



## 线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术

曹奇志 唐金凤 潘杨柳 江敏 蒋思悦 张晶 贾辰凌 樊东鑫 邓婷 王华华 段炼

## Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter

Cao Qi-Zhi Tang Jin-Feng Pan Yang-Liu Jiang Min Jiang Si-Yue Zhang Jing Jia Chen-Ling Fan Dong-Xin Deng Ting Wang Hua-Hua Duan Lian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 154205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220229

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220229>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于双折射晶体的快拍穆勒矩阵成像测偏原理分析

Principle analysis of snapshot Mueller matrix imaging polarimeter using birefringent crystal

物理学报. 2018, 67(10): 104209 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172604>

#### 一种减少空间调制快拍成像测偏仪伪信息的方法

A method of reducing false signature in spatially-modulated snapshot imaging polarimeter

物理学报. 2018, 67(4): 040701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171931>

#### 基于石墨烯的宽带全光空间调制器

Graphene-based broadband all-optical spatial modulator

物理学报. 2018, 67(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180307>

#### 基于相干调制成像的光学检测技术

Technique of detecting optical components based on coherent modulation imaging

物理学报. 2020, 69(17): 174202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200224>

#### 大孔径空间外差干涉光谱成像技术多谱段成像仿真

Simulation of multiband imaging technology of large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy

物理学报. 2018, 67(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180943>

#### 飞秒激光辐照二硫化钨的超快动态响应及时域整形调制

Ultrafast dynamic response and temporal shaping modulation of tungsten disulfide irradiated by femtosecond laser

物理学报. 2021, 70(20): 205201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210737>

## 线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术\*

曹奇志<sup>1)4)</sup> 唐金凤<sup>1)</sup> 潘杨柳<sup>1)</sup> 江敏<sup>1)</sup> 蒋思悦<sup>1)</sup> 张晶<sup>1)4)</sup>†  
贾辰凌<sup>2)3)‡</sup> 樊东鑫<sup>1)</sup> 邓婷<sup>1)</sup> 王华华<sup>1)</sup> 段炼<sup>4)</sup>

1) (南宁师范大学物理与电子学院, 南宁 530023)

2) (西安财经大学, 中国 (西安) 丝绸之路研究院, 西安 710100)

3) (西安交通大学前沿科学技术研究院, 西安 710054)

4) (南宁师范大学, 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530023)

(2022 年 2 月 3 日收到; 2022 年 4 月 9 日收到修改稿)

空间调制快拍成像测偏技术能通过单次曝光同时获取目标全部斯托克斯参量. 针对传统参考光线定标技术不适用动态环境 (如温度变化) 下偏振信息精确测量的瓶颈问题, 本文提出了线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术. 该技术采用沿着同一方向剪切的两块改进型萨瓦偏光镜作为核心调制器件, 两者厚度比为 1:2, 通过快拍获取的干涉图和厚度比, 可以推演出核心调制器件产生的空间调制相位因子, 由此解调出目标全部偏振信息. 该技术最显著的优点是测量目标与系统定标同时进行, 过程中不需要任何预知参考目标. 本文对该技术方案进行了详细的理论分析, 并通过数值模拟和搭建实验平台, 验证了该方案的可行性; 为空间调制快拍成像测偏技术的定标提供了新思路, 有力推动其动态环境下工程实际应用进程.

**关键词:** 动态定标, 空间调制, 快拍成像测偏技术**PACS:** 42.81.Gs, 07.05.Pj, 42.25.Ja**DOI:** 10.7498/aps.71.20220229

## 1 引言

成像测偏技术不仅可获得目标光学辐射的光强度信息, 而且可获得目标的偏振信息, 显著增加被探测目标场景的信息量<sup>[1,2]</sup>. 目标的偏振信息与其自身的介电常数、粗糙度、组织结构、含水量等有密切关系<sup>[3]</sup>. 该技术在空间遥感、环境监测、生物医学<sup>[4,5]</sup>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. 它是当今偏振成像领域研究的热点之一<sup>[1,6–13]</sup>.

