

通道调制型偏振成像系统的偏振参量重建

强帆 朱京平 张云尧 张宁 李浩 宗康 曹莹瑜

Reconstruction of polarization parameters in channel modulated polarization imaging system

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 130202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.130202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130202>

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

差分收敛法对双原子分子高J值转动谱线的预言

R-branch and Q-branch high rotational spectral lines of diatomic molecules using improved difference converging method

物理学报.2016, 65(7): 070202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070202>

利用 Sagnac 干涉仪实现光子轨道角动量分束器

Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on sagnac interferometer

物理学报.2015, 64(13): 130704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130704>

CO₂ 及其碳同位素比值高精度检测研究

High-precision CO₂ and $\delta^{13}\text{CO}_2$ analysis

物理学报.2013, 62(18): 180203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.180203>

静态计算光谱成像仪图谱反演的关键数据处理技术

Critical data processing technology for spectral image inversion in a static computational spectral imager

物理学报.2013, 62(6): 060203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060203>

基于傅里叶变换红外光谱法 CO₂ 气体碳同位素比检测研究

Carbon isotope ratio analysis in CO₂ based on Fourier transform infrared spectroscopy

物理学报.2013, 62(3): 030202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.030202>

通道调制型偏振成像系统的偏振参量重建*

强帆¹⁾²⁾ 朱京平^{1)†} 张云尧¹⁾ 张宁¹⁾ 李浩¹⁾ 宗康¹⁾ 曹莹瑜³⁾

1)(西安交通大学, 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)

2)(西昌卫星发射中心, 西昌 615000)

3)(北京石油化工学院, 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617)

(2016年1月29日收到; 2016年3月1日收到修改稿)

通道调制型偏振成像系统中, 焦平面上获取的信息需要通过目标偏振参量的重建才能有效提取, 因而重建是目标识别、材料分析、生物医疗等技术进一步应用的前提. 为了实现在非理想情况下通道调制型偏振成像系统的偏振参量精确重建, 需要解决成像系统中电荷耦合器件 (CCD) 采样频率与频谱位置偏移对重建的影响. 本文首先详细分析了频谱不发生混叠的条件: CCD 采样频率应至少为 4 倍基频; 在偏振干涉频谱位置偏移时, 使用最大频谱法确定各个偏振态的载波频率, 通过频移、滤波和傅里叶变换获得目标的偏振重建二维图像; 最后通过计算机模拟仿真与实验分析结合的方法验证该重建方案的可行性与有效性. 模拟与实验结果表明: 改进后的偏振重建法得到的偏振图像与原始输入图像的均方差在 0.001 以下, 峰值信噪比有明显的提高, 且结构相似度可达到 0.9 以上, 表明该方法获得的二维偏振态重建图像精度高, 与理论偏振解调法相比具有很大的优越性. 该工作希望为后续偏振探测与分析进一步的研究提供参考.

关键词: 偏振成像, 傅里叶转换, 频移, 重构

PACS: 02.70.Hm, 07.60.Ly, 42.30.Wb, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.65.130202

1 引言

偏振成像技术是一种基于光电成像器件获取目标景物偏振态信息的技术. 这种技术可同时获取目标的形状、光强及偏振等信息^[1,2], 因而受到了国内外研究者的重视, 在光学遥感、生命科学、军事侦察等领域有十分广泛的应用^[3,4]. 传统偏振成像系统的结构可分为时分型与空分型结构, 其中时分型^[5,6]包括旋转偏振片型、液晶型、声光调制型; 空分型包括分振幅型^[7]、分孔径^[8]、分焦平面型^[9]及通道调制型. 实际应用中常常需要一种能够瞬时获得动态目标偏振态且结构紧凑、成本低廉、制作简单的偏振成像系统, 通道调制型偏振成像系统从原理上能够满足上述需求, 因而成为人们研究的

热点.

通道调制型偏振探测系统的思想是 2003 年日本学者 Oka^[10] 提出的, 2008 年 Luo 等^[11] 对其进行改进, 形成了单色光偏振成像系统, 2012 年 Cao 等^[12] 又进行了结构改进. 这类偏振成像系统焦平面上获取的信息需要通过目标偏振参量的重建才能有效提取. 遗憾的是目前有关采样与偏振参量的重建研究鲜有报道, 仅见胡巧云等^[13] 对理想情况下通道调制型偏振成像系统的偏振重建, 对于偏振参量重建工作中影响较大的干涉条纹采样频率问题及非理想情况下的通道调制型偏振成像系统的偏振重建问题至今尚无深入报道.

针对以上问题, 本文以萨瓦板通道调制型偏振成像系统为例, 通过分析影响偏振态重建的采样问题, 给出了通道调制型偏振成像中不产生混叠的最

* 北京石油化工学院光机电装备技术北京市重点实验室开放课题基金 (批准号: KF2014-01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn

低条纹采样频率; 提出在非理想情况导致的频谱偏移可通过寻找最大频谱法确定各个偏振态的载波频率, 进而利用频移法获得目标频谱的偏振重建方案, 并通过数值模拟与实验相结合的方法进行了重建方案的可行性与有效性验证, 希望为后续偏振探测与分析的进一步研究提供参考.

