

空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究

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

Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation

Cao Qi-Zhi Zhang Jing Edward DeHoog Lu Yuan Hu Bao-Qing Li Wu-Gang Li Jian-Ying Fan Dong-Xin Deng Ting Yan Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 050702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.050702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.050702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

椭偏精确测定透明衬底上吸收薄膜的厚度及光学常数

Accurate determination of thickness values and optical constants of absorbing thin films on opaque substrates with spectroscopic ellipsometry

物理学报.2015, 64(11): 110702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110702>

基于 Mueller 矩阵椭偏仪的纳米压印模板与光刻胶光栅结构准确测量

Accurate measurement of templates and imprinted grating structures using Mueller matrix ellipsometry

物理学报.2014, 63(18): 180701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180701>

弹光调制型成像光谱偏振仪中的高精度偏振信息探测研究

The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter

物理学报.2013, 62(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060702>

用斜入射光反射差法无标记实时监测不同浓度兔 IgG 和山羊抗兔 IgG 反应的动力学过程

Label-free and real-time detection of interactional dynamic processes of rabbit IgG with different concentrations and goat anti-rabbit IgG by oblique-incidence reflectivity difference method

物理学报.2012, 61(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.060703>

## 空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究\*

曹奇志<sup>1)2)3)</sup> 张晶<sup>1)2)†</sup> Edward DeHoog<sup>4)</sup> 卢远<sup>2)</sup> 胡宝清<sup>2)</sup> 李武钢<sup>1)2)</sup>  
李建映<sup>1)</sup> 樊东鑫<sup>1)</sup> 邓婷<sup>1)</sup> 闫妍<sup>2)</sup>

1) (广西师范学院物理与电子工程学院, 南宁 530023)

2) (广西师范学院, 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001)

3) (西安交通大学空间光学研究所, 西安 710049)

4) (Optical Engineering &amp; Analysis LLC, 1030 Loma Ave, Long Beach, California 90501, USA)

(2015年11月5日收到; 2015年12月15日收到修改稿)

空间调制快拍成像测偏技术能通过空间调制将目标全部的 Stokes 参量编码到一幅干涉图像中, 实现一次拍摄获取全部偏振信息和二维空间图像, 在生物医学、空间遥感和军事监测等方面具有重要的科学意义和广阔的应用前景. 在之前的研究中, 理论分析了基于改进型萨瓦偏光镜的空间调制稳态微型快拍成像测偏技术 (MSPSIP) 方案, 与基于传统萨瓦偏光镜的空间调制稳态微型快拍成像测偏技术方案相比: 前者在空间载频和通道宽度上提高了 2 倍, 反演目标同一 Stokes 参量的数据面积提高了 4 倍, 这使得它在空间分辨率和信噪比等方面具有明显优势. 本文采用计算机仿真从定量和定性两方面论证该理论分析的正确性; 采用几何光线模型分析阐明目标的偏振态被 MSPSIP 调制的详细过程, 并给出了像面干涉图表达式. 搭建了实验装置, 实验验证了该方案的正确性. 讨论了调整分析器偏振化方向对干涉强度的影响, 为 MSPSIP 的实际应用和优化提供了理论指导. 该技术具有微型轻量、稳态、快拍, 结构简洁、直光路和易配准, 可同时获取多维偏振信息和目标图像的显著特点.

关键词: 成像测偏技术, 快拍, 空间调制, 微型

PACS: 07.60.Fs, 07.60.-j, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.65.050702

## 1 引言

偏振成像技术利用光电成像器件获取目标场景辐射的偏振态信息, 与传统光电成像探测技术相比, 不仅可获得目标光学辐射的光强度信息, 而且可获得偏振度、偏振角、偏振椭率和辐射率等参数信息, 显著增加被探测目标场景的信息量. 它在地质勘探、生物医学和空间探测等领域展现出广泛的应用前景和价值, 该技术已经成为信息光学研究领域的一个热点<sup>[1-15]</sup>.

偏振成像技术目前发展有两大类: 分时型和快拍型 (也有学者称为同时或快照式). 分时型普遍采用机械旋转器件或者电控元件去调制输入光场的

偏振态, 其显著优点是空间分辨率高. 然而, 根据偏振二向反射分布函数<sup>[16]</sup>和 Wolf<sup>[17]</sup>的相干和偏振的统一理论, 偏振态对时间和几何特征检测十分敏感, 任何光场的变化和周围环境的改变都将会导致误配准和偏振伪信号, 因此分时型只适用于静态目标场景的测量. 快拍型是通过一次曝光来获取目标场景的偏振辐射图像, 它从根本上解决了上述方法测量存在的问题, 因此对静态和动态目标场景都能进行实时测量<sup>[6]</sup>. 快拍型按照测量方式主要分为: 分振幅、分焦平面、分孔径和空间调制型, 近来也有学者报道了分振幅与分孔径结合的同时偏振成像. 关于分振幅、分焦平面和分孔径型的快拍成像测偏技术各自的优缺点已经有较多的报道, 在此不再赘述<sup>[3,6,10-15]</sup>. 在这里要强调的是图像之间的

\* 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: 2014BGERLXT10)、广西师范学院博士启动基金、广西高校新型电功能材料重点实验室开放课题 (批准号: DGN201501)、国家自然科学基金 (批准号: 61275184) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA120211) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zj\_happiness@163.com

精确配准是这三种测偏技术都不能忽视的问题。

空间调制快拍成像测偏仪是通过空间调制将目标全部的 Stokes 参量 ( $S_{0-3}$ ) 编码到一帧干涉图像中, 实现一次曝光获取目标图像和全部 Stokes 参量的仪器<sup>[18,19]</sup>. 通过对单帧干涉图解调获得各 Stokes 参量图像, 无需配准. 此外它还具有稳态、微型和紧凑等显著优点, 是近十年快拍成像测偏技术研究的重点方向之一<sup>[20,21]</sup>. 按核心调制器件分类, 空间调制快拍成像测偏仪的技术方案可分为: 双折射型(楔形棱镜、萨瓦偏光镜(CSP)和改进型萨瓦偏光镜(MSP))和偏振光栅型<sup>[20]</sup>. 楔形棱镜方案是2003年日本学者 Oka 和 Kaneko<sup>[18]</sup>首次提出的, 它有明显缺点: 楔形棱镜不易加工, 很难工程化; 光线易出现分叉和偏离; 空间分辨率不高; 只能使用单色或者准单色光源等<sup>[19]</sup>. 为了克服这些不足, 2006年至2009年, 日本学者 Oka 和美国学者 Luo 等提出了萨瓦偏光镜方案: 基于萨瓦偏光镜的快拍成像测偏技术(CSPSIP)方案<sup>[22,23]</sup>. 2009年, 美国学者 Luo<sup>[22]</sup>和 DeHoog 等<sup>[24]</sup>将该技术方案应用到遥感和生物医学领域, 证实了该项技术在遥感和生物医学上具有广泛的应用前景. 但是基于 CSPSIP 也有不足之处: 每个 Stokes 分量通道宽度窄, 反演目标图像的空间分辨率和信噪比低, 而且视场较小, 远场易出现双曲线条纹<sup>[20]</sup>. 2011年, 美国学者 Kudenov 等<sup>[25]</sup>提出了偏振光栅组合方案, 该技术方案最明显的优点是能使用宽带光源照射, 系统光通量大. 但是, 与该方案中采用的偏振光栅组合相比, 单轴双折射晶体分光器件组合的消光比更高.

基于改进萨瓦偏光镜的快拍成像测偏技术(MSPSIP)方案是2012年由曹奇志与西安交通大

学张淳民教授、美国学者 DeHoog 合作在国际上首次提出<sup>[21]</sup>, 通过理论分析指出它与 CSPSIP 相比, 在空间载频和通道宽度上提高了2倍, 反演目标同一 Stokes 参量的数据面积提高了4倍, 这使得它在空间分辨率和信噪比等方面具有明显优势. 该技术具有稳态、微型轻量、快拍, 结构简洁、直光路和易配准, 可同时获取多维偏振信息和目标图像的显著特点<sup>[21]</sup>.

