

一种减少空间调制快拍成像测偏仪伪信息的方法

张晶 任文艺 曹奇志 李建映 邓婷 Jin Ming-Wu

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

Zhang Jing Ren Wen-Yi Cao Qi-Zhi Li Jian-Ying Deng Ting Jin Ming-Wu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 040701 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171931

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171931>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I4>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Mueller 矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量

Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry

物理学报.2016, 65(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070703>

空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究

Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation

物理学报.2016, 65(5): 050702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.050702>

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>

## 一种减少空间调制快拍成像测偏仪伪信息的方法\*

张晶<sup>1)3)4)</sup> 任文艺<sup>2)</sup> 曹奇志<sup>1)3)4)†</sup> 李建映<sup>1)</sup> 邓婷<sup>1)</sup> Jin Ming-Wu<sup>4)</sup>

1)(广西师范学院物理与电子工程学院, 南宁 530023)

2)(西北农林科技大学, 杨凌 712100)

3)(北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(广西师范学院和广西地表过程与智能模拟重点实验室(广西师范学院), 南宁 530023)

4)(Department of Physics, University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019, USA)

(2017年8月31日收到; 2017年11月8日收到修改稿)

空间调制快拍成像测偏技术能将偏振信息编码到一幅干涉图中, 通过一次测量同时获取目标全部斯托克斯参量. 针对空间调制快拍成像测偏技术中, 目标像的高频部分对偏振信息通道产生串扰, 导致重构的偏振信息包含有伪信息和频域重构目标像的空间分辨率低等问题, 提出一种消除伪信息和获取全分辨率目标像的方法. 该方法通过对两次快拍测量获得的干涉图进行简单加减运算, 便可获得探测目标清晰的纯图像和高信噪比的偏振分量干涉图. 本文对该方法进行了详细的理论分析, 并通过计算机仿真和搭建实验平台, 验证了该方法的可行性. 这为空间调制快拍成像测偏技术获取全分辨率目标像和高质量重构偏振信息提供了新思路.

关键词: 串扰, 全分辨率, 成像测偏技术

PACS: 07.60.Fs

DOI: 10.7498/aps.67.20171931

## 1 引言

偏振成像技术不仅可获得目标光强度信息, 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<sup>[1-21]</sup>.

偏振成像技术目前发展有两大类<sup>[1,3,4]</sup>: 分时型和快拍型. 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, 只适用于静态目标场景的测量. 快拍型是对目标进行一次曝光来获取同一场景的多幅不同偏振方向的偏振辐射图像<sup>[1,3]</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<sup>[17]</sup>, 图像之间的精确

配准是前三种快拍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的四个斯托克斯参量编码到一幅图像中, 实现一次拍摄获取目标图像和全部斯托克斯参量( $S_0, S_1, S_2$ 和 $S_3$ )的仪器<sup>[5,7]</sup>. 在这四个分参量中, 一般认为 $S_0$ 是目标的强度图像,  $S_1, S_2$ 和 $S_3$ 是目标的偏振信息<sup>[9]</sup>.

空间调制快拍成像测偏技术通过对单次测量获取的单帧干涉图解调, 可获得目标的全部斯托克斯参量图像<sup>[5-8]</sup>. 按不同的分光器件组合分类, 可分为四种技术方案<sup>[14]</sup>: 楔型棱镜<sup>[5]</sup>、萨瓦偏光镜<sup>[6]</sup>、偏振光栅组合<sup>[20,21]</sup>和改进的萨瓦偏光镜<sup>[8,17-19]</sup>. 无论哪种技术方案, 它们获取的干涉图都是目标像和干涉条纹的叠加, 将干涉图进行二维傅里叶变换, 再使用二维低通滤波器截取不同通

\* 国家自然科学基金(批准号: 11664004, 11504297, 41661085)、广西自然科学基金(批准号: 2016GXNSFAA380241)、陕西省科技厅项目(批准号: 2016KTZDGY05-02)、广西壮族自治区中青年教师基础能力提升项目(批准号: 2017KY0403)、北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室系统基金和广西师范学院博士启动基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qzhcao77@163.com

道中的偏振信息,最后通过二维反傅里叶变换重构目标的偏振信息.然而,这种单次测量技术是基于假设被测斯托克斯参量空间频率是窄带的,即  $S_1$ ,  $S_2$  或者  $S_3$  通道中,只包含有相应偏振分量信息 [5,6,19,20].但是,在频域中干涉图的频谱是目标像的频谱与干涉条纹频谱的叠加,当目标像的频谱较高时,就可能使得相邻的通道之间产生串扰.如果不消除这种串扰,重构出来的偏振信息 ( $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$ ) 中将可能包含伪信息.

如果在重构偏振信息之前就获取到了目标像,这种串扰(伪信息)将能被消除.然而现有的单次快拍成像技术不能实现,如果进行第二次测量,结合两次测量结果,将能提前获取到目标像  $S_0$ ,从而能消除目标像  $S_0$  对  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  重构的串扰,需特别强调此时获取的目标像  $S_0$  是全分辨率.当然,该技术的使用必须权衡是否能容忍测量时间和增加系统的复杂性.此外,虽然本文基于改进型萨瓦偏光镜为核心器件的空间调制快拍成像测偏技术(MSPSIP)为例来讨论 [8,19],但是本文提出消串扰,获取全分辨率目标像的方法,也适用于其他器件

(如:楔型棱镜、萨瓦偏光镜和偏振光栅组合)为核心分光器件的空间调制快拍成像测偏技术.