2 理想偏振系统解调

萨瓦板通道调制型偏振成像系统结构如图 1 所示, 光线依次经过滤波器 (Filter)、萨瓦板 1 (SP1)、22.5° 半波片 (HWP)、萨瓦板 2 (SP2)、45° 检偏器 (A), 之后经由透镜 (L) 出射, 在电荷耦合器件 (CCD) 焦平面阵列上干涉成像. 其光强 I 表示为

$$I(x, y) = \frac{1}{2}S_0(x_i, y_i) + \frac{1}{2}S_1(x_i, y_i) \cos[2\pi\Omega(x, y)]$$

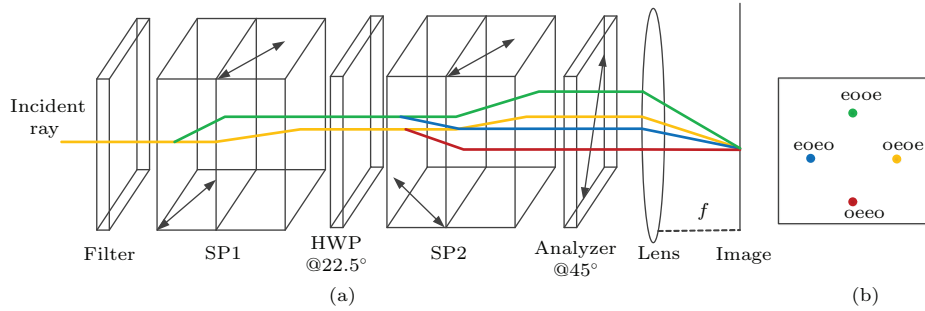


图 1 (网刊彩色) (a) 萨瓦板通道调制型偏振成像仪结构示意图; (b) 入射光通过萨瓦板后四束偏振光的空间分布图
Fig. 1. (color online) (a) Sketch of Savart channel modulated polarization imaging system; (b) the spatial distribution of four polarized light separated by Savart plate.

对 (1) 式进行离散傅里叶变换:

$$F(I) = \frac{1}{2}A_0(f_x, f_y) + \frac{1}{4}A_1(f_x - \Omega, f_y - \Omega) + \frac{1}{4}A_1^*(-f_x + \Omega, -f_y + \Omega) + \frac{1}{8}A_{23}^*(-f_x - 2\Omega, -f_y) + \frac{1}{8}A_{23}(f_x + 2\Omega, f_y) - \frac{1}{8}A_{23}(f_x, f_y - 2\Omega) - \frac{1}{8}A_{23}^*(-f_x, -f_y + 2\Omega), \quad (2)$$

即可获得分别包含 S_0 — S_4 分量的频谱, 如图 2 所示. 式中 (f_x, f_y) 表示频域坐标; * 为对应频谱的共轭; $A_0, A_1, A_{23}, A_{23}^*$ 分别为 $S_0, S_1, S_{23}, S_{23}^*$ 傅里叶变换后的频域形式.

由图 2 可以看出, 当 Stokes 参量不随空间

$$+ \frac{1}{4}|S_{23}(x_i, y_i)| \times \cos[4\pi\Omega x - \arg(S_{23}(x_i, y_i))] - \frac{1}{4}|S_{23}(x_i, y_i)| \times \cos[4\pi\Omega y + \arg(S_{23}(x_i, y_i))], \quad (1)$$

其中 $(x, y), (x_i, y_i)$ 分别为焦平面空间坐标与入射平面空间坐标, 由于在此例中两坐标系统一一对应, 因此可用 (x, y) 代替入射平面坐标; $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示入射光的偏振态, 其中 $S_{23} = S_2 + iS_3, \arg(S_{23})$ 表示 S_{23} 的角度, $\Omega = C \frac{t}{\lambda f}$ 表示通过偏振成像系统后产生的载波频率, 其与萨瓦板厚度 t 成正比, 与入射波长 λ 成反比, 与透镜焦距 f 成反比, 其中 C 和萨瓦板材料相关, 当材料确定时 C 为一常数.

变化时, 频域范围内在 $h = (0, 0), (+\Omega, +\Omega), (-\Omega, -\Omega), (\pm 2\Omega, 0), (0, \pm 2\Omega)$ 处可以清晰地看到 7 个光谱点. 此时, 采用带宽为 Ω 的矩形滤波器分别获取 S_0, S_1, S_{23} 频谱, 通过傅里叶逆变换, 可重构出 S_0 — S_4 :

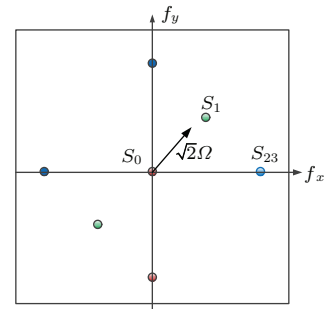


图 2 (网刊彩色) 理想干涉图像频谱示意图
Fig. 2. (color online) Spectrum of ideal interference image.

$$F\{S_0(x, y)\} = A_0(f_x, f_y)$$

$$\leftrightarrow S_0(x, y) = F^{-1}\{A_0(f_x, f_y)\}, \quad (3)$$

$$F\{S_1(x, y) e^{i2\pi\Omega(x, y)}\} = A_1(f_x - \Omega, f_y - \Omega)$$

$$\leftrightarrow S_1(x, y) = F^{-1}\{A_1(f_x - \Omega, f_y - \Omega)\}$$

$$\times e^{-i2\pi\Omega(x, y)}, \quad (4)$$

$$F\{S_{23}(x, y) e^{-i4\pi\Omega x}\} = A_{23}(f_x + 2\Omega, f_y)$$

$$\leftrightarrow S_{23}(x, y) = F^{-1}\{A_{23}(f_x + 2\Omega, f_y)\} e^{i4\pi\Omega x}, \quad (5)$$

$$S_2(x, y) = \text{Re}[S_{23}(x, y)],$$

$$S_3(x, y) = \text{Im}[S_{23}(x, y)], \quad (6)$$

Re 表示取实部, Im 表示取虚部.

