

激光与光电子学进展

具有相位补偿的级联调制型相位延迟量精确检测方法

张敏娟^{1,2*}, 李春阳^{1,2}, 李晋华^{1,2}, 杨坤^{1,2}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

摘要 相位延迟量是偏振光学元件的一个重要指标,为了精准快速地测量偏振元件的相位延迟量,提出一种具有相位补偿的级联调制的偏振元件相位延迟量检测方法。该方法采用弹光调制器(PEM)和电光调制器(EOM)作为相位延迟量检测系统的级联调制元件,利用Soleil-Barbinet相位补偿器对样品进行光学补偿。基于数字锁相技术与现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的片上可编程系统,检测光强极值点对应的Soleil-Barbinet相位补偿器的相位参数并进行数据处理,实现样品的相位延迟量检测。实验表明,利用该方法测量样品的相位延迟量的最大相对误差为0.857%,测量精度为99.143%,验证了将偏振调制法和补偿法相结合测量相位延迟量具有较高的精度,且降低了补偿器本身对测量误差的影响。

关键词 仪器,测量与计量;相位延迟量;弹光调制;电光调制;数字锁相技术;Soleil-Barbinet相位补偿器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212873

Accurate Detection Method of Phase Retardation Based on Cascade Modulation with Phase Compensation

Zhang Minjuan^{1,2*}, Li Chunyang^{1,2}, Li Jinhua^{1,2}, Yang Kun^{1,2}¹*School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*²*Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*

Abstract Phase retardation is an important indicator of polarizing optical elements. To measure the phase retardation of the polarizing element accurately and quickly, a method with phase compensation and cascade modulation for detecting the phase retardation of the polarizing elements is proposed. In this method, a photo-elastic modulator (PEM) and an electro-optical modulator (EOM) are used as the cascade modulation element of the phase delay detection system, and a Soleil-Babinet phase compensator is used to compensate phase retardation for the sample. Using digital phase lock technology and a field-programmable gate array (FPGA)-based on-chip programmable system, it detects the phase parameters of the Soleil-Babinet phase compensator corresponding to the extreme point of light intensity and performs data processing to realize the detection of the phase retardation of the sample. Experiments show that the maximum relative error of using this method to measure the phase delay of a sample is 0.857% and the measurement accuracy is 99.143%, which verifies that the combination of the polarization modulation and compensation methods to measure the phase retardation has high accuracy, and the influence of the compensator itself on the measurement error is reduced.

Key words instruments, measurement and metrology; phase retardation; photo-elastic modulation; electro-optic modulation; digital phase lock technology; Soleil-Barbinet phase compensator

1 引言

光学相位延迟器件是光学系统的重要组成器件,具有晶体双折射特性。当入射光通过光学相位延迟器

件时,光波的偏振态发生改变,产生特定的相位延迟。光学相位延迟器件被广泛应用于偏振光干涉系统、光纤通信、遥感偏振成像系统、光学精密测量等领域^[1]。波片和补偿器作为最常见的光学相位延迟器件,与其

收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505180)、山西省自然科学基金(201901D111163, 201901D111145)

通信作者: *zmj7754@163.com

他光学偏振器件配合使用,可改变入射光波的光强、相位和传播方向,实现偏振态的变换、偏振面的旋转及各种偏振光的调制^[2]。

相位延迟量是光学元件的一个重要参数,与器件厚度、光学均匀性、应力分布等诸多因素密切相关,其大小直接影响到其应用系统的性能,因此有必要对光学元件相位延迟量进行精确测量^[3]。目前针对光学相位延迟量的检测方法主要有:光学外差法、光强比值法、电光调制法、延迟补偿法等。光学外差法中环境噪声对测量结果影响较大,且难以实现快速相位变化量的检测;光强比值法稳定性差,无法满足长时间、高精度测量需求;电光调制法的测量准确度易受调制电压和光源波长稳定性的影响,在工业环境中难以实现可靠测量;延迟补偿法通常是通过移动补偿板将检测信号的相位调制到零或特定值,具有高空间分辨率和宽波长范围,但是其精度受光强波动、低频噪声、补偿器光轴与测量光束不垂直等因素制约^[4-8]。

为了提升光学相位延迟器件的测量精度,本文提出一种综合补偿法和偏振调制法优点的光学相位延迟量测量方法。本文在研究弹光调制器(PEM)和电光调制器(EOM)工作机理和特性的基础上,选择使用光谱范围宽、调制频率高的 PEM 和具有相位延迟量可控、响应速度快的 EOM 进行级联相位调制,同时采用