国内其他学者也对空间调制型快拍成像测偏技术表现出了浓厚的兴趣. 2015年, 胡巧云等<sup>[26]</sup>采用计算机仿真深入研究了空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统的原理. 同年 Gong 等<sup>[27]</sup>对空间调制型快拍成像测偏仪的数据处理进行了研究, 指出频域解调干涉图使得空间高频信息丢失, 导致目标偏振图像空间分辨率低, 提出了空域解调方案, 并且通过计算机仿真和室外原理验证试验证实了该方案的可行性.

本研究是对我们之前研究<sup>[21]</sup>的延续和深入. 采用计算机仿真从定量和定性两方面来论证之前理论分析的正确性; 采用光线追迹方法详细分析了目标的偏振态被基于 MSPSIP 调制过程, 并且给出像面电荷耦合器件(CCD)上的干涉图表达式; 最后在实验室搭建实验平台, 验证该方案的可行性; 讨论了调整分析器偏振化方向对干涉强度的影响.

## 2 光路设计

图1是 MSPSIP 光学设计示意图, 改进型萨瓦偏光镜 MSP<sub>1</sub> 和 MSP<sub>2</sub> 的主截面分别平行于  $yoz$  平

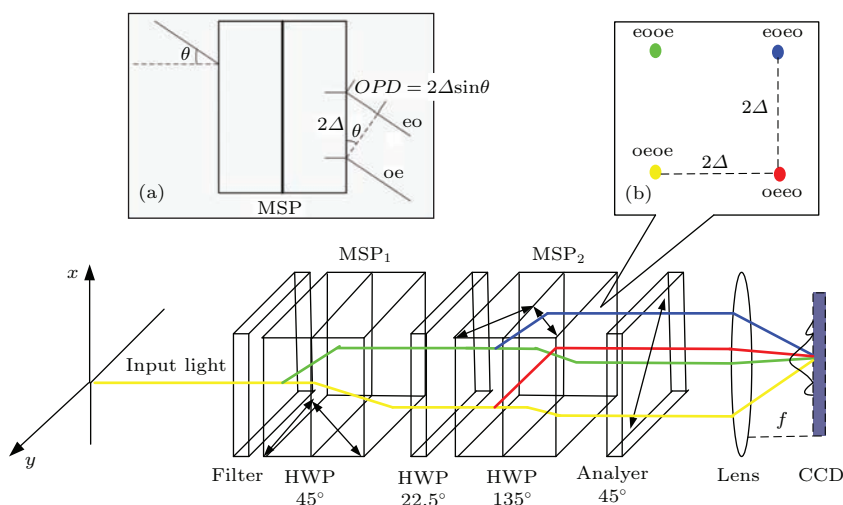


图1 (网刊彩色) MSPSIP 光学设计示意图

Fig. 1. (color online) Optical layout of MSPSIP.

面和  $xoz$  平面. 半波片 HWP 的快轴方向与  $x$  轴的夹角为  $22.5^\circ$ . 分析器 Analyser 的偏振方向与  $x$  轴成  $45^\circ$  角. CCD 探测器放置在成像镜  $L_2$  的后焦平面上. 如果使用准单色光源或我们之前提出的宽带光源方案<sup>[28]</sup>, 滤光片 Filter 可以去掉. 目标出射的光经过 Filter 入射到  $MSP_1$  被分成沿着竖直方向(平行于纸平面)剪切的 two 束正交线偏振光(寻常光(o光)和非寻常光(e光)), 如图 1(a) 所示, 光轴与水平方向成  $22.5^\circ$  的半波片将两线偏振光的光场振动方向旋转  $45^\circ$ , 经过  $MSP_2$  被分成沿着水平和竖直方向剪切的四束线偏振光(如图 1(b) 所示). 最后这四束光线经过分析器和成像镜  $Lens_2$  干涉、成像于 CCD 上.

### 3 几何光线模型分析

在几何光线模型<sup>[29]</sup>分析中, MSP 直接产生正交偏振光线之间的光程差. 图 1(a) 给出一束光线

通过 MSP 后, 被分成平行的两束正交偏振光线, 它们之间的光程差(OPD)为<sup>[30]</sup>

$$OPD = 2\Delta \sin \theta, \tag{1}$$

$$\Delta = t[(n_o^2 - n_e^2)/(n_o^2 + n_e^2)], \tag{2}$$

其中  $\theta$  为入射角,  $\Delta$  是 MSP 的基板横向剪切量,  $t$  是 MSP 的基板厚度,  $n_o$  和  $n_e$  分别为 o 光和 e 光的折射率.

图 2 给出了从  $SP_{11}$  到  $SP_{22}$  的 MSP 组合的光线追迹图. 一束光线入射到  $SP_{11}$  上, 被分成 o/e 光, 因为  $HWP_1$  的快轴与水平方向成  $45^\circ$ , 使得入射到  $SP_{12}$  上两束光的偏振态变成 e/o. 而  $HWP_1$  的快轴与水平方向成  $22.5^\circ$ , 因此经过它的电场矢量都逆时针旋转  $45^\circ$ , 入射到  $SP_{21}$  面的 o 光或者 e 光都剪切成等强度 o 光和 e 光, 进入到  $HWP_2$  后, 与前面的进入  $HWP_1$  相似, 这些光线会改变 o/e 偏振态, 最后进入到  $SP_{22}$ .

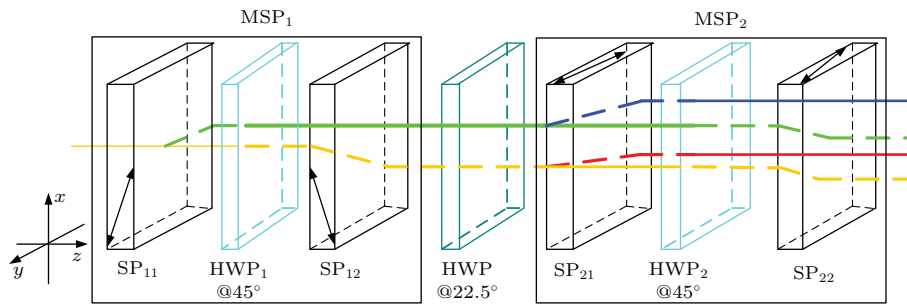


图 2 MSP 组合的光线追迹图

Fig. 2. The propagation track of light of MSP combination.

表 1 光线 1—4 的偏振态以及复振幅

Table 1. The ray configurations Ray1 through Ray4 and the complex amplitudes of the  $E$  fields.

