

波片相位延迟量测量和快轴标定系统

王金伟^{1,2,3}, 李克武^{1,2,3}, 景 宁^{1,2,3}, 罗欣玮^{1,2,3}, 王志斌^{2,3}

- (1. 中北大学 信息与通信工程学院, 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;
3. 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)

摘 要: 为了能够快速精确地测量波片相位延迟量和快轴方位角, 实现测量系统的集成化和自动化, 设计了基于弹光调制技术与数字锁相技术相结合的波片测量系统。采用弹光调制器对检测激光进行调制, 运用基于 FPGA 的数字锁相技术提取调制信号的一、二倍频项, 利用优化算法解调出波片相位延迟量和快轴方位角, 步进电机带动波片转动使快轴到达零度位置, 相位延迟量由 LCD 显示出来。搭建了实验系统, 并对 1/4 波片进行了测量。实验结果表明: 该系统对 1/4 波片快轴方位角的测量精度优于 0.31° , 相位延迟量的测量精度和重复度分别优于 99.47% 和 0.14° 。测量系统的弹光调制器驱动信号、电机驱动信号、数据运算都由 FPGA 控制, 实现了光机电一体化。

关键词: 弹光调制; 数字锁相; 波片; 快轴方位角; 相位延迟量

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0217002

Phase retardation measurement and fast axis calibration system for wave plate

Wang Jinwei^{1,2,3}, Li Kewu^{1,2,3}, Jing Ning^{1,2,3}, Luo Xinwei^{1,2,3}, Wang Zhibin^{2,3}

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

Abstract: In order to efficiently and accurately measure the phase retardation of wave plate and the azimuth angle of fast axis at the same time, to realize the integration and automation of measuring system, a wave plate measuring system based on the combination of the photo-elastic modulation and the digital phase-locked technology was designed. The detecting laser was modulated by the photo-elastic modulator. By means of digital phase-locked technologies based on FPGA, the first harmonic term and the second harmonic term of the modulated signals were extracted. The phase retardation and the azimuth angle of fast axis of wave plate were demodulated by optimized algorithm. The stepper motor drives the wave plate to rotate to make the fast axis of wave plate reach the zero position. And the phase

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-15

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150); 山西省应用基础研究项目(201701D221126)

作者简介: 王金伟(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光电信息检测方面的研究。Email: wangjinweicg@163.com

通讯作者: 王志斌(1966-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光电探测方面的研究。Email: wangzhibin@nuc.edu.cn

retardation was displayed by LCD. The experimental system was set up to measure the quarter-wave plate. The experimental results show that the measuring accuracy of azimuth angle of fast axis of quarter-wave plate is better than 0.31° and the measuring accuracy and repeatability of phase retardation of quarter wave plate are better than 99.47% and 0.14° , respectively. The driving signal of the photo-elastic modulator and stepper motor and the processing of the data were controlled by FPGA. The measuring system realized optical, mechanical and electronic integration and the automation of the measuring process.

Key words: photo-elastic modulation; digital phase-locked; wave plate; azimuth angle of fast axis; phase retardation

0 引言

波片作为一种能产生相位延迟的偏振器件,能够对入射光的偏振态进行改变。在波片的加工过程中需要对其相位延迟量进行检测,加工完波片要进行相位延迟量和快轴的严格精确定标。因此,设计快速精确测量波片的相位延迟量和快轴方位角的系统具有重要的应用意义。

目前,标定波片参数的方法主要有半阴法^[1]、偏振干涉法^[2]、椭圆偏振光矢法^[3]、迈克尔逊干涉法^[4]、弹光调制法^[5]等方法。半阴法是在偏光镜之间插入两个波片,通过调节两波片位置形成半阴镜,将一个波片作为补偿片测量另一个波片的相位延迟量;偏振干涉法是通过测量到达消光位置时检偏器所转过的角度对波片参数进行测量;椭圆偏振分析法是通过计算输出椭圆偏振光矢的长短轴而获得待测波片的相位延迟量;以上三种方法只能测量波片的相位延迟量,而不能测量快轴方位角且测量精度较低。迈克尔逊干涉法是将干涉条纹作为零光程差定位参考,从而实现对波片的相位延迟量和快轴方位角的测量,该方法在测量过程中需要进行光程差调零和调节平面反射镜的位置,测量结果易受环境干扰,稳定性较低。