Soleil-Barbinet 相位补偿器进行相位补偿;基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)和数字锁相放大技术对数据进行处理,确定光强极值点对应的相位补偿值以及计算样品的相位延迟量;通过标定与校准,可消除入射光不稳定等对系统测量准确度的影响,在复杂环境中实现样品相位延迟量的精准测量。

2 基于 PEM 和 EOM 级联调制的相位补偿测量原理

具有相位补偿的级联调制型相位延迟量测试系统结构框图如图 1 所示,光学系统由激光器、起偏器 P1、PEM、分束器 (beam splitter)、EOM、待测样品、Soleil-Babinet 相位补偿器、检偏器 P2 及光电探测器 (detector) 等组成。入射激光经 PEM 后由分束器分为两路信号,一路光信号经 PEM 和 EOM 级联调制、样品偏振调制、Soleil-Babinet 相位补偿后,经检偏器 P2 到 detector 1。detector 1 输出信号经低通滤波分解为直流分量和交流分量,经信号调理后到数据处理系统,实现相位延迟量的分析和计算;另一路分束光经检偏器 P3 输出到 detector 2, detector 2 输出信号经数据处理实现 PEM 相位延迟量的检测,并调制 PEM 驱动信号的频率和幅值,实现 PEM 相位延迟量的稳定控制。

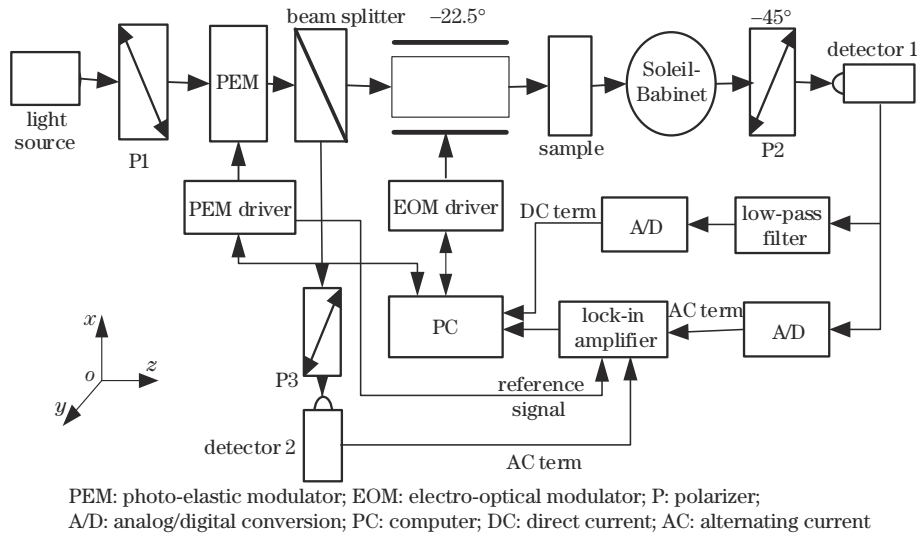


图 1 相位补偿的级联调制型相位延迟量测量系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of measurement system for phase retardation based on cascade modulation with phase compensation

该光学系统中的光学元件都可以用穆勒矩阵进行表示。当调节 PEM 使其快轴方向与光路方向重合时, EOM 调制快轴相对 PEM 快轴成 -22.5° , P1 和 P2 的偏振轴相对 PEM 分别成 45° 和 -45° ^[9]。设入射光通过起偏器后的光强为 I_0 , 因此, 入射光经过起偏器后 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_{in} = I_0 [1, 0, 1, 0]^T. \quad (1)$$

根据文献[10]知 PEM 的穆勒矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{PEM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\beta_p) & \sin(\beta_p) \\ 0 & 0 & -\sin(\beta_p) & \cos(\beta_p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

PEM 的相位延迟量 β_p 为

$$\beta_p = \delta_0 \sin(2\pi ft), \quad (3)$$

式中: δ_0 为 PEM 的调制幅值; f 为 PEM 的调制频率。

检偏器 P₂、P₃ 的穆勒矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{P_2} = \mathbf{M}_{P_3} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

