

# 自校准法测量波片相位延迟

侯俊峰 于 佳 王东光 邓元勇 张志勇 孙英姿

(中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100012)

**摘要** 在旋转补偿器椭偏仪(RCE)的基础上,提出了一种自校准的波片相位延迟测量方法。该方法将补偿器的相位延迟作为未知参数,根据 Mueller 矩阵理论建立了 4 个非线性方程,求解得到待测波片的相位延迟;实现了补偿器相位延迟的自校准,消除了其定标不准确带来的系统误差,尤其适用于多个波长的波片延迟测量。在此基础上建立了一套波片延迟测量系统,并分析和模拟了各种主要的误差源对系统测量精度的影响。结果表明,对于任意延迟的波片,测量系统最大的系统误差和随机误差分别为  $0.036^\circ$  和  $0.040^\circ$ 。此外,使用该方法分别测量了  $\lambda/4$  波片、 $\lambda/2$  波片、 $127^\circ$  波片和空气(不放入任何样品)在波长 517.3、525.0、532.4 nm 处的相位延迟以评估测量系统的性能,其中空气的相位延迟代表测量系统的测量精度,与模拟结果基本一致。

**关键词** 测量;相位延迟;自校准;波片;二向色性

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0408007

## Phase Retardation Measurement of Wave plates Based on the Self-Calibration Method

Hou Junfeng Yu Jia Wang Dongguang Deng Yuanyong Zhang Zhiyong Sun Yingzi

(Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract** Based on the rotating-compensator ellipsometry (RCE), a method of phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method is presented. The new method takes retardation of compensator as an unknown parameter, constructs four nonlinear equations, and calculates the retardation of wave plates under test. The method uses the self-calibration of compensator to eliminate the systematic error caused by its retardation's inaccurate calibration. Especially, it is more convenient for retardation measurement in many wavelengths. Based on this, the measuring accuracy of system is analyzed and simulated. It is found that the maximal systematic error and random error are  $0.036^\circ$  and  $0.04^\circ$ , respectively, over all the samples. Besides, a quarter wave plate (QWP), a half wave plate (HWP), a  $127^\circ$  wave plate and the air (without sample) are measured at 517.3, 525.0 and 532.4 nm, respectively, to evaluate the performance of the system, where the retardation of air indicates the measuring accuracy of the system, and is consistent with error analysis.

**Key words** measurement; phase retardation; self-calibration; wave plate; dichroism

**OCIS codes** 120.2130; 120.5050; 120.5410; 260.2130; 260.5430

## 1 引 言

波片是偏振光学系统中的重要元件,它可以改变入射光的偏振状态,被广泛应用于光弹力学、干涉技术、光学精密仪器测量等诸多领域。相位延迟作为波片的主要参量之一,其测量精度直接影响光学系统的偏振精度。因此,波片相位延迟的高精度测

量是获得高质量偏振光学系统的必要条件。

目前,波片相位延迟的测量方法有很多,包括机械旋转调制<sup>[1~3]</sup>、偏振调制技术<sup>[4~6]</sup>、光弹调制<sup>[7,8]</sup>、补偿法<sup>[9,10]</sup>、分频激光探测法<sup>[11~13]</sup>等,每种方法都有自己的优缺点。其中,机械旋转调制和补偿法由于实验装置简单而常被采用。尽管如此,这些方法

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(10778723, 10803012)和中国科学院方向性资金(KJCX2-EW-T07)资助课题。

作者简介: 侯俊峰(1986—),男,博士研究生,主要从事偏振光学方面的研究。E-mail: jfhou@bao.ac.cn

导师简介: 王东光(1966—),女,博士,研究员,主要从事偏振光学与太阳磁场测量方面的研究。E-mail: wdg@bao.ac.cn

中通常需要插入标准波片或其他相位调制元件调制偏振状态,因此,实验中补偿器延迟量的精确定标是实现高精度波片测量的前提。旋转待测波片的测量方法无需使用补偿器,然而该法不能高精度测量 $\lambda/2$ 波片及全波片<sup>[14]</sup>,且测量精度受探测器的非线性影响较大。技术成熟的椭偏仪<sup>[3]</sup>(RCE)经常被用于测量波片的相位延迟,该方法需要通过测量空气(空矩阵)定标系统中补偿器的延迟量。一方面,空矩阵的测量误差影响补偿器延迟量的定标误差;另一方面,对于多个波长的相位延迟测量,需要在每个波长定标补偿器的相位延迟,非常繁琐;此外,由于已经利用测量空气对系统定标,波片样品测量中空气的测量作为系统的测量精度不再具有实际意义。因此,椭偏仪测量无法较准确地给出系统的测量精度。