成像测偏技术按照调制方式不同, 分为分时型和快拍型 (snapshot, 有学者称为同时或快照式)<sup>[1,2]</sup>. 分时型一般包含有机机械转动 (如旋转玻片等) 或相位延迟调制 (如液晶等) 部件, 虽然原理简单, 获得的偏振图像空间分辨率高, 但系统中含有活动部件和需要多次测量, 这限制了其测量精度和应用范围. 快拍型一般包括: 分振幅、分焦平面、分孔径和空间调制型, 图像之间的精确配准是前三者快拍型成像测偏技术不可忽视的问题. 空间调制快拍成像测偏技术是采用不同的载频将目标的全部 4 个斯托克斯 (Stokes) 参量分量 ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$ ) 编码

\* 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放课题 (批准号: SKLST202003)、国家自然科学基金 (批准号: 11964021, 41961062, 11664004)、广西重点研发计划 (批准号: 2019AB16010)、广西自然科学基金 (批准号: 2018JJA150089, 2016GXNSFAA380241) 和北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室系统基金 (批准号: GTEU-KLOP-K1801) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jingzhang2011@163.com

‡ 通信作者. E-mail: xxjsjcl@qq.com

到一帧干涉图中, 通过一次探测获取全部 Stokes 参量<sup>[6-13]</sup>. 与分振幅、分焦平面和分孔径快拍成像测偏技术相比, 空间调制快拍成像测偏技术仅需对单张干涉图解调, 无需配准. 此外, 该技术具有结构简洁、直光路、易配准和微型轻量等优点, 是近十年快拍成像测量技术的重点方向之一<sup>[6-13]</sup>.

国内外研究学者基于不同核心调制器件 (楔形棱镜<sup>[7]</sup>、萨瓦偏光镜<sup>[8,9]</sup>、偏振光栅<sup>[6]</sup>和改进型萨瓦偏光镜 (modified Savart polariscopes, MSP)<sup>[10-12]</sup>) 提出了优点各异的技术方案. 但在反演目标偏振信息时, 一般采用参考光线定标方法: 在每次测量目标前, 须先测量一些已知偏振态 ( $0^\circ$  和  $45^\circ$  线偏振光) 作为参考数据, 通过将未知目标的数据与参考数据进行归一化, 消除空间调制相位因子的影响, 重构出未知目标的偏振信息. 参考光定标技术前提假设: 测量时系统状态与定标时系统状态完全一样. 然而, 在实际动态环境中 (如温度不稳定), 快拍测偏系统状态是动态变化的. 用测量目标前系统状态去定标测量目标时系统的状态, 必然导致动态的测量误差, 显然传统参考光线定标技术不能满足实际动态环境下的应用需求.

受到通道谱调制动态定标方法启发<sup>[14-16]</sup>, 本文提出了线性剪切空间调制快拍成像测偏技术的动态定标方法. 该方法无需将已知偏振态作为参考数据, 在测量的同时实现系统定标, 极大扩展了空间调制快拍成像测偏技术应用场景, 有利于促进该技术工程实践应用. 本文第 2 节是光路设计; 光学测量和动态定标原理在第 3 节; 数值模拟和实验室

原理验证分别在第 4 节和第 5 节; 第 6 节是结论.

## 2 光路设计

图 1 是基于 MSP 的线性剪切快拍成像测偏技术 (one-dimension modulation snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes, MSP-OMSIP) 光学设计示意图, 改进型萨瓦偏光镜  $MSP_1$  和  $MSP_2$  的主截面平行于  $xoz$  平面, 其中  $MSP_2$  的厚度是  $MSP_1$  厚度的 2 倍; 两者之间夹着的半波片 (half wave plate, HWP) 快轴方向与  $x$  轴方向成  $22.5^\circ$ ; 分析器 A 的偏振化方向与  $x$  轴方向成  $45^\circ$ . 目标出射的光首先经准直后平行入射, 经滤光片后变为单色光, 入射经过  $MSP_1$ , 分成振动方向在  $xoz$  面和  $yo$  面内正交垂直的两束线偏振光; 然后这两束光经过 HWP, 两束光的偏振方向旋转  $45^\circ$ , 垂直入射经过  $MSP_2$  后, 分成四束线偏振光; 最后经分析器 A 和成像镜  $L_2$ , 目标图像与干涉条纹叠加在电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 上.

