

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*

陈友华^{1)2)3)†} 王召巴¹⁾²⁾³⁾ 王志斌¹⁾³⁾ 张瑞¹⁾²⁾³⁾
王艳超¹⁾²⁾³⁾ 王冠军¹⁾²⁾³⁾

1) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

2) (中北大学信息与通信工程学院, 太原 0360051)

3) (山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

(2012年9月12日收到; 2012年11月13日收到修改稿)

提出了一种基于三弹光调制器的差频偏振调制方法, 并结合声光可调谐滤波技术构成了新型弹光调制型成像光谱偏振探测仪 (photo-elastic modulator-based imaging spectro-polarimeter, PEM-ISP). 介绍了 PEM-ISP 及三弹光差频偏振调制方法的基本工作原理, 并从 PEM-ISP 的探测原理出发, 通过分析和计算 PEM-ISP 的 Mueller 矩阵, 推导出了相应的偏振测量公式; 通过仿真及实验验证了三弹光差频偏振调制方法的可行性和准确性; 最后分析了探测积分步长、采样间隔的选取对偏振测量的影响, 对入射视场角、相位延迟幅值等因素所带来的测量误差进行了初步分析. 结果表明, 1% 的相位延迟量误差带来的线偏振度 DoLP 误差 $< 0.6\%$. 本研究为新型 PEM-ISP 的遥感探测以及 Stokes 参量的反演的进一步工程化实现提供了必要的理论依据.

关键词: 偏振调制, 三弹光调制器, 差频, 成像光谱偏振仪

PACS: 07.60.Fs, 42.25.Ja, 02.10.Yn, 78.20.hb

DOI: 10.7498/aps.62.060702

1 引言

成像光谱偏振仪^[1-3] (imaging spectro-polarimeter, ISP) 能够将目标空间信息、光谱信息和偏振信息融于一体, 可增加光学探测的信息量, 提高对目标的探测和识别能力, 在工农业、环境资源、生物医学、大气、天文等领域^[4-10] 具有重要的应用价值. 对于 ISP 而言, 偏振测量的精度会对探测对比度、散射消除效果、目标特征信息提取等产生直接影响^[11]. 现有的测量方法是使待测光通过一系列随时间周期性调制 (机械转动或相位延迟) 的光学元件, 由光电探测器测量透射光的光强, 对输出的电信号做傅里叶

分析, 得出相应偏振态的 Stokes 参量^[12-14], 其中, 基于弹光调制器^[15] (photo-elastic modulator, PEM) 的偏振测量方法^[16,17] 具有测量精度高、光谱范围宽、入射孔径大、视场角宽、稳定性好等优点^[18-21], 由此构成的 PEM-ISP 在高精度偏振成像方面也具有较高的潜力^[22,23]. 但由于 PEM 的偏振调制频率较高 (数十到数百 kHz), 使得采用阵列探测器进行偏振信息获取存在一定的困难^[24]. 为此研究者采取了多种解调办法, 如: 1) 采用额外两组 PEM 配合分光元件的光学同步解调法^[25], 该方法需要较多的光学元件, 因而增加了光学系统的复杂度; 2) 电学同步解调法^[26], 即将 CCD 上每 4 排像元作为一组探测单元, 通过同步掩膜的办法让每组探测单元中的每排像元一次只获得四

* 国家自然科学基金仪器专项基金 (批准号: 61127015)、国际科技合作项目 (批准号: 2012DFA10680) 和山西省国际科技合作项目 (批准号: 2010081038) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenyl110512@163.com

分之一偏振调制周期的信号,最后通过数据融合技术进行解调,该方法相当于提高了探测器的积分速度,但电学系统复杂.

为克服上述缺点,本文提出了一种基于三弹光调制器 (triple-photoelastic-modulator-based) 的差频偏振调制方法,该方法将三 PEM 分别工作在数值略有差异的三个频率 ω_1 , ω_2 和 ω_3 上,以对偏振光进行差频调制,并产生载有被测偏振信息的低频调制分量 ($0, \omega_1-\omega_2, 2\omega_1-2\omega_3$),再通过相应的锁相放大电路,就可以一次测量获得 Stokes 矢量中的 S_0, S_1 和 S_2 ,该方法很好地保留了原有弹光调制偏振测量技术的优点,而且调制后的光电流频率下降了 2—3 个数量级 (10—500 Hz),可与普通阵列探测器实现较好匹配.

