

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

李浩 朱京平 张宁 张云尧 强帆 宗康

Effect of half wave plate angle mismatch on channel modulating imaging result and its compensation

Li Hao Zhu Jing-Ping Zhang Ning Zhang Yun-Yao Qiang Fan Zong Kang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像

Incoherent ptychography in Fresnel domain with simultaneous multi-wavelength illumination

物理学报.2016, 65(12): 124201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124201>

厚样品三维叠层衍射成像的实验研究

Experimental study on three-dimensional ptychography for thick sample

物理学报.2016, 65(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014204>

基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则

An evaluation criterion of infrared image complexity based on background optimal filter scale

物理学报.2015, 64(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234202>

基于叠层衍射的数字水印算法研究

Watermarking algorithm based on ptychographical imaging

物理学报.2015, 64(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234201>

可调谐相位板空域频域联合分析

Combined analysis of tunable phase mask within spatial and frequency domain

物理学报.2015, 64(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224207>

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^{*}

李浩 朱京平[†] 张宁 张云尧 强帆 宗康

(电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2016年2月5日收到; 2016年4月22日收到修改稿)

通道调制型偏振成像系统能够实时地对目标进行全偏振成像, 是当前偏振成像领域的研究热点之一. 基于萨瓦板的通道调制型偏振仪中半波片的光轴方向对成像结果的准确性有较大的影响. 本文分析了半波片失配角的大小对探测器采集到的光强分布的影响, 得到了二者之间的表达式, 根据该表达式提出通过测量半波片失配角对系统进行定标并利用测得的半波片失配角对偏振成像的解调结果进行修正和补偿的方法. 计算机仿真结果显示失配角为 0.5° 时, S_1 , S_2 和 S_3 的解调结果准确度在经过修正补偿后分别提高了0.06%, 3.49%和3.49%. 表明该方法能够较好地解调出的偏振斯托克斯参数图像进行补偿, 得到更精确的成像结果, 对提高通道调制型偏振成像的质量具有重要的意义.

关键词: 偏振成像, 半波片, 失配角, 补偿

PACS: 42.30.-d, 42.25.Ja, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.65.134202

1 引言

偏振成像作为一种有别于传统强度成像、光谱成像以及红外成像的新技术, 在获取目标的强度信息之外还能够探测目标的偏振信息, 在光学遥感、水下探测以及军事侦察等领域具有重要的应用^[1-3]. 因此, 自20世纪70年代美国最先开展偏振成像研究以来就一直受到多国研究者的重视, 相继发展出了包括分时测量、分孔径测量等多种不同类型的偏振成像方法, 但是分时测量存在着不能对运动目标进行实时成像的缺点, 而分孔径的偏振成像方法结构复杂, 系统实现难度较大, 而且这些成像方式也不能够对圆偏振信息进行有效探测. 英国国防评估研究局的Lewis等^[4]进行的水下偏振成像实验表明圆偏振成像比线偏振成像具有更好的探测效果, 此外, 美国亚利桑那大学的Laan等^[5]的研究也表明红外圆偏振光在浑浊介质中具有更长

的探测距离. 因此, 全偏振成像技术对特殊环境下目标的实时探测具有非常重要的意义.

由于能够实时地获取目标的全偏振信息, 通道调制型偏振成像技术在近些年得到了较多学者的关注. Oka^[6]于2003年首次提出了一种基于双折射楔形棱镜的通道调制型偏振成像仪, 成功实现了对目标在特定波长处的全偏振信息的实时探测. 2006年, Oka和Saito^[7]又提出基于萨瓦板偏光镜的偏振成像仪, 该结构的偏振成像仪中各元件为共轴排列, 改进了楔形棱镜组装难度大的缺陷. 2008年, Luo等^[8]在Oka的基础上对基于萨瓦板偏光镜的偏振成像仪进行了改进, 使得该系统能够进行远场全偏振实时成像. 2009年, Oka等^[9]在此基础上提出了用于复色光照明条件下的萨瓦板偏振成像仪, 数值模拟显示在50 nm带宽光源的照明下能够实现较好的偏振成像效果. 同年, DeHoog等^[10]成功将该装置进行了改进并用于视网膜的病理检查. 2012年, Cao等^[11]通过使用改进的萨瓦

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61205187) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: xkjc2013008) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jpzhu@xjtu.edu.cn

板偏光镜提高了该类型偏振成像仪的信噪比和空间分辨率. 2013年, Saito等^[12]利用改进型萨瓦板偏光镜对系统进行了改良, 增大了该型偏振成像仪的视场角.

