

文章编号 1004-924X(2013)04-0876-08

光弹调制差频偏振测量及误差分析

王志斌^{1,2}, 张 瑞^{1*}, 赵冬娥^{1,2}, 陈友华¹, 魏海潮¹

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

2. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要:针对现有光弹调制测量偏振方法无法用普通阵列探测器有效采集锁相频率,难以测量复色光的偏振特性等缺点,提出了一种三光弹调制器互差频调制的新型偏振测量方法。操作时,3个光弹调制器分别工作在频率 ω_1 , ω_2 和 ω_3 上,三频率大小略有差异,从而可以对光进行差频调制并产生载有被测光偏振信息的低频调制分量(0, $\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_1 - 2\omega_3$);然后,通过锁相放大即可以一次测量获得斯托克斯矢量S中的 S_0 , S_1 和 S_2 。介绍了三光弹调制差频偏振测量的基本原理,通过相应的数值仿真和实验验证了其可行性,并对差频大小、相位延迟幅度等因素对测量结果的误差进行了初步分析。分析表明,该方法不仅保留了原光弹调制偏振测量方法测量精度高等优点,而且调制光电流频率下降了2~3个数量级(10~500 Hz),普通阵列探测器即可实现探测,在高精度偏振成像技术方面具有潜在的应用价值。

关键词:光弹调制;偏振态测量;斯托克斯矢量;差频

中图分类号:O436.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132104.0876

Photoelastic-modulator-based differential frequency polarization modulation measurement and error analysis

WANG Zhi-bin^{1,2}, ZHANG Rui^{1*}, ZHAO Dong-e^{1,2}, CHEN You-hua¹, WEI Hai-chao¹

(1. *Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;* 2. *Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-electric Information and Instrument,*

North University of China, Taiyuan 030051, China)

** Corresponding author, E-mail: ruihanghy@163.com*

Abstract: A new differential frequency polarization modulation method based on triple-photoelastic-modulators (triple-PEMs) is proposed to overcome the shortcomings like that phase locked frequency is difficult to be measured by common array detectors and the polarization of polychromatic light is hard to be obtained. With the method, the tandem PEMs are operated as electro-optic circular retardance modulators at slightly different resonant frequencies ω_1 , ω_2 and ω_3 respectively, and they generate differential signals at much lower heterodyne frequencies (0, $\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_1 - 2\omega_3$) by modulating the polarized components of the incident light. Then, the Stokes parameters S_0 , S_1 and S_2 can be obtained simultaneously by the lock-in amplifier circuit with one measurement. The basic principle is intro-

收稿日期:2012-10-19;修订日期:2012-12-14.

基金项目:国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(No. 61127015);国际科技合作项目(No. 2012DFA10680, 2010

***);山西省国际科技合作项目(No. 2010081038)

duced, basic equations are derived, and the feasibility of the method is verified through the corresponding numerical simulation. The preliminary analysis indicates that the method not only retains the advantages of the existing PEM-based polarimetry, but also decreases the frequency of modulated photocurrent by 2–3 orders of magnitude (10–500 Hz). Moreover, its signals can be detected by a common array detector. This method has potential applications to the high precision polarization imaging technology.

Key words: photoelastic modulation; polarization state measurement; Stokes parameter; differential frequency

1 引言

在反射、散射和透射过程中,物体会产生由其自身性质决定的偏振特性,通过获取目标的偏振特性可以为目标观测提供传统方法无法得到的新信息;对所获得的信息进行综合利用,可以有效提高目标的检测和识别能力。因此,偏振信息获取在气溶胶检测、环境监测、目标识别、及生物医学等领域有广阔的应用前景^[1-2]。目前,斯托克斯矢量^[3]的测量方法主要有两种^[4]:一种是偏振光调制法,在待测光路中引入起偏器和相位延迟器,以对光强进行调制和测量,该方法通常要求起偏器和相位延迟器多角度的转动并多次测量,所以存在时间配准和空间配准的问题,进而限制了该方法应用的领域;另一种是分振幅法,即把被测光分为4束,用4个探测器同时完成各分量的测量,该方法虽然无机转动,但需要多组装置。