基于上述方法的不足,本文在椭偏仪实验装置的基础上,根据 Mueller 矩阵描述,将系统中补偿器的相位延迟作为未知参数之一,建立了 4 个非线性方程,基于非线性方程的自洽解得到待测波片的相位延迟。实验中,补偿器和待测波片的相位延迟同时被测量实现了补偿器相位延迟的自校准,消除了测量系统中补偿器的相位延迟定标不准确带来的系统误差,使得不同波长处相位延迟的同时测量成为可能;不再利用空矩阵定标,空矩阵的测量给出了系统的测量精度;此外,利用双区域测量法<sup>[15,16]</sup>消除了元件方位角误调引起的一阶测量误差,通过优化检偏器的方位角减小了高阶误差,实现了任意相位延迟波片的高精度测量。

## 2 测量原理

图 1 为实验装置图。将配有高精度稳压电源的氙灯作为入射光源,光源出射经过光纤耦合器转化为准直度小于  $0.30^\circ$ ,光斑小于 5 mm 的准直光束通过各偏振元件。两个 Glan-Thompson 棱镜 P、A 分别作为起偏器和检偏器,与补偿器 C 分别安装于各自的电控精密转台上。转台的转动精度优于  $10''$ ,可由计算机控制  $360^\circ$  自由旋转,并记录转动信息。成像镜将经过偏振系统的光束会聚于单色仪的入射狭缝,使用光电倍增管(PMT)作为单色光源接收系统。补偿器 C 是由两片光轴相互垂直的石英波片(厚度约 1 mm)胶合而成的近  $\lambda/4$  单色波片(中心波长 532.4 nm),其初始方位角及样品 S 的光轴方位角与起偏器 P 保持平行,均为  $0^\circ$ 。检偏器 A 的方位角相对于 P 旋转  $\theta_a$ 。调整好光路后,由步进电机以  $5^\circ$  的步长旋转补偿器 C,探测器接收一系列光强值。

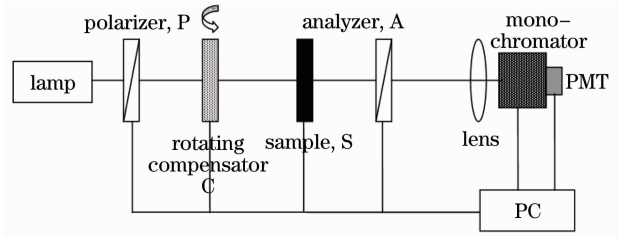


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

根据 Mueller 矩阵描述,探测光强  $I$  为补偿器方位角  $\theta_n$  的函数,表示为

$$I = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \mathbf{R}(-\theta_n) \mathbf{M}_A \mathbf{R}(\theta_n) \mathbf{M}_S \cdot \mathbf{R}(-\theta_n) \mathbf{M}_C \mathbf{R}(\theta_n) \mathbf{M}_P [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T = \tau \left[ 1 + \frac{1}{2} (1 + \cos \delta_c) \cos 2\theta_a + \sin \delta_c \sin \delta \sin 2\theta_a \sin 2\theta_n + \frac{1}{2} (1 - \cos \delta_c) \cos 2\theta_a \cos 4\theta_n + \frac{1}{2} (1 - \cos \delta_c) \cos \delta \sin 2\theta_a \sin 4\theta_n \right] = a_0 + b_2 \sin 2\theta_n + a_4 \cos 4\theta_n + b_4 \sin 4\theta_n, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{R}(\theta_n)$  和  $\mathbf{R}(\theta_a)$  分别为 C 和 A 的旋转矩阵;  $\mathbf{M}_A$ ,  $\mathbf{M}_S$ ,  $\mathbf{M}_C$  和  $\mathbf{M}_P$  分别为 A、S、C 和 P 的 Mueller 矩阵;  $\tau$  是系统透射率、光源辐射强度、探测器响应的乘积;  $\delta_c$  和  $\delta$  分别为补偿器和待测样品的相位延迟;  $\theta_a$  为检偏器的方位角,且