弹光调制技术以调制精度高、效率高以及光谱范围宽等优势,应用于波片测量能够解决上述问题,并实现波片参数的高精度测量。现有弹光调制法^[6]是通过旋转待测波片,经过两次测量,由归一化基频分量和二次谐波分量计算出快轴方位角和波片的相位延迟量,该方法只实现了对快轴方位角的测量,未能对快轴进行标定,测量过程中需手动旋转待测波片,信号锁相和数据运算分别由不同设备处理,测量效率较低,不适合广泛引用。

因此,为了提高测量效率和精度,实现测量系统的集成化和自动化,文中基于弹光调制技术和数字锁相技术,采用优化算法解调波片的相位延迟量和快轴方位角,设计全自动化的波片相位延迟量和快轴方位角测量系统,测量系统有望避免人眼分辨率不足和手动操作导致的测量误差,提高测量效率,实现光机电一体化。

1 原理

1.1 光路系统设计

测试装置的光路系统如图 1 所示,取弹光调制器的快轴方向为 x 轴(0° 位置),慢轴方向为 y 轴,入射光的传播方向为 z 轴,起偏器透光轴方向与 x 轴方向成 45° ,检偏器透光轴方向与 x 轴方向成 -45° 。检测激光经扩束准直后,依次入射到起偏器、弹光调制器(PEM)和待测波片,最后经检偏器出射并被探测器探测到。

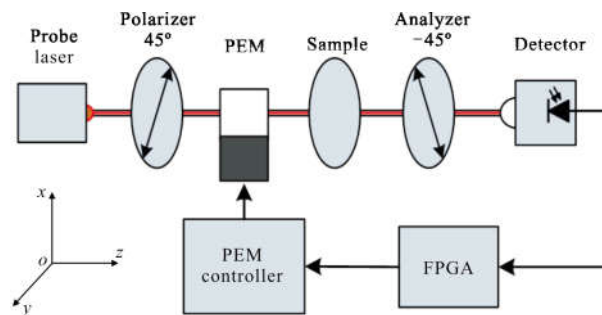


图 1 系统光路示意图

Fig.1 Sketch map of optical system

运用 Stokes 参量和 Muller 矩阵对测量原理进行分析。经过起偏器后的入射光 Stokes 参量为 $S_m=I_0 [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, 其中 I_0 为激光通过起偏器后的光强,每个偏振器件都可以用 Muller 矩阵表示。其中起偏

器和检偏器的 Muller 矩阵分别为:

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

待测波片的 Muller 矩阵和弹光调制器(快轴与 x 轴重合时)Muller 矩阵^[7-8]分别表示为:

$$M_{\text{sample}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cdot \cos \delta & \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta \cdot (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \cdot \sin \delta \\ 0 & \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta \cdot (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cdot \cos \delta & \cos 2\theta \cdot \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cdot \sin \delta & -\cos 2\theta \cdot \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_p & \sin \delta_p \\ 0 & 0 & -\sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\delta_p = \delta_0 \sin 2\pi f_0 t$ 为弹光调制器的可变延迟量, 其中 δ_0 为相位调制幅值, f_0 为弹光调制器的调制频率; θ 为波片的快轴方位角; δ 为波片的相位延迟量。入射光经过图 1 光路系统后, 得出射偏振光的 Stokes 参量为:

$$S_{\text{out}} = M_A M_{\text{sample}} M_{\text{PEM}} M_p S_{\text{in}} \quad (5)$$

将公式(1)~(4)代入公式(5)可得探测器探测的光强 $I^{[6]}$, 则探测器输出的电信号为:

$$V = KI = \frac{KI_0}{2} \{ 1 - \cos(\delta_0 \sin 2\pi f_0 t) \cdot [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] + \sin(\delta_0 \sin 2\pi f_0 t) \sin \delta \cos(2\theta) \} \quad (6)$$

式中: K 为光电常数, 由光电探测器转换系数和放大器增益决定。将公式(6)中 $\cos(\delta_0 \sin 2\pi f_0 t)$ 和 $\sin(\delta_0 \sin 2\pi f_0 t)$ 利用第一类贝塞尔级数展开得:

$$V = \frac{KI_0}{2} \{ 1 - [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] \cdot [J_0(\delta_0) + 2J_2(\delta_0) \cos(4\pi f_0 t) + 2J_4(\delta_0) \cos(8\pi f_0 t) + \dots] + [2\sin \delta \cos(2\theta)] \cdot [J_1(\alpha_0) \sin(2\pi f_0 t) + J_3(\alpha_0) \sin(6\pi f_0 t) + \dots] \} \quad (7)$$