	光线 1		光线 2		光线 3		光线 4	
	Status	Amp.	Status	Amp.	Status	Amp.	Status	Amp.
$SP_{11}$	e	$E_x$	e	$E_x$	o	$E_y$	o	$E_y$
$SP_{12}$	o	$E_x$	o	$E_x$	e	$E_y$	e	$E_y$
$SP_{21}$	o	$E_x/\sqrt{2}$	e	$E_x/\sqrt{2}$	o	$E_y/\sqrt{2}$	e	$E_y/\sqrt{2}$
$SP_{22}$	e	$E_x/\sqrt{2}$	o	$E_x/\sqrt{2}$	e	$E_y/\sqrt{2}$	o	$E_y/\sqrt{2}$
Field @ $Z'$	$\frac{1}{2}E_x(t)e^{-i\varphi_1(x,y)}$		$-\frac{1}{2}E_x(t)e^{-i\varphi_2(x,y)}$		$\frac{1}{2}E_y(t)e^{-i\varphi_3(x,y)}$		$\frac{1}{2}E_y(t)e^{-i\varphi_4(x,y)}$	

表 1 总结了一束光线经过 MSP 组合分成四束光线的详细过程, 这四束光线分别用光线 1—4 表示. 表 1 表明, 其中的任意两束光线之间只要有光程差就对像面上形成的干涉条纹有贡献. 例如, 光线 1 和光线 2 在  $SP_{11}$  和  $SP_{12}$  中有相同的 e—o 光路,

但是在  $SP_{21}$  和  $SP_{22}$  中光路分离了, 它们之间产生了沿着  $y$  轴方向的光程差, 因此它们之间会形成干涉. 类似的光线组合: 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 和 4-3 分别产生沿着  $x+y$ ,  $x-y$ ,  $x$ ,  $y-x$  和  $y$  五个方向独立的干涉条纹. 为了看清楚这些条纹的产生过程, 我

们根据 MSP 组合中每个双折射晶体的光轴方向将入射光的电矢量依次分解, 得到四束线偏振光(即光线 1—4), 每束线偏振光按照分析器的透光方向进行透射, 每束光线的表达式以表格的形式列在表 1 中, 其中  $E_x(t)$  和  $E_y(t)$  分别表示沿着  $x$  轴和  $y$  轴的时变电场矢量的复振幅;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  和  $\varphi_4$  分别表示光线 1—4 经过 MSP 组合中各双折射晶体的累积相位变化, 各光线对之间的  $(\varphi_j - \varphi_i)$  就是它们之间的相位差. 在像面上的光场总辐射强度  $I = |E|^2$ , 因此有

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) &= \left\langle \left| \frac{1}{2} E_x(x_i, y_i; t) e^{i\varphi_1} - \frac{1}{2} E_x(x_i, y_i; t) e^{i\varphi_2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} E_y(x_i, y_i; t) e^{i\varphi_3} + \frac{1}{2} E_y(x_i, y_i; t) e^{i\varphi_4} \right|^2 \right\rangle \\ &= \frac{1}{4} \left[ 2 (|E_x|^2 + |E_y|^2) \right. \\ &\quad + (|E_x|^2 - |E_y|^2) (e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)}) \\ &\quad + E_x E_y^* e^{i(\varphi_1 - \varphi_4)} + E_y E_x^* e^{i(\varphi_4 - \varphi_1)} \\ &\quad \left. - E_x E_y^* e^{i(\varphi_2 - \varphi_3)} - E_y E_x^* e^{i(\varphi_3 - \varphi_2)} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

其中, 尖括号代表取时间平均, 星号表示取复共轭; 除第一项(背景强度项)外, 括号中的其他各项, 因包含随着空间变化的相位因子, 故而都会形成干涉条纹. 回顾一下各 Stokes 参数的定义<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle &= S_0, \\ \langle |E_x|^2 \rangle &= \frac{1}{2} (S_0 + S_1), \\ \langle |E_y|^2 \rangle &= \frac{1}{2} (S_0 - S_1), \\ E_x^* E_y &= \frac{1}{2} (S_2 + iS_3), \\ E_y^* E_x &= \frac{1}{2} (S_2 - iS_3). \quad (4) \end{aligned}$$

此外, 在理想情况下,  $\varphi_1$ — $\varphi_4$  可以表示成空间坐标的线性函数:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (x_i + y_i), \\ \varphi_2(x_i, y_i) &= -2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (x_i + y_i), \\ \varphi_3(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (-x_i + y_i), \\ \varphi_4(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (-x_i - y_i), \\ \varphi_1(x_i, y_i) - \varphi_2(x_i, y_i) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \varphi_3(x_i, y_i) - \varphi_4(x_i, y_i) = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} 2y_i, \\ &\quad \varphi_1(x_i, y_i) - \varphi_3(x_i, y_i) \\ &= \varphi_2(x_i, y_i) - \varphi_4(x_i, y_i) = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} 2x_i, \\ &\quad \varphi_1(x_i, y_i) - \varphi_4(x_i, y_i) = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} 2(x_i + y_i), \\ &\quad \varphi_2(x_i, y_i) - \varphi_3(x_i, y_i) = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} 2(x_i - y_i). \quad (5) \end{aligned}$$

结合 (3), (4) 和 (5) 式可以得到

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) &= \frac{1}{4} \{ 2S_0 + 2S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x_i) \\ &\quad + S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i - y_i)] \\ &\quad + S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(x_i - y_i)] \\ &\quad - S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)] \\ &\quad + S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)] \}. \quad (6) \end{aligned}$$

在 (6) 式中,  $S_0$  是直流分量,  $S_1, S_2$  和  $S_3$  都被载频  $2\Omega$  所调制.

Luo 等<sup>[22]</sup> 提出的 CSPSP 获得干涉图的表达式:

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) &= \frac{1}{4} \{ 2S_0 + 2S_1 \cos[2\pi \times \Omega \times (x_i + y_i)] \\ &\quad + S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i)] \\ &\quad - S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(x_i)] \\ &\quad - S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(y_i)] \\ &\quad + S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(y_i)] \}, \quad (7) \end{aligned}$$

在 (7) 式中,  $S_0$  是直流分量,  $S_2$  和  $S_3$  都被载频  $2\Omega$  所调制, 然而  $S_1$  是被载频  $\Omega$  所调制.

比较 (6) 和 (7) 式可知, 在两等式中,  $S_0$  都是直流分量,  $S_2$  和  $S_3$  也都被载频  $2\Omega$  所调制, 惟一的不同是在 (6) 式中  $S_1$  是被载频  $2\Omega$  所调制, 而在 (7) 式中  $S_1$  是被载频  $\Omega$  所调制. 为了解调各 Stokes 分量, 需要对 (6) 和 (7) 式进行傅里叶变换, 在频域中采用二维滤波器对各分量进行滤波. 其中对 (6) 式的频谱采用  $2K\Omega \times 2K\Omega$  的二维滤波器, 而对 (7) 式的频谱只能采用  $K\Omega \times K\Omega$  的二维滤波器 ( $K$  是一个与 CCD 尺寸相关的常数). 可见 (6) 式采用的滤波器面积是 (7) 式滤波器面积的四倍, 也就是说通过 (6) 式反演 Stokes 参数的数据面积是 (7) 式相应面积的四倍. 因此在解调各 Stokes 分量时, 前者的通道宽度、空间分辨率和信噪比都优于后者. 下面将通过数值模拟进行定性分析和定量计算来详细说明这些优点.

### 4 数值模拟

本节内容是采用计算机仿真实验来验证 MSPSIP 理论分析的正确性, 并且说明其相比于 CSPSIP 的显著优点. 基于 MSP 和 CSP 的 SIP 系统设计参数如下:  $f_2 = 80 \text{ mm}$ , CCD 分辨率为  $512 \times 512$ , 像元尺寸为  $16 \mu\text{m}$ , MSP 和 CSP 的单板厚度均为  $4.13 \text{ mm}$ ,  $n_e = 1.48956$ ,  $n_o = 1.66527$ , 光源是单色光, 其波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$ . 可见系统的核心器件 MSP 组合总尺寸不超过  $17 \text{ mm}$ , 仪器长度为  $10 \text{ cm}$ .