## 3 光学测量和自定标原理

利用 Stokes 参量-Mueller 矩阵形式, 分析 MSP-OMSIP 的探测原理. 设入射光的 Stokes 参量为  $S_{0,in}$ , 用一个  $4 \times 1$  的矩阵表示, 则出射光的 Stokes 参量  $S_{0,out}$  等于光学系统的 Mueller 矩阵  $M$  乘以入射光的 Stokes 参量, 即  $S_{0,out} = MS_{0,in}$ . 基于本测量系统的基本结构和探测原理, 入射光经

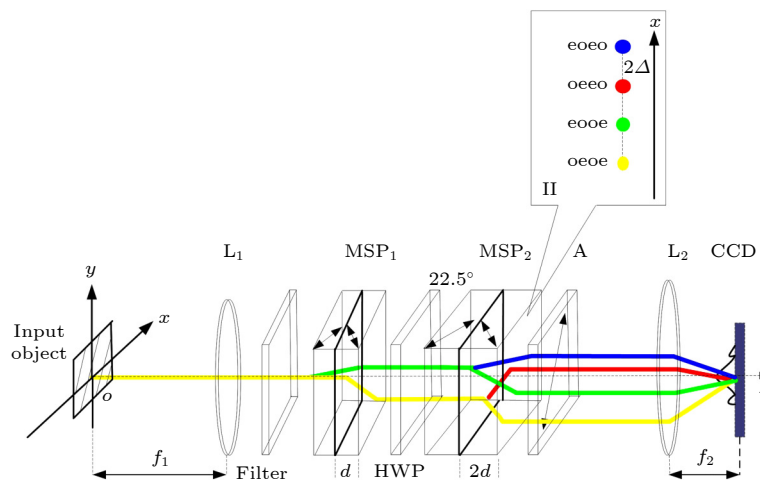


图 1 MSP-OMSIP 光学设计示意图

Fig. 1. Optical layout of MSP-OMSIP.

过系统的矩阵传输方程可表示为

$$\mathbf{S}_{0,\text{out}} = \mathbf{M}_{\text{P}_2(45^\circ)} \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_{\text{H}(22.5^\circ)} \mathbf{M}_1 \mathbf{S}_{0,\text{in}}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{M}_{\text{P}_2(45^\circ)}$ ,  $\mathbf{M}_2$ ,  $\mathbf{M}_{\text{H}(22.5^\circ)}$  和  $\mathbf{M}_1$  分别表示分析器 A、改进型萨瓦偏光镜 MSP<sub>2</sub>、HWP 和改进型萨瓦偏光镜 MSP<sub>1</sub> 的 Mueller 矩阵<sup>[5]</sup>.

通过计算 (1) 式, 可得到焦平面 (FPA) 上光强  $I = S_{0,\text{out}}$ ,

$$\begin{aligned} I = & \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 \cos(2\pi \times 4\Omega \times x) \\ & + \frac{1}{4} |S_{23}| \cos[2\pi \times 2\Omega \times x + \arg(S_{23})] \\ & - \frac{1}{4} |S_{23}| \cos[2\pi \times 6\Omega \times x - \arg(S_{23})], \quad (2) \end{aligned}$$

