

文章编号: 1001-3806(2014)02-0255-05

## 弹光调制偏振 Stokes 参量测量及误差分析

王立福<sup>1</sup>, 王志斌<sup>1,2\*</sup>, 李晓<sup>1,2</sup>, 陈友华<sup>1</sup>, 张瑞<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1</sup>

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 为了更简便地实现 Stokes 矢量测量, 采用一种工作在不同频率上的双弹光调制器, 利用它的频率叠加对光进行调制, 产生载有被测量的高频调制分量, 通过锁相一次得到了适用于所有偏振态测量的 4 个 Stokes 分量, 且进行了理论分析、仿真验证以及误差分析, 即对相位延迟幅度、入射角等因素对测量结果的影响进行了分析。结果表明, 该方法实现了只需测量一次便可测出偏振态的所有分量, 为进一步工程实现提供了基本的理论支撑。

**关键词:** 光谱学; 双弹光调制器; Stokes 矢量; 偏振; 锁相

**中图分类号:** O436.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.023

### Measurement of the polarization Stokes parameters based on photoelastic-modulation and its error analysis

WANG Lifu<sup>1</sup>, WANG Zhibin<sup>1,2</sup>, LI Xiao<sup>1,2</sup>, CHEN Youhua<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to measure Stokes vectors simply and conveniently, a dual-photoelastic-modulator working at different frequencies was adopted to generate high frequency modulation component loaded with the parameters to be measured after light modulation because of the frequency superposition. Four Stokes components suitable for all polarization measurements were obtained once through a phase-locked polarization measurement. After theoretical analysis, simulation verification and error analysis, the effects of phase delay and incidence angle on the measurement results were studied. The results show that all the measured polarization components can be obtained with only one measurement and the method provides theoretical support for further engineering implementation.

**Key words:** spectroscopy; dual-photoelastic modulator; Stokes parameters; polarization; phase-locked

## 引言

斯托克斯参量已经被广泛应用于矢量光束的偏振特性变化的研究, 且可描述光束所有的偏振态和光强度, 因此只要测量出全部的斯托克斯参量, 即可确定不同光束的偏振态。测量斯托克斯参量的方法

分为两类: 一类是分振幅法<sup>[1-2]</sup>, 用 4 个光电探测器同一时刻探测分成 4 束的待测光, 完成对各个斯托克斯参量的测量; 另一类是偏振光调制法, 即在调制光路中加入相位延迟器和起偏器, 只要使得它们绕光轴作多角度的转动<sup>[3]</sup>, 不同角度调制结果不同, 可以满足大部分偏振光的测量。目前, 应用这一原理研制新型偏振测量仪已引起业内同行的密切关注, 但其存在转动机械误差。近年来, 随着现代偏振测量技术的快速发展, 偏振调制技术也有了长足的进展。

弹光调制器就是一种运行在谐振频率状态下的偏振调制器件, 弹光调制器 (photoelastic modulator, PEM) 是一种基于光学双折射晶体材料弹光效应的相位调制器件, 自从弹光调制器发明以来, 由于具有

基金项目: 国家国际科技合作专项基金资助项目 (2013DFR10150); 国家自然科学基金仪器专项基金资助项目 (61127015); 山西省国际科技合作计划资助项目 (2010081038)

作者简介: 王立福 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事弹光干涉具仿真方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