图 3 为输入系统的 Stokes 目标图像, 该图像十分有趣, 图像中心的空间频率明显高于边缘. 图 4(a) 和图 4(b) 分别是基于 (6) 和 (7) 式模拟得到的干涉图, 从图中可以看到目标图像和清晰的干涉条纹. 图 5(a) 和图 5(b) 分别是图 4(a) 和图 4(b) 的傅里叶变换谱, 可以看出该图中有 7 个分离的峰 (通道), 这表明模拟的图像中包含了相应的载频. 同时这 7 个峰 (通道) 分别包含着  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  的

信息, 如果要解调出这些 Stokes 参数, 需要对部分通道采用二维滤波器进行滤波. 如图 6(a) 所示,

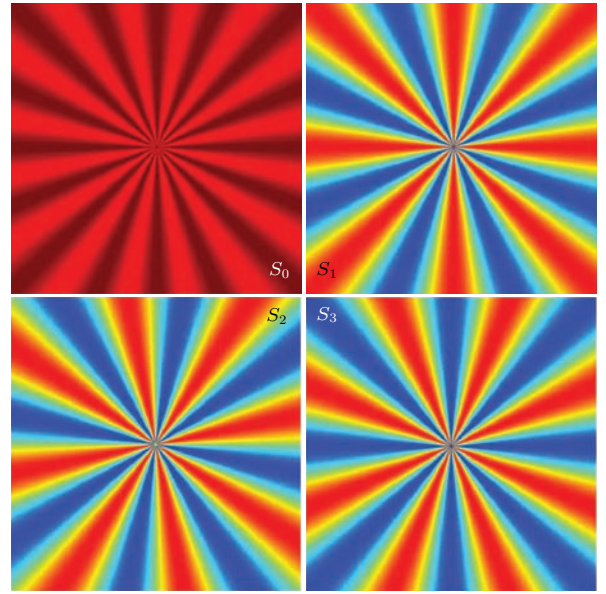


图 3 (网刊彩色) 输入 Stokes 目标图像  
Fig. 3. (color online) Stokes object.

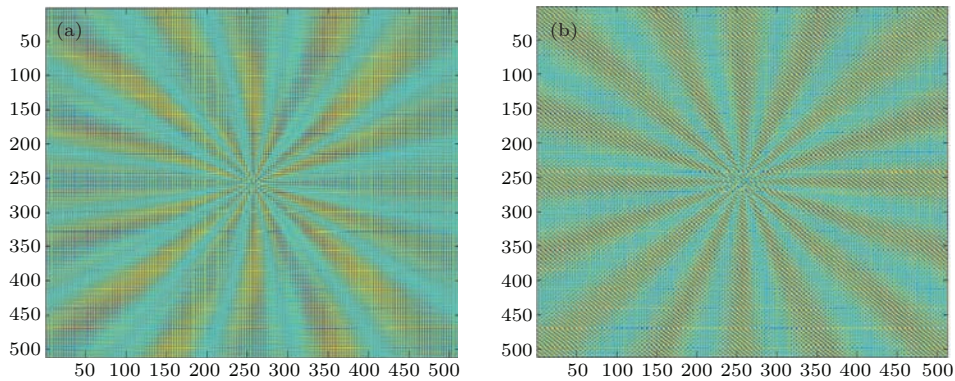


图 4 (网刊彩色) (a) 采用 MSP 的 SIP 的干涉图; (b) 采用 CSP 的 SIP 的干涉图

Fig. 4. (color online) (a) Simulated image of the SIP using MSP; (b) simulated image of the SIP using CSP.

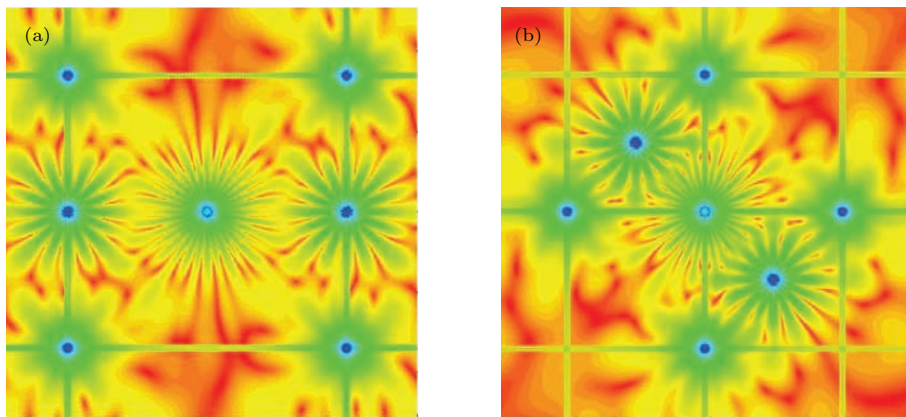


图 5 (网刊彩色) (a) 图 4(a) 的傅里叶频谱; (b) 图 4(b) 的傅里叶频谱

Fig. 5. (color online) (a) Fourier spectra of Fig. 4. (a); (b) Fourier spectra of Fig. 4. (b).

对图 5(a) 滤波采用尺寸为  $2K\Omega \times 2K\Omega$  的二维滤波器能进行完美的滤波, 没有混频重叠区域. 然而, 如图 6(b) 所示, 对图 5(b) 采用尺寸为  $2K\Omega \times 2K\Omega$  的二维滤波器进行滤波时, 会出现黄色区域标记的混频重叠区域, 原因是包含  $S_1$  信息的峰的载频只有  $\Omega$ . 为了消去混频重叠区域, 对图 5(b) 只能采用如图 6(c) 所示的  $K\Omega \times K\Omega$  大小的二维滤波器进行滤波. 很明显采用  $2K\Omega \times 2K\Omega$  滤波获得的通道宽度是采用  $K\Omega \times K\Omega$  滤波的两倍, 反演同一 Stokes 参量的数据面积前者是后者的四倍, 因此可以预见前者将能反演更多的高频信息. 图 7 给出了反演出的 Stokes 目标图像, 图 7(a) 和图 7(b) 都

很好地反演出了输入 Stokes 目标图像 (图 3) 的边缘低频信息. 然而, 图 7(a) 明显保留了更多中心部分的高频信息, 而图 7(b) 的中心部分因为丢失了较多的高频信息, 明显比图 7(a) 要模糊. 为了更清楚且直观地说明这一点, 我们对图 7 与图 3 进行求差得到图 8. 可以明显看到图 8(b) 的残差量比图 8(a) 多, 而且主要集中在图像中心的高频部分. 这表明采用 MSPSIP 探测目标时, 能反演出目标的更多高频信息.

以上主要是视觉定性分析, 下面我们来定量评估反演图像的质量, 主要从相关系数和信噪比两个方面来进行评价.

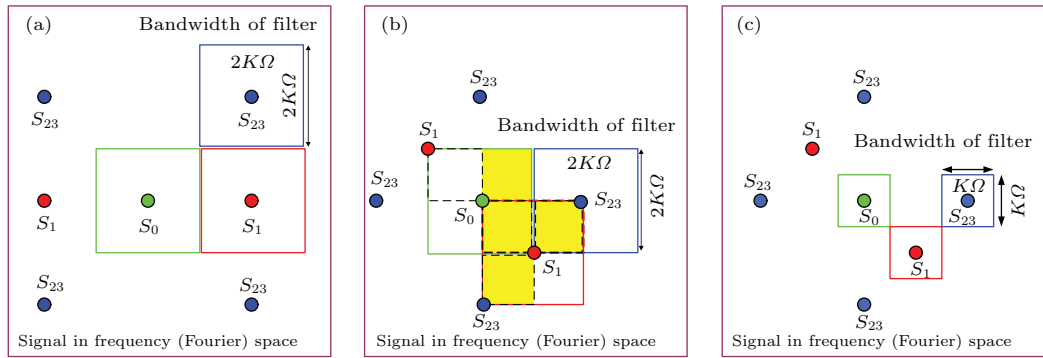


图 6 (网刊彩色) (a) 图 5 (a) 滤波 ( $2K\Omega \times 2K\Omega$ ); (b) 图 5 (b) 滤波 ( $2K\Omega \times 2K\Omega$ ), 黄色区域表示滤波重叠区域; (c) 图 5 (b) 滤波 ( $K\Omega \times K\Omega$ )

Fig. 6. (color online) (a) Filtering using the spatial frequency filtering ( $2K\Omega \times 2K\Omega$ ) for Fig. 5. (a); (b) filtering using the spatial frequency filtering ( $2K\Omega \times 2K\Omega$ ) for Fig. 5.(b), the yellow areas indicate regions of overlap in filters resulting in cross talk of the different channels; (c) filtering using the spatial-frequency filtering ( $K\Omega \times K\Omega$ ) for Fig. 5. (b).