$$S_{23} = S_2 + iS_3, \quad (3)$$

$S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  是 4 个斯托克斯 (Stokes) 参量分量, 其中  $\Omega = \Delta/(\lambda f)$  是空间载频,  $\lambda$  是入射光的波长,  $f$  是成像镜的焦距,  $\Delta$  是萨瓦偏光镜 MSP<sub>1</sub> 的平板横向剪切量<sup>[11]</sup>. 对光强  $I$  进行傅里叶变换获得如图 2 所示的 7 个峰, 这些峰中包含不同的 Stokes 参量. 由于傅里叶变换的对称性, 只需分别对  $C_0$ ,  $C_1$  和  $C_2$  通道采用二维滤波器进行截取, 再进行反傅里叶变换  $\Im$ , 来重构  $S_0$ ,  $S_1$  和  $S_{23}$  的偏振信息:

$$\Im(C_0) = \frac{1}{2} S_0, \quad (4)$$

$$\Im(C_1) = \frac{1}{4} S_1 \exp(j4\pi\Omega x), \quad (5)$$

$$\Im(C_2) = \frac{1}{8} (S_2 + jS_3) \exp(j2\pi\Omega x). \quad (6)$$

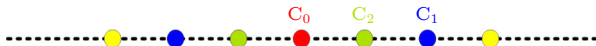


图 2 干涉图频谱通道示意图

Fig. 2. Spectrum channel of interferogram.

为了重构未知目标的 Stokes 参量, 需进行系统定标来解调相位因子  $\exp(j2\pi\Omega x)$  和  $\exp(j4\pi\Omega x)$ . 传统方法采用参考光线定标技术<sup>[6]</sup>: 在每次测量目标前, 先采集已知偏振态 (偏振方向  $0^\circ$  和  $45^\circ$  线偏振片) 干涉图作为参考数据, 来消除这些相位因子. 然而在工程实践中, 经常需长时间地对目标或者目标场景进行观测, 环境状态 (如温度) 一般是不稳定的, 快拍测偏系统的状态也是动态变化的. 用测量目标前的系统状态去定标测量目标时的状态, 必然导致动态的测量误差. 为此, 本文提出了线性剪

切空间调制快拍成像动态定标技术. 自定标原理为: 令延迟相位  $\phi_1 = 2\pi\Omega x_i$ ,  $\phi_2 = 4\pi\Omega x_i$ ,

$$P_0 = \frac{1}{2} S_0, \quad (7)$$

$$P_1 = \frac{1}{4} |S_1| \exp[j\phi_2 + \arg(S_1)], \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{1}{8} |S_{23}| \exp[j(\phi_2 - \phi_1) + \arg(S_{23})], \quad (9)$$

$$P_3 = \frac{1}{8} |S_{23}| \exp[j(\phi_2 + \phi_1) - \arg(S_{23})], \quad (10)$$

其中  $\arg(S_1)$  是 0 或  $\pi$ . 由 (7) 式—(10) 式可得

$$P_1^2 = \frac{1}{16} |S_1|^2 \exp(2j\phi_2), \quad (11)$$

$$-P_2 P_3 = \frac{1}{64} |S_{23}|^2 \exp(2j\phi_2), \quad (12)$$

$$16P_1^2 - 64P_2 P_3 = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) \exp(2j\phi_2). \quad (13)$$

由于 (13) 式的绝对值等于完全偏振光成分中的光强的平方, 总是一个大于 0 的值. 因此,  $\phi_2$  可以通过对 (13) 式求复角得到. 由于 MSP<sub>2</sub> 的厚度是 MSP<sub>1</sub> 厚度的两倍, 可以求出  $\phi_1$  是  $\phi_2$  的一半. 求出  $\phi_1$  和  $\phi_2$  后, 通过 (4) 式—(6) 式可以反演出:

$$S_0 = |\Im(C_0)|, \quad (14)$$

$$S_1 = 4\text{Re}\{\Im(C_1) \exp(-2j\phi_2)\}, \quad (15)$$

$$S_2 = 8\text{Re}\{\Im(C_2) \exp(-2j\phi_1)\}, \quad (16)$$

$$S_3 = 8\text{Im}\{\Im(C_2) \exp(-2j\phi_1)\}, \quad (17)$$

其中 Re 和 Im 分别是对复数取实部和虚部操作.