实验中 EOM 采用横向调制 (外电场和光传播方向垂直), 对 EOM 施加半波电压的穆勒矩阵可描述为

$$\mathbf{M}_{\text{EOM}V=V_\pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在 EOM 上施加调制频率为 f_0 的交流信号后产生的相位延迟为

$$\beta_E = \frac{\pi V}{V_\pi} \sin(2\pi f_0 t) = \rho \sin(2\pi f_0 t), \quad (6)$$

式中: V_π 为 EOM 上的半波电压; V 为外加电压。令 $\rho = \pi V / V_\pi$, 为两个本征模在电光晶体中获得的相位差。当 $V = V_\pi$ 时, 若不考虑晶体中的吸收损失和表面的反射损失, 透过率近似为 1, 两个偏振分量产生 π 的相位延迟^[11]。

Soleil-Barbinet 相位补偿器可用于产生相位延迟或进行相位补偿, 其结构示意图如图 2 所示。它是由两块光轴方向相同的晶体楔和一块与之光轴垂直的平晶组成, 通过旋转测微丝杆改变晶体楔对的组合厚度, 从而改变相位延迟量, 实现相位补偿, 且晶体楔在平移过程中相位延迟量呈现周期性变化^[12]。当晶体楔平移 ΔL 后, 光通过 Soleil-Babinet 相位补偿器时产生的相位延迟量为

$$\beta_B = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \cdot \Delta L \tan \alpha, \quad (7)$$

式中: n_o 与 n_e 分别为 o 光和 e 光所对应的主折射率; α 为补偿器的楔角。

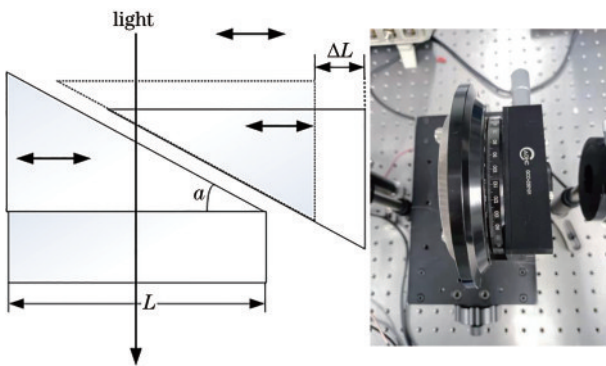


图 2 Soleil-Barbinet 相位补偿器

Fig. 2 Soleil-Barbinet phase compensator

入射光经过 PEM、EOM、待测样品、Soleil-Babinet 相位补偿器后的出射光的总相位延迟量 β 为

$$\beta = \beta_P + \beta_E + \beta_S + \beta_B = \beta_P + \beta_E + \Delta\beta, \quad (8)$$

式中: β_S 为待测样品的相位延迟; $\Delta\beta$ 为待测样品与 Soleil-Babinet 补偿器的相位延迟量的和。出射光为沿 Z 方向偏振的线偏振光, 其光强为

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\beta_P + \beta_E + \Delta\beta}{2} \right) = \frac{I_0}{2} \left[1 - \cos(\beta_P + \beta_E + \Delta\beta) \right]. \quad (9)$$

将式(3)和式(6)代入式(9)可得

$$I = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - \cos[\beta_P + \rho \sin(2\pi f_0 t)] + \Delta\beta \right\} = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - \cos\Delta\beta \cos[\beta_P + \rho \sin(2\pi f_0 t)] + \sin\Delta\beta \sin[\beta_P + \rho \sin(2\pi f_0 t)] \right\}. \quad (10)$$

利用第一阶贝塞尔级数, 将式(10)简化为

$$\begin{cases} \sin[t \sin(\omega t)] = 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(t) \sin[(2k-1)\omega t] \\ \cos[t \sin(\omega t)] = J_0(t) + 2 \sum_{2k} J_{2k}(t) \cos(2k\omega t) \end{cases}, \quad (11)$$

式中: k 为正整数; J_0 表示第 0 阶贝塞尔级数; J_{2k-1} 表示第 $2k-1$ 阶贝塞尔级数; J_{2k} 表示第 $2k$ 阶贝塞尔级数, 式(11)可以表述为

$$I = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - \cos\Delta\beta \left[\beta_P + J_0(\rho) + 2 \sum_{2k} J_{2k}(\rho) \cdot \cos(2k \cdot 2\pi f_0 t) \right] + \sin\Delta\beta \sin \left\{ \beta_P + 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(\rho) \cdot \sin[(2k-1) \cdot 2\pi f_0 t] \right\} \right\}, \quad (12)$$