2 新型 PEM-ISP 基本原理

项目组设计的 PEM-ISP 光路图如图 1 所示.采

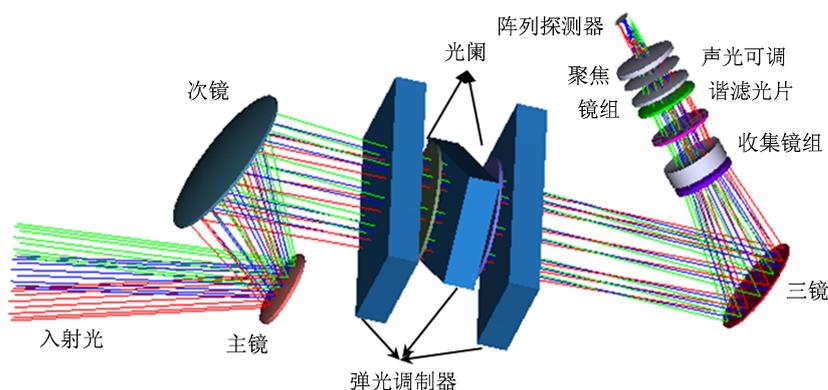


图 1 新型 PEM-ISP 光路图

3 三弹光差频偏振调制技术

3.1 实验装置及基本原理

三弹光差频调制偏振测量实验装置如图 2 所示. 三组 PEM 的调制频率有微小差异,快轴角度分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和 0° ,光源发出的部分偏振光经过 3 组 PEM 联合调制后,由 45° 检偏器检偏,并由探测器收集. 被测光由波长为 633 nm 的固体激光器发出,并首先经过起偏器 P_1 ,通过调节起偏角度为 22.5° ,将被测光的归一化偏振分量调制为 $S_0 = 1.0, S_1 = 0.707, S_2 = 0.707, S_3 = 0$. 该完全线偏振光依次通过 PEM1, PEM2, PEM3, 并被其进行偏振调制,实验采用的 PEM 均为美国 HINDs Instruments, Inc. 制造的 II/ZS50 型,并由 FPGA 作为总体信号输出源,

用的反射式成像光学系统具有波长范围宽、透过率高、色差小、光路简单、对鬼像不敏感以及具有较稳定偏振性能等特点^[27],一定程度上降低了系统本身的偏振测量的影响;三弹光差频调制偏振测量元件由三组弹光调制器构成,并将其放置在次镜和三镜之间,从而不会对系统视场角产生太大限制,并可减少仪器偏振特性带来的测量误差^[28],三组 PEM 分别工作在数值略有差异的三个频率上,从而产生相应的差频信号对偏振光进行差频调制,并产生载有被测偏振信息的低频调制分量;AOTF 作为色散元件放置在三镜之后,既可保证入射进 AOTF 的光束角度在合理范围之内,同时由于经 AOTF 后的 1 级衍射光具有偏振特性,还起到了检偏作用^[29]. 通过同步控制技术,在一次偏振调制周期内,AOTF 固定在某一个探测波段,当 AOTF 完成一次全波段调谐后,系统完成对目标的图像、光谱和偏振信息的测量.

以保证三者工作频率及相位的稳定性. 探测器采用 Thorlab 公司生产的光电探测器,积分时间 > 1 ms,可降低偏振调制中高频项对测量信号的影响,并由 National Instruments 生产的 PXIe-5122 高速数据采集卡完成数据采集、积分、去噪及锁相等处理工作.

根据矩阵光学的基本原理^[30],当光束通过该系统后,其 Stokes 分量的变化可用 Muller 矩阵表述为

$$S' = M_0 M_1 M_2 M_3 S, \quad (1)$$

其中 $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 为被测光的 Stokes 参量, $S' = (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3)^T$ 为经调制后光的 Stokes 参量, M_0, M_1, M_2 和 M_3 分别表示检偏器, PEM1, PEM2 和 PEM3 所对应的 Muller 矩阵,

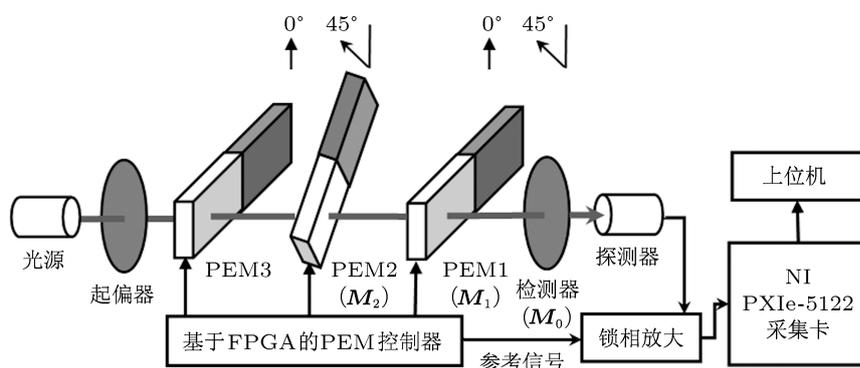


图2 三弹光差频偏振调制技术实验装置图

$$\begin{aligned}
 M_0 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 M_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta_1) & -\sin(\delta_1) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta_1) & \cos(\delta_1) \end{pmatrix}, \\
 M_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_2) & 0 & -\sin(\delta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\delta_2) & 0 & \cos(\delta_2) \end{pmatrix}, \\
 M_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta_3) & -\sin(\delta_3) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta_3) & \cos(\delta_3) \end{pmatrix}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中, $\delta_i = \delta_{i0} \sin(\omega_i t)$ ($i = 1, 2, 3$), 是弹光调制相位延迟量, δ_{i0} 是相位延迟幅值, 将 (2) 式代入 (1) 式可得探测器获得的光强 I' :