## 2 光学系统理想模型

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平面和xoz平面.半波片HWP的快轴方向与x轴的夹角为22.5°角.分析器Analyser的偏振方向与x轴成45°角.电荷耦合器(CCD)探测器放置在成像镜L的后焦平面上.如果使用准单色光源或我们之前提出宽带光源方案 [15],滤光片Filter可以去掉.目标出射的光经过Filter入射到MSP<sub>1</sub>被分成沿着竖直方向(平行于纸平面)剪切的两束正交线偏振光,光轴与水平方向成22.5°角的半波片将两线偏振的光场振动方向旋转45°角,经过MSP<sub>2</sub>被分成沿着水平和竖直方向剪切的四束线偏振光.最后这四束光线经过分析器A和成像镜L干涉,成像于CCD上.

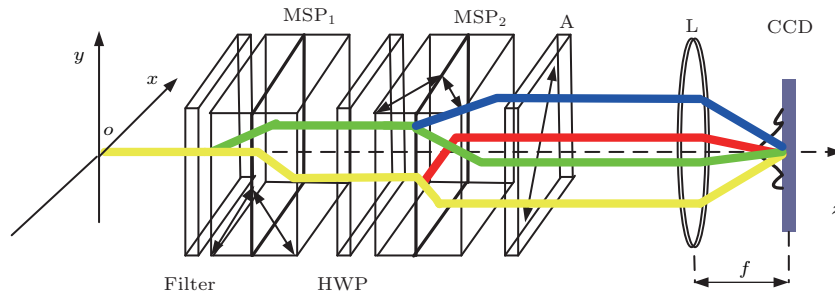


图1 MSPSIP光学设计示意图  
Fig. 1. Optical layout of MSPSIP.

用光线追迹分析可知分析器与x轴成45°角时,CCD上像面光强  $I_{45}$  分布为 [17]:

$$I_{45} = \frac{1}{2}S_0 + \frac{1}{2}S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x) + \frac{1}{4}|S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(y-x) + \{\arg[S_{23}]\}) - \frac{1}{4}|S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(x+y) - \{\arg[S_{23}]\}), \quad (1)$$

$$S_{23} = S_2 + iS_3; \quad \Omega = \frac{\Delta}{\lambda f}, \quad (2)$$

其中arg表示求复数的辐角;Δ是MSP的平板横向剪切量;f是成像镜的焦距;λ为入射光的波长; $S_0$ — $S_3$ 是二维空间分布的斯托克斯参量.对光强  $I_{45}$  进行傅里叶变换就获得如图2的七个峰,这些

峰中包含不同的斯托克斯参量,由于傅里叶变换的对称性,只需分别对  $C_0$ ,  $C_1$  和  $C_{23}$  通道采用二维滤波器进行截取,再进行反傅里叶变换,来重构  $S_0$ ,  $S_1$  和  $S_{23}$  的偏振信息.

$$\mathfrak{S}(C_0) = \frac{1}{2}S_0, \quad (3)$$

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

$$\mathfrak{S}(C_{23}) = \frac{1}{8}(S_2 + jS_3) \exp(j4\pi\Omega x) \exp(j4\pi\Omega y). \quad (5)$$

ℑ表示反傅里叶变换,为了重构未知目标的斯托克斯参量,需进行系统定标,来解调相位因子  $\exp(j4\pi\Omega x)$  和  $\exp(j4\pi\Omega y)$ .一般通过测量一些已知偏振态作为参考数据,来解调这些相位因

子<sup>[21]</sup>. 如测量偏振方向与  $x$  轴夹角为  $0^\circ$  线偏振片作为参考数据, 可以解调等 (4) 式中  $\exp(j4\pi\Omega x)$ ; 测量偏振方向与  $x$  轴夹角为  $45^\circ$  线偏振片作为参考数据, 可以解调等 (5) 式中  $\exp(j4\pi\Omega x)$  和  $\exp(j4\pi\Omega y)$ . 通过将未知目标测量数据和参考数据进行归一化, 可以消除相位因子影响, 重构出未知目标的斯托克斯参量, 例如:

$$S_{0,\text{object}} = |\Im(C_{0,\text{object}})|, \quad (6)$$

$$S_{1,\text{object}} = R \left[ \frac{\Im(C_{1,\text{object}})}{\Im(C_{1,\text{reference},0^\circ})} \frac{|\Im(C_{0,\text{reference},0^\circ})|}{S_{0,\text{object}}} \right], \quad (7)$$

$$S_{2,\text{object}} = R \left[ \frac{\Im(C_{23,\text{object}})}{\Im(C_{2,\text{reference},45^\circ})} \frac{|\Im(C_{0,\text{reference},45^\circ})|}{S_{0,\text{object}}} \right], \quad (8)$$

$$S_{3,\text{object}} = I \left[ \frac{\Im(C_{23,\text{object}})}{\Im(C_{2,\text{reference},45^\circ})} \frac{|\Im(C_{0,\text{reference},45^\circ})|}{S_{0,\text{object}}} \right]. \quad (9)$$

