 Savart 棱镜厚度误差的变化, 其中 S_0 的 SSIM 值

选择最小二乘拟合的方法确定解调图与标准图之间的偏差, 其中将解调图的数据 S_{dem} 与标准图的数据 S_{imp} 进行最小二乘拟合, 可得到线性方程为

$$S_{dem} = k_s S_{imp} + b_s, \quad (6)$$

式中: k_s 为拟合曲线的斜率; b_s 为拟合曲线的截距。这些参数可以用来评定解调图与标准图之间的相似度, 拟合结果分别如表 3 和表 4 所示。

一直保持靠近 1 的位置, 表示 S_0 的解调结果不受 Savart 棱镜厚度误差的影响。而其他 Stokes 分量和 DOP 偏振图的 SSIM 值会受到影响, 且整体趋势是随着 Savart 棱镜厚度误差的增大而逐渐降低。

利用分振幅偏振相机得到的偏振图进行模拟仿真, 对参数标定前后的解调结果进行分析, 并通过计算解调图和标准图之间的结构相似度和最小二乘拟合法两种方法对解调结果进行定量分析, 最后给出了解调结果随 Savart 棱镜厚度误差的变化趋势。

3.3 空间调制偏振成像及解调实验

通过空间调制偏振成像及解调实验验证分光实验

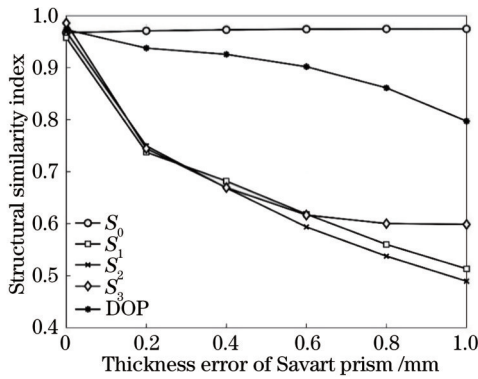


图 8 解调图的结构相似度随 Savart 棱镜厚度误差的变化图
Fig. 8 Structural similarity index of demodulation diagram varying with thickness error of Savart prism

对 Savart 棱镜整体厚度修正值的正确性,按照图 1 的理论偏振成像光路布局搭建光路,进行了偏振成像实验,偏振成像实验如图 9 所示。

对目标物体进行偏振成像,利用平行镜头和滤光片对入射光进行调制,以使入射光平行垂直入射,两个 Savart 棱镜对入射光进行分光后出射 4 束光,在经过检

偏器调制后进行干涉成像,得到干涉图像,如图 9(b) 所示。后续使用修正前后的两种参数对得到的干涉图进行解调处理,对比分析两种解调效果以验证参数标定的有效性,解调结果如图 10 所示,

从图 10 中可知,第 1 行分别为参数未标定时解调得到的偏振度图[图 10(a)]、 S_0 偏振图[图 10(b)]和 S_1 偏振图[图 10(c)],第 2 行分别为参数标定后解调得到的偏振度[图 10(d)]、 S_0 偏振图[图 10(e)]和 S_1 偏振图[图 10(f)]。通过对比分析可以发现两种解调结果中 S_0 偏振图[图 10(b)、(e)]的 S_0 偏振信息在成像时未被调制到载波上,不受 Savart 棱镜参数的影响,解调效果较好;其他偏振度[图 10(a)、(d)]和 S_1 偏振图[图 10(c)、(f)]都存在很大差异,其中使用标定后参数解调得到的偏振图效果较好,而使用标定前参数解调得到的偏振图误差较大,效果较差。

为了能更进一步地对不同偏振特性目标的偏振成像及解调效果进行分析,采用增加调节偏振片的方式获得不同偏振成像环境。对不同偏振方向平行光管的光进行偏振成像后,使用标定前后的参数进行解调,各 Stokes 分量和偏振度图如图 11 所示。

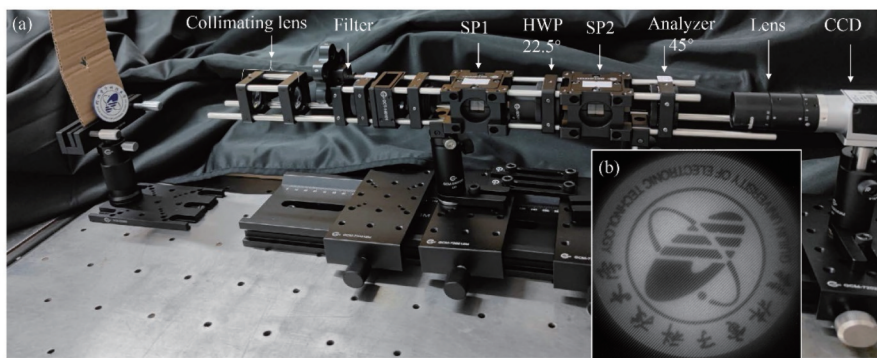


图 9 空间调制全偏振成像实验。(a) 实验布局图; (b) 干涉图
Fig. 9 Experimental layout of spatially modulated full polarization imaging. (a) Experimental layout; (b) interferogram