3 非理想情况下偏振参量重建

理想情况下偏振参量重建工作较简单, 然而在实际情况, 频谱混叠、萨瓦板厚度不同、半波片角度适配等问题会造成偏振图像谱线形状与位置变化, 使得解调结果产生较大误差, 因此选择合理的采样频率及非理想情况导致的频谱偏移时偏振参量的重建成为研究的关键.

3.1 焦平面阵列采样频率

通道调制型偏振成像系统一般使用焦平面阵列作为成像载体, 这会导致连续函数离散化, 即采样, 对谱线形状产生较大影响, 导致滤波及傅里叶逆变换获得的重建偏振参量产生较大误差.

采样过程中最重要的参数是采样频率, 对应每对干涉条纹所占像素数. 为了保证偏振分辨率, 干涉条纹所占像素要尽量少; 而为了不失真地恢复原

信号, 干涉条纹所占像素要尽量多. 以加载 S_{23} 信息的条纹为例, 其光强表示为

$$T_{S_{23}} = \frac{1}{4}|S_{23}(x, y)| \cos[2\pi f_0 x - \theta(x, y)]$$

$$- \frac{1}{4}|S_{23}(x, y)| \cos[2\pi f_0 x + \theta(x, y)], \quad (7)$$

其中 $\theta(x, y) = \arg[S_{23}(x, y)]$, 选基频 $f_0 = 2\Omega$. 假设采样频率 $f_s = kf_0$, ($k = 2, 3, 4 \dots$), k 表示基频的倍数.

频谱不出现混叠应满足以下条件:

1) 对于同一个载波频率, 两个共轭频谱必须分离 (如图 3 (a) 所示), 即

$$f_0 - \frac{1}{2\pi} \frac{\partial\theta(x, y)}{\partial x} \Big|_{\max} \geq 0; \quad (8)$$

2) 对于相邻的两个频谱岛, 频谱之间不发生混叠 (如图 3 (b) 所示), 即

$$f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{\partial\theta(x, y)}{\partial x} \Big|_{\max}$$

$$\leq f_s - \left(f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{\partial\theta(x, y)}{\partial x} \Big|_{\max} \right). \quad (9)$$

3) $\theta(x, y)$ 随 x 变化不会超过 2π ,

$$0 \leq \left| \frac{\partial\theta(x, y)}{\partial x} \right| \leq 2\pi. \quad (10)$$

根据 (8)–(10) 式可得 $k \geq 4$, 即一对条纹周期至少需要 4 个抽样值才能保证频谱不发生混叠. 又由于分别在 f_y 轴方向与 f_x 轴方向上, S_{23} 的载波频率 $\Omega_{S_{23}}$ 是 S_1 载波频率 Ω_{S_1} 的 2 倍, 即 $\Omega_{S_{23}} = 2\Omega_{S_1}$, 因此 S_1 至少应选取 8 个抽样值每对条纹. 此时系统载波频率

$$\Omega = \Omega_{S_1} = \frac{1}{8} * \frac{1}{\text{pixel}},$$

其中 pixel 指像素尺寸. 如图 4.

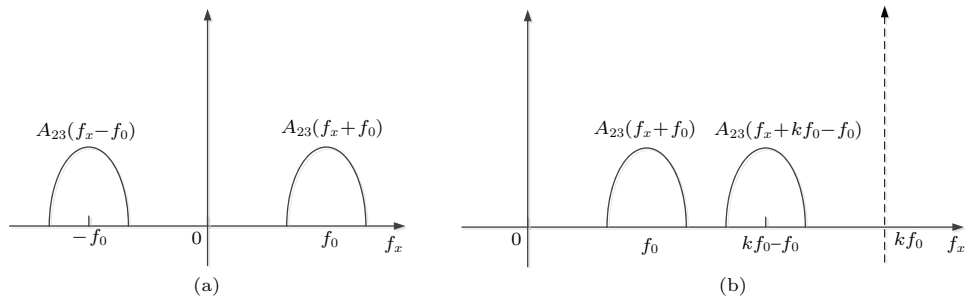


图 3 (a) S_{23} 一维共轭频谱图; (b) S_{23} 相邻频谱岛频谱分布示意图

Fig. 3. (a) 1-D conjugate spectrum of S_{23} ; (b) adjacent “frequency island” of S_{23} .