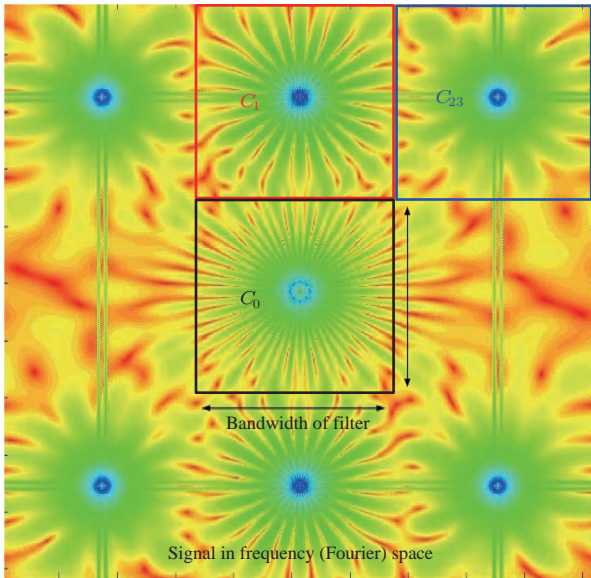


图2 MSPSIP 像面干涉图的傅里叶频谱, 七个峰包含不同斯托克斯参量

Fig. 2. Schematic diagram of the filtering for the signal in frequency (Fourier) space.

然而, 当两个相邻的通道非常接近时, 在空间调制快拍成像测偏技术中, 斯托克斯参量重构中会出现伪信息. 这是因为等式 (4)—(9) 都假设被测斯托克斯参量空间频率是有限宽度的,  $S_1$ ,  $S_2$  或者  $S_3$  通道中的数据只包含相应偏振分量信息<sup>[5,6,19,20]</sup>. 然而,  $S_0$  分量中高频分量会延展进入到  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  通道中, 这会将伪信息注入到它们的真实数据中. 如果在  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  重构之前, 将  $S_0$  分量移除, 则这些伪信息可以在它们的重构结果图

像中消除. 但是采用现在的单次测量方式不能移除  $S_0$  分量. 如果将分析器的偏振取向变成与  $x$  轴成  $135^\circ$  角, 在像面 CCD 上形成干涉条纹的表达式  $I_{135}$  为

$$I_{135} = \frac{1}{2} S_0 - \frac{1}{2} S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x) - \frac{1}{4} |S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(y - x) + \{\arg[S_{23}]\}) + \frac{1}{4} |S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(x + y) - \{\arg[S_{23}]\}), \quad (10)$$

等式 (10) 相对于等式 (1) 发生了  $180^\circ$  的载频相移.

当两次测量相减时:

$$I_{135} - I_{45} = S_1 \cos(2\pi \times 2\Omega \times x) + \frac{1}{2} |S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(y - x) + \{\arg[S_{23}]\}) - \frac{1}{2} |S_{23}| \cos(2\pi \times 2\Omega(x + y) - \{\arg[S_{23}]\}), \quad (11)$$

两式相减消掉  $S_0$  项, 得到交流分量 (包含偏振分量的调制项), 因此消除  $S_0$  分量对其他偏振分量通道可能的串扰.

此外, 当这两次测量相加时, 能消掉包含  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  的交流分量:

$$I_{135} + I_{45} = S_0, \quad (12)$$

得到直流分量 (全空间分辨的  $S_0$ ), 相当于 MSP<sub>1</sub>, HWP, MSP<sub>2</sub> 和 A 都没放置在这个光学系统中.

从上面理论可知, 对两幅干涉图进行简单的加减运算, 便可获得探测目标的纯图像和偏振分量干涉图. 两干涉图像求和后只剩直流分量, 此时得到的是清晰的纯目标像, 没有偏振分量, 而且其强度增大为原来每一幅干涉图像的两倍. 而两幅干涉图求差后, 背景图像消失, 此时得到的是高信噪比的偏振分量干涉图, 偏振分量干涉图强度同样增大为原来每一幅干涉图像的两倍. 经过傅里叶变换可得到的偏振分量干涉图频谱, 再进行频域滤波和反傅里叶变换, 即可复原出对应的偏振分量.

### 3 数值模拟

下面采用计算机仿真实验来验证上述理论分析的正确性. MSPSIP 系统设计参数如下:  $f = 100 \text{ mm}$ , CCD 分辨率为  $1024 \times 1024$ , 像元尺寸为  $12 \text{ }\mu\text{m}$ , MSP 的单板厚度均为  $4.25 \text{ mm}$ ,

$n_e = 1.48956$ ,  $n_o = 1.66527$ , 光源是单色光, 其波长  $\lambda = 632.8$  nm.