1.2 基于 FPGA 的数字锁相

测量系统数字锁相基本思路为 A/D 模数转换器将探测器测得的模拟信号转变为数字信号, 并将数字信号输入到 FPGA 中, 然后数字信号与在 FPGA 中存储的参考信号进行乘累加运算, 最终信号各倍频项均在 FPGA 中完成提取。该设计中 A/D 的采样时钟 $f_s = 3.208 \text{ MHz}$, 对探测到的信号进行整周期采样, 每个周期采样点数为 $N(N \geq 3)^{[9]}$, 对 L 个周期采样, 得到总采样点数 $M = N \cdot L$ 。对探测器测得的模拟电信号 V 进行模数转换后得到数字信号:

$$V_k = \frac{KI_0}{2} \{ 1 - [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] \cdot [J_0(\delta_0) + 2J_2(\delta_0) \cos\left(\frac{4\pi k}{N}\right) + 2J_4(\delta_0) \cos\left(\frac{8\pi k}{N}\right) + \dots] + [2\sin \delta \cos(2\theta)] \cdot [J_1(\alpha_0) \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + J_3(\alpha_0) \sin\left(\frac{6\pi k}{N}\right) + \dots] \} \quad (8)$$

式中: $k = 1, 2, 3, \dots, M-1$ 。为了确保锁相结果的稳定性和准确性, 本设计采用双路参考信号。首先将 V_k 与存储在 FPGA 的正弦参考序列 $R_{1s_i} = B_1 \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ 进行乘累加运算可得到探测信号一倍频项的同相分量^[9]:

$$C_1 = B_1 \frac{KI_0 J_1(\alpha_0) \sin \delta \cos(2\theta)}{2} \cos \varphi \quad (9)$$

式中: φ 为参考信号与调制信号之间的相位差; B_1 为参考信号的幅值。然后 V_k 与存储在 FPGA 中的余弦参考序列 $R_{1c_i} = B_1 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ 进行乘累加运算可得一倍频信号的正交分量:

$$S_1 = B_1 \frac{KI_0 J_1(\alpha_0) \sin \delta \cos(2\theta)}{2} \sin \varphi \quad (10)$$

由公式(9)和(10)可求得探测器测得的一倍频信号:

$$V_{1f} = 2\sqrt{C_1^2 + S_1^2} = B_1 KI_0 J_1(\alpha_0) \sin \delta \cos(2\theta) \quad (11)$$

同理, V_k 分别与存在 FPGA 中的二倍频信号正弦参考 $R_{2s_i} = B_2 \sin\left(\frac{4\pi k}{N}\right)$ 和二倍频信号的余弦参考 $R_{2c_i} = B_2 \cos\left(\frac{4\pi k}{N}\right)$ 进行乘累加运算可得到二倍频信号为:

$$V_2 = -B_2 KI_0 J_2(\alpha_0) [\cos \delta \cos^2(2\theta) + \sin^2 2\theta] \quad (12)$$

待测波片转过 45° 后, 快轴与 x 轴夹角变为 $(\theta + 45^\circ)$, 仍依据公式(8)和基于 FPGA 的数字锁相原理得一倍、二倍频项分别为:

$$V'_{1f} = B_1 K I_0 J_1(\alpha_0) \sin(\delta) \cos(2(\theta + 45^\circ)) \quad (13)$$

$$V'_{2f} = -B_2 K I_0 J_2(\alpha_0) [\sin^2(2(\theta + 45^\circ)) + \cos(\delta) \cos^2(2(\theta + 45^\circ))] \quad (14)$$

由公式(11)、(13)得:

$$\frac{V'_{1f}}{V_{1f}} = -\tan 2\theta \quad (15)$$

从而得快轴方位角:

$$\theta = \frac{\arctan\left(-\frac{V'_{1f}}{V_{1f}}\right)}{2} \quad (16)$$

由公式(16)可知波片的快轴方位角只与数字锁相得到的一倍频有关,与其他倍频项无关。再由二倍频项可算出波片相位延迟量 δ 。由二倍频相除

$$\frac{V'_{2f}}{V'_{1f}} = \frac{\sin^2 2\theta + \cos \delta \cos^2 2\theta}{\cos^2 2\theta + \cos \delta \sin^2 2\theta} \quad (17)$$