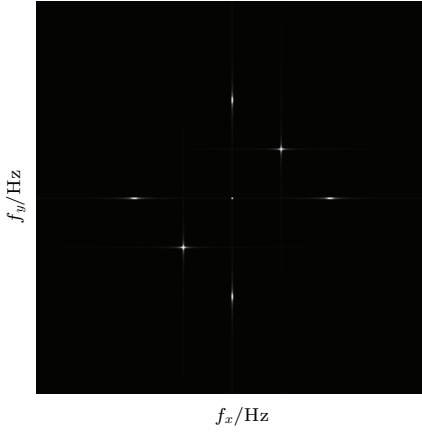

 图4 $N = 256, k = 4$ 时的频谱图

 Fig. 4. Spectrum of ideal interference image when $N = 256$ and $k = 4$.

3.2 非理想偏振信息的重建

实际应用中由于仪器、实验条件、环境因素等限制,例如萨瓦板厚度与理论萨瓦板厚度有误差及半波片角度失配等,会导致偏振图像的频谱产生偏移.由于在制作过程中,萨瓦板厚度会引入半波长的误差,而萨瓦板厚度 t 与载波频率 Ω 成正比,此时载波频率变为 $\Omega' = C \frac{t}{\lambda f} + C \frac{\Delta t}{\lambda f}$, Δt 表示萨瓦板厚度偏移量.通过傅里叶变换可知偏振图像的频谱将会产生线性偏移,当四块萨瓦板晶体厚度都不同时,其频谱偏移为线性偏移的叠加;当半波片角度失配时,则在原有偏振干涉图像中不同方向的干涉条纹上分别乘以了关于失配角 α 的影响因子 $(1 \pm f(\alpha))$,亦使频谱位置产生线性偏移的叠加变化.若理想频谱中载波频率为 Ω_0 而实际载波频率为 Ω 且 $\Omega \neq \Omega_0$.此时重建的偏振态图像为 $S_i e^{\pm i2\pi(\Omega - \Omega_0)}$ 其中 $(i = 1, 2, 3)$,即重建的偏振参量会产生周期性显示的效果.为了获得正确的 Stokes 参量的二维分布图,本文提出通过寻找最大频谱值位置法确定频谱位置,并利用傅里叶变换的频移性质,分别对 S_1, S_{23} 做频移,使其分别位于低频分量位置上,再利用滤波器截取低频分量,进行傅里叶逆变换,最后得到相应参量二维分布.具体步骤包括(图5):

1) 对输入图像 I 进行傅里叶变换;

2) 根据设备参数,获得频域滤波通道大小,以各偏振态频谱为中心,以滤波器大小为区域大小,进行频域区域划分,分别找到区域中最大值对应坐标,获得精确载波频率 $S_0(\Omega_{S_{0x}}, \Omega_{S_{0y}})$,

$S_1(\Omega_{S_{1x}}, \Omega_{S_{1y}}), S_{23}^*(\Omega_{S_{231x}}, \Omega_{S_{231y}})$ 及 $S_{23}(\Omega_{S_{232x}}, \Omega_{S_{232y}})$;

3) 分别对输入光进行频移;

4) 利用低通滤波器分别对频移后的频谱图进行滤波;

5) 进行傅里叶逆变换,结合系数得到输出 Stokes 参量二维图像.

例如,利用傅里叶变换性质,对 S_1 进行频移,对公式两边同乘以相位因子 $e^{-i2\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)}$ 得到:

$$\begin{aligned} & I(x, y) e^{-i2\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)} \\ &= \frac{1}{2} S_0(x, y) e^{-i2\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)} + \frac{1}{4} S_1(x, y) \\ &+ \frac{1}{4} S_1(x, y) e^{-i4\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)} \\ &+ \left\{ \frac{1}{4} |S_{23}(x, y)| \cos[2\pi(\Omega_{S_{231x}}x + \Omega_{S_{231y}}y)x \right. \\ &- \arg(S_{23}(x, y))] \\ &- \frac{1}{4} |S_{23}(x, y)| \cos[2\pi(\Omega_{S_{232x}}x + \Omega_{S_{232y}}y)x \\ &+ \arg(S_{23}(x, y))] \left. \right\} e^{-i2\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)}, \quad (11) \end{aligned}$$

式中 $\Omega_{S_{1x}}, \Omega_{S_{1y}}$ 分别表示 S_1 在 x 轴与 y 轴上的载波频率; $\Omega_{S_{231x}}, \Omega_{S_{231y}}$ 分别表示 S_{23} 沿 x 方向干涉的条纹在 x 轴与 y 轴上的载波频率; $\Omega_{S_{232x}}, \Omega_{S_{232y}}$ 分别表示 S_{23} 沿 y 轴方向干涉的条纹在 x 轴与 y 轴上的载波频率.

通过傅里叶变换得到:

$$\begin{aligned} & F[I(x, y) e^{-i2\pi(\Omega_{S_{1x}}x + \Omega_{S_{1y}}y)}] \\ &= \frac{1}{4} A_1(f_x, f_y) + \frac{1}{2} A_0(f_x + \Omega_{S_{1x}}, f_y + \Omega_{S_{1y}}) \\ &+ \frac{1}{4} A_1(f_x + 2\Omega_{S_{1x}}, f_y + 2\Omega_{S_{1y}}) \\ &+ \frac{1}{8} A_{23}^*(-f_x - \Omega_{S_{231x}} + \Omega_{S_{1x}}, -f_y - \Omega_{S_{231y}} \\ &+ \Omega_{S_{1y}}) + \frac{1}{8} A_{23}(f_x + \Omega_{S_{231x}} + \Omega_{S_{1x}}, f_y \\ &+ \Omega_{S_{231y}} + \Omega_{S_{1y}}) - \frac{1}{8} A_{23}(f_x - \Omega_{S_{232x}} \\ &+ \Omega_{S_{1x}}, f_y - \Omega_{S_{232y}} + \Omega_{S_{1y}}) - \frac{1}{8} A_{23}^*(-f_x \\ &+ \Omega_{S_{232x}} + \Omega_{S_{1x}}, -f_y + \Omega_{S_{232y}} + \Omega_{S_{1y}}). \quad (12) \end{aligned}$$