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)分别是基于等式(1)和(10)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是对图4(a)和图4(b)进行求和得到的结果图像(全分辨率的 $S_0$ 分量). 图6是对图4(a)和图4(b)进行求差所得结果的图像, 消去了目标图像 $S_0$ 分量, 只剩下包含着 $S_1$ ,  $S_2$ 和 $S_3$ 信息的调制项. 图7(a)–(c)分别是图6中解调出来的 $S_1$ ,  $S_2$ 和 $S_3$ 偏振分量. 将重构斯托克斯参量图7与原始输入图3相比较可知, 图7中的边缘低频部分重构较好, 但是中心高频部分明显缺失, 这是频域反演使用二维低通滤波器导致的结果 [17,19].

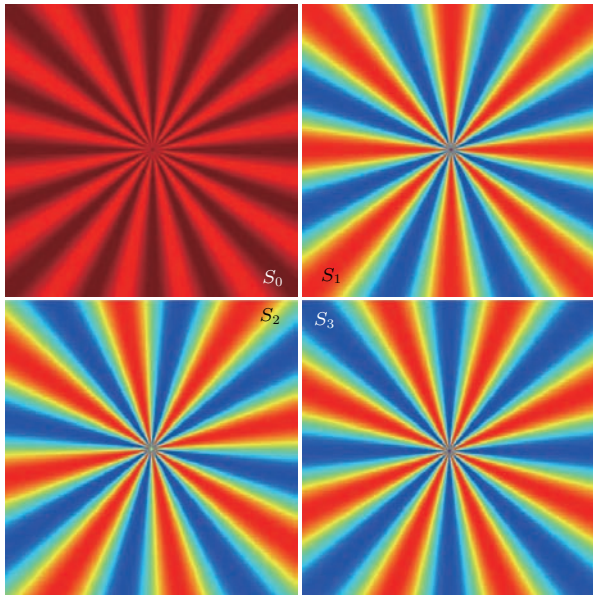


图3 输入 Stokes 目标图像  
Fig. 3. Stokes object.

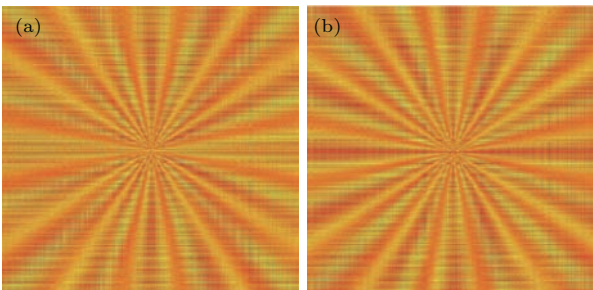


图4 模拟干涉图 (a) 采用等式(2)模拟; (b) 采用等式(11)模拟  
Fig. 4. Simulated image: (a) Simulated image of Eq. (2); (b) simulated image of Eq. (11).

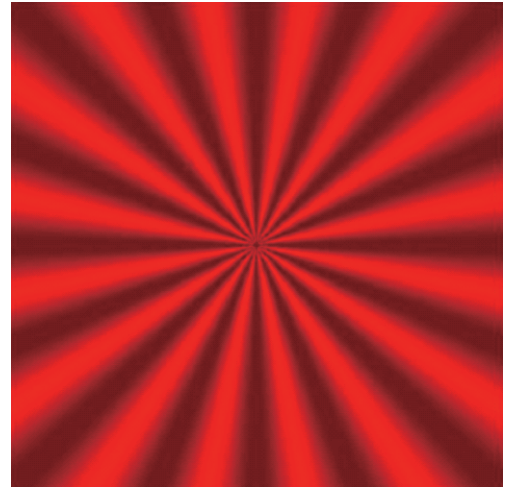


图5 全分辨率强度图像(图4(a)与图4(b)之和)  
Fig. 5. The full resolution  $S_0$  (the sum between Fig. 4(a) and Fig. 4(b)).

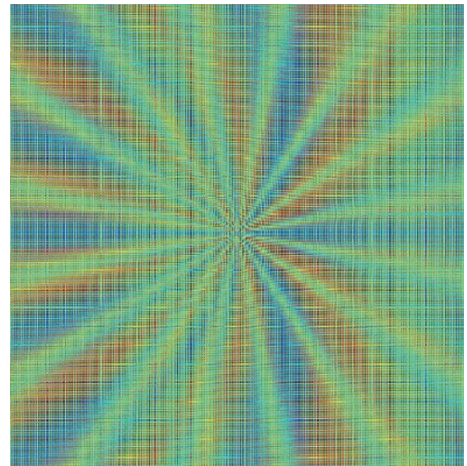


图6 图4(a)与图4(b)之差  
Fig. 6. The difference between Fig. 4(a) and Fig. 4(b).