在基于萨瓦板的通道调制型偏振成像系统的偏振调制模块中使用了一个光轴方向为 22.5° 的半波片, 其作用是用来改变由萨瓦板偏光镜 SP_1 出射的o光和e光的振动面方向, 使其均与 x 轴成 45° 角, 从而各自被 SP_2 分成等振幅的两束光, 最后形成的四束光才能发生干涉, 将偏振斯托克斯参数调制在不同的通道上, 并且易于被解调出来. 但是, 当半波片的光轴方向存在一定的失配角时, 从它出射的光在经过其后的萨瓦板偏光镜 SP_2 时就不再是等振幅分光, 进而导致发生干涉的各光束的振幅发生变化, 影响干涉条纹的强度分布, 这就会导致解调出来的偏振图像与入射光的实际偏振分布图像之间存在较大差别.

针对以上问题, 本文推导了基于萨瓦板的通道调制型偏振成像系统中半波片光轴的失配角与焦平面阵列上所采集到的干涉光强分布表达式之间的关系, 分析了该情况下焦平面阵列上的光强分布对偏振成像结果的影响, 并根据光强表达式提出了对系统进行定标, 然后在解调过程中对半波片失配角所引起的误差进行补偿, 从而使得最终得到的偏

振图像更接近系统入射光的实际偏振分布.

2 半波片失配角对探测器上的光强分布的影响

基于萨瓦板的通道调制型偏振成像仪的原理如图1所示, 系统由两块萨瓦板偏光镜与夹在中间的一个光轴方向与 x 轴正方向夹角为 22.5° 的半波片、一个透振方向与 x 轴正方向夹角为 45° 的偏振片、一个成像透镜以及位于透镜焦平面上的焦平面阵列(FPA)组成.

由原理图可以看出入射光经过萨瓦板组件后被横向剪切为四束, 这四束光经成像透镜汇聚后在其焦平面处两两之间发生干涉, 干涉后在FPA上形成的干涉图样光强分布为^[7]

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \frac{1}{2}S_0(x, y) + \frac{1}{2}S_1(x, y)\cos[2\pi\Omega(x+y)] \\ &\quad - \frac{1}{4}|S_{23}(x, y)|\cos\{2\pi\Omega(2x) + \arg[S_{23}(x, y)]\} \\ &\quad + \frac{1}{4}|S_{23}(x, y)|\cos\{2\pi\Omega(2x) - \arg[S_{23}(x, y)]\}, \\ \Omega &= \frac{\Delta}{\lambda f}, \\ S_{23}(x, y) &= S_2(x, y) + iS_3(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

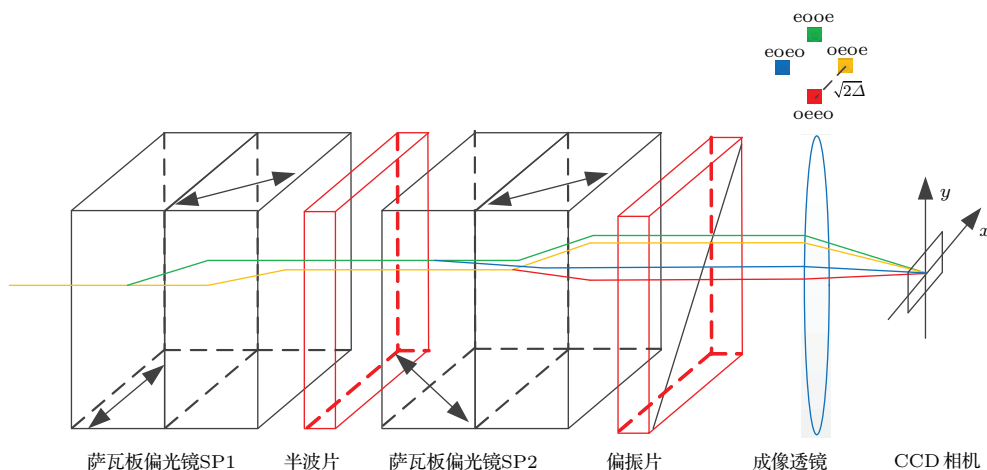


图1 (网刊彩色) 萨瓦板偏振成像仪原理图

Fig. 1. (color online) Principle of imaging polarimeter using Savart plates.