此时,利用低频滤波器,即可获得 S_1 的频谱,通过傅里叶逆变换从而获得 S_1 的二维空间变化,同理 S_{23} 也可以移动到相应低频位置后进行解调.

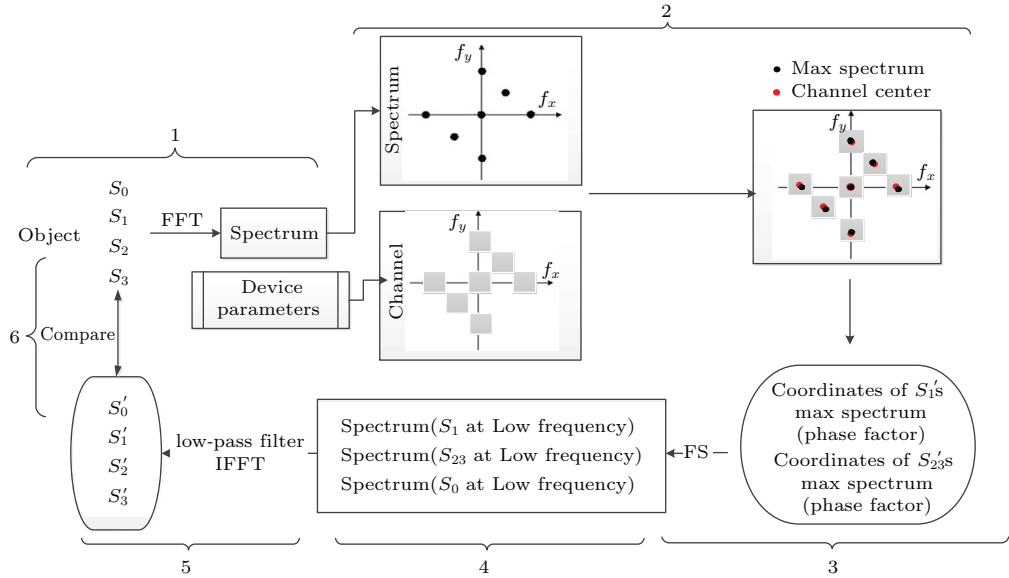


图5 重建步骤示意图

Fig. 5. Step of Stokes parameter reconstruction.

通过频移、滤波、傅里叶逆变换后的低频分量分别为: $\frac{1}{2}S_0(x, y)$, $\frac{1}{4}S_1(x, y)$, $\frac{1}{8}[S_2(x, y) - iS_3(x, y)]$ (或 $\frac{1}{8}[S_2(x, y) + iS_3(x, y)]$), 则各个偏振态可表示为

$$S_0 = F^{-1}[A_0(f_x, f_y)], \quad (13)$$

$$S_1 = F^{-1}[A_1(f_x, f_y)], \quad (14)$$

$$S_2 = \text{real}\{F^{-1}[A_{23}^*(-f_x, -f_y)]\}, \quad (15)$$

$$S_3 = -\text{imag}\{F^{-1}[A_{23}^*(-f_x, -f_y)]\}. \quad (16)$$

4 数字仿真验证

为了验证改进的解调方法优越性, 本文使用 Matlab 进行模拟, 对比理想解调方法与改进后的解调方法.

设探测器像元大小 d 为 $4.75 \mu\text{m} \times 4.75 \mu\text{m}$, 像元数 n 为 512×512 , 由于 S_{23} 对应的采样频率来说, 每对条纹占 4 个像素, 且 $\Omega_{S_{23}} = 2\Omega$, 因此理论中心波长对应的载波频率 $\Omega_0 = \frac{1}{8} \times \frac{1}{4.75 \mu\text{m}}$, 若因误差实际获得的载波频率为 $\Omega = 0.124 \times \frac{1}{4.75} \mu\text{m}^{-1}$, 采用如图 6 所示作为输入图像进行仿真.

利用理论载波频率 Ω_0 进行解调获得图 7(a)—(d) 所示的偏振重建图像, 利用改进法进行解调获得的重建图像如图 7(e)—(h) 所示. 可以看出改进法解调结果明显优于理论解调方法的解调结果.

我们分别利用均方差、峰值信噪比与结构相似度^[14]对理想情况与非理想情况下的解调结果和原始输入图进行了分析. 均方差反映了复原图像与全参考图像之间的全局差异, MSE 越小, 则两幅图像越接近. 使用 (17) 式定量表达:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y) - I'(x, y)]^2, \quad (17)$$

其中 M, N 分别表示图像长和宽; I 为原始图像光强; I' 表示重建图像的像光强度. 表 1 为两种解调方法所获得图像与原始图像的均方差, 可以看出改进后的解调结果明显优于理论解调方法.