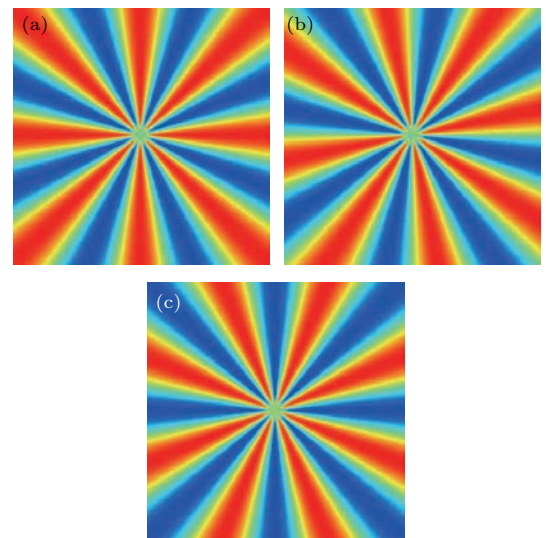


图7 由图6重构的斯托克斯参量 (a)  $S_1$ ; (b)  $S_2$ ; (c)  $S_3$   
Fig. 7. Reconstructed Stokes images from Fig. 6 : (a)  $S_1$ ; (b)  $S_2$ ; (c)  $S_3$ .

### 4 重构目标图像质量分析

从光学系统理想模型分析和数值模拟可知, 通过两次快拍获得的干涉图相加可以得到目标的全分辨率像. 下面从重构目标像与输入目标图像的差异性与相似性两方面来定量评价重构获得的目标全分辨率像的质量: 1) 采用重构目标像与输入目标图像的差图像(输入目标像与重构图像之差)来定量评价两图像的差异性; 2) 采用结构相似指标(structural similarity index, SSIM)来定量评价两图像的相似性.

图8是输入目标像(图3中 $S_0$ 分量)与重构目标图像(图5)的差图像. 它是伪彩色图像, 颜色表示其数值大小, 具体颜色代表的数值可以从图8右侧的竖直彩色条(bar)中找到. 很明显, 图8整体颜色是绿色, 对照右侧的bar, 该颜色代表的数值是0. 此外, 为了证实其值为0, 在图8中, 任意取了一个像素点(图8中的小黑点), 其值(Index)确实是0. 图8是输入目标图像与重构目标图像之间的差图像, 其值为0, 这表明两者差异性为0.

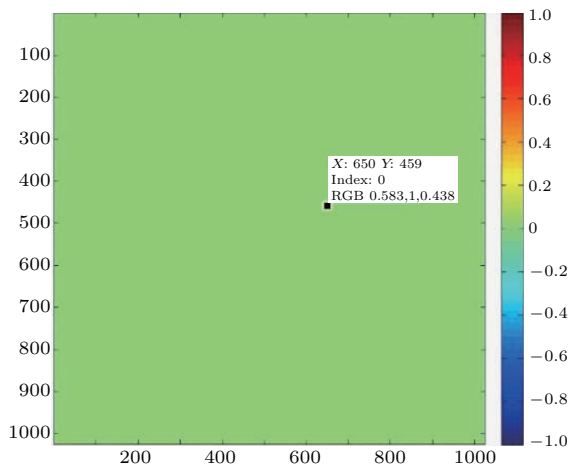


图8 差图像

Fig. 8. Difference image.

结构相似指标(SSIM)是一种用以衡量两张图像相似程度的指标<sup>[18,19]</sup>. 当两张影像的其中一张为无失真图像(如输入目标像), 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品质衡量指标<sup>[22-24]</sup>. SSIM计算的图像整体平均相似性, 取值的范围为0到1, 结构相似性指标的值越大, 代表两个图像的相似性越高, 当结构相似性指标的值为1时, 则被衡量的两张图像完全相同. SSIM计算

表达式如下:

$$SSIM(i, j) = \frac{(2\mu_i\mu_j + c_1)(2\sigma_{ij} + c_2)}{(\mu_i^2 + \mu_j^2 + c_1)(\sigma_i^2 + \sigma_j^2 + c_2)}, \quad (13)$$

$\mu_i$ 和 $\mu_j$ 分别表示图像*i*和*j*的均值;  $\sigma_i$ 和 $\sigma_j$ 分别表示图像*i*和*j*的标准差;  $\sigma_{ij}$ 是图像*i*和*j*的协方差;  $c_1$ 和 $c_2$ 是两个小常数, 由等式 $c_1 = (k_1 * L)^2$ 和 $c_2 = (k_2 * L)^2$ 决定, 其中*L*为参考窗口图像动态范围, 一般*L*为1.5;  $k_1$ 和 $k_2$ 是两个小常数( $k_1, k_2 \ll 1$ ), 通常选择 $k_1 = 0.01, k_2 = 0.03$ .

本文采用MATLAB软件平台计算输入目标像(图3中 $S_0$ 分量)与重构目标图像(图5)的SSIM等于1, 即整体评价两幅图像是完全相同的.

为了更加直观, 图9给出了重构图像与输入目标图像的局域相似性评估图(SSIMMAP), 即每个像素相似性评估图. 图9同样是伪彩色图, 整体颜色是黄色, 对照右侧的bar, 该颜色代表的数值是1. 此外, 为了证实其值为1, 在图9中, 任意取了一个像素点(图9中的小黑点), 其值(Index)确实是1. 这表明两者局部也是完全同的. 结构相似指标表明在理想光学系统成像条件下, 重构图像与输入目标图像完成相同.