$$\begin{cases} a_0 = \tau \left[ 1 + \frac{1}{2} (1 + \cos \delta_c) \cos 2\theta_a \right] \\ b_2 = \tau \sin \delta_c \sin \delta \sin 2\theta_a \\ a_4 = \frac{1}{2} \tau (1 - \cos \delta_c) \cos 2\theta_a \\ b_4 = \frac{1}{2} \tau (1 - \cos \delta_c) \cos \delta \sin 2\theta_a \end{cases}, \quad (2)$$

傅里叶系数  $a_0$ 、 $b_2$ 、 $a_4$  和  $b_4$  是未知参数  $\tau$ 、 $\delta_c$ 、 $\delta$ 、 $\theta_a$  的非线性函数。依据消元法,消除  $\tau$ 、 $\delta$ 、 $\theta_a$ , 得到一个只含有未知数  $\delta_c$  的方程,表示为

$$\frac{4a_4}{a_0 + a_4} = 1 - \cos \delta_c - \frac{4b_4^2}{(a_0 + a_4)^2} \frac{1}{1 - \cos \delta_c} - \frac{b_2^2}{(a_0 + a_4)^2} \frac{1}{1 + \cos \delta_c}, \quad (3)$$

定义:  $t_1 = 4a_4/(a_0 + a_4)$ ,  $t_2 = 4b_4^2/(a_0 + a_4)^2$ ,  $t_3 = b_2^2/(a_0 + a_4)^2$ ,  $x = \cos \delta_c$ 。(3)式可以转化为

$$x^3 + (t_1 - 1)x^2 + (t_3 - t_2 - t_1)x + (1 - t_1 - t_2 - t_3) = ax^3 + bx^2 + cx + d = 0, \quad -1 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

(4)式是一个一元三次方程,根据判别式  $\Delta = B^2 - 4AC$  (其中  $A = b^2 - 3ac, B = bc - 9ad, C = c^2 - 3bd$ ) 的大小该方程有几组不同的解。该系统满足  $\Delta < 0$ , 根据盛金公式<sup>[17]</sup>, (4)式有 3 个不同的实根, 但仅一个在此处是有意义的, 即

$$x = [-b + A^{1/2} \cos(\Theta/3) - (3A)^{1/2} \sin(\Theta/3)] / (3a), \quad (5)$$

其中  $\Theta = \arccos T, T = (2Ab - 3aB) / (2A^{3/2}) (A > 0, -1 < T < 1)$ 。未知参数  $\delta_c, \theta_a, \tau, \delta$  由以下公式给出

$$\delta_c = \arccos x, \quad (6)$$

$$\theta_a = \pm \arctan \left\{ \frac{1}{(a_0 + a_4)^2} \left[ \frac{4b_4^2}{(1 - \cos \delta_c)^2} + \frac{b_2^2}{\sin^2 \delta_c} \right]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

$$\tau = \frac{a_0 + a_4}{1 + \cos 2\theta_a}, \quad (8)$$

$$(b_2 > 0 \ \& \ b_4 < 0) \text{ 或 } (b_2 < 0 \ \& \ b_4 > 0)$$

$$\delta = \arcsin \left( \frac{b_2}{\tau \sin \delta_c \sin 2\theta_a} \right), \quad (9)$$

$$(b_2 > 0 \ \& \ b_4 > 0) \text{ 或 } (b_2 < 0 \ \& \ b_4 < 0)$$

$$\delta = \pi - \arcsin \left( \frac{b_2}{\tau \sin \delta_c \sin 2\theta_a} \right). \quad (10)$$