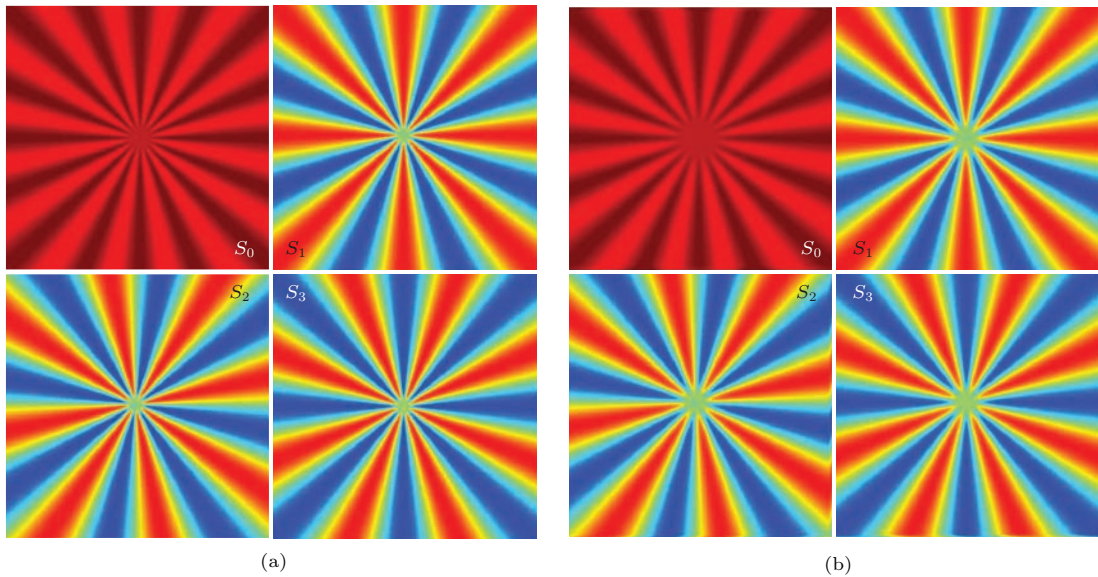


图 7 (网刊彩色) (a) 采用图 6(a) 滤波反演的目标图像; (b) 采用图 6(c) 滤波反演的目标图像

Fig. 7. (color online) (a) Reconstructed image from Fig. 6(a); (b) reconstructed image from Fig. 6(c).

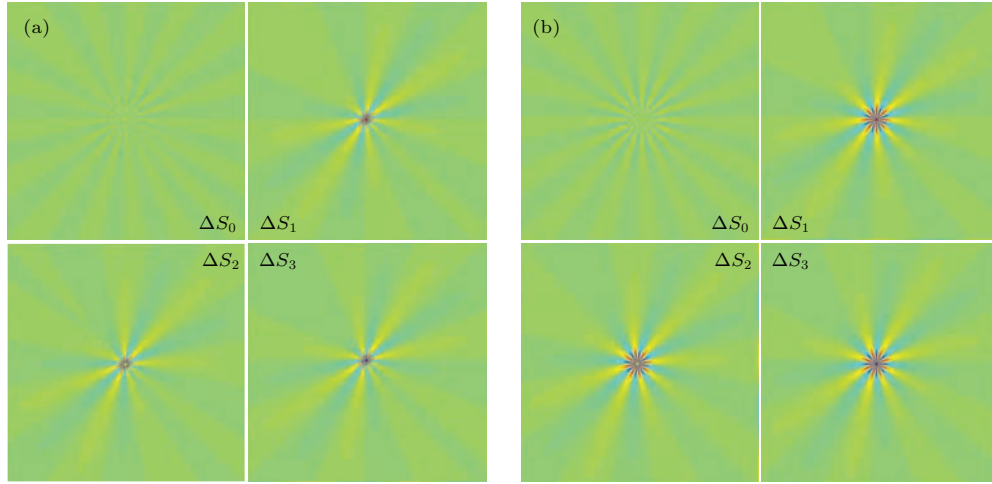


图8 (网刊彩色) (a) 图7 (a)与图3 的差图像; (b) 图7 (b)与图3 的差图像

Fig. 8. (color online) (a) The difference image between Fig. 7(a) and Fig. 3; (b) the difference image between Fig. 7(b) and Fig. 3.

首先采用相似性评估的方法来评价反演图像和输入目标图像的相似性. 相似性测量主要是计算两者的相关系数, 相关系数越高表明这两幅图像越相似, 也就是该反演图像与输入目标图像越相似. 相关系数的定义如下:

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (R_{k,i,j} - \bar{R})(I_{k,i,j} - \bar{I})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (R_{k,i,j} - \bar{R})^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (I_{k,i,j} - \bar{I})^2}}, \quad (8)$$

其中  $R_{k,i,j}$  和  $I_{k,i,j}$  分别是反演图像与输入目标图像的第  $k$  个 Stokes 参数在坐标  $(i, j)$  的像素值;  $\bar{R}_k$  和  $\bar{I}_k$  分别是相应图像的像素平均值;  $M$  和  $N$  是图像的行和列数. 根据 (8) 式计算出反演图像与输

入目标图像的相关系数 ( $C_k$ ) 列在表 2 中, 可以看出, 基于 MSP 的 SIP 相关系数比 CSP 的要高. 这表明基于 MSP 的 SIP 的反演图像与输入目标图像更相似.

此外, 采用 MATLAB 的 imnoise 函数对输入 Stokes 目标图像加入泊松噪音后, 计算反演图像的信噪比 (SNR), 信噪比定义如下:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left\{ 255 \times 255 \times \left[ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (R_{k,i,j} - I_{k,i,j})^2 \right]^{-1} \right\}. \quad (9)$$

根据 (9) 式计算出的 SNR 列于表 2. 表 2 中列出的数据表明 MSPSIP 的反演图像与 CSPSIP 具有更高的 SNR.

表 2 反演 Stokes 图像与输入目标 Stokes 图像之间的相关系数 ( $C_k$ ) 与信噪比

Table 2. The correlation coefficients and the signal-to-noise ratio used for the quantitative evaluations of the reconstructed images and Stokes object.

SIP	$C_k$				SNR			
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
CSP	0.9671	0.9903	0.9904	0.9856	79.4908	70.0697	71.0685	67.9850
MSP	0.9760	0.9943	0.9941	0.9904	81.0494	72.4944	73.4000	69.7441

## 5 分析器偏振化方向对干涉强度的影响

如图 1 所示, MSPSIP 是由滤波片、改进型萨瓦偏光镜 1、半波片、改进型萨瓦偏光镜 2、分析器、成像镜和 CCD 组成的成像链路. 在理想情况下, 分

析器的偏振化方向与水平轴夹角为  $45^\circ$  (理想方向), 以便进入成像镜的四束线偏振光的光强相等. 但是在实际操作中, 由于各种原因, 分析器的偏振化方向与理想方向总有一点偏差, 使得进入成像镜的四束线偏振光光强与理想状况不一致, 从而影响 CCD 上的干涉强度, 这会对目标偏振信息探测产生显著影响.



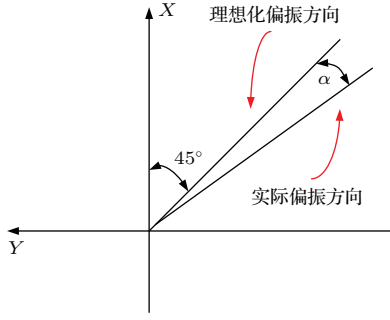


图9 分析器P偏离理想化偏振方向示意图

Fig. 9. Schematic diagram of deviation between analyzer and the ideal direction.