收稿日期: 2013-06-20; 收到修改稿日期: 2013-07-16

无机械振动影响、入射角较大、调制频率高且装置稳定性高、损耗小、容易控制、波段范围宽(可从真空紫外到远红外)等一系列优点<sup>[4-5]</sup>,基于上述的这些优点,这种优越的偏振调制器很快应用到了许多领域,且对光学、生物物理、物理化学、晶体生长等领域都产生了积极的推动作用。而传统的弹光调制偏振测量的方法是基于弹光调制的低频测量<sup>[6-8]</sup>,不适用于高速运动物体的光谱测量,虽然容易探测,但不适用于高速运动物体的光谱测量,并且传统的弹光调制偏振测量方法只能一次测量 Stokes 矢量中 2 个参量或者 3 个参量,也有可以测量出 4 个参量的,但是需要转动装置,降低了装置的稳定性,因此,针对传统方法的诸多不足,本文中提出了使用双弹光调制测偏振的新方法,该方法只需测量一次就可以测出 Stokes 矢量的 4 个参量,适用于所有的偏振态测量,结合光谱测量及图像融合技术可以用于高速运动物体的偏振光谱测量,且无需转动实验装置,提高了结构的稳定性,很好地弥补了现有偏振光谱测量的不足。

## 1 弹光调制 Stokes 矢量测量结构及原理

### 1.1 Stokes 矢量

偏振测量中偏振态的描述方法有 4 种:三角函数表示法、Jones 矢量表示法、Stokes 矢量和邦加球表示法。而 Stokes 矢量是英国物理学家 STOKES 在 1852 年研究部分偏振光时首次提出的。由于 Stokes 矢量既可以描述完全偏振光,也可以描述部分偏振光和非偏振光,可以是单色光也可以是复色光,所以在所有描述光偏振特性的方法中,Stokes 矢量被广泛应用。Stokes 矢量可用 4 个参量表示所有光的偏振状态,具体表示如下<sup>[4,9-10]</sup>:

$$S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_0 = \langle \tilde{E}_x^2 \rangle + \langle \tilde{E}_y^2 \rangle \\ S_1 = \langle \tilde{E}_x^2 \rangle - \langle \tilde{E}_y^2 \rangle \\ S_2 = 2\langle \tilde{E}_x \tilde{E}_y \cos(\varphi_1) \rangle \\ S_3 = 2\langle \tilde{E}_x \tilde{E}_y \sin(\varphi_2) \rangle \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\tilde{E}_x$  和  $\tilde{E}_y$  表示电场在  $x$  和  $y$  方向的振幅,  $\langle \rangle$  表示对时间的平均值,  $\varphi_1 = \phi_y - \phi_x$  表示  $x$  方向和  $y$  方向上相位差,  $\varphi_2 = \phi_y - \phi_x$  表示  $y$  方向和  $x$  方向上相位差,  $S_0$  表示光的总强度,  $S_1$  表示光的  $x$  分量和  $y$  分量的强度差,  $S_2$  表示光在  $+45^\circ$  或  $-45^\circ$  方向线偏振分量的强度差,  $S_3$  表示光的右旋圆偏振分量与左

旋圆偏振分量的强度差。

对于全偏振光有<sup>[9]</sup>:  $S_0 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ , 部分偏振光有  $S_0 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ , 自然界中的光包含的圆偏振信息很少,而一般的偏振测量装置测量的偏振信息主要是对 Stokes 矢量中  $S_0, S_1$  和  $S_2$  的测量,为此对  $S_3$  的测量变得尤为重要了。基于几种偏振态的类型,本文中提出了一种使用双弹光调制器测偏振态的新方法,该方法只需一次测量就可以测出 Stokes 的 4 个参量,适用于任何偏振态的测量。

### 1.2 测量原理及结构

光通过弹光调制器后的相位延迟为<sup>[4]</sup>:

$$\phi = \phi_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为调制器的频率,  $\theta$  为初相位, 相位延迟的幅值为:

$$\phi_0 = \frac{2\pi d}{\lambda} KV_0 \quad (4)$$

式中,  $d$  为弹光晶体通光方向的厚度,  $\lambda$  为光波波长,  $K$  是与弹光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<sup>[11]</sup>。

弹光调制偏振测量结构如图 1 所示,由 1 组 2 个弹光调制器 (PEM<sub>1</sub>, PEM<sub>2</sub>) + 1 个检偏器 (P) 组成,以 PEM<sub>1</sub> 的光轴建立为实验室坐标系,其中 PEM<sub>1</sub> 与 PEM<sub>2</sub> 的相位延迟方向分别为  $0^\circ$  与  $45^\circ$ , P 的检偏方向为  $0^\circ$ 。