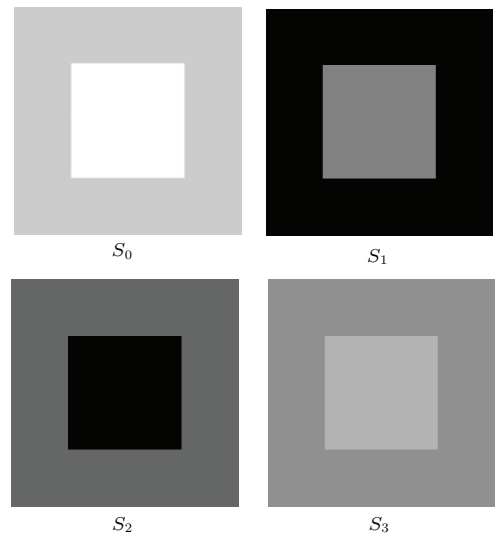


图6 原始输入偏振态

Fig. 6. Original input polarization.

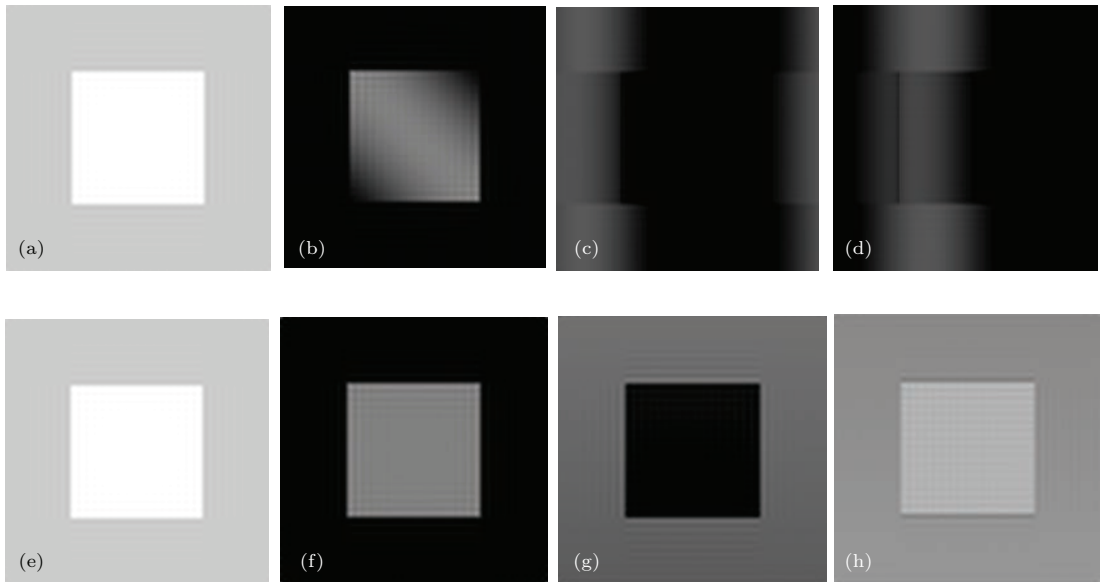


图7 两种解调方法获得的重建图像 (a)—(d) 理论解调方法; (e)—(h) 本文改进法

Fig. 7. Reconstruction images by two methods: (a)–(d) Theory method, (e)–(h) the improve method.

表1 理论解调方法及改进解调方法与原始输入图像均方差

Table 1. The MSE between original polarization and theory demodulation or improved demodulation.

均方差	S_0	S_1	S_2	S_3
$MSE_{理想}$	1.2023×10^{-4}	-0.0126	0.1410	0.4570
$MSE_{改进}$	1.1833×10^{-4}	7.4686×10^{-4}	9.9415×10^{-4}	4.48479×10^{-4}

峰值信噪比是指到达噪音比率的顶点信号, 这里指最大值信号与图像差异间的比率. 使用(18)式定量表达:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE}, \quad (18)$$

其中 L 表示图像中像素的最大灰度值. 表2为两种解调方法所获得图像与原始图像的峰值信噪比结果. 其中除 S_0 的峰值信噪比相似外, 可看出改进后解调结果优于理想解调方法的解调结果, 在 S_2 与 S_3 中尤为明显.

表2 理论解调方法及改进解调方法与原始输入图像峰值信噪比

Table 2. The $PSNR$ between original polarization and theory demodulation or improved demodulation.

峰值信噪比	S_0	S_1	S_2	S_3
$PSNR_{理想}$	201.08	154.60	130.41	118.65
$PSNR_{改进}$	201.25	182.82	179.96	187.14

以上两种评价参数为传统客观评价方法, 但其只考虑了图像之间的整体差异而忽略了局部差异,

尤其是无法检测对人眼较为敏感的图像结构方面的区别. 使用结构相似度 $SSIM$ 可以弥补这一缺陷, 相似度指对图像从结构、亮度及对比度等方面进行评价, 两幅图越接近, 其值越接近于1. 使用(19)式定量表达:

$$SSIM = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)}, \quad (19)$$

其中 $\mu_X\mu_Y$ 分别表示原始图像和重建图像的像素均值, $\sigma_X\sigma_Y$ 表示两幅图像的方差, σ_{XY} 表示两幅图的协方差, C_1, C_2 为较小的常数. 表3为两种解调方法所获得图像与原始图像的相似度, 可以看出改进后的解调结果明显更优.