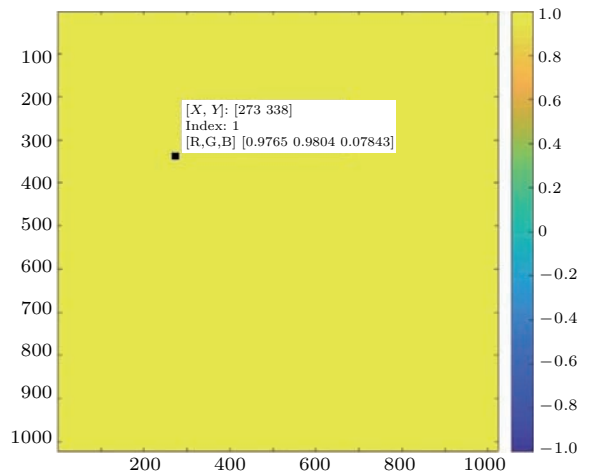


图9 局域相似性评估图

Fig. 9. Local values of structural similarity index.

通过上面的重构图像与目标的差异性与相似性两方面来定量评价表明: 在理想光学系统成像条件下, 采用新方法重构的目标图像与输入目标图像差异为零, 相似性1(即100%), 两者完全一样. 这表明两干涉图像求和重构的目标图像包含了目标的全部信息(低频和低频信息), 是全分辨率图像.

此外, 这也表明两幅干涉图求差获得的是纯偏振分量( $S_1, S_2$ 和 $S_3$ )干涉图, 完全消去了 $S_0$ 分量,

因此  $S_0$  分量的高频成分也就不会串扰到偏振分量 ( $S_1, S_2$  和  $S_3$ ) 中去了。

### 5 原理验证实验

图 10 是实验装置示意图。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)组装的,并非按一定的指标设计所加工,所以,其参数仅为由所选仪器组成的

装置而言。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  $1024 \times 1024$ , 像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 。

图 11 和图 12 分别是分析器 A 偏振化方向为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时进行快拍成像测偏实验获得的干涉图。从其局部放大可以清楚地看到目标图像上叠加

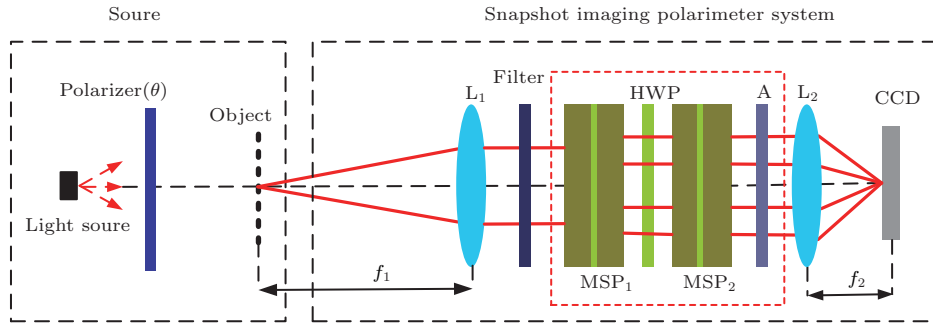


图 10 MSPSIP 原理方案验证实验示意图

Fig. 10. Schematic diagram of the MSPSIP.

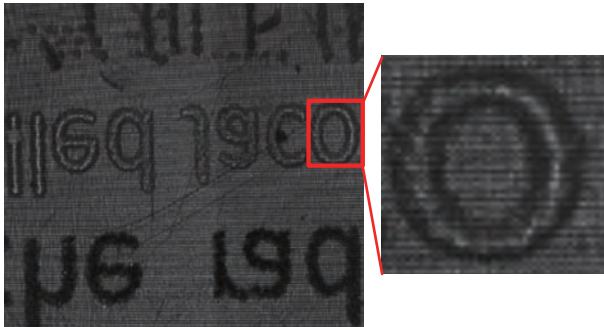


图 11 分析器 A 偏振化方向为  $45^\circ$  时成像测偏实验获得的干涉图和目标像,对图中的局部放大可以清楚地看到干涉条纹  
Fig. 11. Raw image of a transparent plastic film. Interference fringes are located in the whole areas of the scene.

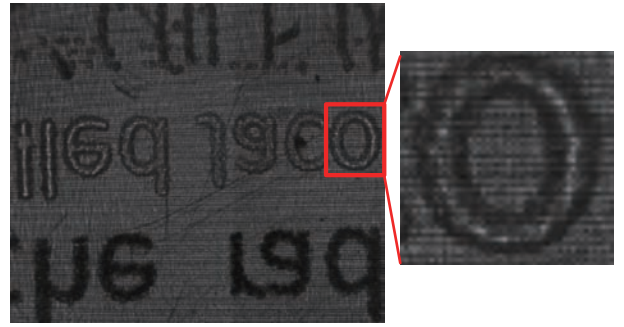


图 12 分析器 A 偏振化方向为  $135^\circ$  时成像测偏实验获得的干涉图和目标像,对图中的局部放大可以清楚地看到干涉条纹  
Fig. 12. Raw image of a transparent plastic film. Interference fringes are located in the whole areas of the scene.