其中 Ω 为载波频率, $\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}t$ 表示萨瓦板单板对入射光线的横向剪切量, n_o , n_e 是晶体的双折射率, t 为单块萨瓦板的厚度, λ 为成像所使用的光的波长, f 为成像透镜的焦距. 由该光强表达式

可以看出: FPA上的光强分布是表示入射光偏振态的四个斯托克斯参数 S_0 — S_3 被调制之后的叠加, 通过对FPA所采集到的干涉强度分布进行解调即可得到入射光的斯托克斯参数分布.

在基于萨瓦板的通道调制型偏振成像仪中, 半

波片的作用主要在于改变通过它的线偏振光的振动面方向, 当半波片的光轴恰好与 x 轴正方向成 22.5° 时就能够使得从萨瓦板偏光镜 SP_1 出射的 oe 光和 eo 光所在的振动面恰好与 x 轴正方向成 $\pm 45^\circ$ 角, 从而保证在经过后边的 SP_2 时 oe 光和 eo 光能够被等振幅分光, 最终能够在透镜焦平面处得到 (1) 式的光强分布. 但实际系统中半波片的光轴方向难免与理想系统存在一定大小的角度失配, 导致最终在 FPA 上实际得到的光强分布与理论情况存在一定的差异.

假设在萨瓦板偏振成像仪中, 半波片的角度失配为 α , 即其光轴方向与 x 轴正方向夹角为 $\omega = 22.5^\circ + \alpha$, 沿 z 轴方向进入萨瓦板偏振成像仪的入射光沿 x 轴和 y 轴方向上的振幅大小分别为 E_x 和 E_y , 则进入系统后的光经过系统内的偏振光学元件后在出射面变为四束, 半波片失配角导致该四束光的振幅大小分别为

$$\begin{aligned} E'_1 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_{10} \cdot \sin \omega_1 \\ &= \frac{1}{2} E_y \cdot (\sin 2\alpha - \cos 2\alpha), \\ E'_2 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_{10} \cdot \cos \omega_1 \\ &= \frac{1}{2} E_y \cdot (\sin 2\alpha + \cos 2\alpha), \\ E'_3 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_{20} \cdot \cos \omega_2 \\ &= \frac{1}{2} E_x \cdot (\cos 2\alpha - \sin 2\alpha), \\ E'_4 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_{20} \cdot \sin \omega_2 \\ &= \frac{1}{2} E_y \cdot (\sin 2\alpha + \cos 2\alpha). \end{aligned} \quad (2)$$

最后, 这四束满足相干条件的光经过成像透镜后在 FPA 上两两之间发生干涉, 干涉图样的强度分布为

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) &= \left\langle \left| E'_1(x_i, y_i; t) e^{-i\phi_1} \right. \right. \\ &\quad + E'_2(x_i, y_i; t) e^{-i\phi_2} \\ &\quad + E'_3(x_i, y_i; t) e^{-i\phi_3} \\ &\quad \left. \left. + E'_4(x_i, y_i; t) e^{-i\phi_4} \right|^2 \right\rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式中尖括号表示对时间的平均, x_i, y_i 是像平面上各点的坐标, 它们与目标场中的各点的坐标一一对应, 而 $\phi_1 - \phi_4$ 则表示四束光在经过系统的过程中所产生的累积相位. 将 (3) 式展开可得:

$$I = \langle |E'_1|^2 \rangle + \langle |E'_2|^2 \rangle + \langle |E'_3|^2 \rangle + \langle |E'_4|^2 \rangle$$

$$\begin{aligned} &+ \left[\langle E'_1 E'^*_2 \rangle e^{i(\phi_2 - \phi_1)} + \text{c.c} \right] \\ &+ \left[\langle E'_1 E'^*_3 \rangle e^{i(\phi_3 - \phi_1)} + \text{c.c} \right] \\ &+ \left[\langle E'_1 E'^*_4 \rangle e^{i(\phi_4 - \phi_1)} + \text{c.c} \right] \\ &+ \left[\langle E'_2 E'^*_3 \rangle e^{i(\phi_3 - \phi_2)} + \text{c.c} \right] \\ &+ \left[\langle E'_2 E'^*_4 \rangle e^{i(\phi_4 - \phi_2)} + \text{c.c} \right] \\ &+ \left[\langle E'_3 E'^*_4 \rangle e^{i(\phi_4 - \phi_3)} + \text{c.c} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