光弹调制偏振测量是现代偏振测量领域中的一个重要分支,是一种基于光弹效应的相位调制技术。目前,光弹调制偏振测量方法主要有两种:一种是通过一次测量锁相4个不同频率分量获得斯托克斯矢量,但由于锁相频率是驱动频率的整数倍(>50 kHz),因此用阵列探测器无法对它进行有效采集^[5-10];另一种是双光弹差频调制测量,虽然差频频率低,但一次只能得到斯托克斯矢量中的两个量,需要通过机械转动来测量剩余量,并且测量时需额外增加针对特定测量波段的1/4波片,无法满足复色光偏振测量需求^[1]。针对以上测量方法存在的缺点,本文提出了三光弹调制器差频偏振测量方法,该方法只需探测互差频信号就可以通过一次测量同时获得 S_0 , S_1 和 S_2 。文中对此方法进行了理论推导,并结合仿真实验对该方法进行了误差分析。

2 测量原理

2.1 光弹调制

光弹调制器是一种基于高性能光弹晶体光弹效应的调制器件。其工作原理为:压电晶体在光学各向同性物质上加以周期性变化的机械应力,使光弹晶体共振形成应力驻波,产生周期性变化的双折射,因此光通过光弹调制器后其相位被调制^[11]。光弹调制器具有无机振动、通光孔径大、视场角大、信号调制频率高(20~80 kHz)、适用波段宽(从紫外到红外)等优点^[12-13]。

当被测光通过光弹晶体时,互相垂直的两偏振分量的相位延迟为:

$$\delta = \delta_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

相位延迟的幅值:

$$\delta_0 = \frac{2\pi d}{\lambda} k V_0, \quad (2)$$

其中: d 为光弹晶体通光方向的厚度, λ 为光波波长, k 是与光弹晶体和压电晶体有关的系数, V_0 为对应驱动电路的电压峰值^[14]。

2.2 三光弹调制差频偏振测量原理

三光弹调制差频偏振测量原理如图1所示。在测试光路中,光弹调制器 PEM_1 的振动轴与检偏器透光轴成 45° , PEM_3 与 PEM_2 放置在 PEM_1

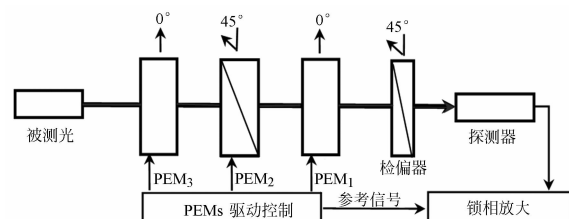


图1 三光弹调制偏振测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization measurement based on 3-PEM

前。其中, PEM_3 与 PEM_1 平行, PEM_2 与 PEM_1 成 45° 。被测光依次通过三光弹调制器和检偏器后, 由探测器把调制后的光信号转化成电信号, 对此电信号进行锁相放大和数据处理就可得到被测光的 S_0, S_1 和 S_2 , 其中锁相频率以驱动频率作为参考。被测光经调制和检偏器后的斯托克斯矢量为^[15]:

$$\mathbf{M}_0 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & b_1 \\ 0 & 0 & -b_1 & a_1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & -b_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & a_2 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & b_3 \\ 0 & 0 & -b_3 & a_3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

式中: $a_i = \cos \delta_i, b_i = \sin \delta_i, \delta_i = \delta_{i0} \sin \omega_i t, (i = 1, 2, 3)$ 。

其中: 矢量 $\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 为被测光的斯托克斯矢量, $\mathbf{S}' = (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3)^T$ 为经调制后光的斯托克斯矢量, $\mathbf{M}_0, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 和 \mathbf{M}_3 分别表示检偏器、 PEM_1 、 PEM_2 和 PEM_3 所对应的 Mueller 矩阵^[15], 即有:

由于探测器只能接收到总的光强 S'_0 , 将式 (4) 代入式 (3) 可得:

$$S'_0 = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \frac{1}{2} S_2 [\cos \delta_1 \cos \delta_3 - \sin \delta_1 \cos \delta_2 \sin \delta_3] + \frac{1}{2} S_3 [\cos \delta_1 \sin \delta_3 + \sin \delta_1 \cos \delta_2 \cos \delta_3], \quad (5)$$