## 4 数值模拟

采用计算机仿真实验验证 MSP-OMSIP 理论分析的正确性. 仿真采用的系统参数为:  $f_2 = 80 \text{ mm}$ , CCD 分辨率为  $1024 \times 1024$ , 像元尺寸为  $5.3 \text{ } \mu\text{m}$ , 空间载频设为 0.05. 图 3 为输入系统的 Stokes 目标图像. 图 4 为 CCD 上模拟得到的干涉图. 可以看到目标图像和清晰的干涉条纹. 图 5 为图 4 的傅里叶变换频谱, 可以看出 7 个分离的峰 (通道) 一字排开, 这 7 个峰 (通道) 分别包含 4 个 Stokes 信息. 使用二维滤波器进行滤波, 通过对通道  $C_0$ ,  $C_1$  和  $C_2$  进行反傅里叶变换, 采用第 3 节给出的动态定标原理算法, 可以反演获得目标图像 (如图 6 所示).



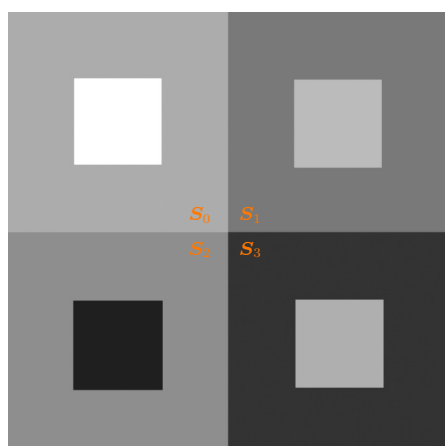


图 3 输入系统的 Stokes 目标图像  
Fig. 3. Enter the Stokes target image for the system.

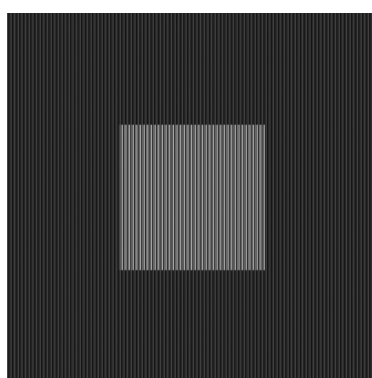


图 4 CCD 上模拟得到的干涉图  
Fig. 4. Interferogram simulated on CCD.

结构相似指标 (SSIM) 是一种衡量两张图像相似程度的指标. 当两张图像中的一张为无失真图像 (如输入目标图像), 另一张为重构图像, 二者的结构相似性可以看成是重构图像的质量衡量指标.

SSIM 取值在 0—1 之间, 该值越大, 表示两图像的相似性越高, 当数值为 1 时, 则两图像完全相同. 由表 1 中数据可知, 4 个 Stokes 分量 SSIM 的系数均在 0.925 以上, 表明很好地重构了目标图像. 值得注意的是, 由 (4) 式和 (5) 式可知 Stokes 参量  $S_0$  和  $S_1$  分别从  $C_0$  和  $C_1$  通道中得到, 由 (6) 式可知  $S_2$  和  $S_3$  共用一个通道  $C_2$ . 从表 1 可知单独占有一个通道的 (如  $S_0$  和  $S_1$ ) 的 SSIM 比多个 Stokes 参量 (如  $S_2$  和  $S_3$ ) 共享一个通道的 SSIM 高, 这是因为共享通道使得信号之间更易产生串扰. 此外, 由 (2) 式可知,  $S_{23}$  的调制系数只是  $S_1$  的 1/2, 是  $S_0$  的 1/4. 换言之, 各通道能量分配比例不一样, 在相同的噪声下, 信噪比也不一样, 分配能量少的信噪比相对低, 反演时图像质量相对就差一些 [17].