为了方便书写, 在这里省略了 x_i, y_i 和 t , 在理想情况下, 我们选取 eo 光的累积相位 ϕ_1 作为参考, 则

$$\begin{aligned} \phi_1(x_i, y_i) &= 0, \\ \phi_2(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (x_i + y_i), \\ \phi_3(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{2\Delta}{\lambda f} x_i, \\ \phi_4(x_i, y_i) &= 2\pi \frac{\Delta}{\lambda f} (x_i - y_i), \end{aligned} \quad (5)$$

在偏振光学中, 描述光的偏振态的四个斯托克斯参数和它的振幅之间的关系满足

$$\begin{aligned} \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle &= S_0, \\ \langle |E_x|^2 \rangle &= \frac{1}{2} (S_0 + S_1), \\ \langle |E_y|^2 \rangle &= \frac{1}{2} (S_0 - S_1), \\ \langle E_x^* E_y \rangle &= \frac{1}{2} (S_2 + iS_3). \end{aligned} \quad (6)$$

将 (2), (5) 和 (6) 式代入 (4) 式并化简即可得到像平面上的干涉强度分布为

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) &= \frac{1}{2} S_0(x_i, y_i) + \frac{1}{2} S_1(x_i, y_i) \\ &\quad \times \cos[2\pi\Omega(x_i + y_i)] (1 - 2\sin^2 2\alpha) \\ &\quad - \frac{1}{4} |S_{23}(x_i, y_i)| \cos\{2\pi\Omega(2x_i) \\ &\quad + \arg[S_{23}(x_i, y_i)]\} (1 - 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha) \\ &\quad + \frac{1}{4} |S_{23}(x_i, y_i)| \cos\{2\pi\Omega(2x_i) \\ &\quad - \arg[S_{23}(x_i, y_i)]\} (1 + 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

由上式可以看出在表达式中 $S_0, S_1 \cdot (1 - 2\sin^2 2\alpha), S_{23} \cdot (1 - 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha)$ 以及 $S_{23} \cdot (1 + 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha)$ 分别被调制在不同的通道上, 若系统存在一定大小的半波片失配角, 而在实际解调过程未加以考虑, 直接按照 (1) 式进行解调, 那么解调结果就会与入射光的偏振态存在一定的偏差.

3 半波片失配角的补偿

为了解决半波片角度失配对探测结果所造成的影响, 本文提出在使用萨瓦板型通道调制型偏振成像时, 根据(7)式计算半波片失配角 α , 然后根据计算出来的失配角对解调结果进行修正, 从而得到比较接近入射光实际斯托克斯参数的偏振斯托克斯参数分布图像.

由非偏振目标发出的光强分布 $I_0(x, y)$, 系统前端放置一个起偏器, 则由目标物发出的光透过起偏器后的强度分布变为 $\frac{1}{2}I(x, y)$. 先使起偏器起偏方向位于 0° 方向上, 则进入系统的斯托克斯参数为 $\frac{1}{2}I(x, y) \cdot (1, 1, 0, 0)^T$, 由(7)式可知在FPA上探测到的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \frac{1}{2}S_0(x, y) + \frac{1}{2}S_1(x, y) \\ &\quad \times \cos[2\pi\Omega(x+y)](1 - 2\sin^2 2\alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

再调节起偏器, 使其起偏方向位于 45° 方向, 则进入系统的斯托克斯参数分布为 $\frac{1}{2}I(x, y) \cdot (1, 0, 1, 0)^T$, FPA上探测到的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \frac{1}{2}S_0(x, y) - \frac{1}{4}|S_{23}(x, y)| \cos\{2\pi\Omega(2x) \\ &\quad + \arg[S_{23}(x, y)]\}(1 - 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha). \end{aligned} \quad (9)$$

分别对两次探测结果进行解调, 得

$$\begin{aligned} S_{t1}(x, y) &= \left(\frac{1}{2}I(x, y), \frac{1}{2}I(x, y) \cdot (1 - 2\sin^2 2\alpha), 0, 0 \right)^T, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_{t2}(x, y) &= \left(\frac{1}{2}I(x, y), 0, \frac{1}{2}I(x, y) \cdot (1 - 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha), 0 \right)^T. \end{aligned} \quad (11)$$

分别由(10)式和(11)式可计算出与半波片失配角 α 相关的系数 $A = 1 - 2\sin^2 2\alpha$, $B = 1 - 2\cos 2\alpha \sin 2\alpha$. 实际偏振成像时, FPA上直接采集到如表达式(7)所表示的强度分布结果, 直接解调可得 $S_0(x, y)$, $S'_1 = A \cdot S_1(x, y)$ 和 $S'_{23} = B \cdot S_{23}(x, y)$, 将以上 A 和 B 代入, 即可计算出目标物的偏振斯托克斯参数分布 $S(x, y)$.