式(12)可以简化为

$$I = I_0 \left[2\gamma \sin\Delta\beta J_1(\rho) \sin(2\pi f_0 t) - \tau \cos\Delta\beta J_2(\rho) \cos(4\pi f_0 t) \right], \quad (13)$$

式中, γ 和 τ 分别为基频 f_0 和二倍频 $2f_0$ 的放大系数。本文选用基频 f_0 和二倍频 $2f_0$ 信号对调制补偿后的光波进行选频放大, 其作用是帮助系统判断完全补偿的位置, 将直流零位的测量由绝对光强的测量转换为交流零位的测量^[13]。

当 $\Delta\beta = \beta_S + \beta_B = \frac{\pi}{2}$ 时, 探测器输出频率为 f_0 的正弦信号; 当 $\Delta\beta = 0$ 即 $\beta_S = -\beta_B$ 时, 探测器输出为频率为 $2f_0$ 的正弦信号, 此时系统处于完全补偿的状态, 交流调制信号中仅有偶次谐波分量, 基频分量为最小值。因此, 可利用基频最小值寻找光强极值点, 从而精准判断完全补偿位置。

当系统中不放置待测样品时, 根据式(7), 旋转相位补偿器可以得到相位周期为 2π 时的位移量 $\Delta L_{2\pi}$:

$$2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \cdot \Delta L_{2\pi} \tan \alpha, \quad (14)$$

式中, $\Delta L_{2\pi}$ 为两次二倍频信号的补偿器移动距离。加入待测样品后, 可以再次测量补偿器移动距离 ΔL , 可通过下式计算得到补偿器产生的相位延迟量:

$$\frac{\beta_B}{2\pi} = \frac{\Delta L}{\Delta L_{2\pi}}, \quad (15)$$

基于补偿器完全补偿原理,可计算出待测样品的相位延迟量:

$$\beta_s = -\frac{\Delta L}{\Delta L_{2\pi}} 2\pi \quad (16)$$

3 基于数字锁相技术的数据处理

本文系统的数据处理部分不仅要实现样品相位延迟量的计算,也要对 PEM 的相位延迟量进行检测,进而调节 PEM 的驱动信号实现 PEM 的相位延迟量的稳定控制,其数据处理实现框图如图 3 所示。图中,基于测

量的 PEM 的相位延迟量的变化调节频率控制字和占空比;利用直接数字合成器(DDS)技术实现驱动信号的幅值和频率的调节,稳定 PEM 的相位延迟量^[14];样品相位延迟量是基于 Qsys 的可编程片上(SOPC)系统,运用数字锁相技术将参考信号和模拟/数字(A/D)信号转换进行乘累加运算,输入到 NIOS_II 处理器进行数据运算与算法实现,在上位机可直接显示基频信号最小值与二倍频信号值,从而准确找到完全补偿位置,实现相位延迟量的精准测量。

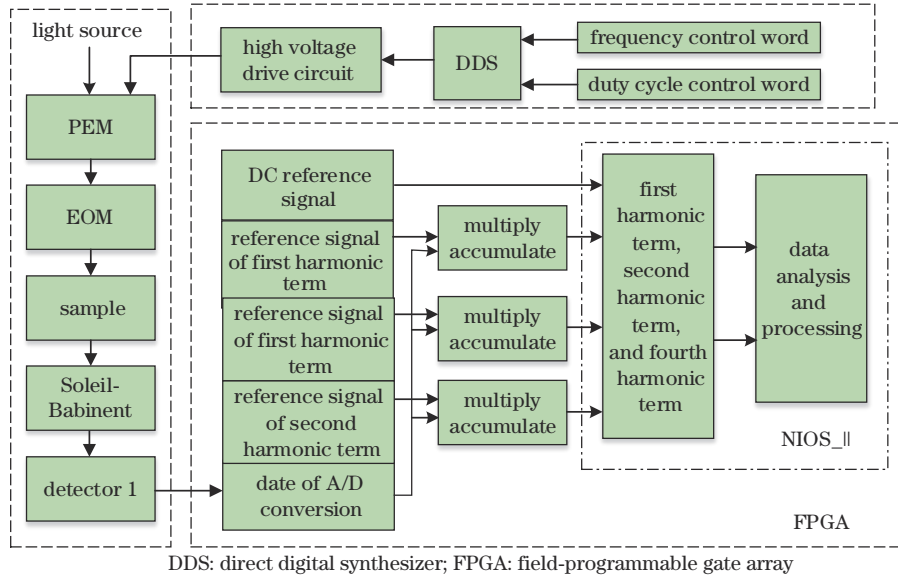


图 3 数据处理实现框图
Fig. 3 Data processing realization block diagram

4 实验验证与数据分析

4.1 系统搭建与调试

搭建的测试系统如图 4 所示,在实验中环境温度在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,入射光采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne