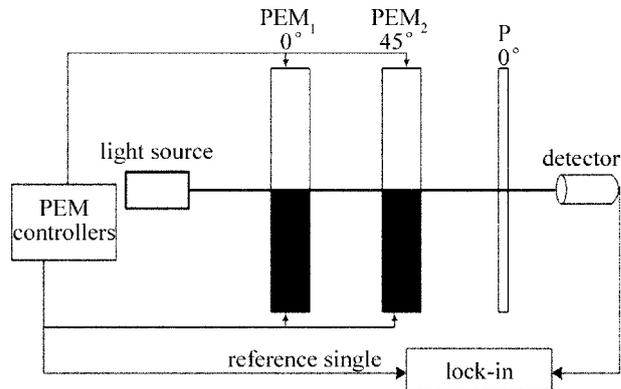


Fig. 1 Stokes vector measurement schematics based on dual-photoelastic modulator

由弹光调制器的概念可知,当一束光通过该装置时,PEM<sub>1</sub> 和 PEM<sub>2</sub> 产生调制,相当于可变波片,所以,通过该装置最终得到的 Stokes 矢量为<sup>[4,9]</sup>:

$$[S_0' \ S_1' \ S_2' \ S_3']^T = M_P M_2 M_1 [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T \quad (5)$$

式中,矢量  $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$  为被测光的 Stokes 矢量,  $[S_0' \ S_1' \ S_2' \ S_3']^T$  为经过调制和检偏器之

后的 Stokes 矢量, 矩阵  $M_1, M_2, M_p$  分别为 PEM<sub>1</sub>, PEM<sub>2</sub> 和检偏器 P 的 Mueller 矩阵<sup>[12]</sup>, 表示如下:

$$\begin{cases} M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 \\ 0 & 0 & -\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 \end{bmatrix} \\ M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_2 & 0 & \sin\varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin\varphi_2 & 0 & \cos\varphi_2 \end{bmatrix} \\ M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\varphi_i = \varphi_{0i} \sin(\omega_i t)$ , 其中  $i = 1, 2$ 。

这样, 弹光偏振测量结构的系统 Mueller 传输矩阵为<sup>[11-13]</sup>:

$$M = M_p M_2 M_1 = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & \cos\varphi_2 & \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 & -\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ 1 & \cos\varphi_2 & \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 & -\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

而探测器只能接收总的光强  $S_0'$ , 可以得到接收到的总光强为  $M$  矩阵的第 1 行与入射光 Stokes 量的乘积:

$$S_0' = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 \cos\varphi_2 + \frac{1}{2} S_2 \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 - \frac{1}{2} S_3 \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \quad (8)$$

将  $\cos\varphi_i$  和  $\sin\varphi_i$  用贝塞尔函数展开得<sup>[14]</sup>:

$$S_0' = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 J_0(\varphi_{10}) + S_1 \sum_n J_n(\varphi_{20}) \cos(n\omega_2 t) \pm S_2 2 \sum_{m_1} \sum_{m_2} J_{m_1}(\varphi_{10}) J_{m_2}(\varphi_{20}) \cos(m_1 \omega_1 t \pm m_2 \omega_2 t) \mp S_3 2 \sum_n \sum_m J_n(\varphi_{10}) J_m(\varphi_{20}) \times \sin(n\omega_1 t \pm m\omega_2 t) \quad (9)$$

式中,  $m$  为奇数,  $n$  为偶数,  $J_x(y)$  是对应  $y$  下的第  $x$  级贝塞尔函数,  $m_1$  和  $m_2$  为两个弹光调制器相位延迟贝塞尔函数展开后的级数,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为两个弹光调制器的工作频率。由 (9) 式可知, 在探测器探测到的光强中只要测得直流分量、高频频率