4 数值仿真

4.1 系统参数选择

在仿真中我们选用德国映美精公司生产的DMK51 BU02-USB单色CCD相机, 其像元大小为 $4.40 \mu\text{m} \times 4.40 \mu\text{m}$, 成像透镜焦距为16 mm, 使用632.8 nm的光作为系统的适用波长, 萨瓦板使用折射率较大的方解石晶体, 萨瓦板单板厚度为5.32 mm, 载波频率 Ω 为4 pixel/fringe, 系统中半波片的失配角大小为 $\alpha = 0.5^\circ$.

4.2 仿真结果与分析

图2(a)–(d)分别表示系统的输入图像的斯托克斯参数分布, 图像从左向右分为三个部分, 第一部分表示的是水平线偏振光, 第二部分表示部分偏振光, 第三部分表示 45° 的线偏振光. 图2(e)是输入图像经系统调制后在CCD上得到的光强分布, 可以看出不同偏振态的入射光经系统调制之后会形成不同形状的明暗变化的周期性条纹.

抽取输入图像和解调结果中一行像素归一化之后的灰度数据来描绘斯托克斯参数的横向分布情况, 如图3(a)–(d)所示, 其中红色曲线表示输入斯托克斯参数, 蓝色曲线表示直接按照(1)式解调得到的结果, 绿色曲线表示借助半波片失配角进行修正后的解调结果.

从图3(b)–(d)中可以看出, 补偿修正后的 S_1 , S_2 和 S_3 的值相比修正之前更接近输入值, 尤其在 S_2 和 S_3 上表现得更加明显, 其中 S_1 的解调结果准确度在修正后提高了0.06%, S_2 和 S_3 则提高了3.49%, 而图3(a)中的 S_0 所对应的三条曲线基本重合. 这是由于半波片的失配角的大小对 S_0 的调制没有影响, 因此 S_0 始终能够得到比较准确的解调结果, 而成像系统对 S_1 和 $S_{2,3}$ 的调制情况和失配角的大小有关, 且对 $S_{2,3}$ 的影响更加明显, 因此未进行修正的 $S_{2,3}$ 的解调结果就与输入值有较大差别. 仿真结果说明, 该方法可以对解调结果进行有效补偿, 使得解调结果更加精确.

此外, 图3(a)–(d)中的解调后的曲线相比于输入值在边界处的变化比较平缓, 这主要是由于在解调过程中采用频域滤波器造成图像的高频信息丢失, 在实际应用中就会导致成像结果中目标的边界比较模糊的现象.

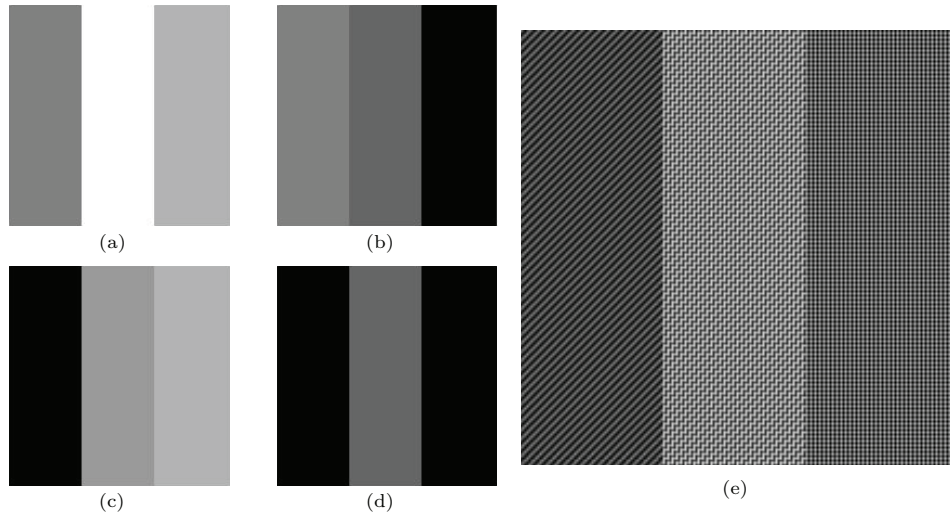


图2 输入斯托克斯参数及 CCD 上的光强分布 (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3 ; (e) CCD 上的光强分布
Fig. 2. Distribution of the Stokes parameter and their intensity in CCD: (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3 ; (e) the intensity in CCD.