$$\begin{aligned}
 I' &= \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 \sin(\delta_1) \sin(\delta_2) \\
 &+ \frac{1}{2} S_2 [\cos(\delta_1) \cos(\delta_3) \\
 &- \sin(\delta_1) \cos(\delta_2) \sin(\delta_3)] \\
 &+ \frac{1}{2} S_3 [\cos(\delta_1) \sin(\delta_3) \\
 &+ \sin(\delta_1) \cos(\delta_2) \cos(\delta_3)]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

对 (3) 式进行 Bessel 展开得^[31]

$$\begin{aligned}
 I' &= \frac{1}{2} S_0 + S_1 \sum_{m_1} \sum_{m_2} J_{m_1}(\delta_{10}) J_{m_2}(\delta_{20}) \\
 &\times \cos[(m_1 \omega_1 \pm m_2 \omega_2) t] + S_2 \left\{ \sum_{n_1} \sum_{n_2} P J_{n_1}(\delta_{10}) \right. \\
 &\times J_{n_2}(\delta_{30}) \cos[(n_1 \omega_1 \pm n_2 \omega_3) t] \\
 &- 2 \sum_{m_1} J_{m_1}(\delta_{10}) \sin(m_1 \omega_1 t) \\
 &\times \left. \sum_n \sum_m J_n(\delta_{20}) J_m(\delta_{30}) \sin[(n \omega_2 \pm m \omega_3) t] \right\} \\
 &+ S_3 \left\{ \pm \sum_{n_1} \sum_{n_2} J_{n_1}(\delta_{10}) J_{n_2}(\delta_{30}) \right. \\
 &\times \sin[(n_1 \omega_1 \pm n_2 \omega_3) t] \\
 &+ 2 \sum_m J_m(\delta_{10}) \sin(m \omega_1 t) \sum_{n_1} \sum_{n_2} P J_{n_1}(\delta_{20}) \\
 &\times \left. J_{n_2}(\delta_{30}) \cos[(n_1 \omega_2 \pm n_2 \omega_3) t] \right\}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中 m 为奇数, n 为偶数, $J_x(y)$ 是对应 y 下的第 x 级 Bessel 函数, 当 $n_1 = n_2 = 0$ 时, $P = 1/2$, 其他情况 $P = 1$.

一般而言, PEM 的工作频率都在数十 kHz 到数 MHz 之间, 因此, (4) 式中角频率为 $n(\omega_i - \omega_j)$ 和 $m(\omega_i - \omega_j)$ (q 其中 i 与 j 取 1, 2, 3, 且 $i \neq j$) 属于低频, 可由普通阵列探测器获得, 而其余频率都往往高达几百 kHz, 经过探测器积分后, 强度基本归零, 且高频部分并不会提供偏振分量的更多信息, 因而探测器获得的信号可近似为

$$\begin{aligned}
 I' &\approx \frac{1}{2} S_0 + S_1 \sum_m J_m(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \cos[m(\omega_1 - \omega_2) t] \\
 &+ S_2 \sum_n P J_n(\delta_{10}) J_n(\delta_{30}) \cos[n(\omega_1 - \omega_3) t]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

以 PEM 的驱动信号为参考信号, 通过锁相放大技术, 在低频分量中解析直流分量、角频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 分量的光强幅值就可以求得 S_0, S_1 和 S_2 :

$$\begin{cases} I'_{dc} = \frac{1}{2}(S_0 + J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})S_2), \\ I'_{\omega_1 - \omega_2} = J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})S_1, \\ I'_{2(\omega_1 - \omega_3)} = J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})S_2, \end{cases} \quad (6)$$

其中 I'_{dc} , $I'_{\omega_1 - \omega_2}$ 和 $I'_{2(\omega_1 - \omega_3)}$ 分别表示探测信号在直流分量、频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 的分量和频率为 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 的分量的幅值, 由 (6) 式就可以求得 S_0, S_1 和 S_2 如 (7) 式:

$$\begin{cases} S_0 = 2 \left[I'_{dc} - \frac{J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})I'_{2(\omega_1 - \omega_3)}}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} \right], \\ S_1 = \frac{I'_{\omega_1 - \omega_2}}{J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})}, \\ S_2 = \frac{I'_{2(\omega_1 - \omega_3)}}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})}. \end{cases} \quad (7)$$

由上述推导可知, 在一次测量中, 该调制方法可产生载有被测偏振信息的低频调制分量 ($0, \omega_1 - \omega_2, 2\omega_1 - 2\omega_3$), 通过相应的锁相放大电路, 就可以一次测量获得 Stokes 矢量中的 S_0, S_1 和 S_2 .