由(1)式可知, 出射光强  $I$  随补偿器的方位角  $\theta_a$  的变化曲线为正弦曲线, 在  $2\pi$  周期内每隔  $5^\circ$  采集一个数据, 得到 72 组数据。采用最小二乘拟合求解傅里叶系数  $a_0, b_2, a_4$  和  $b_4$ 。其次, 根据(9)、(10)式计算待测样品的相位延迟  $\delta$ 。

此外, 由(6)式可知, 补偿器 C 的相位延迟  $\delta_c$  将根据该测量方法直接计算, 实现了补偿器相位延迟的自校准, 消除了测量系统中补偿器的相位延迟定标不准确带来的系统误差, 使得不同波长处波片延迟的同时测量成为可能。

### 3 误差分析

测量系统中, 补偿器的相位延迟由上述测量方法直接计算, 不存在误差。因此, 主要的误差源包括方位角误差、二向色性误差、光子噪声和电机旋转误差。本节将系统分析这些误差源及消除方法, 并利用计算机模拟估计系统的测量误差。

误差分析是一个非线性过程, 不能做简单的计算, 因此, 将使用计算机模拟估计各个误差因素带来的延迟测量误差。模拟过程: 假定整个测量系统是

理想的, 通过 Mueller 矩阵运算得到出射光强  $I$  [见(1)式], 由(6)~(10)式求得理想情况下待测波片的延迟  $\delta_{\text{theory}}$ ; 假定系统中的某一误差源存在最大误差  $\Delta$ , 如果误差源属于系统误差, 则将  $\Delta$  直接代入(1)式, 由(6)~(10)式求得非理想情况下的波片延迟  $\delta_c$ ; 如果误差源属于随机误差, 则由 Matlab 随机函数 rand 随机给出误差源属于误差  $\Delta_i (|\Delta_i| \leq \Delta)$ , 同理可得到非理想情况下的波片延迟  $\delta_c'$ , 重复测量 20 次,  $\delta_c$  为  $\delta_c'$  20 次测量的平均值;  $\Delta\delta = |\delta_{\text{theory}} - \delta_c|$ ,  $\Delta\delta$  即为该误差源引起的延迟测量误差。

计算机模拟中, 补偿器的延迟  $\delta_c = 90^\circ$  (中心波长 532.4 nm), 样品和补偿器的最大方位角误差  $\Delta\theta_{1,2} = 0.5^\circ$ , 二向色性误差  $\Delta\Psi_{3,4} = 0.011^\circ$ , 光子噪声  $\epsilon_3 = 0.8\%$ , 步进电机旋转精度  $\epsilon_6 = 10''$ 。其中, 样品和补偿片的二向色性<sup>[18,19]</sup>  $\Delta\Psi_{3,4}$  随波长变化, 该处的  $\Delta\Psi_{3,4} = 0.011^\circ$ , 在波长 532.4 nm 处测得。

#### 3.1 方位角误差

测量系统中, 补偿器和待测样品的方位角误差是主要的误差源之一。双区域测量法<sup>[15,16]</sup> 是消除方位角误差的经典方法, 该法通过依次旋转检偏器在两个对称的位置, 两次测量的延迟量的平均值作为待测样品的相位延迟, 消除了方位角误差产生的一阶测量误差。尽管如此, 为了实现高精度测量, 需要考虑方位角误差引起的二阶甚至更高阶测量误差。