将式 (5) 中的正弦和余弦按贝塞尔函数展开 得^[8,16]:

$$S'_0 = \frac{1}{2} S_0 + S_1 \sum_{m_1}^{\infty} \sum_{m_2}^{\infty} J_{m_1}(\delta_{10}) J_{m_2}(\delta_{20}) \cos[(m_1 \omega_1 \pm m_2 \omega_2) t] + S_2 \left\{ \sum_{n_1}^{\infty} \sum_{n_2}^{\infty} P J_{n_1}(\delta_{10}) J_{n_2}(\delta_{20}) \cos[(n_1 \omega_1 \pm n_2 \omega_2) t] - 2 \sum_{m}^{\infty} \sum_{n}^{\infty} J_m(\delta_{10}) J_n(\delta_{20}) \sin[(m \omega_1 \pm n \omega_2) t] \sum_{m'}^{\infty} J_{m'}(\delta_{30}) \sin(m \omega_3 t) \right\} + S_3 \left\{ \pm \sum_{n}^{\infty} \sum_{m}^{\infty} J_n(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \sin[(n \omega_1 \pm m \omega_2) t] + 2 \sum_{m}^{\infty} \sum_{n}^{\infty} J_m(\delta_{10}) J_n(\delta_{20}) \sin[(m \omega_1 \pm n \omega_2) t] \sum_{n'}^{\infty} P J_{n'}(\delta_{30}) \cos(n \omega_3 t) \right\}, \quad (6)$$

其中: m 为奇数, n 为偶数; $J_x(y)$ 是 y 对应的第 x 级贝塞尔函数; 当 $n=0$ 或 $n_1 = n_2 = 0$ 时, $P=1/2$, 其它情况 $P=1$ 。由于光弹调制驱动频率在几万赫兹, 探测到的高频频率高于驱动频率, 导致高频信号难以检测, 而三光弹调制斯托克斯矢量的测量并不需要高频部分。由式 (6) 可知, 频率为 $n(\omega_i - \omega_j)$ 和 $m(\omega_i - \omega_j)$ (其中 i 与 j 取 1, 2, 3, 且 $i \neq j$) 是低频, 省去高频项得:

$$S'_0 \approx \frac{1}{2} S_0 + S_1 \sum_{m}^{\infty} J_m(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \cos[m(\omega_1 - \omega_2) t] + S_2 \sum_{n}^{\infty} P J_n(\delta_{10}) J_n(\delta_{30}) \cos[n(\omega_1 - \omega_3) t]. \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 在低频分量中只要测得直流分量、低频频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 的分量就

可以获得 S_0, S_1 和 S_2 。这是因为更高的频率对求这 3 个量不会提供更多有用的信息, 而且检测高频信号对硬件要求高, 数据量大, 后期处理复杂。

通过锁相放大技术, 以光弹调制器的驱动信号作为参考信号, 从探测器的输出信号中解析低频分量就可以求得 S_0, S_1 和 S_2 。由式 (7) 可得直流分量、低频频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 的分量随时间的变化, 分别为:

$$S_{dc} = \frac{1}{2} S_0 + S_2 J_0(\delta_{10}) J_0(\delta_{30}), \quad (8)$$

$$S_{\omega_1 - \omega_2} = S_1 J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos[(\omega_1 - \omega_2) t], \quad (9)$$

$$S_{2(\omega_1 - \omega_3)} = S_2 J_2(\delta_{10}) J_2(\delta_{30}) \cos[2(\omega_1 - \omega_3) t], \quad (10)$$

其中: $J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \neq 0$ 且 $J_2(\delta_{10}) J_2(\delta_{30}) \neq 0$ 。由

式(8)、(9)和(10)可以求得 S_0, S_1 和 S_2 , 分别为:

$$S_0 = 2 \left[S_{dc} - \frac{J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})B}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} \right], \quad (11)$$

$$S_1 = \frac{A}{J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})}, \quad (12)$$

$$S_2 = \frac{B}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})}. \quad (13)$$

式中: A 和 B 分别表示探测信号频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 和 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 分量的幅值。由上述推导可知, 在一次测量中只需得到探测光电流的低频分量 $(0, \omega_1 - \omega_2, 2\omega_1 - 2\omega_3)$, 就可以实现对被测光斯托克斯矢量中 S_0, S_1 和 S_2 的测量。

3 仿真实验与误差分析

3.1 仿真与实验

3.1.1 仿真分析

本文通过 MATLAB 仿真验证上述理论的正确性。设被测光 $S_0 = 1.0, S_1 = 0.7, S_2 = 0.7, S_3 = 0.0$ (归一化后), 三驱动频率分别为 $f_1 =$