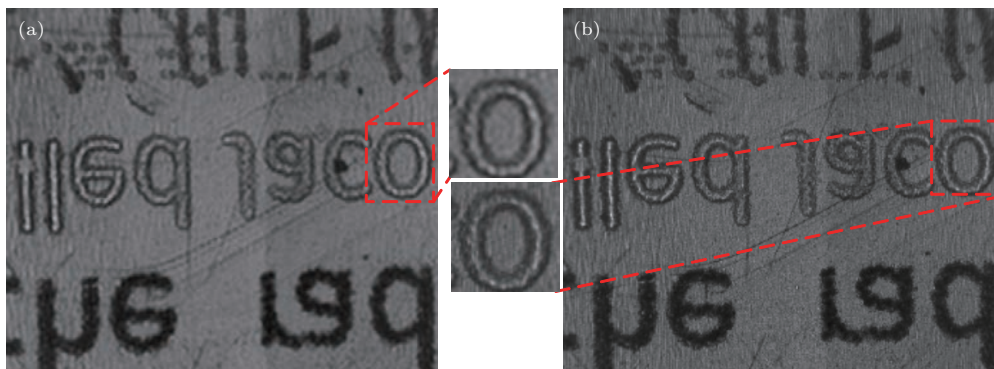


图 13 (a) 对图 10 进行反演重构获得的  $S_0$ ; (b) 对两次测量的干涉图求和获得的全分辨率  $S_0$   
Fig. 13. (a)  $S_0$  acquired from the raw data in Fig. 11; (b)  $S_0$  acquired from sum the raw data between Fig. 11 and Fig. 12.

着干涉条纹, 这表明目标的偏振信息通过成像测偏系统已经编码到目标的像上. 通过傅里叶变换和二维空间滤波的重构算法, 可以由图 11 (或者图 12) 反演出目标  $S_0$  分量 (如图 13 (a) 所示). 图 13 (b) 是通过图 11 和图 12 求和运算获得的  $S_0$  分量, 图 13 (b) 中目标的边缘细节比图 13 (a) 更清晰, 这表明图 13 (b) 的空间分辨率更高. 图 14 是对图 11 和图 12 进行求差得到的结果图像, 消去了目标图像  $S_0$  分量, 只剩下调制项. 图 15 (a)—(c) 分别是图 14 中解调出来的  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  偏振分量.



图 14 图 11 与图 12 之差

Fig. 14. The difference between Fig. 11 and Fig. 12.

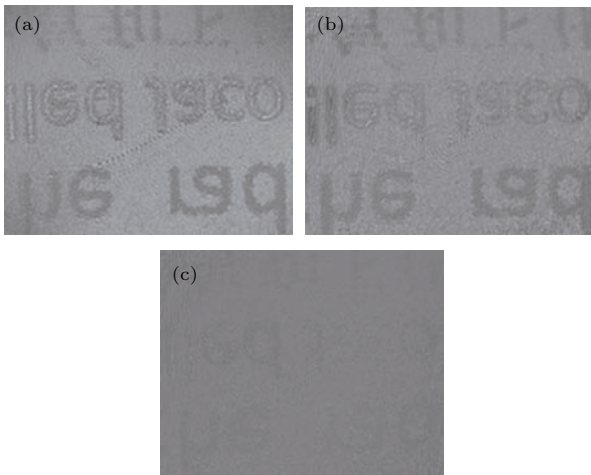


图 15 由图 14 重构的斯托克斯参量 (a)  $S_1$ ; (b)  $S_2$ ; (c)  $S_3$

Fig. 15.  $S_0$  acquired from the raw data in Fig. 14: (a)  $S_1$ ; (b)  $S_2$ ; (c)  $S_3$ .

## 6 结 论

本文提出了一种消去伪信息, 获取全分辨目标像的方法, 首先对该方法进行了详细的理论分析, 再通过计算机仿真和搭建实验平台, 验证了该方法

的可行性. 这种方法的显著优点是只需对两次测量获得的干涉图进行简单加减运算, 便可获得探测目标的纯图像和偏振分量干涉图: 两干涉图像求和后只有直流分量, 得到全分辨率的目标图像; 两幅干涉图求差后, 背景图像消失, 得到高信噪比的偏振分量干涉图. 本文提出的方法为空间调制快拍成像测偏技术获取全分辨率目标图像和高质量重构偏振信息提供了新思路.