可得:

$$\delta = \arccos \frac{V'_{2f} \tan^2 2\theta - V_{2f}}{V_{2f} \tan^2 2\theta - V'_{2f}} \quad (18)$$

将公式(16)代入公式(18)得相位延迟量:

$$\delta = \arccos \frac{V'_{2f} \left(-\frac{V'_{1f}}{V_{1f}}\right)^2 - V_{2f}}{V_{2f} \left(-\frac{V'_{1f}}{V_{1f}}\right)^2 - V'_{2f}} \quad (19)$$

由公式(19)可知 1/4 波片的相位延迟量只与数字锁相后的一倍频信号和二倍频信号有关,与其他

参量无关,提高了测量精度。

1.3 步进电机的细分驱动技术

步进电机驱动器是将接收到的电脉冲信号转变为角位移量的器件。当步进电机驱动器接收到单位脉冲信号后,驱动器驱动步进电机转动一个固定的角度位移,这种角度位移称为步距角。步进电机通过细分驱动器驱动后,不仅为步进电机提供驱动力而且还能使步距角减小为步进电机固有步距角的 1/n。此外,步进电机驱动器可避免步进电机的低频振荡,从而减小了电机转动过程中的转动误差,为系统高精度测量波片相位延迟量和快轴方位角提供了可能。

测量系统驱动步进电机的脉冲信号由 FPGA 产生,并且步进电机的转动由 FPGA 控制。系统选用了 JK57HS56-2804 两相四线步进电机,步距角为 1.8°,步进电机驱动器选用了 ZD-2HD430S 高性能步进电机驱动器,它能做到 32 细分。因此,当驱动器调节到 32 细分状态时,步进电机步距角变为固有步距角的 1/32 即 1.8°/32=0.056 25°。在第二次测量波片参数时波片转动了 45°,所以在确定波片的快轴时需要将波片转回(θ+45°)。由于步进电机驱动器不能使步进电机反转,所以标定波片的快轴时需要将步进电机再转动 360-(θ+45)°,使波片快轴到达零度位置,达到标定快轴的目的。系统算法示意图如图 2 所示。