激光器,起偏器和检偏器均采用 Thorlabs 公司的消光比大于 $10^5:1$ 的格兰泰勒棱镜,偏振方向与激光的偏振方向一致,且相对 PEM 调制快轴分别成 45° 和 -45° 。PEM 为实验室自行研制的八角形硒化锌晶体,谐振频率为 50.284 kHz;分束器采用大恒光电公司的 50:50

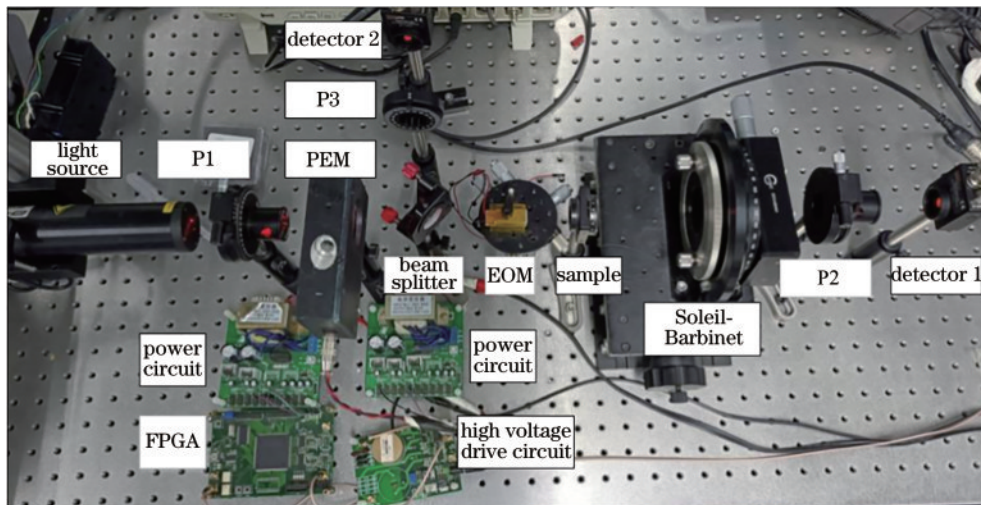


图 4 测量系统实物图
Fig. 4 Physical diagram of measurement system

的分光镜,仅将光路分为两路,不改变偏振态;EOM 是利用铌酸锂单轴晶体的横向体电光效应研制的,可沿晶片光轴 Z 方向通光、Y 方向上施加电场;实验使用 Thorlabs 公司 WPH05M-633 nm 的零级 1/2 波片和 WPQSM05-633 nm 的零级 1/4 波片作为待测样品验证测试系统的可行性与准确性,所以 1/2 波片和 1/4 波片相位延迟量的理论值分别为 180°和 90°。

在光学系统搭建时,首先在系统中不放置样品、相位补偿器对光学系统进行调试,以保证探测光强最强,同时,PEM 的相位延迟量维持相对稳定;再将 Soleil-Barbinet 相位补偿器放置到光路中,旋转补偿器到消光位置,使补偿器的晶轴方向与入射光的偏振方向重合,再旋转补偿器 45°后固定补偿器。

4.2 Soleil-Barbinet 相位补偿器的标定

项目选用 GCO-030101 Soleil-Barbinet 补偿器进行相位补偿,该补偿器可对 200~2100 nm 波长范围的光进行 0~2π 范围内的相位延迟调节。补偿器通过调节测微丝杠改变相位延迟量,且其测微丝杠最小平移量为 0.001 mm,移动范围为 0~30 mm。根据式(7)知相位延迟量和平移量之间的比例系数与光源波长有关,因此补偿器在测量前应先定标。

将补偿器置于测量系统中,调节补偿器使探测器输出光强为最小,出现光强极值点,记录当前测微丝杠平移量 L_0 ,旋转测微丝杠改变平移量,相位补偿量达到 2π 时,示波器显示光强最弱时,再次记录测微丝杠平移量 $L_{2\pi}$ 。因此,0 和 2π 处的平移量差值 $\Delta L_{2\pi} = L_{2\pi} - L_0$ 。表 1 为 6 次对补偿器的标定结果。