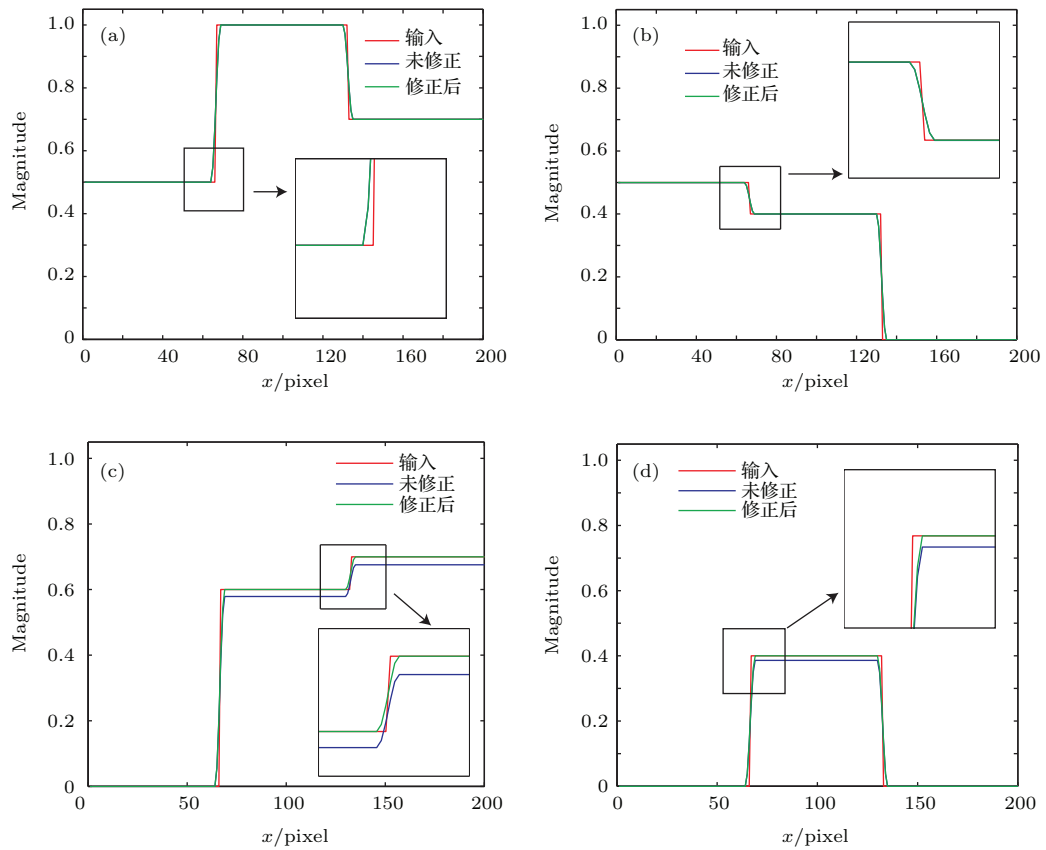


图3 (网刊彩色) 斯托克斯参数沿横向的分布 (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3
Fig. 3. (color online) Transverse distribution of the Stokes parameter: (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3 .

5 结 论

针对萨瓦板偏振成像系统中半波片角度失配导致偏振成像的结果与目标的真实值之间误差较大的问题, 本文研究了半波片角度失配对 FPA 上

采集到的光强分布的影响, 在此基础上提出了计算半波片失配角并据此对解调结果进行补偿的方法. 模拟仿真的结果显示, 在未进行补偿的情况下, 失配角对 S_1 , S_2 和 S_3 的解调结果存在不同程度的影响, 尤其对 S_2 和 S_3 的影响比较明显, 而本文所提

出的补偿方法能够有效地消除 S_1 , S_2 和 S_3 的误差, 从而得到比较准确的斯托克斯参数分布图像. 当失配角 0.5° 时, S_1 的解调结果的准确度在修正后提高了 0.06%, S_2 和 S_3 则提高了 3.49%. 由此可知, 本文提出的补偿方法能够有效消除半波片失配角对偏振成像结果的影响, 尤其能大幅度提升 S_2 和 S_3 成像结果的准确度, 这对于萨瓦板偏振成像的应用具有重要的意义.