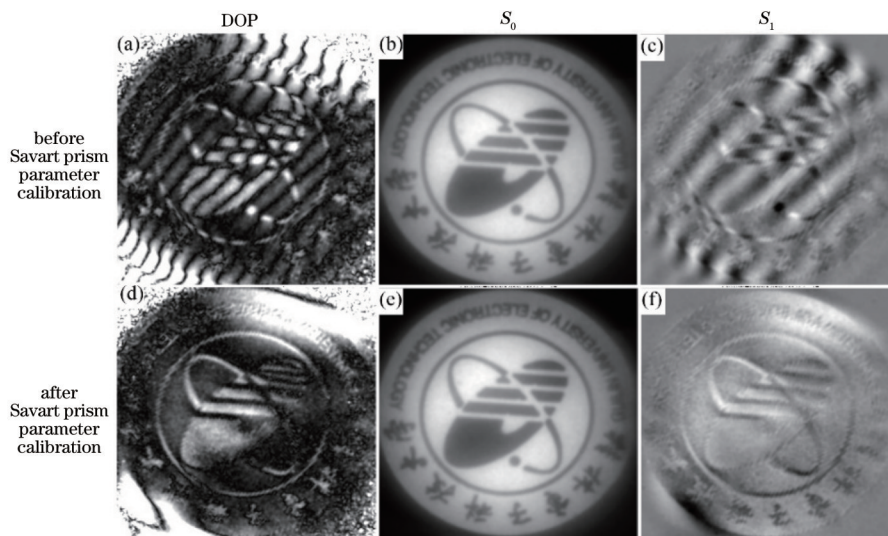


图 10 使用标定前后的两种参数进行解调的偏振图。(a)(d) 偏振度图; (b)(e) S_0 偏振图; (c)(f) S_1 偏振图
Fig. 10 Polarization diagrams demodulated with two parameters before and after calibration. (a)(d) Diagrams of DOP; (b)(e) polarization diagrams of S_0 ; (c)(f) polarization diagrams of S_1

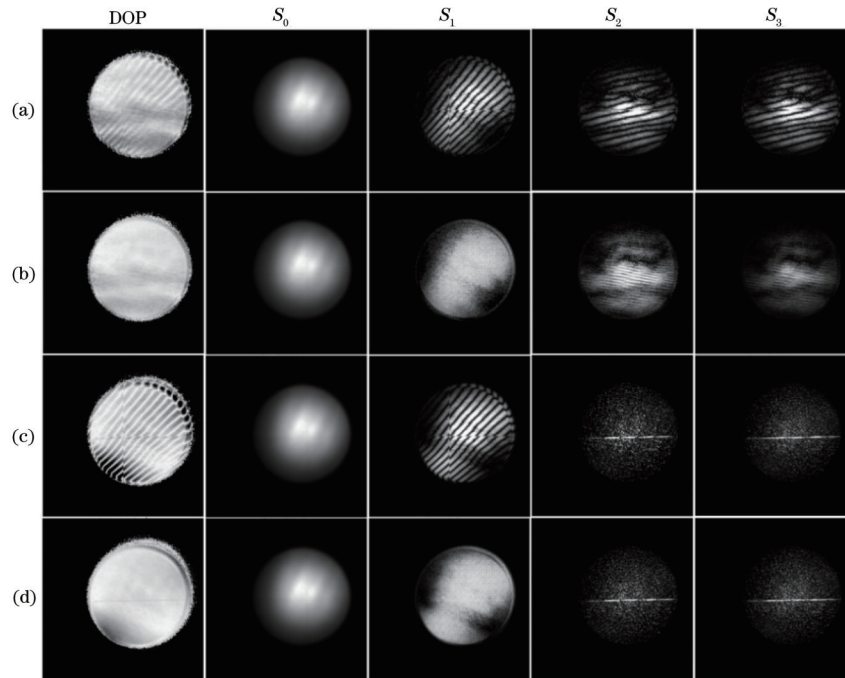


图 11 特定偏振状态光的偏振解调实验结果。(a)(b) 60°偏振光的解调结果;(c)(d) 90°偏振光的解调结果

Fig. 11 Polarization demodulation experimental results of light with different polarization states. (a)(b) Demodulation diagrams of 60° polarized light; (c)(d) demodulation diagrams of 90° polarized light