本文将通过优化检偏器方位角  $\theta_a$  使得二阶及

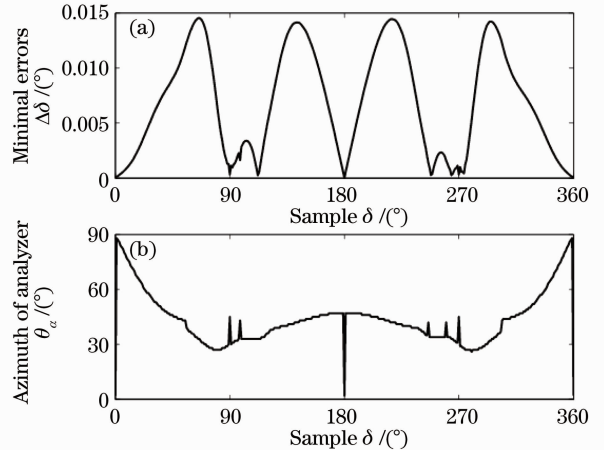


图 2  $\theta_a$  的优化。(a) 不同延迟的样品对应的最小测量误差值; (b) 与最小测量误差值相应的  $\theta_a$  的优化值

Fig. 2 Optimization of  $\theta_a$ . (a) Indicates the minimal measurement errors for samples over  $0 \sim 2\pi$ ; (b) indicates corresponding optimization results of  $\theta_a$  for (a)

高阶测量误差在整个延迟测量范围  $0\sim 2\pi$  较小,从而降低方位角误差引起的高阶测量误差的影响。优化过程中,使用误差参数:补偿器延迟  $\delta_c = 90^\circ$ ,补偿器和样品最大方位角误差  $\Delta\theta_{1,2} = 0.5^\circ$ ,且利用双区域测量法消除了一阶效应,优化结果如图 2 所示。结果表明, $0\sim 2\pi$  延迟范围内,最大的测量误差值出现在  $\delta = 69^\circ$ ,与之对应的  $\theta_a$  的优化值为  $31^\circ$ 。因此,为了使测量误差在整个样品区域较小,本系统选择  $\theta_a = 31^\circ$ 。图 3 是  $\theta_a$  分别为  $31^\circ$  和  $45^\circ$  时,利用双区域测量法消除了一阶效应后样品和补偿器的方位角误差引起的系统测量误差与样品延迟的关系。其中  $\Delta\delta_1$  为样品方位角误差导致的样品延迟测量误差, $\Delta\delta_2$  为补偿器方位角误差导致的样品延迟测量误差。图 3 表明,当选用检偏器方位角  $\theta_a$  为优化值  $31^\circ$  时,系统的测量误差远小于  $\theta_a = 45^\circ$  时的测量误差,同时表明上述检偏器方位角优化方案进一步提高了系统的测量精度。

### 3.2 二向色性

波片的二向色性主要由波片表面的透射率及反射率的不同引起。二向色性主要来自补偿器和待测样品,具体表现在(1)式的 Mueller 矩阵  $M_C, M_S$ ,考虑二向色性误差时  $M_C, M_S$  改为  $M'_C, M'_S$ ,表示为

$$M'_C = \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\psi_3 & 0 & 0 \\ -\cos 2\psi_3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\psi_3 \cos \delta_c & \sin 2\psi_3 \sin \delta_c \\ 0 & 0 & -\sin 2\psi_3 \sin \delta_c & \sin 2\psi_3 \cos \delta_c \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M'_S = \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\psi_4 & 0 & 0 \\ -\cos 2\psi_4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\psi_4 \cos \delta_s & \sin 2\psi_4 \sin \delta_s \\ 0 & 0 & -\sin 2\psi_4 \sin \delta_s & \sin 2\psi_4 \cos \delta_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中  $\Psi_3$  和  $\Psi_4$  分别为补偿器和待测样品的二向色角。如果波片不存在二向色性误差时  $\Psi_{3,4} = \pi/4$ ,反之则  $\Psi_{3,4} = \pi/4 + \Delta\Psi_{3,4}$ 。在测量原理中假设波片不存在二向色性,将二向色性误差作为误差源考虑,下面主要分析待测样品和补偿器存在二向色性时,该测量方法导致的延迟测量误差。实验测得,在为  $532.4 \text{ nm}$  时,补偿器和待测波片的二向色性大约为  $0.011^\circ (\Delta\Psi_{3,4} = 0.011^\circ)$ 。将该值作为最大误差代入计算机模拟中,计算得到系统测量误差。模拟结果如图 4 所示,其中  $\Delta\delta_3, \Delta\delta_4$  分别为样品和补偿器的二向色性引起的测量误差。分析表明,待测样品