3.2 误差分析

系统误差来源主要从以下三个方面分析讨论:

- 1) 探测器的采样方式和积分步 S 长造成的影响;
- 2) 最大相位延迟值的偏差造成的测量误差;
- 3) 收集光的入射角带来的测量误差.

首先对相应的阵列探测器如 CCD 相机的信号采集方式进行了仿真模拟, 并对积分步长的选取对探测信号的影响进行了初步分析, 具体如下.

定义一个偏振调制周期时间为 t_{frame} , 即为一帧图像, 每经过一次采样即产生一副帧 \tilde{t}_n , t_0 为探测器工作的延时, 为了通过阵列探测器获得较好的低频调制信号, 并尽可能避免高频成分的干扰, 需要合理选择积分步长、采样间隔等参数.

如图 3 所示, t_{sample} 为一次完整的采样时间, t_{int} 为积分时间, t_{read} 为数据转移时间, 并有 $t_{sample} \geq t_{int} + t_{read}$. 在本文所给的例子中, $t_{frame} = 50$ ms, 高频项 $f_h > 50$ kHz, 对应的 $t_h < 20$ μ s, 而需要的低频信号 $f_l < 1$ kHz, 对应的 $t_l > 1$ ms. 为保证有效的滤除高频, t_{int} 应远大于 20 μ s, 同时根据奈

奎斯特采样定理, t_{int} 还应小于最低频信号周期的一半, 对于本例, 最低频率应为 $(\omega_1 - \omega_2)/2\pi = 400$ Hz, 则 $t_{int} < 1.25$ ms. 图 4 是将 t_{int} 分别取为 0.1 ms, 0.8 ms 得到的结果, 可以看出, 虽然在 $t_{int} = 0.1$ ms 时的高频噪声干扰很大, 但需要的低频包络曲线依然很明显, 因而在实际操作时, 通过设定适当的积分步长, 再配合低通滤波器、锁相或者 FFT 等手段均可消除高频噪声的干扰.

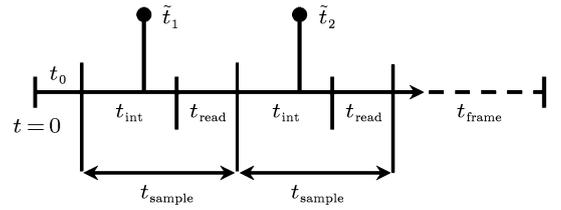


图 3 帧间采样及积分间隔示意图

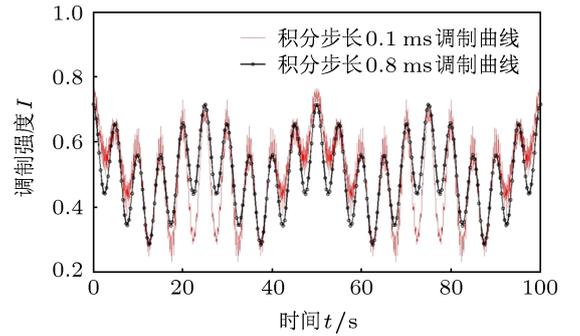


图 4 积分步长的选取对信号采集的影响

其次, 在实际工程应用中, 由于驱动电压等因素, 三组 PEM 的 δ_0 并不会严格与预想情况一致, 往往存在一定的偏差, 根据误差分析原理及 (6) 式可得:

$$\begin{aligned} \Delta I'_{\omega_1 - \omega_2} &= S_1 \left(J_1(\delta_{20}) \frac{dJ_1(\delta_{10})}{d\delta_{10}} \Delta\delta_{10} \right. \\ &\quad \left. + J_1(\delta_{10}) \frac{dJ_1(\delta_{20})}{d\delta_{20}} \Delta\delta_{20} \right), \\ \Delta I'_{2(\omega_1 - \omega_3)} &= S_2 \left(J_2(\delta_{30}) \frac{dJ_2(\delta_{10})}{d\delta_{10}} \Delta\delta_{10} \right. \\ &\quad \left. + J_2(\delta_{10}) \frac{dJ_2(\delta_{30})}{d\delta_{30}} \Delta\delta_{30} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

则 S_1 与 S_2 的相对误差公式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S_1}{S_1} &= \frac{1}{J_1(\delta_{10})} \left| \frac{dJ_1(\delta_{10})}{d\delta_{10}} \right| \Delta\delta_{10} \\ &\quad + \frac{1}{J_1(\delta_{20})} \left| \frac{dJ_1(\delta_{20})}{d\delta_{20}} \right| \Delta\delta_{20}, \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta S_2}{S_2} = \frac{1}{J_2(\delta_{10})} \left| \frac{dJ_2(\delta_{10})}{d\delta_{10}} \right| \Delta\delta_{10} + \frac{1}{J_2(\delta_{20})} \left| \frac{dJ_2(\delta_{30})}{d\delta_{30}} \right| \Delta\delta_{30}. \quad (9)$$