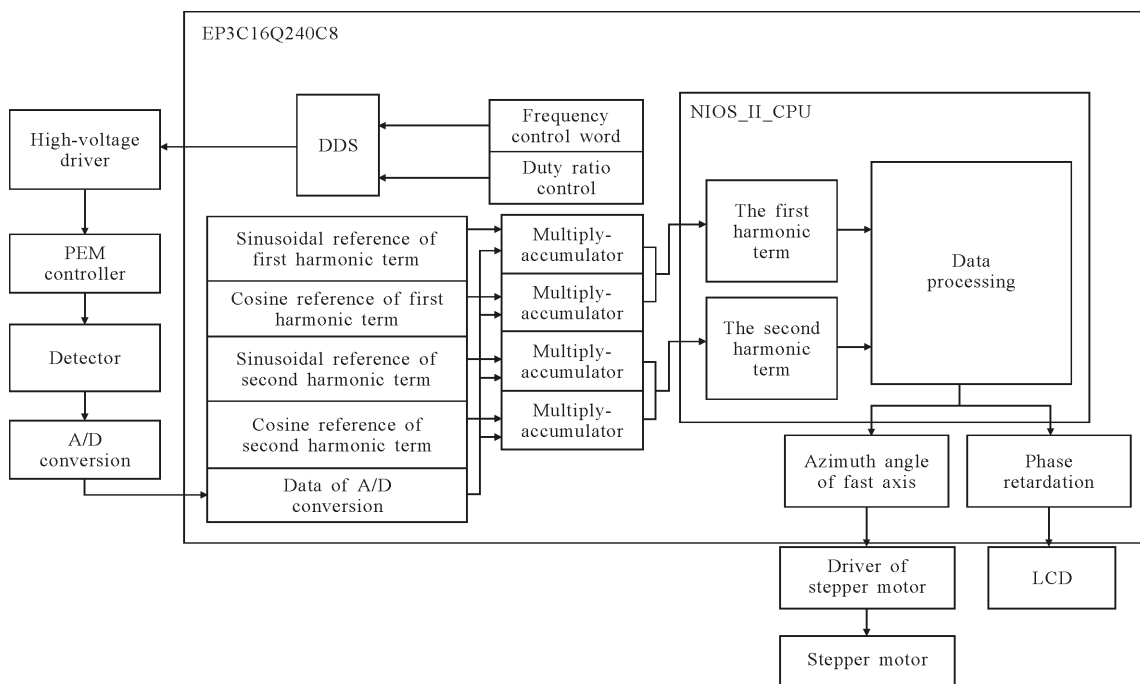


图 2 系统算法示意图

Fig.2 Sketch map of system algorithm

2 实验

测量系统主要包含光路系统、弹光调制器驱动电路、FPGA 电路、步进电机驱动、LCD 显示五个部分。按照图 1 搭建了实验系统,起偏器和检偏器均为 Thorlabs 公司的格兰泰勒偏振棱镜 GT10,消光比优于 105:1;弹光调制器为实验室自行研制的具有双压电石英驱动的八角对称状结构的弹光调制器,谐振频率为 50.124 KHz;光源选用了激光功率为 5 mW,波长为 650 nm 的半导体激光器;待测波片为 Thorlabs 公司 WPH05M-633 nm 的 1/4 波片。因此,波片相位延迟量的理论值 $\delta_r=633/650 \times 90^\circ=87.65^\circ$ 。系统实物图如图 3 所示。

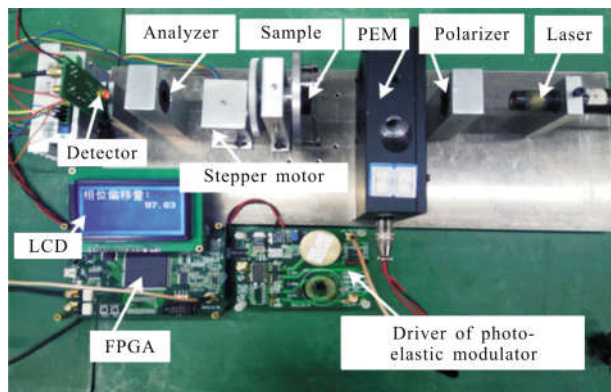


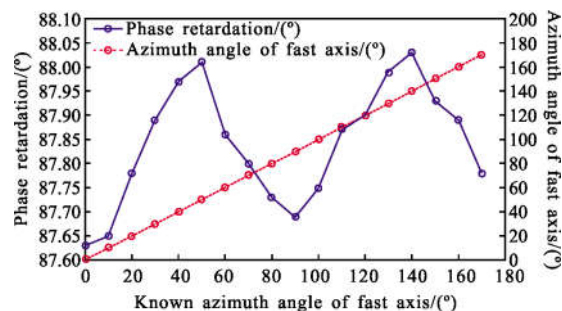
图 3 测量系统实物图

Fig.3 Physical map of measuring system

为了验证该方案的可行性,进行了如下实验。首先,取弹光调制器的快轴方向为 x 轴,慢轴方向为 y 轴,入射光的传播方向为 z 轴,起偏器的透光轴方向与弹光调制器快轴方向成 45° ,检偏器的透光轴方向与弹光调制器的快轴方向成 -45° 。在初始状态下 FPGA 对光电探测器输入的信号进行数字锁相处理,经数字锁相后分别得到探测信号的一倍、二倍频项,并进行保存。延时 5 s 后,启动步进电机匀速转动带动波片转动 45° 后停止转动,此时 FPGA 再对探测信号进行数字锁相处理,再次得到波片转动后的信号一倍、二倍频项。然后 FPGA 对两次信号的各倍频项进行处理,得到波片的快轴方位角 θ 和相位延迟量 δ ,最后由快轴方位角 θ 与驱动电机脉冲的关系使步进电机带动波片转动直到波片快轴转到 x 轴方向停止。从而实现了波片的快轴方向与弹光调制器

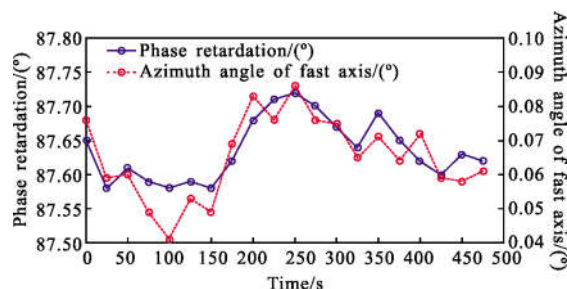
的快轴方向重合,完成了标定波片快轴,同时测得的相位延迟量通过 LCD 显示出来。