$2\omega_2$  和  $(\omega_1 + \omega_2)$  以及  $(2\omega_1 + \omega_2)$  分量以获得  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$ , 因此通过锁相技术, 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高频分量就可以求得  $S_1, S_2$  和  $S_3$ , 由 (9) 式可得直流分量、高频频率为  $2\omega_2$  和  $(\omega_1 + \omega_2)$  以及  $(2\omega_1 + \omega_2)$  分量随时间的变化分别为:

$$\begin{cases} S_{DC}' = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{2} S_1 J_0(\varphi_{10}) \\ S_{2\omega_2}' = S_1 J_2(\varphi_{20}) \cos(2\omega_2 t) \\ S_{\omega_1+\omega_2}' = 2S_2 J_1(\varphi_{10}) J_1(\varphi_{20}) \cos(\omega_1 t + \omega_2 t) \\ S_{2\omega_1+\omega_2}' = -2S_3 J_2(\varphi_{10}) J_1(\varphi_{20}) \sin(2\omega_1 t + \omega_2 t) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $S_{DC}'$  表示探测信号直流分量,  $J_2(\varphi_{20}) \neq 0, J_1(\varphi_{10}) J_1(\varphi_{20}) \neq 0$  和  $J_2(\varphi_{12}) \times J_1(\varphi_{20}) \neq 0$ , 则可求得  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  如下式所示:

$$\begin{cases} S_0 = 2S_{DC}' - \frac{AJ_0(\varphi_{10})}{J_2(\varphi_{20})} \\ S_1 = \frac{A}{J_2(\varphi_{20})} \\ S_2 = \frac{B}{2J_1(\varphi_{10}) J_1(\varphi_{20})} \\ S_3 = \frac{C}{-2J_2(\varphi_{10}) J_1(\varphi_{20})} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $A, B, C$  分别表示探测信号频率为  $2\omega_2, (\omega_1 + \omega_2)$  和  $(2\omega_1 + \omega_2)$  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频率分量 ( $0, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 + \omega_2$ ), 就可以实现对被测光斯托克斯矢量中  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  的测量。

## 2 仿真结果与误差分析

### 2.1 仿真分析

为了验证上述理论的一般性, 使用 MATLAB 软件仿真时, 偏振光被选为部分偏振光, 设被测光  $S_0 = 1.00, S_1 = 0.60, S_2 = 0.30, S_3 = 0.50$ , 两驱动频率分别是  $f_1 = 50.00\text{kHz}$  和  $f_2 = 30.00\text{kHz}$ , 其中  $\omega_i = 2\pi f_i$  (其中  $i = 1, 2$ ), 相位延迟幅值  $\varphi_{10} = 2.5\text{rad}$ ,  $\varphi_{20} = 2.0\text{rad}$ , 带入 (8) 式得到结果如图 2a 所示, 这是被测光通过双光弹和检偏器后的实际光强。如果对图 2a 中曲线锁相, 测得频率为  $2\omega_2$  的分量  $S_{2\omega_2}'$  如图 2b 中的实线所示, 同样锁相  $(\omega_1 + \omega_2)$  和  $(2\omega_1 + \omega_2)$  的分量  $S_{\omega_1+\omega_2}'$  和  $S_{2\omega_1+\omega_2}'$  如图 2b 中的虚线和加圆线所示, 从仿真结果图能明显看出信号的包络与周期性。