假设三组 PEM 的 δ_0 均相等, 且存在 1% 的偏差 $\Delta\delta_0$, 根据 (9) 式, 该偏差导致的偏振测量误差随 δ_0 的变化关系如图 5 所示: 可以看出, 对于不同的 δ_0 , 1% 的 δ_0 偏差所引起的最大偏振测量误差 $\Delta S_1 < 0.6\%$, $\Delta S_2 < 0.4\%$, 通过选取合适的 δ_0 , 其误差还可以更小, 比如 $\delta_0 = 1.84$ 时, S_1 的测量误差基本为零, $\delta_0 = 3.05$ 时, S_2 的测量误差基本为零. 这是因为此时对应的 Bessel 系数 $J_1(\delta_0)$ 或者 $J_2(\delta_0)$ 恰好处于变化量最小的波峰处, 因此选择适当的 δ_0 , 对降低测量误差很有帮助.

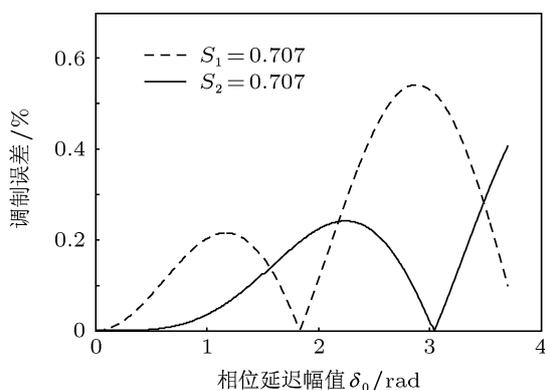


图 5 相位延迟误差导致的偏振测量误差仿真图

最后, 在图 1 所示的三反射光学系统设计中, 次镜和三镜之间的光束呈收缩趋势, 光束进入 PEM 时存在一定的入射角度, 因而在进过 PEM 调制时, 必然有相位延迟幅值 δ_0 的误差. 相对于其他偏振测量器件而言, PEM 的视场角较大, 且其相位延迟量与视场角关系满足 $1/\cos(\theta)$ [29], θ 为视场角, 如图 6(a) 所示, 在 $\pm 20^\circ$ 入射角的情况下, δ_0 的归一化值依然可以大于 0.974, 此时的 $\Delta\delta_0 = 2.6\%$. 图 6(b) 给出了偏振测量误差随入射角的变化情况, 可以看出, 其对应的偏振测量误差 $\Delta S_1 < 0.6\%$, $\Delta S_2 < 0.5\%$. 另外, 对于整个系统而言, 由于 PEM 随入射角的调制效率变化属于已知参量, 因而该误差可通过后续的修正或角度补偿得到消除 [32-34].

3.3 实验及仿真结果对比与分析

本实验主要验证三弹光差频偏振调制技术的正确性, 以及相位延迟量误差对偏振测量精度的影

响, 根据图 2 所示实验装置, 将三组 PEM 的工作频率分别调节为 $f_1 = 50.040$ kHz, $f_2 = 49.920$ kHz 和 $f_3 = 50.000$ kHz, 如果调节三组 PEM 的相位延迟幅值 $\delta_{10} = \delta_{20} = \delta_{30} = \pi$, 则被测光经过偏振调制系统后, 对频率 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 进行 FFT 变换, 可得到对应的频域波形如图 7(a) 所示.