$50.45 \text{ kHz}, f_2 = 50.15 \text{ kHz}$ 和 $f_3 = 50.25 \text{ kHz}$, $\omega_i = 2\pi f_i (i = 1, 2, 3)$, 相位延迟幅值 $\delta_{10} = \delta_{20} = \pi/2, \delta_{30} = \pi$ 。将这些参数带入式(5)得到归一化的总光强, 如图 2(a)所示, 灰色部分是被测光通过三光弹和检偏器后的实际光强, 黑色曲线去除高频部分。对该曲线锁相来测频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 的分量, $S_{\omega_1 - \omega_2}$ 如图 2(b)中的黑色曲线所示, 同样锁相可得分量 $2(\omega_1 - \omega_3) S_{2(\omega_1 - \omega_3)}$, 如图 2(c)中的黑色曲线所示。其中, 图 2(b)中的灰色部分为式(5)总光强中包含 S_1 的项 $0.5 S_1 \sin \delta_1 \sin \delta_2$, 图 2(c)中的灰色部分为包含 S_2 的项 $0.5 S_2 [\cos \delta_1 \cos \delta_3 - \sin \delta_1 \cos \delta_2 \sin \delta_3]$ 。从仿真结果能明显看出信号的包络与周期性。

由 $\delta_{10} = \delta_{20} = \pi/2$ 和 $\delta_{30} = \pi$, 可得: $J_0(\delta_{10}) = 0.472, J_0(\delta_{30}) = -0.304, J_1(\delta_{10}) = J_1(\delta_{20}) = 0.567, J_2(\delta_{10}) = 0.250, J_2(\delta_{30}) = 0.485$ 。提取图 2(a)中的直流分量 $S_{dc} = 0.400$, 由图 2(b)与 2(c)可得光强幅值 $A = 0.225, B = 0.085$, 带入式(11)、(12)和(13)可得: $S_0 = 1.0, S_1 = 0.7, S_2 = 0.7$ 。

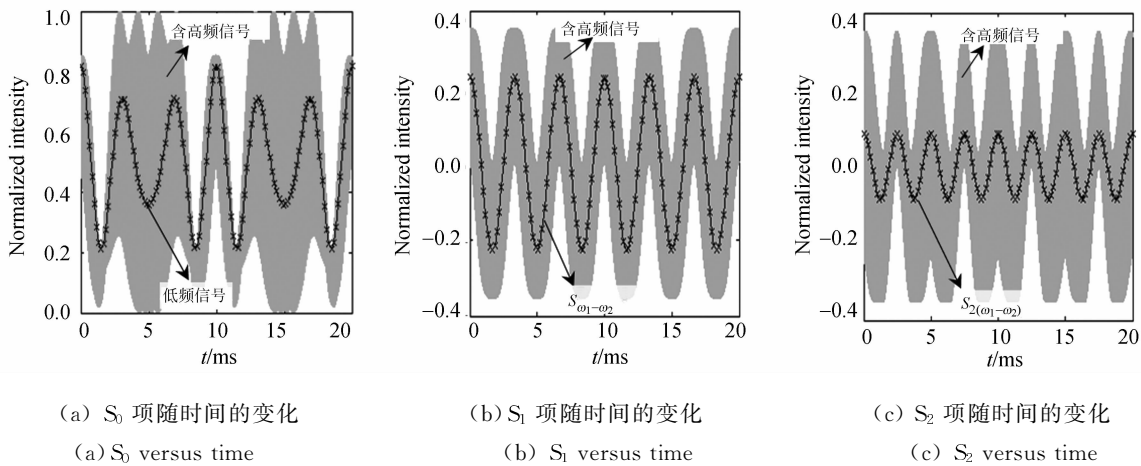


图 2 三光弹调制测偏振仿真图

Fig. 2 Simulation diagrams for measurement of polarization based on 3-PEM

3.1.2 实验分析

实验各参数与仿真相同, 实验装置与结果分别如图 3、图 4 所示。被测光经调制并通过截止频率为 700 Hz 的低通滤波后, 得到的信号如图 4(a)所示, 可以看出与仿真图 2(a)的低频信号完全吻合, 通过 NI PXI-5122 采集得到对应的频谱, 如图 4(b)所示。