表3 理论解调方法及改进解调方法与原始输入图像相似度

Table 3. The $SSIM$ between original polarization and theory demodulation or improved demodulation.

相似度	S_0	S_1	S_2	S_3
$SSIM_{理想}$	0.9994	0.8555	0.0289	0.0821
$SSIM_{改进}$	0.9994	0.9777	0.9917	0.9989

5 实验验证与分析

利用如图8所示光学偏振干涉成像实验设备进行实验验证. 探测器选用德国映美精公司生产的DMK41BU02型探测器, 像元数 n 为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$, 像元大小 d 为 $4.75 \mu\text{m} \times 4.75 \mu\text{m}$, 透镜焦距 f 为 25 mm , Savart 偏光镜厚度 t 为 5 cm . 取输入归一化偏振态 S 为 $[1, 1, 0, 0]$. 原始图像及经过实验装置后获得的干涉图像如图9所示.

取 S_1 理想载波频率 $\Omega_0 = 0.160 \times \frac{1}{4.75 \mu\text{m}}$. 实验中, 人为引入误差使得载波频率变为 $\Omega = 0.15901 \times \frac{1}{4.75 \mu\text{m}}$. 利用理论解调方法获得的 S_0, S_1 分别对应于图10中的(a)和(b); 利用寻找最大频谱并进行频移法重建 S_0, S_1 由图10(c)和(d)表示.



图8 (网刊彩色) 通道调制型偏振干涉成像装置
Fig. 8. (color online) Channel modulated polarization interference imager.

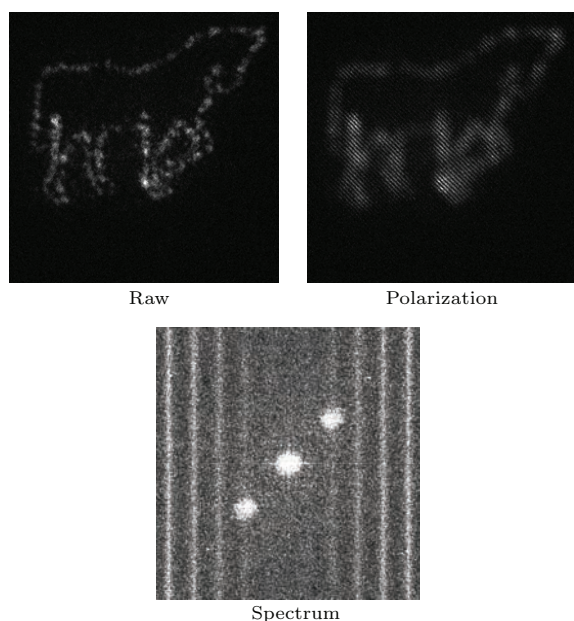


图9 实验原始图像、偏振图像及其频谱图
Fig. 9. Raw image, polarization image and its spectrum.

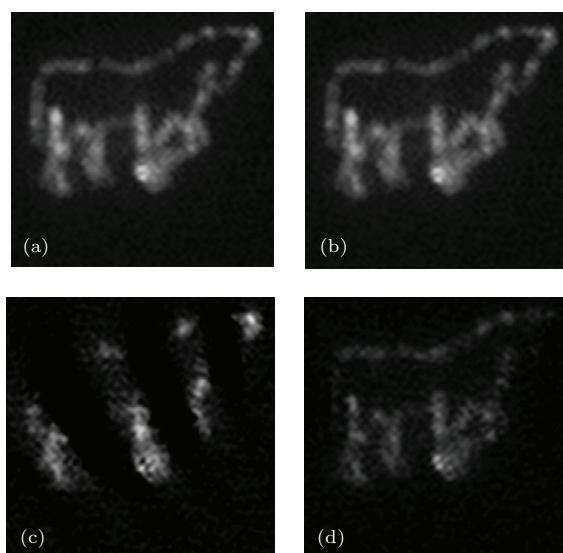


图10 两种方法获得的偏振重建图像 (a), (b) 理论解调方法; (c), (d) 改进的方法
Fig. 10. Reconstruction images by two method: (a), (b) Theory method; (c), (d) the improved method.

由实验设定可知, S_1 偏振态分布应与 S_0 分布相似, 但理论解调法获得的结果明显不理想, 产生了周期性的条纹, 即 S_1 的偏振态图像为 $S_1 \cos[2\pi(\Omega - \Omega_0)]$; 而利用寻找最大频谱法可以精确获得 S_1 的实际载波频率, 进而通过频移与傅里叶逆变换获取准确的 S_1 空间分布. 两种解调方法对 S_0 的重建结果相似, 但在 S_1 重建结果中改进解调方法明显优于理论解调方法.