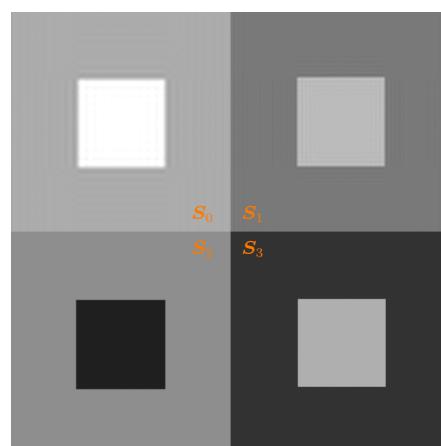


图 6 采用动态定标算法反演的目标图像  
Fig. 6. Reconstructed target image inversion using the dynamic calibration.

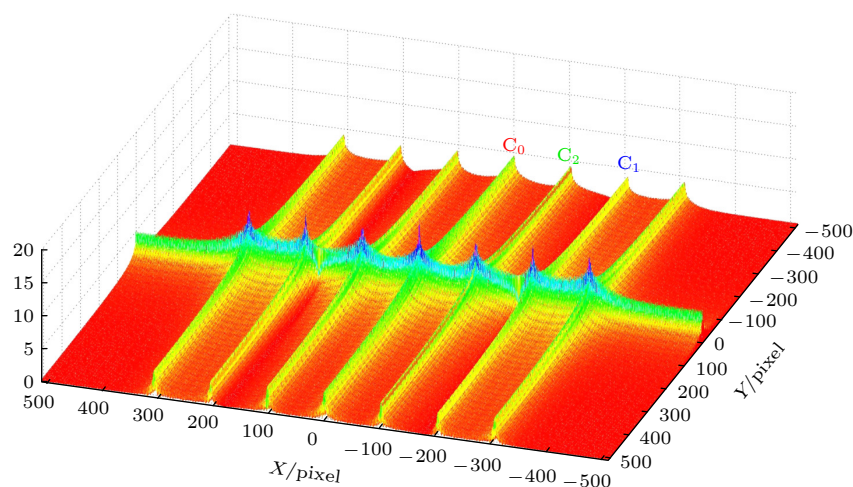


图 5 图 4 的傅里叶频谱  
Fig. 5. Fourier spectra of Fig. 4.

表 1 各个通道的 SSIM

Table 1. SSIM of each channel.

通道	SSIM
$S_0$	0.9761
$S_1$	0.9710
$S_2$	0.9375
$S_3$	0.9252

## 5 原理验证实验

验证实验装置示意图如图 7 所示, 该实验选用实验室现有元件 (激光器、偏振片、透镜、MSP、半

波片以及 CCD 等) 搭建, 并非按照一定指标设计加工, 所以其参数是由所选仪器组成的装置决定. 实验光源采用索雷博 HNL210 LB 型激光器, 其中心波长为 632.8 nm; 扩束器由  $L_1$  ( $f = 20$  mm) 和  $L_2$  ( $f = 150$  mm) 组成. MSP<sub>1</sub> 和 MSP<sub>2</sub> 尺寸分别为 25 mm × 25 mm × 8 mm 和 25 mm × 25 mm × 16 mm, 其中 MSP<sub>2</sub> 厚度是 MSP<sub>1</sub> 的 2 倍. 半波片由曲阜师范大学激光研究所生产, 其中心波长是 632.8 nm; 四分之一波片由卓立汉光提供, 其中心波长是 632.8 nm;  $L_3$  和  $L_4$  的焦距均为 80 mm. CCD 是索雷博 DCC3240 M 型, 其分辨率为 1024 × 1280, 像元尺寸为 5.3 μm × 5.3 μm.

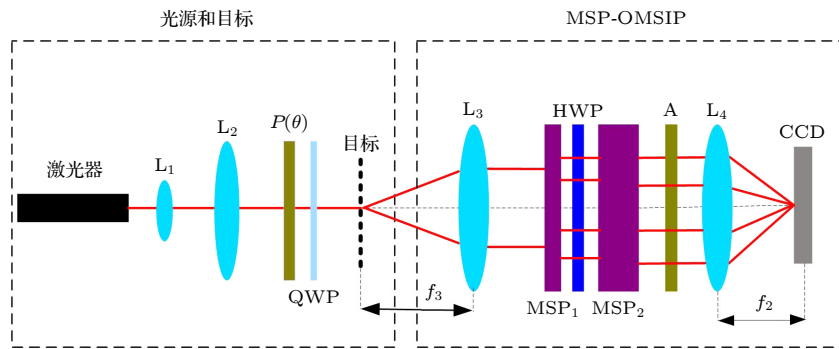


图 7 MSP-OMSIP 原理方案验证实验示意图

Fig. 7. Schematic diagram of verification experiment of the MSP-OMSIP principle scheme.