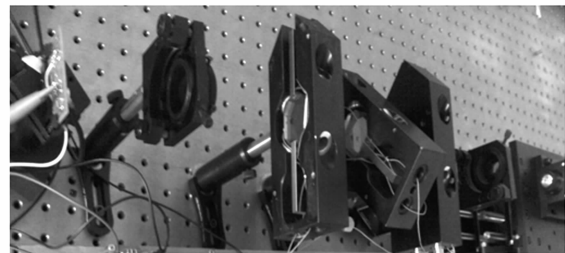
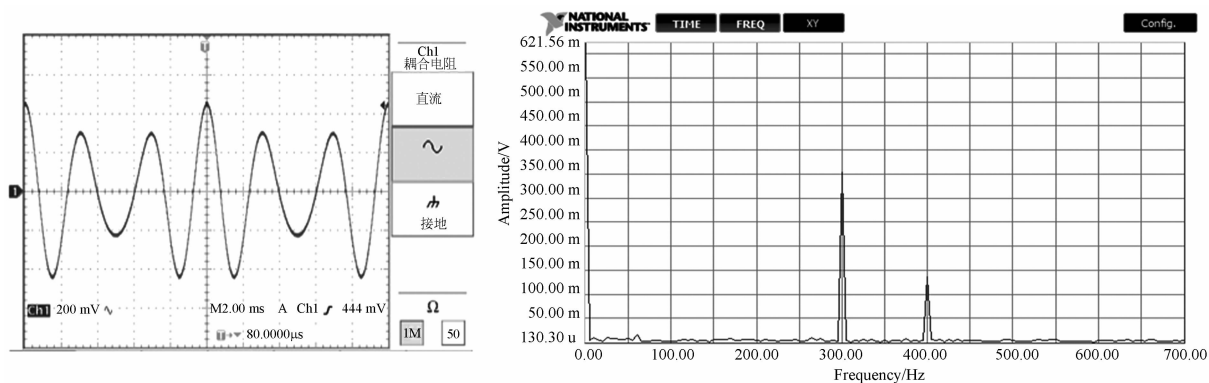


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup



(a) 测得的低频信号 (b) 频谱
(a) Oscilloscope traces of measured signal (b) Spectrum

图 4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

由图 4(b)可知,直流分量 $S_{dc} = 621.56 \text{ mV}$, $A = 350.12 \text{ mV}$, $B = 133.24 \text{ mV}$, 带入式 (11)、(12) 和 (13) 并归一化可得: $S_0 = 1.0$, $S_1 = 0.7$, $S_2 = 0.7$, 实验结果与仿真结果完全相同。

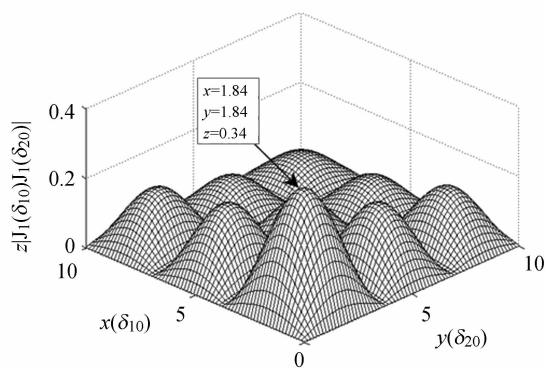
3.2 驱动频率对测量的影响

如果频率选择不当,会使测量结果产生很大的误差,应根据式 (7) 合理选择驱动频率。当三驱动频率分别为 $f_1 = 50.50 \text{ kHz}$, $f_2 = 50.40 \text{ kHz}$ 和 $f_3 = 50.35 \text{ kHz}$ 时, $\omega_i = 2\pi f_i (i=1, 2, 3)$, 由式 (7) 可知,含有 S_1 的项中不仅包含 100 Hz ($m_1 = m_2 = 1$) 的分量,还包含 300 Hz ($m_1 = m_2 = 3$, 倍频成分) 的分量,测 S_1 的倍频成分会对调制频率为 300 Hz 的 S_2 分量的测量造成干扰,因此,选择驱动频率时需考虑其它频率互相之间的影响(尤其是倍频的影响)。

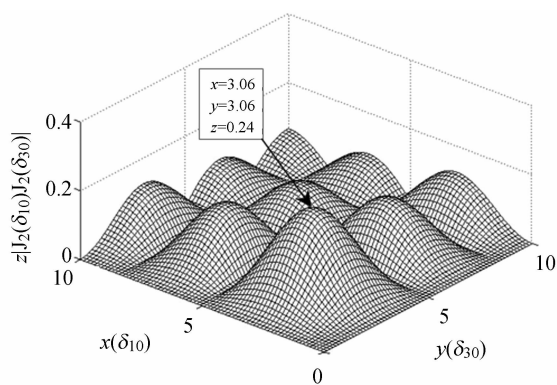
另外,差频的大小对探测时间也有很大影响。上述仿真中三驱动频率分别为 $50.45, 50.15$ 和 50.25 kHz , 用此方法只需测直流分量、频率为 300 Hz 和 400 Hz 的分量,带入式 (11)、(12) 和 (13) 就可以得到 S_0, S_1 和 S_2 ; 如果三频率为 $50.045, 50.015$ 和 50.025 kHz , 同理,测直流量、频率为 30 Hz 和 40 Hz 分量就可得 S_0, S_1 和 S_2 , 虽然锁相频率小了一个数量级,但周期却是原来的 10 倍,也就是完成一次测量的时间是原来的 10 倍。所以在实际应用中应根据需要合理选择驱动频率。