图 11 为对 60°和 90°偏振方向的平行光管进行偏振成像后,分别使用 Savart 棱镜标定前后的参数进行解调得到的各 Stokes 分量 and 偏振度图像。其中图 11 (c)、(d)为 90°偏振方向的光解调结果,只包含了表示总光强 S_0 和线偏振光 S_1 的解调图像,在参数标定前 S_1 和 DOP 的解调图都受到参数误差的影响。其中图 11 (a)、(b)为 60°偏振方向的光解调结果,包含了全部 Stokes 分量的解调图像,通过对比分析可以发现参数误差对不同 Stokes 分量解调过程的影响。

通过不同实验对各偏振状态下解调结果进行了对比分析,明确了 Savart 棱镜参数的误差对各 Stokes 分量解调结果的影响及变化趋势。这也在一定程度上证明了使用分光成像实验对 Savart 棱镜参数标定的可行性,有利于偏振成像及解调的实际应用,也为后续进一步的精确测量和参数标定提供了研究基础。

4 结 论

在偏振信息的应用范围越来越广泛的当下,偏振成像作为偏振信息较为直观的展现方式受到科研工作者的重视。针对空间调制偏振成像系统中器件参数误差影响解调效果的问题进行分析研究,首先明确了 Savart 棱镜参数在解调过程中的作用,提出了基于 Savart 棱镜的分光成像实验对 Savart 棱镜参数标定的方法。这种标定方法无需特定的测量设备就能实现对整体参数的标定。随后基于分振幅偏振相机进行模拟仿真,对参数标定前后的解调效果进行了定量分析,并对解调效果随参数误差的变化趋势进行了研究。最后进行偏振成像实验,对参数标定前后的解调效果进行对比,对不同偏振状态下的光进行偏振成像和解调实

验,验证了基于 Savart 棱镜分光实验的参数标定方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Demos S G, Alfano R R. Optical polarization imaging[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 150-155.
- [2] 杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1511001.
Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1511001.
- [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] 姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 星载面阵 CCD 性能测试系统设计及温度影响分析[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0910001.
Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Design of performance test system and analysis of temperature dependence for space-borne array CCD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0910001.
- [5] Fang S, Xia X S, Xing H, et al. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19523-19537.
- [6] 王凌志, 韩阳, 潘倩. 多角度偏振高光谱的农田土壤肥力模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 240-245.
Wang L Z, Han Y, Pan Q. Study on farmland soil fertility model based on multi-angle polarized hyper-

- spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 240-245.
- [7] Snik F, Craven-Jones J, Escuti M, et al. An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9099: 90990B.
- [8] 叶松, 屈文学, 李树, 等. 基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1001003.
Ye S, Qu W X, Li S, et al. Sea surface glint-suppression method based on the polarization time-domain characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1001003.
- [9] Oka K, Kaneko T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms[J]. Optics Express, 2003, 11(13): 1510-1519.
- [10] Oka K, Saito N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6295: 43-49.
- [11] Luo H T, Oka K, DeHoog E, et al. Compact and miniature snapshot imaging polarimeter[J]. Applied Optics, 2008, 47(24): 4413-4417.
- [12] 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.
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.
- [13] 彭志红, 张淳民, 赵葆常, 等. 新型偏振干涉成像光谱仪中 Savart 偏光镜透射率的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6374-6381.
Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, et al. The transmittance of Savart polariscope in polarization interference imaging spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6374-6381.
- [14] 简小华, 张淳民, 孙尧, 等. 一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 643-646.
Jian X H, Zhang C M, Sun Y, et al. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement Savart polariscope[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 643-646.
- [15] Cao Q Z, Zhang J, DeHoog E, et al. Demonstration of snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes[J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 954-959.
- [16] 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.
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.
- [17] 刘震. 空间调制型全偏振成像系统关键误差分析与性能优化研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 65-92.
Liu Z. The research on error analysis and optimization of the spatially modulated imaging polarimeter[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 65-92.
- [18] 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.
- [19] 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.
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.
- [20] 李浩, 朱京平, 张宁, 等. 半波片角度失配对通道调制型偏振成像效果的影响及补偿[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 134202.
Li H, Zhu J P, Zhang N, et al. Effect of half wave plate angle mismatch on channel modulating imaging result and its compensation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 134202.
- [21] 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.
- [22] 王孙晨, 张磊, 薛模根, 等. 空间调制型全偏振成像系统解调算法优化[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1211001.
Wang S C, Zhang L, Xue M G, et al. Optimization with demodulation algorithm for spatially modulated full polarization imaging system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1211001.