设分析器的偏振化方向与理想方向夹角为 $\alpha$ 角(如图9). 我们对 $\alpha$ 角的正负规定如下: 沿着Z轴正方向观看, 顺时针方向 $\alpha$ 为正, 逆时针为负. 为了下面的计算表达简便, 我们令 $k_1 = \cos(45^\circ - \alpha)$ ,  $k_2 = \sin(45^\circ - \alpha)$ . 将从MSP<sub>2</sub>出射的四束线偏振光按照分析器的偏振化方向进行投影, 并借鉴(3)式, 求出CCD像面上的干涉强度表达式, 可得

$$\begin{aligned}
 I(x_i, y_i) = & \frac{1}{2} [S_0 + 2k_1k_2S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x_i) \\
 & + (k_1^2 - k_2^2) \{S_2 \cos(2\pi \times 2\Omega \times y_i) \\
 & + S_3 \sin(2\pi \times 2\Omega \times y_i)\} \\
 & + k_1k_2 \{S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i - y_i)] \\
 & + S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega \times (x_i - y_i)]\} \\
 & - k_1k_2 \{S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)] \\
 & - S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)]\}]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

由(10)式可知, 在MSPSIP中, 像面上的干涉强度受到 $k_1$ 和 $k_2$ 的影响, 即与 $\alpha$ 角有关. 虽然在光学装调过程中 $\alpha$ 角应该不会很大, 但是由于偏振片可以旋转, 所以我们将较大的范围内进行讨论. 下面分析干涉图随 $\alpha$ 角的变化情况.

由(10)式可知, 强度 $I(x_i, y_i)$ 随 $\alpha$ 角的变化周期为 $\pi$ . 我们将在 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 范围内讨论.

1) 当 $\alpha = 0^\circ$ , 即偏振片实际偏振化方向与理想偏振化方向重合, 这时 $k_1 = k_2 = \sqrt{2}/2$ , 将其代入(10)式, 它与(6)式一致. 其中(10)式中的第三项 $((k_1^2 - k_2^2) \{S_2 \cos(2\pi \times 2\Omega \times y_i) + S_3 \sin(2\pi \times 2\Omega \times y_i)\})$ 等于零.

2) 如果 $\alpha \neq 0^\circ$ , (10)式中的第三项将不会等于零. 对(10)式进行傅里叶变换, 在频域中出现了9个峰(如图10所示), 这与图5(a)中的7个峰不同, 多出来的两个峰是由(10)式中第三项傅里叶变换产生的. 这将影响我们后续偏振态的反演工作. 因

为新增的 $C_3$ 峰也包含有 $S_2$ 和 $S_3$ 的信息, 从理论上说, 通过 $C_3$ 峰和 $C_2$ 峰都能反演出 $S_2$ 和 $S_3$ 的信息. 究竟该选择哪个峰? 我们认为在相同噪声水平条件下, 应该选择调制系数大的峰, 这样反演出来的 $S_2$ 和 $S_3$ 信噪比更高. 由(10)式可知,  $C_3$ 峰和 $C_2$ 峰的空域调制系数 $M_{C_3}$ 和 $M_{C_2}$ 分别为 $0.5(k_1^2 - k_2^2)$ 和 $0.5k_1k_2$ .

$$\begin{aligned}
 M_{C_3} = & 0.5(k_1^2 - k_2^2) = 0.5(\cos^2(45^\circ - \alpha) \\
 & - \sin^2(45^\circ - \alpha)) = 0.5 \sin(2\alpha),
 \end{aligned}$$

$$M_{C_2} = 0.5k_1k_2 = 0.5 \cos(45^\circ - \alpha)$$

$$\sin(45^\circ - \alpha) = 0.25 \cos(2\alpha).$$

图11是调制系数 $M_{C_3}$ 和 $M_{C_2}$ 随 $\alpha$ 角的变化曲线. 从图11中可知, 当 $-76.7^\circ \leq \alpha \leq 13.3^\circ$ 时,  $M_{C_3} \leq M_{C_2}$ , 所以应该选择 $C_2$ 峰反演 $S_2$ 和 $S_3$ ; 而在 $-90^\circ \leq \alpha \leq -76.7^\circ$ 和 $13.3^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时,  $M_{C_3} \geq M_{C_2}$ , 应该选择 $C_3$ 峰反演 $S_2$ 和 $S_3$ . 考虑到在实际装调中偏离理想方向角度较小, 因此选择 $C_2$ 峰反演 $S_2$ 和 $S_3$ 将会获得更好的效果.

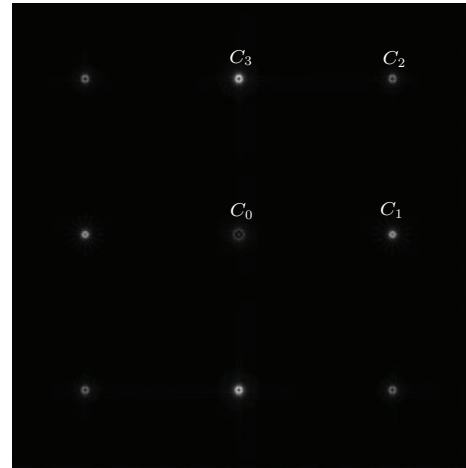

 图10 干涉图频谱图( $\alpha = 22.5^\circ$ )

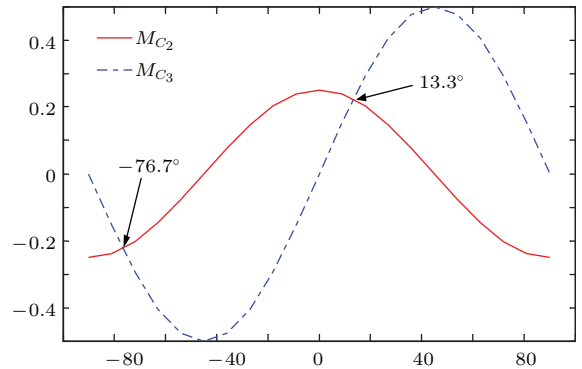
 Fig. 10. Fourier spectra ( $\alpha = 22.5^\circ$ ).

 图11 调制系数 $M_{C_2}$ 和 $M_{C_3}$ 随 $\alpha$ 角的变化

 Fig. 11. The change of modulation coefficient  $M_{C_2}$  and  $M_{C_3}$  along with  $\alpha$ .

3) 偏振态均衡调制技术. 在四个 Stokes 参量 ( $S_{0-3}$ ) 中, 一般认为  $S_0$  是强度分量,  $S_{1-3}$  为偏振分量. 从 (6) 式中可知,  $S_{23}$  的空域调制系数仅是  $S_1$  的一半, 这将导致在相同的噪声水平下, 反演出来的  $S_{23}$  的信噪比明显低于  $S_1$ , 不利于全部偏振信息的探测.

然而, 在 (10) 式中, 第二项 ( $2k_1k_2S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x_i)$ ) 和第三项 ( $(k_1^2 - k_2^2)[S_2 \cos(2\pi \times 2\Omega \times y_i) + S_3 \sin(2\pi \times 2\Omega \times y_i)]$ ) 中包含了全部的偏振分量  $S_{1-3}$ . 如果调整分析器偏振化方向, 可以改变  $S_{1-3}$  的空域调制系数, 使它们相等, 这样就可以实现全部偏振分量的空域均衡调制.