3.3 相位延迟幅值对测量的影响

由上述理论推导可知,相位延迟幅值 δ_{10}, δ_{20} 和 δ_{30} 的大小对最终结果也有很大影响。



(a) $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ 随 δ_{10}, δ_{20} 的变化
(a) $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ versus δ_{10} and δ_{20}



(b) $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ 随 δ_{20}, δ_{30} 的变化
(b) $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ versus δ_{20} and δ_{30}

图 5 $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ 与 $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ 随 δ_{10}, δ_{20} 和 δ_{30} 的变化

Fig. 5 $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ and $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ versus δ_{10}, δ_{20} and δ_{30}

由式(9)和(10)可知,如果 $J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})=0$ 或 $J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})=0$ 时,探测器将测不到频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 或 $2(\omega_1 - \omega_3)$ 的分量,所以也就得不到 S_1 或 S_2 ; 并且 $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ 与 $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ 越大,探测器探测信号中包含 $S_{\omega_1 - \omega_2}$ 与 $S_{2(\omega_1 - \omega_2)}$ 的幅值就越强。 $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ 与 $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ 随 δ_{10} , δ_{20} 和 δ_{30} 的变化如图 5 所示,由图 5 可知, $|J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})|$ 与 $|J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})|$ 最大时的 δ_{10} 并不相同,所以要根据实际需要合理选择相位延迟幅值 δ_{10} , δ_{20} 和 δ_{30} 。

3.4 误差分析

本文主要分析了由相位延迟幅值的微小偏差引起的 S_0 , S_1 和 S_2 的测量误差,由式(11)、(12)和(13)得到相位延迟幅值 δ_{10} , δ_{20} , δ_{30} 的微小变化 $\Delta\delta_{10}$, $\Delta\delta_{20}$, $\Delta\delta_{30}$, 求解 S_0 , S_1 和 S_2 的偏差分别为:

$$\Delta S_0 = 2B \left[\frac{J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} - \frac{J_0(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_0(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})}{J_2(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_2(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})} \right], \quad (14)$$

$$\Delta S_1 = A \left[\frac{1}{J_1(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_1(\delta_{20} + \Delta\delta_{20})} - \frac{1}{J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})} \right], \quad (15)$$

$$\Delta S_2 = B \left[\frac{1}{J_2(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_2(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})} - \frac{1}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} \right]. \quad (16)$$

影响相位延迟幅值的因素有很多,如入射角变化、驱动电压波动等。入射角变化引起的相位延迟幅值偏差主要有两方面原因^[12]:一是当入射角不等于零时,通光路径上受到的应力不同;二是入射角的变化会使光弹晶体在通光方向上的厚度 d 发生变化,变化后的 $d' = d/\cos\theta'$, θ' 为光通过光弹晶体的折射角,它满足折射定律。在入射角很小的情况下,可以忽略第一种原因的影响。假设光弹材料为熔融石英,结合 $d' = d/\cos\theta'$ 与式(10)可得到 S_0 , S_1 和 S_2 的偏差,见图 6。

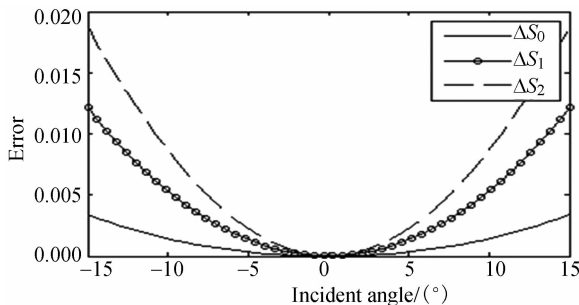


图 6 入射角的偏差对 S_0 , S_1 和 S_2 造成的偏差
Fig. 6 Errors in S_0 , S_1 and S_2 resulting from field angles