表 1 Soleil-Barbinet 补偿器标定结果
Table 1 Calibration results of Soleil-Barbinet compensator

unit: mm

Number	1	2	3	4	5	6	Mean value
L_0	4.785	4.786	4.773	4.882	4.880	4.786	4.815
$L_{2\pi}$	18.355	18.352	18.361	18.356	18.359	18.352	18.355
$\Delta L_{2\pi}$	13.570	13.566	13.588	13.474	13.479	13.566	13.540

4.3 测量及结果分析

在系统测试时,选用 1/2 波片和 1/4 波片分别作为测试样品,将待测波片置于电光调制器和补偿器之间,偏振光垂直穿过待测波片。旋转待测波片,使波片的晶轴方向与入射光偏振方向重合。再将待测波片旋转 45°,使其晶轴方向与补偿器晶轴方向一致,此时为测量初始位置。再次调节补偿器测微丝杠使输出信号基频分量最小,并记录测微丝杠的值,两者相减得到补偿器移动量 ΔL 。通过 ΔL 可以计算待测样品的相位延

迟量。

但在实际测量中示波器因灵敏度低不能准确显示光强极值点,导致相位完全补偿测量不准。为了准确判断完全补偿位置对应的平移量,采用 FPGA 对测量信号进行数字锁相,并基于 FPGA 的软核进行数据处理。数据处理需完成输入信号的基频分量最小值和二倍频分量最大值的查找,从而准确找出完全补偿时对应的平移量。实验中对 1/2 波片和 1/4 波片分别多次测试,结果如表 2 所示。

表 2 1/2 波片与 1/4 波片测量结果
Table 2 Measurement results of half-wave plate and quarter-wave plate

n	$\Delta L_{2\pi} /$ mm	Half-wave plate				Quarter-wave plate			
		$\Delta L /$ mm	$\beta_s /(^{\circ})$	Absolute error /(^{\circ})	Relative error /%	$\Delta L /$ mm	$\beta_s /(^{\circ})$	Absolute error /(^{\circ})	Relative error /%
1		6.719	178.644	1.356	0.753	3.360	89.335	0.665	0.739
2		6.716	178.564	1.436	0.798	3.359	89.309	0.691	0.768
3		6.721	178.697	1.303	0.724	3.361	89.362	0.638	0.709
4		6.715	178.538	1.462	0.812	3.360	89.335	0.665	0.739
5		6.717	178.591	1.409	0.783	3.359	89.309	0.691	0.768
6	13.540	6.722	178.724	1.276	0.709	3.360	89.335	0.665	0.739
7		6.718	178.617	1.383	0.768	3.358	89.282	0.718	0.798
8		6.715	178.538	1.462	0.812	3.357	89.256	0.744	0.827
9		6.723	178.750	1.250	0.694	3.361	89.362	0.638	0.709
10		6.721	178.697	1.303	0.724	3.356	89.229	0.771	0.857
11		6.717	178.591	1.409	0.783	3.359	89.309	0.691	0.768

由表 2 和图 5 可知,测量中 1/2 波片最大绝对误差为 1.462°,1/4 波片存在最大绝对误差 0.771°;两个待测样品相位延迟量的最大相对误差为 0.857%,再由