令  $M_{C_1} = k_1k_2 = M_{C_3} = 0.5(k_1^2 - k_2^2)$ , 即  $\cos(2\alpha) = \sin(2\alpha)$ , 考虑在  $(-\pi/2, \pi/2)$  的区间内, 可以解出:  $\alpha_1 = 22.5^\circ$  和  $\alpha_2 = -67.5^\circ$ . 将它们代入 (10) 式可得

$$I(x_i, y_i) = \frac{1}{2} \{ [S_0 + (\sqrt{2}/2)S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x_i) + (\sqrt{2}/2)[S_2 \cos(2\pi \times 2\Omega \times y_i) + S_3 \sin(2\pi \times 2\Omega \times y_i)] \}$$

$$+ (\sqrt{2}/4)\{S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i - y_i)] + S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega \times (x_i - y_i)]\} - (\sqrt{2}/4)\{S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)] - S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(x_i + y_i)]\}. \quad (11)$$

(11) 式的傅里叶变换频谱图如图 10 所示, 提取  $C_1$  峰和  $C_3$  峰的信息就能反演出空间调制系数相等的偏振分量 ( $S_{1-3}$ ) 图像.

从以上的分析可知, 调整分析器的偏振化方向可以显著改变像面上的干涉强度, 从而影响目标 Stokes 参量的获取. 本部分研究为 MSPSIP 的实际应用和优化提供了理论指导.

### 6 验证实验

图 12 是 MSPSIP 实验装置示意图 (分析器的偏振化方向为  $45^\circ$ ). 由于实验装置是选用实验室现有元件 (透镜、偏振片、半波片、MSP 以及 CCD 相机等) 组合的, 并非按一定的指标设计所加工, 所以, 其参数仅对由所选仪器组成的装置而言.

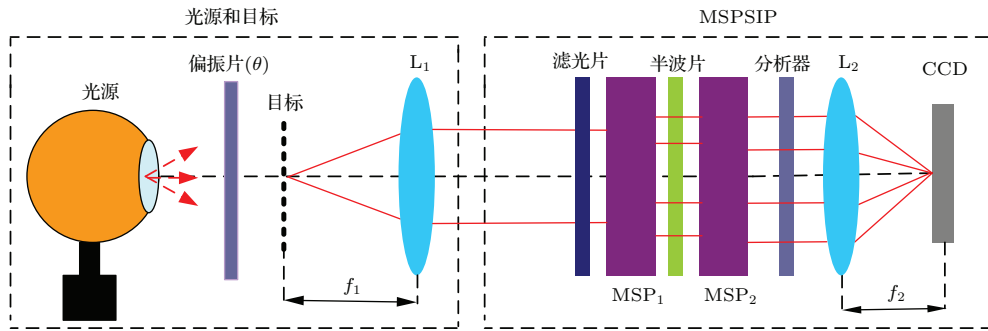


图 12 (网刊彩色) MSPSIP 原理方案验证实验示意图

Fig. 12. (color online) Schematic diagram of the MSPSIP.

光源采用卤钨灯, 滤光片中心波长是 632.8 nm, MSP 的尺寸是 25 mm × 25 mm × 8.5 mm (单板厚度为 4.25 mm), 透镜  $L_1$  和  $L_2$  焦距分别为  $f_1 = f_2 = 100$  mm, 探测器分辨率为 1024 × 1024, 像元尺寸为 12 μm × 12 μm. 可见 MSPSIP 的尺寸仅为 25 mm × 25 mm × 110 mm 左右.

图 13 和图 14 是 MSPSIP 快拍成像测偏实验获得的干涉图和目标像. 从它们的局部放大可以清楚地看到目标图像上的干涉条纹, 这表明目标的偏振信息被 MSPSIP 编码到目标的像上. 通过傅里叶变换和二维空间滤波 (如同模拟仿真部分的图 5 和图 6 所示) 的重构算法, 可以由图 14 反演出目标的全部偏振信息 (如图 15 所示). 从图 15 可以看出,

偏振图像的噪声较大, 这主要是由装置本身原因造成的. 正如前面所述, 我们的装置部件都是采用实

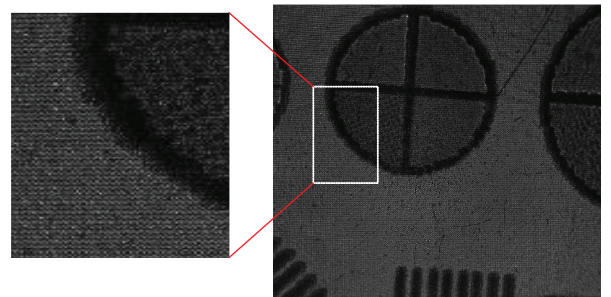


图 13 快拍成像测偏实验获得的干涉图和目标像, 对图中的局部放大可以清楚地看到干涉条纹

Fig. 13. Raw image of a transparent plastic film. Interference fringes are located in the whole areas of the scene.

实验室现有元件组合的. 如果按照设计要求选择参数和加工制作仪器, 则信噪比将会大幅度提高, 偏振图像的空间分辨率也将达到预期的要求.

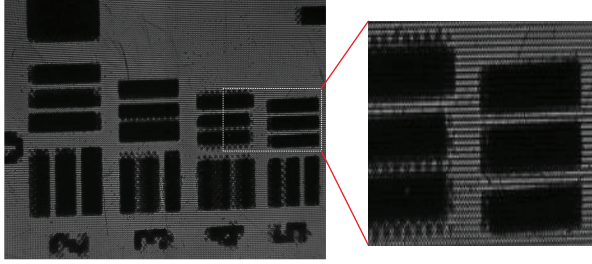


图 14 快拍成像测偏实验获得的干涉图和目标像, 对图中的局部放大可以清楚的看到干涉条纹

Fig. 14. Raw image of a transparent plastic film. Interference fringes are located in the whole areas of the scene.

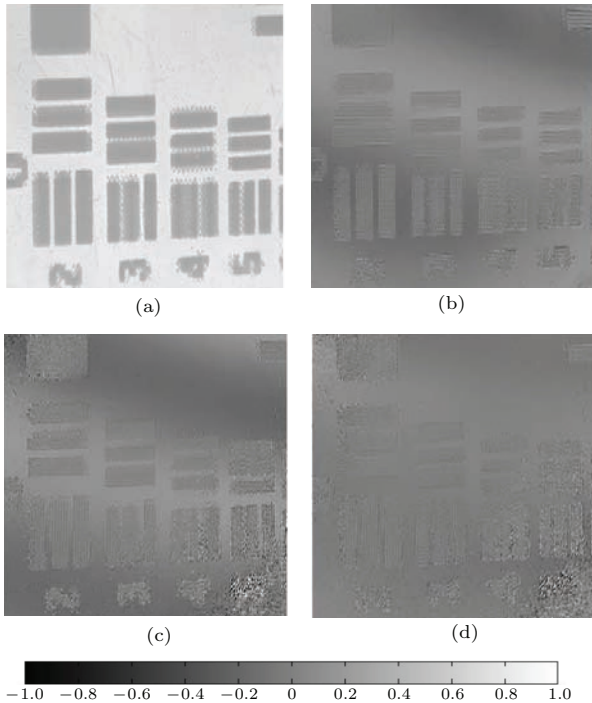


图 15 通过反演算法获得图 14 的偏振图像 (a)  $S_0$ ; (b)  $S_1/S_0$ ; (c)  $S_2/S_0$ ; (d)  $S_3/S_0$ .

Fig. 15. Processed polarization data that calculated from the raw data in Fig. 14: (a)  $S_0$ ; (b)  $S_1/S_0$ ; (c)  $S_2/S_0$ ; (d)  $S_3/S_0$ .