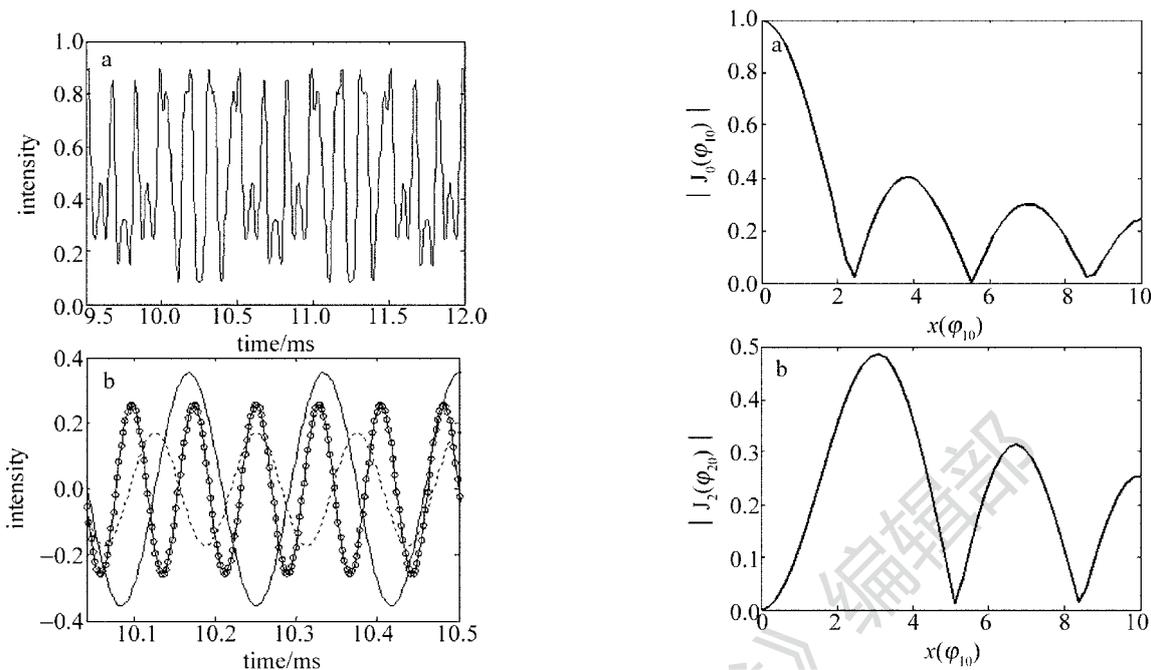


Fig. 2 a—the total light intensity measured by the apparatus b—light intensity curve of each component

由  $\varphi_{10} = 2.5\text{rad}$  和  $\varphi_{20} = 2.0\text{rad}$  可得:  $J_0(\varphi_{10}) = -0.048, J_1(\varphi_{10}) = 0.497, J_1(\varphi_{20}) = 0.577, J_2(\varphi_{10}) = 0.446$ 。对仿真图(见图 2a)提取直流分量  $S_{DC}' = 0.487$ , 由仿真结果(见图 2b)可得光强幅值  $S_{2\omega_2}' = 0.353, S_{\omega_1 + \omega_2}' = 0.172, S_{2\omega_1 + \omega_2}' = 0.257$ , 带入(11)式可得:  $S_0 = 1.00, S_1 = 0.60, S_2 = 0.30, S_3 = 0.50$ 。

2.2 误差分析

相位延迟幅值  $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$  的大小对最终结果影响也很大。由(10)式可知, 如果  $J_2(\varphi_{20}) = 0, J_1(\varphi_{10}) \times J_1(\varphi_{20}) = 0$  或  $J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20}) = 0$  时, 探测器将测不到频率  $2\omega_2, (\omega_1 + \omega_2)$  或  $(2\omega_1 + \omega_2)$  的分量, 所以也就得不到  $S_1, S_2$  或  $S_3$ , 并且由(10)式可以看出,  $|J_2(\varphi_{20})|, |J_1(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  或  $|J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  越大, 探测器的信号中包含  $S_{2\omega_2}', S_{\omega_1 + \omega_2}'$  和  $S_{2\omega_1 + \omega_2}'$  的幅值就越强,  $|J_2(\varphi_{20})|, |J_1(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  或  $|J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  随  $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$  的变化如图 3 所示, 由图 3 可知,  $|J_0(\varphi_{10})|, |J_2(\varphi_{20})|, |J_1(\varphi_{10}) \times J_1(\varphi_{20})|$  或  $|J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  最大时的  $\varphi_{10}$  并不相同, 所以要根据实际需要合理选择相位延迟幅值  $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$ , 由(3)式可知, 相位延迟幅值可通过驱动电压峰值来调节。