在系统准确性测试实验中,以 1/4 波片为待测样品,以 10° 为步进,波片快轴从 0° 位置旋转到 170° 位置对波片进行测量,实验结果如图 4(a)所示。在系统稳定性测试实验中,对同一块 1/4 波片(快轴位于零度角位置)进行了 20 次测量。每 25 s 记录一次实验数据验证系统的稳定性,实验数据如图 4(b)所示。



(a) 1/4 波片准确性测量结果

(a) Measuring results of accuracy of quarter-wave plate



(b) 1/4 波片稳定性测量结果

(b) Measuring results of stability of quarter-wave plate

图 4 1/4 波片测量结果

Fig.4 Measuring results of quarter-wave plate

3 分析与讨论

在系统准确性测量过程中,对图 4(a)的实验数据进行分析可得 1/4 波片快轴方位角的最大偏差和相位延迟量的平均值、标准差,见表 1。

由表 1 可知,相位延迟量测量值的标准差为 0.14° 。波片快轴旋转到 120° 时,相位延迟量测量值为 88.11° ,此时存在最大偏差 $\Delta\delta_{\max}=(88.11-87.65)^\circ=0.46^\circ$,对应相对误差为 $R=\Delta\delta_{\max}/\delta_r=0.46^\circ/87.65^\circ=0.53\%$ 。因此,将系统对应的测量精度视为 $1-R=99.47\%$ 。当波片快轴旋转到 70° 时,快轴方位角测量值存在最大偏

差为 0.31°。

表 1 准确性测量结果的平均值、标准差

Tab.1 Average values and standard deviation of measuring results of accuracy

Statistical value	Azimuth of fast axis	Phase retardation
Reference values/(°) (@650 nm)	-	87.65
Average values/(°)	-	87.89
Standard deviation/(°)	-	0.14
Maximum deviation/(°)	0.31	0.46

在系统的稳定性测试中,对图 4(b)的实验数据进行分析可得 1/4 波片快轴方位角和相位延迟量的平均值、标准差,见表 2。

表 2 稳定性测量结果的平均值、标准差

Tab.2 Average values and standard deviation of measuring results of stability

Statistical value	Azimuth of fast axis	Phase retardation
Reference values/(°) (@650 nm)	0	87.65
Average values/(°)	0.065 1	87.62
Standard deviation/(°)	0.012 6	0.049

由表 2 可知,1/4 波片的快轴方位角和相位延迟量的测量值标准差分别为 0.013°和 0.049°,测量系统具有很强的稳定性。

系统的测量误差主要来源于步进电机带动齿轮旋转造成的误差,此外,光源的不稳定也会影响测量结果。所以减小测量误差可以从提高机械结构的精密度和稳定光源等方面展开工作。

4 结 论

文中将弹光调制技术和数字锁相技术应用到波片参数测量中,设计了能够高效精确测量波片相位延迟量和快轴方位角,并用步进电机标定快轴的测量系统。搭建了实验系统并对波片进行了测量,实验结果表明该系统对 1/4 波片快轴方位角的测量精度

优于 0.31°,相位延迟量的测量精度和重复度分别优于 99.47%和 0.14°。测量系统测量效率高,单次测量用时仅需 20 s,信号的数字锁相和数据计算处理由 FPGA 完成,弹光调制器和步进电机的驱动信号由 FPGA 控制,波片测量过程中无需手动操作,实现了光机电一体化和测量过程自动化。

参考文献:

- [1] Xue Qingwen, Li Guohua. Half-shade method for measuring the phase retardation of quarter-wave plate [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1998, 9(2): 150-151. (in Chinese)
- [2] Xiao Haosu, Zhang Yunqiang. Precision analysis of polarization interference method for measuring stress birefringence of crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 273-275. (in Chinese)
- [3] Tan Qiao, Xu Qifeng. New method for retardance measurement of a quarter-wave plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0717002. (in Chinese)
- [4] Ren Hongliang, Wang Jiuyang. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 250-252. (in Chinese)
- [5] Hu jianming, Wang Xiangzhao. Measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 02532239. (in Chinese)
- [6] Zeng Aijun, Li Fanyue. Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photo-elastic modulator [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4347-4352.
- [7] Li Kewu, Wang Zhibin. High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation [J]. *Acta Phys Sinica*, 2015, 64(18): 184206. (in Chinese)
- [8] Li Kewu, Wang Liming. Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0508003. (in Chinese)
- [9] Wang Shuang, Wang Zhibin. Realizing the measurement of the crystal electro-optic coefficient by photo-elastic modulation with digital phase locking [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1012001. (in Chinese)