参考文献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [2] Harsdorf S, Reuter R, Töneböen S 1999 *SPIE Munich Germany* **3821** 378
- [3] Xie D H, Gu X F, Cheng T H, Yu T, Li Z Q, Chen X F, Chen H, Guo J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 077801 (in Chinese) [谢东海, 顾行发, 程天海, 余涛, 李正强, 陈兴峰, 陈好, 郭靖 2012 物理学报 **61** 077801]
- [4] Lewis G D, Jordan D L, Roberts J 1999 *Appl. Opt.* **38** 3937
- [5] van der Laan J D, Scrymgeour D A, Kemme S A, Dere-niak E L 2015 *Appl. Opt.* **54** 2266
- [6] Kazuhiko O 2003 *Opt. Express* **11** 1510
- [7] Kazuhiko O, Naooki S 2006 *Proc. SPIE* **6295** 629508
- [8] Luo H T, Kazuhiko O, Edward D, Michael K, James S, Eustace L D 2008 *Appl. Opt.* **47** 4413
- [9] Kazuhiko O, Ryosuke S, Masayuki O, Darren M, Eustace L D 2009 *OSA*
- [10] Edward D, Luo H T, Kazuhiko O, Eustace D, James S 2009 *Appl. Opt.* **48** 1663
- [11] Cao Q Z, Zhang C M, Edward D 2012 *Appl. Opt.* **51** 5197
- [12] Naooki S, Satoru O, Katsura O, Masahiro K, Rintaro K, Kazuhiko O 2013 *Proc. SPIE* **8873** 88730M-1

Effect of half wave plate angle mismatch on channel modulating imaging result and its compensation^{*}

Li Hao Zhu Jing-Ping[†] Zhang Ning Zhang Yun-Yao Qiang Fan Zong Kang

(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Shaanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique, Xi'an 710049, China)

(Received 5 February 2016; revised manuscript received 22 April 2016)

Abstract

Polarization imaging technology is a powerful tool in remote sensing, bioscience, or other scientific areas science, and it can extract the polarization information of target effectively. As a novel polarization imaging technology, the channel modulating polarization imaging has been widely investigated in recent years, owing to its prominent advantages of compact, snapshot and full-Stokes acquirable. In the polarization imaging system based on Savart plate, a half wave plate with its optical axis at an angle of 22.5° is used to rotate the vibration direction of each incident light to $\pm 45^\circ$. Thus, the amplitude of the light could be equally divided by the second Savart plate polariscope. Finally, the different components of light will interfere with each other on the focal plane and the target polarization information will be modulated in the interference pattern. Since the intensity distribution of interference pattern is sensitive to the orientation of the half wave plate, a small mismatch angle of half wave plate will lead to a wrong polarization image. In order to solve this problem, we investigate the relationship between the mismatch angle and the image intensity grabbed by focal plane array (FPA) and propose an error eliminating method to improve the accuracy of polarization imaging. We analyze how the mismatch angle α affects the light intensity and deduce the expression of the image obtained by the FPA. According to the expression, the raw image we grabbed directly by the FPA is a superposition of the modulated Stokes images with different carrier frequencies. Compared with the ideal expression, the expression we obtained shows that the channels of Stokes parameter S_1 and $S_{2,3}$ each contain a constant factor which is related to the mismatch angle α . On the basis of this expression, we propose a method to measure the mismatch angle by imaging a target twice, one is behind a polarizer that is oriented at 0° and the other at 45° . Then we can calibrate the system by calculating the mismatch angle through the demodulated images. To image a target with the calibrated system, we just demodulate the raw image obtained by the FPA and then divide the reconstructed stokes images by the constant factor which is determined by α . For a mismatch angle of 0.5° , a computer simulation is conducted. The result shows that through the compensation method, the accuracies of S_1 , S_2 and S_3 can be increased by 0.06%, 3.49% and 3.49%, respectively.

Keywords: polarization imaging, half wave plate, mismatch angle, compensation

PACS: 42.30.-d, 42.25.Ja, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.65.134202

^{*} Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205187) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. xkjc2013008).

[†] Corresponding author. E-mail: jpzhu@xjtu.edu.cn