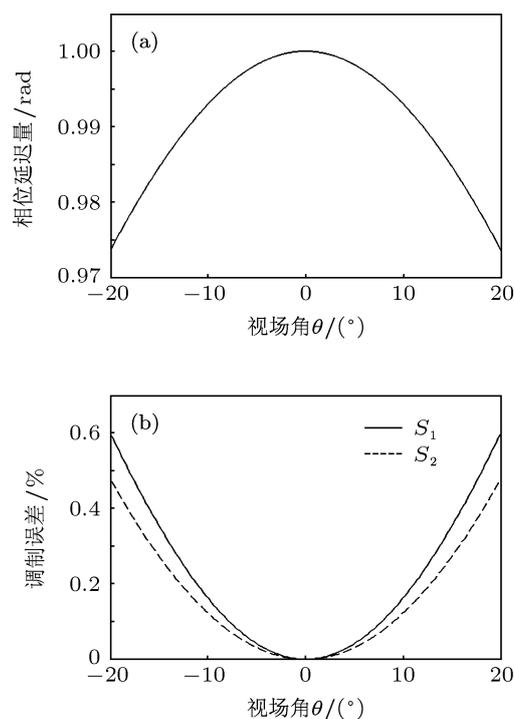


图 6 视场角对偏振测量精度的影响 (a) 相位延迟量与视场角关系曲线; (b) 调制误差与视场角关系曲线

从频域图中可以看到直流分量、差频信号 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 对应的 80 和 120 Hz 频率成分, 以及它们的倍频信号成分; 通过锁相电路对 80 和 120 Hz 频率进行锁相输出, 亦可得到图 7(b) 所示时域图形; 另外, 如果我们将实验的初始条件代入 (4) 式进行数值仿真, 可得图 7(c) 中灰色部分曲线所示调制曲线, 该部分包含高频成分, 再通过设定适当步长的积分运算, 即可得到图 7(c) 中的黑色曲线, 可以看出, 该曲线是频率分别为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 的 S_1 与 S_2 的叠加曲线, 且图 7(b) 和 (c) 的曲线符合情况较好.

实验采用的三组 PEM 的相位延迟幅值不确定度 $\Delta\delta < 2\%$ [35], 根据图 7(a) 给出的 I'_{dc} , $I'_{(\omega_1 - \omega_2)}$, $I'_{2(\omega_1 - \omega_3)}$ 和 (7) 式, 可以计算出 Stokes 参量为 $S_0 = 0.9911$, $S_1 = 0.6929$, $S_2 = 0.6965$, 归一化后有 $S_0 = 1.0$, $S_1 = 0.6992$, $S_2 = 0.7028$, 其相对误差 $\Delta S_1 < 1.1\%$ (理论值 $< 0.96\%$), $\Delta S_2 < 0.6\%$ (理论值 $< 0.12\%$), S_2 的实测误差与理论值出入较大的主要

原因在于进行归一化时, S_0 的测量误差实质上已累计进 S_2 中, 因此实测的 ΔS_2 不仅包含 $I'_{2(\omega_1-\omega_3)}$ 的测量误差, 还包括了 I'_{dc} 的测量误差.

根据线偏振度 (degree of the linear polarization, DoLP) 误差公式

$$\Delta \text{DoLP} = \sqrt{\left(\frac{S_1}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}\right)^2 \Delta S_1^2 + \left(\frac{S_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}\right)^2 \Delta S_2^2}, \quad (10)$$

代入以上数据可得 $\Delta \delta = 1\%$ 对应的 $\Delta \text{DoLP} < 0.51\%$, 如果令相位延迟幅值 $\delta_{10} = \delta_{20} = \delta_{30} = \pi/2$, 则可计算出相应的归一化 Stokes 参量为 $S_0 = 1.0$, $S_1 = 0.7039$, $S_2 = 0.7021$, 相对误差 $\Delta S_1 < 0.4\%$ (理论值 $< 0.26\%$), $\Delta S_2 < 0.7\%$ (理论值 $< 0.26\%$), $\Delta \delta = 1\%$ 时, 对应的 $\Delta \text{DoLP} < 0.28\%$.

表 1 给出了在上述实验条件下, 令相位延迟量 $\delta_{10} = \delta_{20} = \delta_{30}$ 等于不同值情况下的偏振实测数据及测量误差分析.