## 参考文献

- [1] Snik F, Craven-Jones J, Escuti M, Fineschid S, Harrington D, Martinof A D, Mawetg D, Riedih J, Tyo J S 2014 *Proc. SPIE 9099, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI* Baltimore, Maryland, United States, March 24–28, 2014 p90990B
- [2] Forward S, Gribble A, Alali S, Andras A L, Vitkin I A 2017 *Sci. Reports* **7** 11958
- [3] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [4] Alali S, Vitkin A 2015 *J. Biomed. Opt.* **20** 0611041
- [5] Oka K, Kaneko T 2003 *Opt. Express* **11** 1510
- [6] Luo H T 2008 *Ph. D. Dissertation* (Tucson: University of Arizona)
- [7] 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)]
- [8] Cao Q Z, Zhang C M, DeHoog E 2012 *Appl. Opt.* **51** 5791
- [9] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [10] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红, 张淳民, 赵葆常, 李英才, 吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [11] Qu Y, Zhang C M, Wang D Y, Tian P B, Bai W G, Zhang X Y, Zhang P, Dai H S, Wu Q M 2013 *Int. J. Remote Sens.* **34** 3938
- [12] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [彭志红, 张淳民, 赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [13] Oka K, Haga Y, Komaki Y 2013 *Proceedings Volume 8873, Polarization Science and Remote Sensing VI* San Diego, California, United States September 27, 2013 p88730R-1
- [14] Oka K, Haga Y, Michida H 2015 *Proceedings Volume 9613, Polarization Science and Remote Sensing VII* San Diego, California, United States, September 1, 2015 p96130E-9
- [15] Oka K, Kodai S, Hiroshi M 2017 *Proceedings Volume 10407, Polarization Science and Remote Sensing VIII* San Diego, California, United States, September 7, 2017 p104070M



- [16] 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]
- [17] Cao Q Z, Zhang J, DeHoog E, 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, 阎妍 2016 物理学报 **65** 050702]
- [18] Cao Q Z, Zhang C M, Zhang J, Kang Y Q 2014 *Optik* **125** 3380
- [19] Cao Q Z, Zhang J, DeHoog E, Zhang C M 2016 *Appl. Opt.* **55** 954
- [20] Kudenov M, Escuti M, Dereniak E, Oka K 2011 *Appl. Opt.* **50** 2283
- [21] Kudenov M W 2009 *Ph. D. Dissertation* (Tucson: The University of Arizona)
- [22] Horé A, Ziou D 2010 *Proceedings of IEEE Conference on Pattern Recognition Istanbul, Turkey* October 7, 2010 p2366
- [23] [https://www.mathworks.com/help/images/ref/ssim.html?searchHighlight=SSIM&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/images/ref/ssim.html?searchHighlight=SSIM&s_tid=doc_srchtile) [2017-11-8]
- [24] Wang Z, Bovik C, Sheikh R, Simoncelli P 2004 *IEEE Trans. on Image Process.* **13** 600

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

Zhang Jing<sup>1)3)4)</sup> Ren Wen-Yi<sup>2)</sup> Cao Qi-Zhi<sup>1)3)4)†</sup> Li Jian-Ying<sup>1)</sup>  
Deng Ting<sup>1)</sup> Jin Ming-Wu<sup>4)</sup>

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

2) (School of Science Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

3) (Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Guangxi Teachers Education University), Ministry of Education and Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation (Guangxi Teachers Education University) Nanning 530023, China)

4) (Department of Physics, University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019, USA)

( Received 31 August 2017; revised manuscript received 8 November 2017 )

## Abstract

Spatially-modulated snapshot imaging polarimeter can encode four Stokes parameters ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$ ) into a single interferogram and allow the instantaneous measurement of polarization from a single snapshot. However, the reconstructed polarization information contains aliasing signal, and the reconstructed intensity images suffer low spatial resolution because of the crosstalk between high frequency components of the image and frequency domain filtering for the polarization channels. In this paper, we propose an image superposition and subtraction method to mitigate the aliasing problem and to recover the image resolution. The two interferograms acquired from two snapshot measurements are superposed to obtain the intensity image ( $S_0$  component) of an object without the polarization components because the phases of the polarization components in the two interferograms are opposite. In comparison with the intensity of each of the original interferograms, the intensity of  $S_0$  component increases twice and its spatial resolution improves up to a maximum value offered by the instrument. Then a subtraction between the two interferograms is performed to derive the pure interference fringes while the intensity image vanishes. The intensity of the pure interference fringes also increases twice compared with that of each original interferogram because phases of the interference terms in original interferograms are opposite. The polarization images ( $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  components) can be reconstructed from the pure interference fringes, and do not include crosstalk signals between the high frequency components of the intensity image. The theoretical basis of the method is presented through a detailed analysis. Its feasibility is verified by both computer simulation and experiment. The simulation results show that the otherness and the structural similarity index between the input and reconstructed intensity images is zero and 1, respectively, indicating a perfect reconstruction of  $S_0$ . The results also make it clear that the pure interference fringes do not include any component of intensity image, and thus the reconstructed polarization information does not contain any crosstalk signals. Moreover, the experimental results are in accordance with the theoretical expectation and the computer simulations. This research provides a novel means for spatially-modulated snapshot imaging polarization technology to obtain full-resolution object images and high-quality reconstructed polarization information.

**Keywords:** crosstalk, full resolution, imaging polarimeter

**PACS:** 07.60.Fs

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171931

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11664004, 11504297, 41661085), the National Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant No. 2016GXNSFAA380241), Shaanxi Science and Technology, China (Grant No. 2016KTZDGY05-02), Basic Ability Promotion Project of Guangxi Middle and Young Teachers in University, China (Grant No. 2017KY0403), Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, China (Guangxi Teachers Education University), and the Ph. D. Initial Fund of the Guangxi Teachers Education University, China.

† Corresponding author. E-mail: [qzhcao77@163.com](mailto:qzhcao77@163.com)