## 7 结 论

本文采用几何光线模型分析阐明 MSPSIP 的探测原理. 搭建了实验装置, 采用计算机仿真和实验验证了 MSPSIP 原理方案的正确性. 计算机仿真实验表明该方案相比于 CSPSIP 方案, 在空间载频、通道宽度、空间分辨率和信噪比方面均具有明显优势. 我们也讨论了调整分析器偏振化方向对干涉强

度的影响. 本研究为 MSPSIP 的工程化打下了坚实的基础. 此外, MSPSIP 具有微型、稳态、快拍、直光路和易配准, 可同时获取多维偏振信息和目标图像的显著特点. 在生物医学、空间遥感和军事监测等方面具有中具有重要的科学意义和广阔的应用前景.

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所赵葆常研究员和西安交通大学空间光学研究所权乃辰博士以及贾辰凌硕士的讨论

## 参考文献

- [1] Snik F, Craven-Jones J, Escuti M, Fineschi S, Harrington D, de Martino, A, 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] Alali S, Vitkin A 2015 *J. Biomed. Opt.* **20** 061104
- [3] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [4] Goldstein D H 2010 *Polarized Light* (Florida: CRC Press)
- [5] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 祝宝辉, 赵葆常, 杜鹃 2008 物理学报 **57** 7565]
- [6] Li S J, Jiang H J, Zhu J P, Duan J, Fu Q, Fu Y G, Dong K Y 2013 *Chin. Opt.* **6** 803 (in Chinese) [李淑军, 姜会林, 朱京平, 段锦, 付强, 付跃刚, 董科研 2013 中国光学 **6** 803]
- [7] Song K S 2002 *M. S. Dissertation* (Changchun: Northeast Normal University) [宋开山 2002 硕士论文 (长春: 东北师范大学)]
- [8] Huang R 2004 *M. S. Dissertation* (Changchun: Northeast Normal University) [黄睿 2004 硕士论文 (长春: 东北师范大学)]
- [9] Zhao Y S, Huang F, Jin L, Jin X F, Zhou S X 2000 *J. Remote Sens.* **4** 131 (in Chinese) [赵云升, 黄芳, 金伦, 金锡锋, 周淑香 2000 遥感学报 **4** 131]
- [10] He H H, 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 生物化学与生物物理进展 **42** 419]
- [11] Li S, Qiu Z W, Yang C J 2010 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **5** 198 (in Chinese) [李双, 裘桢炜, 杨长久 2010 大气与环境光学学报 **5** 198]
- [12] Liu J, Xia R Q, Jin W Q, Wang X, Du L 2013 *Opt. Tech.* **39** 56 (in Chinese) [刘敬, 夏润秋, 金伟其, 王霞, 杜岚 2013 光学技术 **39** 56]
- [13] Liu J, Jin W Q, Wang Y H, Wang X 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 117 (in Chinese) [刘敬, 金伟其, 王亚慧, 王霞 2015 光学学报 **35** 117]

- [14] Wang Y, Xue M G, Huang Q C 2009 *Comput. Engineer.* **35** 271 (in Chinese) [王勇, 薛模根, 黄勤超 2009 计算机工程 **35** 271]
- [15] Cheng M X, He Z J, Huang Z H 2008 *Opto-Electron. Engineer.* **35** 93 (in Chinese) [程敏熙, 何振江, 黄佐华 2008 光电工程 **35** 93]
- [16] Schott J R 2009 *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing* (WA: Spie Press)
- [17] Wolf E 2007 *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [18] Oka K, Kaneko T 2003 *Opt. Express* **11** 1510
- [19] Luo H T 2008 *Ph. D. Dissertation* (Arizona: University of Arizona)
- [20] Cao Q Z 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University) [曹奇志 2014 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [21] Cao Q Z, Zhang C, DeHoog E 2012 *Appl. Opt.* **51** 5791
- [22] Luo H T, Oka K, DeHoog E, Kudenov M, Schiewgerling J, Dereniak E L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4413
- [23] Oka K, Saito N 2006 *SPIE Optics and Photonics International Society for Optics and Photonics* California, USA, August 13, 2006 p629508
- [24] DeHoog E, Luo H, Oka K, Dereniak E L, Schiewgerling J 2009 *Appl. Opt.* **48** 1663
- [25] Kudenov M W, Escuti M J, Dereniak E L, Oka K 2011 *Appl. Opt.* **50** 2283
- [26] Hu Q Y, Yang W F, Hu Y D, Hong J 2015 *Acta Opt. Sin.* **2** 144 (in Chinese) [胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 洪津 2015 光学学报 **2** 144]
- [27] Gong G Y, Sun X B, Yang W F, Liu Z 2015 *Applied Optics and Photonics China (AOPC2015) International Society for Optics and Photonics* Beijing, China, May 5-9, 2015 p967529
- [28] Cao Q Z, Zhang C M, Zhang J, Kang Y Q 2014 *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **125** 3380
- [29] Liang Q 1990 *Appl. Opt.* **29** 1008
- [30] Francon M, Mallick S 1971 *Polarization Interferometers* (New York: Wiley)

# Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation\*

Cao Qi-Zhi<sup>1)2)3)</sup> Zhang Jing<sup>1)2)†</sup> Edward DeHoog<sup>4)</sup> Lu Yuan<sup>2)</sup> Hu Bao-Qing<sup>2)</sup>  
Li Wu-Gang<sup>1)2)</sup> Li Jian-Ying<sup>1)</sup> Fan Dong-Xin<sup>1)</sup> Deng Ting<sup>1)</sup> Yan Yan<sup>2)</sup>

1) (*College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530023, China*)

2) (*Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Guangxi Teachers Education University), Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China*)

3) (*Institute of Space Optics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

4) (*Optical Engineering and Analysis LLC, 1030 Loma Ave, Long Beach, California 90501, USA*)

( Received 5 November 2015; revised manuscript received 15 December 2015 )

## Abstract

The spatially modulated snapshot imaging polarimeter can acquire the image and two-dimensional state of polarization using the spatial carrier fringe to encode the full Stokes vectors in a single interference image. It can be used in space exploration, earth observation and detection of biological medicine, land surface and oceans. In an earlier publication, we demonstrated by theoretical analysis that the spatially modulated snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes (MSPSIP) is comparable in carrier frequency, signal-to-noise ratio, and spatial resolution to a spatially modulated snapshot imaging polarimeter using conventional Savart polariscopes. In this investigation, the numerical simulation is used to demonstrate theoretical analysis and the feasibility of MSPSIP. Moreover, a geometric ray model is developed to explain the principle and scheme of MSPSIP and derive the expressions of interference intensities. Moreover, a laboratory experiment is conducted to demonstrate the validity of MSPSIP. In addition, we analyze that the interference intensity varies with the direction of polarization analyzer. This investigation enriches the study on MSPSIP and provides a theoretical and practical guidance for study, design, modulation, experiment and engineering of MSPSIP. Furthermore, the MSPSIP operates based on the principle of encoding polarization information within the spatial modulation of the image. This unique technology allows all Stokes parameters to be simultaneously recorded from each spatial position in an image with a single integration period of the imaging system. The device contains no moving parts and requires no scanning, allowing it to acquire data without the motion artifacts normally associated with scanning polarimeter. In addition to having snapshot imaging and static (no moving parts) capabilities, image processing is simple, and the device is compact, and miniature. Therefore, we believe that MSPSIP will be useful in many applications, such as remote sensing and bioscience.

**Keywords:** imaging polarimeter, snapshot, spatial modulation, subminiature

**PACS:** 07.60.Fs, 07.60.-j, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.65.050702

\* Project supported by Opening fund of Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education (Guangxi Teachers Education University), China (Grant No. 2014BGERLXT10), the Ph. D. Initial Fund of the Guangxi Teachers Education University, China, the Open Project of Key Laboratory of New Electric Functional Materials of Guangxi Colleges and Universities, China (Grant No. DGN201501), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275184), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA120211).

† Corresponding author. E-mail: [zj\\_happiness@163.com](mailto:zj_happiness@163.com)