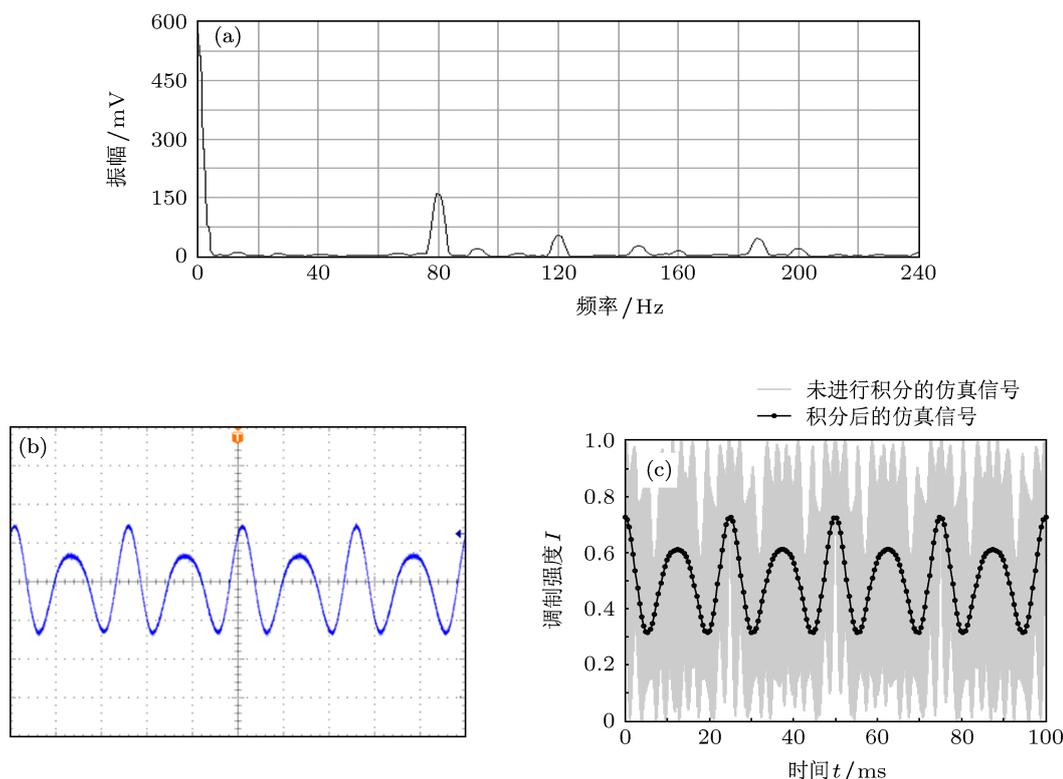


图 7 三弹光差频偏振调制技术实验及仿真图 (a) 频谱; (b) 示波器信号; (c) 仿真信号

表 1 不同相位延迟幅度下的测量数据及测量误差

δ/rad	测量信号强度/mV			归一化 Stokes 参量值			$\Delta \text{DoLP}/\%$
	I'_{dc}	$I'_{(\omega_1-\omega_2)}$	$I'_{2(\omega_1-\omega_3)}$	S_0	S_1	S_2	
π	563.91	56.37	163.21	1	0.6992	0.7028	< 0.51
0.85π	560.15	142.66	153.62	1	0.6990	0.7021	< 0.57
0.75π	577.01	126.60	196.66	1	0.7045	0.7026	< 0.48
0.5π	587.82	224.3	43.99	1	0.7039	0.7021	< 0.28
0.4π	508.23	184.5	24.03	1	0.7047	0.7030	< 0.23

根据表 1 的实测数据和图 5 的误差分析理论可以看出, 对于三弹光差频偏振调制技术, 1% 的相位延迟量误差, 带来的 DoLP 误差 $< 0.6\%$, 甚至更低, 而在旋转波片法中, 1% 的相位延迟量误差带来的偏

振测量误差典型值为 3%^[36]. 这除了 PEM 本身的优点影响外, 根据 (7) 式可以看出, 与 S_1 和 S_2 相关联的系数分别是 Bessel 系数的乘积 $J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})$ 和 $J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})$, 因而, 相位延迟量 δ_0 的一些偏差, 通

过乘积之后会大大降低,这也是三弹光差频偏振调制技术的特点之一。

另外,从表 1 还可以看出,不同 δ 时的 Bessel 系数值也不尽相同,因而相应的信号强度也不一样,例如将 δ 设为 0.3π 或者更小时,虽然此时的理论误差可以非常小,但 $I'_{2(\omega_1-\omega_3)}$ 频率分量则会因为幅值太小而无法测量,因此为保证测量的最佳效果,需综合考虑探测灵敏度与测量误差的影响。

4 结论

本文简单介绍了 PEM-ISP 的探测原理,对提出的基于三弹光调制器的差频偏振调制方法进行

了相应的理论分析和公式推导,给出了调制信号强度、差频频率及相位延迟量之间的关系,并对偏振测量精度进行了分析,给出了测量误差范围.通过对探测积分步长、采样间隔的选取以及偏振测量误差的影响因素分析及实验表明,差频频率的大小、相位延迟幅值的合理选择对于最终的 Stokes 参量的反演精度具有非常重要的作用,且该方法在高精度偏振反演方面具有很高的潜力.本研究可为弹光调制偏振测量理论的发展,新型 PEM-ISP 的工程化提供基础理论指导,对以高偏振测量精度、大视场角等为关键参数的成像光谱偏振遥感技术的应用将具有重要科学意义与实用前景。