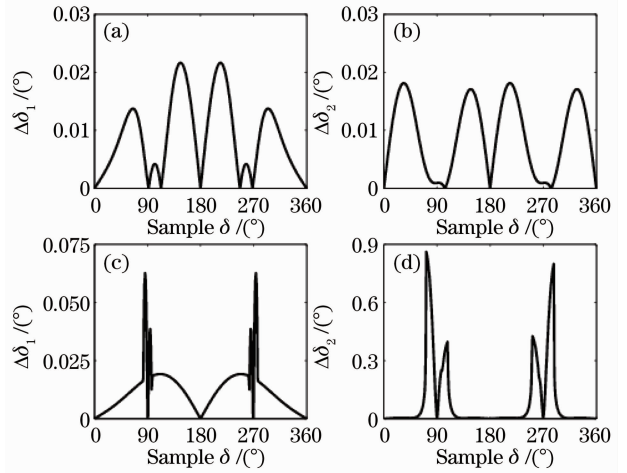


图 3 方位角误差引起的延迟测量误差与样品延迟的关系。(a)、(c)分别表示  $\theta_a = 31^\circ$  和  $\theta_a = 45^\circ$  样品的方位角误差引起的测量误差;(b)、(d) 分别表示  $\theta_a = 31^\circ$  和  $\theta_a = 45^\circ$  时补偿器的方位角误差引起的测量误差

Fig. 3 Relations between measurement errors introduced by azimuth errors and retardation of samples. (a) and (c) indicate their relations introduced by sample's azimuth error at  $\theta_a = 31^\circ$  and  $\theta_a = 45^\circ$ , respectively; (b) and (d) indicate their relations introduced by compensator's azimuth error at  $\theta_a = 31^\circ$  and  $\theta_a = 45^\circ$ , respectively

的二向色性影响微乎其微[图 4(a)],补偿器的二向色性对于  $\lambda/2$  波片及全波片影响最大,达到  $0.022^\circ$ ,对于  $\lambda/4$  波片无影响[图 4(b)]。

### 3.3 随机误差

随机误差包括光子噪声和电机旋转不确定性。该测量系统中,光子噪声  $\varepsilon_5 = 0.8\%$ ,电机旋转精度  $\varepsilon_6 = 10''$ ,图 5 为模拟结果,其中  $\Delta\delta_5, \Delta\delta_6$  分别为光子噪声和电机旋转精度带来的测量误差。结果表明,随机误差主要来自光子噪声的影响,且对  $\lambda/4$  波片的测量产生较大误差。

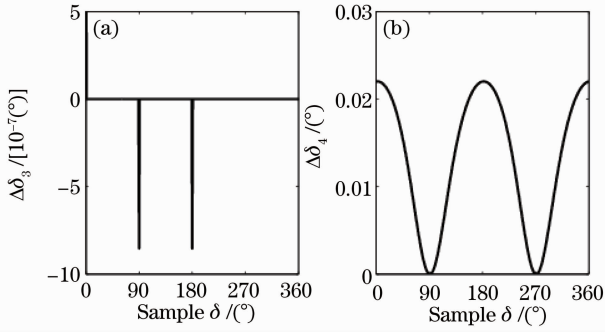


图4 二向色性引起的延迟测量误差与样品延迟的关系。(a)、(b)分别表示样品和补偿器的二向色性引起的延迟测量误差

Fig. 4 Relations between measurement errors introduced by dichroism and retardation of samples. (a) and (b) indicate their relations introduced by dichroism of samples and compensator, respectively

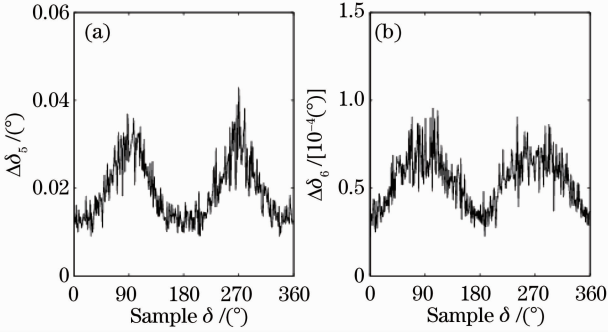


图5 光子噪声(a)和电机旋转误差(b)引起的延迟测量误差与样品延迟的关系

Fig. 5 Relations between measurement errors introduced by photon noise (a) and motor rotating errors (b)