图 8 为 MSP-OMSIP 快拍获取的干涉图, 干涉条纹叠加在目标图像上, 这表明目标的偏振信息已编码在干涉图中. 通过本文所提出的动态定标反演算法, 可获得如图 9 所示的偏振图像, 可以看出, 自定标算法很好地解调出了目标的信息.



图 8 快拍成像测偏实验获得的干涉图和目标像

Fig. 8. Interferograms and target images obtained from snapshot imaging polarimetry experiments.

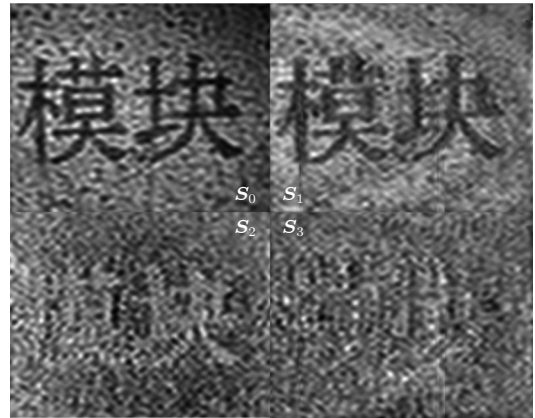


图 9 通过反演算法获得图 8 的偏振图像

Fig. 9. Processed polarization data of Fig. 8. that calculated by the inversion algorithm.

## 6 结 论

本文提出了一种线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术, 以 MSP 为核心调制器件, 给出了光学系统设计方案, 推导出动态定标数理模型; 并

采用计算机仿真和搭建实验平台验证了线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术的可行性. 传统参考光线定标技术标定的是测量目标前系统的状态, 该技术保证目标被精确测量的前提条件是: 光学系统在测量过程中, 其状态始终不变, 即不适用于动态环境下目标的测量, 这严重限制了空间调制快拍成像技术的使用范围. 本文提出的动态定标技术, 在测量目标的同时实现了系统状态定标, 极大地促进了空间调制快拍成像技术工程应用进程, 为动态环境下空间调制快拍成像技术定标提供了新思路.