6 结 论

本文以萨瓦板型通道调制型偏振干涉成像系统为例, 分析了非理想偏振信息的重建及采样问题, 推导出要使频谱不发生混叠, 则焦平面偏振干涉图像中最大频率干涉条纹的分辨率至少为4个像素每对条纹; 在偏振干涉图像的干涉条纹频率可能与理论条纹频率不匹配的情况下, 提出通过寻找最大频谱法确定各个偏振态的载波频率, 利用频移法获得目标频谱的偏振重建方案; 数值模拟分析了非理想情况下偏振干涉图像频谱位置的改变对偏振图像重建的影响, 并采用均方差、峰值信噪比与结构相似度分析了本文提出的改进解调方法相对于理论解调方案的改进效果, 得到改进解调方法获得重建图像与原始图像的均值误差低于0.001, 峰值信噪比明显提高且可将 S_2, S_3 与原始图像相似度由理论解调方案的 <0.1 提高到0.99以上; 最后通

过实验验证了改进的偏振重建方案的可行性与有效性. 此方法可为后续偏振探测与分析进一步的研究提供参考.

参考文献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2008 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [2] Gu X F, Chen X F, Cheng H T, Li Z Q, Yu T, Xie D H, Xu H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070702 (in Chinese) [顾行发, 陈兴峰, 程海天, 李正强, 余涛, 谢东海, 许华 2011 物理学报 **60** 070702]
- [3] Awartani O, Kudenov M W 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 093306
- [4] Cao N W, Liu W Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 61 (in Chinese) [曹念文, 刘文清, 张玉钧 2000 物理学报 **49** 61]
- [5] Egan W G, Johnson W R, Whitehead V S 1991 *Appl. Opt.* **30** 435
- [6] Hou J F, Wu T X, Wang D G, Deng Y Y, Zhang Z Y, Sun Y Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 060701 (in Chinese) [侯俊峰, 吴太夏, 王东光, 邓元勇, 张志勇, 孙英姿 2015 物理学报 **64** 060701]
- [7] Azzam R 1985 *Opt. Lett.* **10** 309
- [8] Pezzaniti J L, Chenault D B 2005 *Proc. SPIE* **44** 515
- [9] Andreau A G, Kalayjian Z K 2002 *IEEE Sens. J.* **2** 566
- [10] Oka K, Saito N 2006 *Proc. SPIE* **6295** 629508
- [11] Luo H, Oka K, Hoog E D, Kudenov M, Schiewgerling J, Dereniak E L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4413
- [12] Cao Q, Zhang C, Zhang J, Kang Y 2014 *Optik* **125** 3380
- [13] Hu Q Y, Yang W F, Hu Y D, Hong J 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0211004 (in Chinese) [胡巧云, 杨伟峰, 胡亚东, 洪津 2015 光学学报 **35** 0211004]
- [14] Yan L L, Li H, Qiu J N, Liang P 2015 *J. Appl. Opt.* 2015 **36** 58 (in Chinese) [闫乐乐, 李辉, 邱聚能, 梁平 2015 应用光学 **36** 58]

Reconstruction of polarization parameters in channel modulated polarization imaging system*

Qiang Fan¹⁾²⁾ Zhu Jing-Ping^{1)†} Zhang Yun-Yao¹⁾ Zhang Ning¹⁾ Li Hao¹⁾
Zong Kang¹⁾ Cao Ying-Yu³⁾

1) (Shaanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique, Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China)

3) (Beijing Area Key Laboratory of Opt-Mechatronic Equipment Technology, Beijing 102617, China)

(Received 29 January 2016; revised manuscript received 1 March 2016)

Abstract

Based on the reconstruction of the polarization parameters in a channel modulating polarization imaging system, the polarization features of the target could be extracted effectively. Considering that the reconstruction of polarization parameters can provide important reference for target recognition, material analysis, remote sensing and bio-medical treatment, the research on accurate reconstruction of polarization parameters is now urgently required. In order to improve the accuracy of polarization parameter reconstruction, we first study the influence of sample frequency of interference fringes on the imaging process. For the same carrier frequency, conjugate spectra are separated and also the spectra are not aliasing for two adjacent spectral lines. It is concluded that to prevent the image spectrum from aliasing, the sample frequency should be at least 4 times the maximum fringe frequency of the polarization interference image. Then we study Stokes parameter reconstruction method when the spectral line positions of interference image are changed by assembling error. Since different Stokes parameters are amplitude modulated at different frequencies, we apply segment filters to split the frequency domain into different regions, and seek for the largest spectrum in corresponding regions. The largest spectrum in different regions can be used to determine the spectral line position of polarization carrier frequency, and the two-dimensional images of the target are rebuilt in sequence by the frequency shifting, spectral filtering, and Fourier inversion transforming. According to the above method, we could obtain an exact polarization rebuilding image when the line position of polarization carrier frequency is modified. Finally, we use the computer simulation and experiment to verify the feasibility and effectiveness of such a rebuilding method. The results demonstrate that the reconstruction of polarization parameters in channel modulating polarization imaging by this rebuilding method is better than by the traditional theoretical rebuilding method. In detail, the mean square error between the reconstruction and original input image could be suppressed to 0.001 while the peak-signal-to-noise ratio is improved and the structural similarity index measurement could be more than 0.9 by utilizing the new rebuilding method. It turns out that the reconstruction method with great superiority can provide a promising reference for further research of channel modulating polarization imaging system.

Keywords: polarization imaging, Fourier transform, frequency shift, reconstruction

PACS: 02.70.Hm, 07.60.Ly, 42.30.Wb, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.65.130202

* Project supported by the Beijing Area Key Laboratory of Opto-Mechatronic Equipment Technology, China (Grant No. KF2014-01).

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