最大相对误差可得系统的测量精度为 99.143%。说明系统具有较高的稳定性且测量精度高。

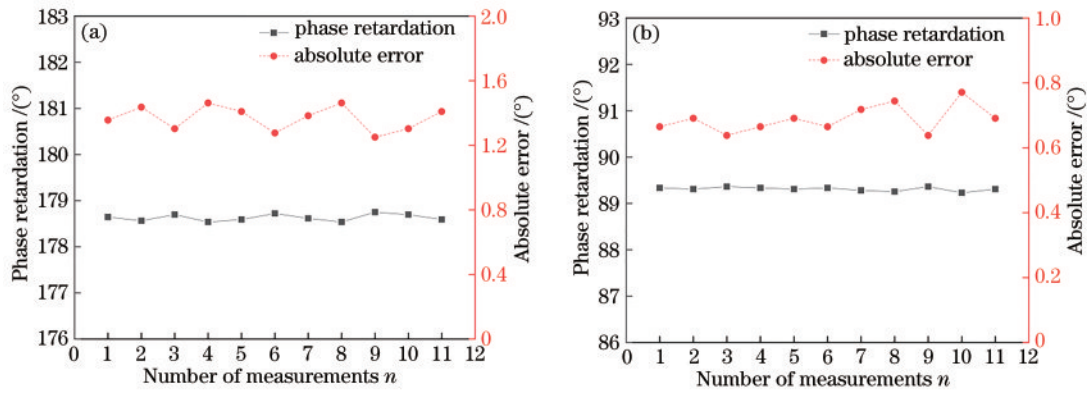


图 5 相位延迟量测量结果与绝对误差。(a) 1/2 波片；(b) 1/4 波片

Fig. 5 Measurement results of phase retardation and absolute error. (a) Half-wave plate; (b) quarter-wave plate

5 结 论

采用 PEM 和 EOM 级联调制与 Soleil-Barbinet 相位补偿器相结合的方法进行相位延迟量测量。通过对 Soleil-Barbinet 相位补偿器多次标定, 基于 FPGA 与数字锁相技术判断完全补偿点, 精准找到基频分量最小值处消光位置, 从而根据补偿器上测微丝杆读数计算待测样品相位延迟量。该方法综合了补偿法和偏振调制法的优点, 通过补偿器平移量的相对比值直接求解出待测样品的相位延迟量, 在一定程度上消除了光学系统误差, 实现了对光学器件相位延迟量的精准测量。实验结果表明, 该方法测量的相位延迟量最大绝对误差为 1.462° , 最大相对误差为 0.857% , 测量精度为 99.143% , 具有测量稳定性高、速度快、误差小的优点。

参 考 文 献

- [1] Li G Y, Gu L Y, Gu S Y, et al. Simultaneous measurement of retardance and fast axis azimuth based on liquid crystal wave plate group[J]. *Optik*, 2018, 172: 554-560.
- [2] Qi J L, Wang W H, Shi B, et al. Concise and efficient direct-view generation of arbitrary cylindrical vector beams by a vortex half-wave plate[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 803-813.
- [3] Wang H Y, Zhang Z Y, Zhao K, et al. Independent phase manipulation of co- and cross-polarizations with all-dielectric metasurface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 053601.
- [4] 李春艳, 吴易明, 高立民, 等. 磁光调制法测量玻璃内应力(英文)[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 911-916. Li C Y, Wu Y M, Gao L M, et al. Magneto-optical modulation measurement method of glass[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 911-916.
- [5] Chen K H, Tseng J T, Yeh C H, et al. Alternative method for measuring the phase retardation and fast axis of a wave plate[J]. *Optical Review*, 2019, 26(6): 652-658.
- [6] Ou M Y, Liu Y, Tang J L, et al. Composite achromatic quartz wave plate with adjustable retardation and temperature insensitivity[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(22): 6665-6670.
- [7] 陈强华, 孔祥悦, 刘斌超, 等. 基于磁光调制及基频信号检测的高精度波片测量[J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(5): 461-465. Chen Q H, Kong X Y, Liu B C, et al. A wave plate measurement method based on magneto-optical modulating and base frequency signal detecting[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(5): 461-465.
- [8] Ding F, Chen Y T, Bozhevolnyi S I. Gap-surface plasmon metasurfaces for linear-polarization conversion, focusing, and beam splitting[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 707-714.
- [9] 王楠, 王艳超, 张敏娟, 等. 基于电压补偿的弹光调制器稳定性控制方法研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4): 419-424. Wang N, Wang Y C, Zhang M J, et al. A stability control method of photo-elastic modulator based on voltage compensation[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 419-424.
- [10] 李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0508003. Li K W, Wang L M, Wang Z B, et al. Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0508003.
- [11] Zhang Y, Song F J. Method for measuring retardation of infrared wave-plate by modulated-polarized visible light [J]. *Information Optics and Optical Data Storage II*, 2012, 8559(3): 1-8.
- [12] Zhang W J, Zhang Z W. Heterodyne interferometry method for calibration of a Soleil-Babinet compensator[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4227-4231.
- [13] Li K W, Wang L M, Wang Z B, et al. Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 690-697.
- [14] 张敏娟, 刘文敬, 王志斌, 等. 弹光调制器的频率漂移特性及其傅里叶变换光谱的稳定性研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 20200019. Zhang M J, Liu W J, Wang Z B, et al. Study on frequency-drifting characteristics of photo-elastic modulator and stability of Fourier transform spectra[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200019.