## 参考文献

- [1] Snik F, Craven J J, Escuti M, Fineschi S, Harrington D, David M, Antonello D M, Dimitri M, Jerome R, Tyo J S 2014 *SPIE Sensing Technology and Applications International Society for Optics and Photonics* Maryland, USA, May 5–9, 2014 p90990B
- [2] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [3] Bass M, Mahajan N 2010 *Handbook of Optics* (3rd Ed.) (Vol. 1: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments) (New York: McGraw Hill) pp413–512
- [4] He H F, Zeng N, Liao R, Ma H 2015 *Progress in Biochemistry and Biophysics* **42** 419 (in Chinese) [何宏辉, 曾楠, 廖然, 马辉 2015 *生物与化学进展* **42** 419]
- [5] Goldstein D, Goldstein D H 2003 *Polarized Light, revised and expanded* (Florida: CRC Press) pp513–538
- [6] Kudenov M W, Escuti M J, Dereniak E L, Oka K 2011 *Appl. Opt.* **50** 2283
- [7] Oka K, Kaneko T 2003 *Opt. Express* **11** 1510
- [8] Luo H T, Oka K, Dehoog E, Kudenov M, Schiewgerling J, Dereniak E L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4413
- [9] Luo H T 2008 *Ph. D. Dissertation* (Arizona: University of Arizona)
- [10] Cao Q Z, Zhang C, DeHoog E 2012 *Appl. Opt.* **51** 5791
- [11] Cao Q Z, Zhang J, DeHoog E, Zhang C M 2016 *Appl. Opt.* **55** 954
- [12] Cao Q Z 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University) (in Chinese) [曹奇志 2014 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [13] Zhang Z Y, Ye S, Wang S C, Li S, Zhang Y T, Zhang W T, Wang F Y, Wang J J, Wang X Q, Li H Y, Qu X W 2021 *Opt. Laser Technol.* **143** 107297
- [14] Taniguchi A, Oka K, Okabe H, Hayakawa M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3279
- [15] Hagen N 2020 *SPIE Sensing Optical Technology and Measurement for Industrial Applications* Yokohama, Japan June 5, 2020 p1152302
- [16] Chrysler B D, Otani Y, Nathan H 2019 *SPIE Polarization Science and Remote Sensing IX* California, United States, September 6, 2019 p111320P
- [17] Cao Q Z, Zhang J, Edward D, Lu Y, Hu B Q, Li W G, Li J Y, Fan D X, Deng T, Yan Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 050702 (in Chinese) [曹奇志, 张晶, Edward DeHoog, 卢远, 胡宝清, 李武钢, 李建映, 樊东鑫, 邓婷, 闫妍 2016 *物理学报* **65** 050702]

# Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter\*

Cao Qi-Zhi<sup>1)4)</sup> Tang Jin-Feng<sup>1)</sup> Pan Yang-Liu<sup>1)</sup> Jiang Min<sup>1)</sup>  
 Jiang Si-Yue<sup>1)</sup> Zhang Jing<sup>1)4)†</sup> Jia Chen-Ling<sup>2)3)‡</sup> Fan Dong-Xin<sup>1)</sup>  
 Deng Ting<sup>1)</sup> Wang Hua-Hua<sup>1)</sup> Duan Lian<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Physics and Electronics, Nanning Normal University, Nanning 530023, China)

<sup>2)</sup> (China (Xi'an) Institute for Silk Road Research, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)

<sup>3)</sup> (Frontier Institute of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

<sup>4)</sup> (Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530023, China)

( Received 3 February 2022; revised manuscript received 9 April 2022 )

## Abstract

The spatially modulated snapshot imaging polarimeter (SMSIP) can measure two-dimensional state of polarization through using the spatial carrier to encode the Stokes vectors in a single image. The traditional reference calibration is not suitable for dynamic environment (such as temperature change), and the dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging is proposed in this paper. In the dynamic calibration used are two modified Savart polariscopes with shear along the same direction as the core modulation device. In addition, the thickness ratio of the two modified Savart polariscopes is 1:2. The spatial modulation phase factor generated by the core modulation device can be deduced from the interferogram and thickness ratio so as to demodulate all the polarization information of the target. The significant advantage of the dynamic calibration is that the target detection and the system calibration are carried out simultaneously. The reference target is not required in the process. In this work, the detailed theoretical analysis of the dynamic calibration is presented. In addition, a laboratory experiment and numerical simulation are conducted to demonstrate the validity of the proposed dynamic calibration. The present study provides a new idea for calibrating the spatially modulated snapshot imaging polarimeter, and effectively promotes its applications in engineering under dynamic environment.

**Keywords:** dynamic calibration, spatial modulation, snapshot imaging polarimeter

**PACS:** 42.81.Gs, 07.05.Pj, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220229

\* Project supported by the Open Project of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Technology, Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. SKLST202003), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11964021, 41961062, 11664004), the Guangxi Key R&D Program, China (Grant No. 2019AB16010), the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant Nos. 2018JJA150089, 2016GXNSFAA380241), and the Key Laboratory System Fund of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf of Ministry of Education, China (Grant No. GTEU-KLOP-K1801).

† Corresponding author. E-mail: [jingzhang2011@163.com](mailto:jingzhang2011@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [xxjsjcl@qq.com](mailto:xxjsjcl@qq.com)