相位延迟幅值的微小偏差对求解  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  也有一定的影响, 由(11)式可以得到相位延迟幅值  $\varphi_{10}, \varphi_{20}$  的微小变化  $\Delta\varphi_{10}, \Delta\varphi_{20}$  对求解  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  的偏差见下式:

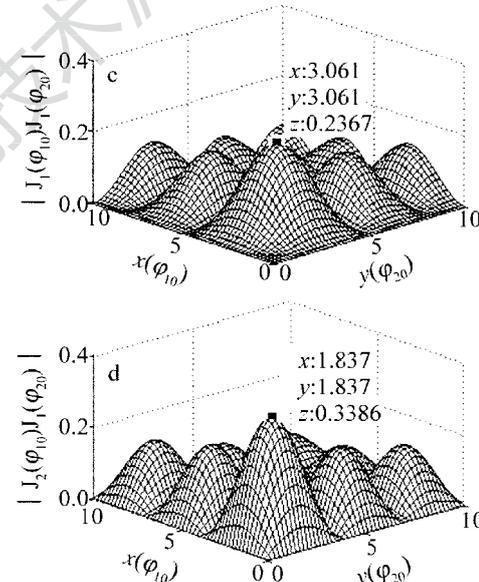


Fig. 3 a— $|J_0(\varphi_{10})|$  versus  $\varphi_{10}$  and  $\varphi_{20}$  b— $|J_2(\varphi_{20})|$  versus  $\varphi_{10}$  and  $\varphi_{20}$  c— $|J_1(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  versus  $\varphi_{10}$  and  $\varphi_{20}$  d— $|J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})|$  versus  $\varphi_{10}$  and  $\varphi_{20}$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta S_0 &= A \left[ \frac{J_0(\varphi_{10} + \Delta\varphi_{10})}{J_2(\varphi_{20} + \Delta\varphi_{20})} - \frac{J_0(\varphi_{10})}{J_2(\varphi_{20})} \right] \\ \Delta S_1 &= A \left[ \frac{1}{J_2(\varphi_{20} + \Delta\varphi_{20})} - \frac{1}{J_2(\varphi_{20})} \right] \\ \Delta S_2 &= B \left[ \frac{1}{2J_1(\varphi_{10} + \Delta\varphi_{10})J_1(\varphi_{20} + \Delta\varphi_{20})} - \frac{1}{2J_1(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})} \right] \\ \Delta S_3 &= C \left[ \frac{1}{2J_2(\varphi_{10})J_1(\varphi_{20})} - \frac{1}{2J_2(\varphi_{10} + \Delta\varphi_{10})J_1(\varphi_{20} + \Delta\varphi_{20})} \right] \end{aligned} \right. \quad (12)$$

造成相位延迟幅值的变化因素有很多,如入射角的变化、驱动电压的变化等。弹光调制有通光孔径大<sup>[14]</sup>和视场角大的优点,但入射角的微小的变化也会对测量结果产生影响,入射角的变化最终会造成相位延迟幅值的变化,这种相位延迟的变化主要有两个方面的原因<sup>[15]</sup>:一是由于入射角不等于0时,在通光的路径上受到的应力不同所造成的;二是由于入射角的变化会使(4)式中  $d$  的变化,变化后的  $d' = d/\cos\theta'$  ( $\theta'$  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,第1种原因影响很小,可以忽略,主要是第2种原因。接下来分析由于入射角的微小偏差对上述仿真结果造成的误差,假设光弹材料为熔融石英,结合  $d' = d/\cos\theta'$  与(12)式可得到  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  的偏差,如图4所示。