由图 6 可以看出,在入射角为 $\pm 15^\circ$ 时, $\Delta S_0 = 0.0034$, 其相对误差 $\Delta S_0/S_0 = 0.0034/1 = 0.34\%$; 同理可得: $\Delta S_1/S_1 = 0.01214/0.5 = 2.4\%$, $\Delta S_2/S_2 = 0.0187/0.8 = 2.3\%$, 且随着偏移角度的变小,误差越来越小。

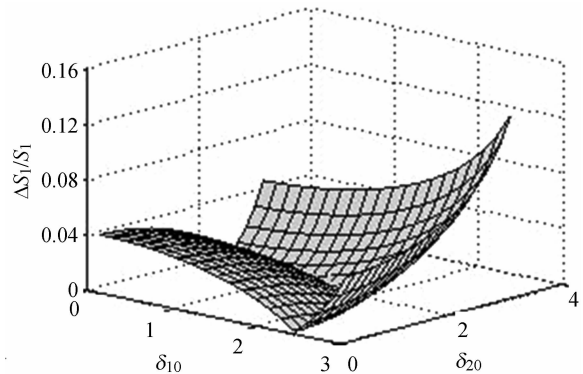
驱动电压波动会造成相位延迟幅值偏差,参考 HINDs instruments 生产的 ZSII50-PEM 参数有: $\Delta d < 2\%$ ^[17], 由式(11)~(16)可得相对误差为:

$$\frac{\Delta S_0}{S_0} = \left| \frac{B \left[\frac{J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} - \frac{J_0(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_0(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})}{J_2(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_2(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})} \right]}{\left[S_{0c} - \frac{J_0(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_0(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})B}{J_2(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_2(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})} \right]} \right|, \quad (17)$$

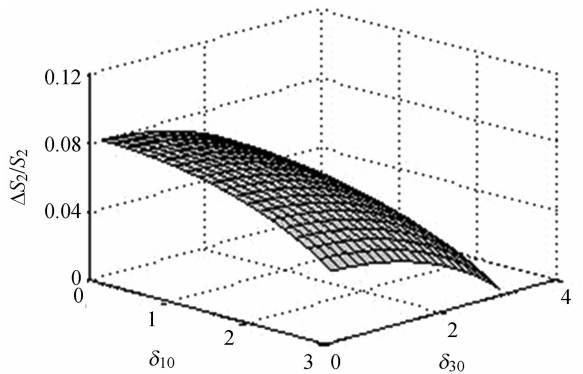
$$\frac{\Delta S_1}{S_1} = \left| 1 - \frac{J_1(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_1(\delta_{20} + \Delta\delta_{20})}{J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})} \right|, \quad (18)$$

$$\frac{\Delta S_2}{S_2} = \left| 1 - \frac{J_2(\delta_{10} + \Delta\delta_{10})J_2(\delta_{30} + \Delta\delta_{30})}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})} \right|. \quad (19)$$

由上式可知,求 S_1 和 S_2 的误差与相位延迟



(a) $\Delta S_1/S_1$ 随 δ_{10} 和 δ_{20} 的变化
(a) $\Delta S_1/S_1$ versus δ_{10} and δ_{20}



(b) $\Delta S_2/S_2$ 随 δ_{10} 和 δ_{30} 的变化
(b) $\Delta S_2/S_2$ versus δ_{10} and δ_{30}

图 7 $\Delta S_1/S_1$ 与 $\Delta S_2/S_2$ 随 δ_{10} , δ_{20} 和 δ_{30} 的变化
Fig. 7 $\Delta S_1/S_1$ and $\Delta S_2/S_2$ versus δ_{10} , δ_{20} and δ_{30}

幅值及其偏差有关;而求解 S_0 的误差还与 S_{dc} 和 $S_{2(\omega_1-\omega_2)}$ 有关。当延迟幅值 δ_{10} , δ_{20} 和 δ_{30} 的偏差为 2% 时,测量 S_1 和 S_2 所引起的误差如图 7 所示。

4 结 论

本文提出了一种三光弹调制偏振测量新方法。理论分析可知,采用该方法测量偏振只需探

测低频(比驱动频率小 2~3 个数量级)信号,一次测量即可同时获得斯托克斯矢量的 S_0 , S_1 和 S_2 。通过仿真与实验验证了该方法的正确性,推导给出了调制信号强度、相位延迟幅值、视场角及驱动频率之间的关系,并进行了相应的误差分析,确定了误差范围。根据实际需要选择合适的驱动频率和相位延迟幅值,减小了测量误差。本研究为光弹调制应用于偏振成像技术提供了理论指导。