-
- [1] Joseph S T, Dennis L G, David B C, Joseph A S 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [2] Zhu B H, Zhang C M, Jian X H, Zeng W F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090701 (in Chinese) [祝宝辉, 张淳民, 简小华, 曾文锋 2012 物理学报 **61** 090701]
- [3] Wang X Q, Xiang L B, Huang M, Jing J J 2011 *Spectrosc. Spect. Anal.* **31** 1968 (in Chinese) [王全新, 相里斌, 黄旻, 景娟娟 2011 光谱学与光谱分析 **31** 1968]
- [4] Frank C, Jong W, Klamer S 2002 *Opt. Eng.* **41** 1021
- [5] Hasekamp O P, Landgraf J 2007 *Appl. Opt.* **46** 3332
- [6] Ford K B, Michael R D 2001 *Opt. Express* **9** 444
- [7] Kurosaki H 2007 *Adv. Space Res.* **39** 185
- [8] Otto P H, Jochen L 2007 *Appl. Opt.* **46** 3332
- [9] Jones H S, Iannarilli J F, Kehahian L P 2004 *Opt. Express* **12** 6559
- [10] Scharmer G B, Narayan G, Hillberg T 2008 *Astrophys. J.* **689** L 69
- [11] Mahler A B 2010 *Ph. D. Dissertation* (Arizona: the University of Arizona)
- [12] 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, 杜娟 2008 物理学报 **57** 7565]
- [13] 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, 郭婧 2012 物理学报 **61** 077801]
- [14] Zhang C M, Ai J J, Ren W Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 7565
- [15] Kemp J C 1969 *J. Opt. Soc. Am.* **59** 950
- [16] Liu Y W, Jones G A, Peng Y, Shen T H 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 1
- [17] Guan W, Jones G A, Liu Y W, Shen T H 2008 *Appl. Phys.* **103** 043104
- [18] Keller C U, Povel H, Stenflo J O 1994 *Proc. SPIE* **2265** 222
- [19] Gandorfer A M, Povel H P, Steiner P 2004 *Astron. Astrophys.* **422** 703
- [20] Ramelli R, Balemi S, Bianda M 2010 *Proc. SPIE* **773** 5
- [21] Christian T, Schmid H M, Anthony B 2008 *Proceedings of Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II Marseille, France June 23, 2008* **7014** 70143F
- [22] Diner D J, Davis A B, Hancock B 2007 *Appl. Opt.* **46** 8428
- [23] Diner D J, Davis A B, Hancock B 2010 *Appl. Opt.* **49** 2929
- [24] Candorfer A M, Povel H P 1997 *Astron. Astrophys.* **328** 381
- [25] Stenflo O J 1984 *Appl. Opt.* **23** 1267
- [26] Povel H 1995 *Opt. Eng.* **34** 1870
- [27] Mahler A B, Chipman R 2011 *Proc. SPIE* **6676** 667601
- [28] Kuldkepp M, Hawkes N C, Rachlew E 2005 *Appl. Opt.* **44** 5899
- [29] Katrašnik J, Pernuš F, Likar B 2010 *Appl. Spectroscopy* **64** 1265
- [30] Theocaris P S, Gdoutos E E 1979 *Matrix Theory of Photo Elasticity* (Vol.2) (Berlin: Springer-Verlag)
- [31] Wei G, Grenville A J, Liu Y W, Shen T H 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 043104
- [32] Wang B, List J 2005 *Proc. SPIE* **5888** 436
- [33] Zhang C M, Liu N, Wu F Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 949 (in Chinese) [张淳民, 刘宁, 吴福全 2010 物理学报 **59** 949]
- [34] Wu J F, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034201
- [35] Kemp J C 2010 *PEM-100 Photoelastic Modulator User Manual* (Oregon: Hinds International, Inc.) p77
- [36] Kuhn J R, Potter D, Parise B 2001 *Astrophys. J.* **553** L189

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

Chen You-Hua^{1)2)3)†} Wang Zhao-Ba¹⁾²⁾³⁾ Wang Zhi-Bin¹⁾³⁾
Zhang Rui¹⁾²⁾³⁾ Wang Yan-Chao¹⁾²⁾³⁾ Wang Guan-Jun¹⁾²⁾³⁾

1) (*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

2) (*School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

3) (*Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(Received 12 September 2012; revised manuscript received 13 November 2012)

Abstract

A new method of polarization modulation based triple-photoelastic-modulator (triple-PEM) is proposed as an key component of photo-elastic modulator-based imaging spectro-polarimeter (PEM-ISP) combined with acousto optic tunable filter. The basic principles of PEM-ISP and triple-PEM-based differential frequency polarization modulation are described, that is, the tandem PEMs are operated as an electro-optic circular retardance modulator in a high-performance reflective imaging system. Operating the PEMs at slightly different resonant frequencies generates a differential signal that modulates the polarized component of the incident light at a much lower heterodyne frequency. Then the basic equations for polarization measurement is derived by analyzing and calculating its Muller matrix. The simulation and experiments verify the feasibility and accuracy of polarization measurement by triple-PEM-based differential frequency polarization modulation. Finally, we analyze the influences of the setting of integral step and sampling interval of the detector polarization measurement, and a preliminary error analyses of field angle, phase retardation amplitude etc are also carried out. The result shows that the measurement error of DoLP is less than 0.6% when the phase retardation error is 1%. This work provides the necessary theoretical basis for remote sensing of new PEM-ISP and for engineering implementation of Stokes parametric inversion.

Keywords: polarization modulation, triple-photoelastic-modulator, heterodyne frequency, imaging spectropolarimeter

PACS: 07.60.Fs, 42.25.Ja, 02.10.Yn, 78.20.hb

DOI: 10.7498/aps.62.060702

* Project supported by the Special Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127015), the International S & T Cooperation Projects of China (Grant No. 2012DFA10680) and the International S & T Cooperation Projects of Shanxi Province, China (Grant No. 2010081038).

† Corresponding author. E-mail: chenyh110512@163.com