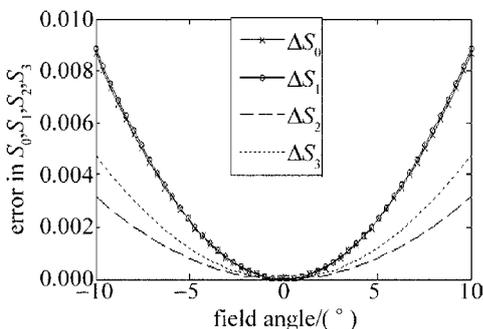


Fig. 4 Error in  $S_0, S_1, S_2$  and  $S_3$  resulting from tilted angles

由图4可以看出,在入射角是  $\pm 10^\circ$  时,求解出的  $S_0$  的偏差  $\Delta S_0 = 0.0034$ ,也就是对最终  $S_0$  的误差为  $\Delta S_0/S_0 = 0.00868/1 = 0.87\%$ ;同理可得  $S_1$  的误差  $\Delta S_1/S_1 = 0.00887/0.6 = 1.5\%$ ,  $S_2$  的误差  $\Delta S_2/S_2 = 0.00319/0.3 = 1.1\%$ ,  $\Delta S_3/S_3 = 0.00477/0.5 = 0.95\%$ ,由图4可知,随着偏移角度的变小,误差越来越小。

### 3 结论

通过以上的讨论和仿真可知,采用双弹光调制测量托克斯参量方法,只需对探测信号的相应频率进行锁相,便可以一次测量同时获得斯托克斯矢量的4个分量,适用于所有的偏振光的测量,既不需要转动装置多次测量,也不需要多组装置,就可以获得高频分量。通过对信号调制幅度与相位延迟幅度关系仿真分析,对相位延迟幅值偏差对测量结果造成

的误差进行分析,根据实际入射角允许的范围选择合适相位延迟幅值,为该方法的进一步工程实现提供了基本的理论支撑。

### 参 考 文 献

- [1] AZZAM R M A. Division-of amplitude photopolarimeter(DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light [J]. Journal of Modern Optics,1982,29(5):685-689.
- [2] 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).
- [3] XU C J, ZHAO J S, CAI Y, et al. Several schemes of infrared polarization imaging[J]. Infrared Technology, 2009,31(5):262-266 (in Chinese).
- [4] ZHIY 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).
- [5] JING N, WANG Zh B, ZHANG J L, et al. Fast spectrum recovery of nonlinear optical path difference interferogram in photoelastic modulator[J]. Laser Technology, 2012,36(2):271-274 (in Chinese).
- [6] WANG B L, LEADBETTER A, ROCKWELL R R. Evaluation of a dual PEM Stokes polarimeter using different signal processing methods[J]. Proceedings of SPIE,2005,5888:251-258.
- [7] GUAN W, 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.
- [8] GUAN W, JONES G A, LIU Y, et al. The measurement of the Stokes parameters;a generalized methodology using a dual photoelastic modulator system [J]. American Institute of Physics,2008,103(4):043104.
- [9] LIAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 43-62 (in Chinese).
- [10] ZHU Q Ch, CHEN Sh Sh. Matrix optics introduction [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1991: 187-199 (in Chinese).
- [11] SONG Zh P, HONG J, QIAO Y L. Study on the measurement principle of Stokes elements spectral based on intensity modulation [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics,2009,26(3):268-271 (in Chinese).
- [12] SONG Zh P, HONG J, QIAO Y L. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. Optics and Precision Engineering, 2011,18(11):2325-2331 (in Chinese).
- [13] CHEN W B, GU P F. Using Stokes vector express polarized light and application [J]. Optical Instruments, 2004,26(2):42-46 (in Chinese).
- [14] WANG Zh X, GUO D R. Introduction to special function [M]. Beijing: Peking University Press,2000:337-417 (in Chinese).
- [15] WANG B L, LIST J. Basic optical properties of the photoelastic modulator; part I. Useful aperture and acceptance angle [J]. Proceedings of SPIE,2005,5888:436-443.