参考文献:

- [1] DINER D J, DAVIS A, HANCOCK B, *et al.*. Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8428-8445.
- [2] 弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1088-1095.
GONG J Q, ZHAN H G, LIU D ZH. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)
- [3] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 程敏熙, 何振江, 黄佐华. 分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统 [J]. *光电工程*, 2008, 35(5): 93-97.
CHENG M X, HE ZH J, HUANG Z H. Polarimeter system of stokes parameters based on division-of-amplitude [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 93-97. (in Chinese)
- [5] WANG B, LEADBETTER A, ROCKWELL R R. Evaluation of a dual PEM stokes polarimeter using different signal processing methods [J]. *Polarization Science and Remote Sensing II*, 2005, 5888: 58880W-1-8.
- [6] WEI G, COOK P J, JONES G A, *et al.*. Experimental determination of the Stokes parameters using a dual photoelastic modulator system [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14): 2644-2652.
- [7] POVEL H. Imaging Stokes polarimetry with piezoelectric modulators and charge-coupled-device image sensors [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(7): 1870-1878.
- [8] WEI G, JONES G A, LIU Y W, *et al.*. The measurement of the Stokes parameters: a generalized methodology using a dual photoelastic modulator system [J]. *American Institute of Physics*, 2008, 103: 043104-1-6.
- [9] LIU Y W, JONES G A, PENG Y, *et al.*. Generalized theory and application of Stokes parameter measurements made with a single photoelastic modulator [J]. *American Institute of Physics*, 2006, 100: 063537-1-7.
- [10] 胡春光, 孙立东, 李艳宁, 等. 光弹调制式反射差分光谱仪的理论分析 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, 5(1): 1-5.
HU CH G, SUN L D, LI Y N, *et al.*. Theoretical analysis of reflectance difference spectrometer based on photoelastic modulation [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, 5(1): 1-5. (in Chinese)
- [11] CLINE R A, WESTERVELD W B, RISLEY J S. A new method for measuring the retardation of a photoelastic modulator using single photon counting techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(5): 2169-2174.
- [12] WANG B, LIST J. Basic optical properties of the photoelastic modulator part I: useful aperture and acceptance angle [J]. *SPIE*, 2005, 5888: 436-443.
- [13] BADOZ J, SILVERMAN M P, CANIT J C. Wave propagation through a medium with static and dynamic birefringence: theory of the photoelastic modulator [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, 7(4): 672-682.
- [14] 周军, 苏桂英, 李国华. 光弹调制器定标新方法 [J]. *光子学报*, 2001, 30(1): 81-84.
ZHOU J, SU G Y, LI G H. A new method for calibration of photoelastic modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(1): 81-84. (in Chinese)
- [15] 竺庆春, 陈时胜. 矩阵光学导论 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991.
ZHU Q CH, CHEN SH SH. *Translated Matrix Optics Introduction*[M]. Shanghai: Shanghai Science and

Technology Literature Press,1991. (in Chinese)

- [16] 王竹溪,郭敦仁.特殊函数概论[M].北京:北京大学出版社,2000.

WANG ZH X, GUO D R. *Introduction to Special*

Function[M]. Beijing: Peking University Press, 2000. (in Chinese)

- [17] KEMP J C. PEM-100 *Photoelastic Modulator User Manual*[M]. Hinds International, Inc., 2010.

作者简介:



王志斌(1966—),男,山西长治人,教授,硕士生导师,毕业于北京师范大学物理系理论物理专业,现为中北大学物理系副主任,主要从事光谱成像技术及遥感遥测方面的研究。E-mail: wang-zhibin@nuc.edu.cn



陈友华(1986—),男,江苏盐城人,博士研究生,主要从事高速光谱探测等方面的研究。E-mail: chenyh110512@163.com



张瑞(1987—),男,山西长治人,硕士研究生,2011年于中北大学获得学士学位,主要从事光谱成像仪理论仿真方面的研究。E-mail: ruizhanghy@163.com



魏海潮(1986—),男,山东菏泽人,硕士研究生,2010年于中北大学获得学士学位,主要从事弹光调制器及其驱动控制器的研究。E-mail: weihai_chao@126.com



赵冬娥(1970—),女,山西临汾人,博士,教授,硕士生导师,1992年于太原机械学院获得学士学位,2000年于华北工学院获得硕士学位,2005年于中北大学获得博士学位,主要从事测试计量技术及仪器、光学工程、通信与信息系统等方面的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)