### 3.4 总的测量误差

总的测量误差包括系统误差和随机误差。其中

$$\Delta\delta_{\text{sys}} = \sqrt{\Delta\delta_1^2 + \Delta\delta_2^2 + \Delta\delta_3^2 + \Delta\delta_4^2}, \quad (13)$$

$$\Delta\delta_{\text{rand}} = \sqrt{\Delta\delta_5^2 + \Delta\delta_6^2}. \quad (14)$$

图6为测量系统的系统误差和随机误差。比较图6(a)、(b)易见,  $\lambda/4$ 波片的测量误差主要来自光子噪声;比较图6(a)、图4(b),  $\lambda/2$ 波片及全波片的系统误差主要来自补偿器的二向色性;对于任意延迟的样品,系统误差和随机误差在  $0.036^\circ$ 和  $0.040^\circ$ 以内。

## 4 测量结果

实验在3个波长517.3、525.0、532.4 nm测量了4个样品(样品中心波长为532.4 nm)的相位延迟,以评估测量系统的性能。样品分别为: $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片、 $127^\circ$ 波片和空气(不放入任何样品)。

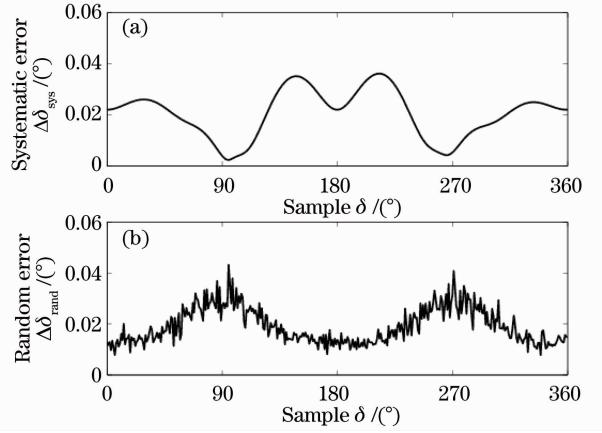


图6 总的系统误差和随机误差

Fig. 6 Total systematic error and random error

测量结果如图7所示,其中横坐标表示测量次数,纵坐标表示待测样品的相位延迟测量结果。表1为与图7对应的样品延迟测量的平均值和均方差。

表1 平均值和方差

Table 1 Mean and standard deviations

|                   | 517.3 nm                        | 525.0 nm                        | 532.4 nm                        |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $\lambda/4$ plate | $92.054^\circ \pm 0.021^\circ$  | $90.286^\circ \pm 0.033^\circ$  | $89.208^\circ \pm 0.036^\circ$  |
|                   | $184.422^\circ \pm 0.040^\circ$ | $181.195^\circ \pm 0.020^\circ$ | $178.890^\circ \pm 0.027^\circ$ |
| $\lambda/2$ plate | $130.418^\circ \pm 0.023^\circ$ | $128.069^\circ \pm 0.035^\circ$ | $126.550^\circ \pm 0.035^\circ$ |
|                   | $0.022^\circ \pm 0.011^\circ$   | $0.017^\circ \pm 0.017^\circ$   | $0.029^\circ \pm 0.024^\circ$   |
| Air               | $0.011^\circ$                   | $0.017^\circ$                   | $0.024^\circ$                   |

3个波长的延迟测量中,空气的相位延迟分别为  $0.022^\circ \pm 0.011^\circ$ ,  $0.017^\circ \pm 0.017^\circ$ 和  $0.029^\circ \pm 0.024^\circ$ 。测量结果与计算机模拟中  $0^\circ$ 样品处的模拟值相比(其中,空气延迟测量的平均值对应系统误差,标准方差对应随机误差),基本保持一致,表明上述计算机模拟相对可靠。由于该测量系统中未利用空气测量定标系统参数,因此,空气的相位延迟客观反映了该延迟测量系统的测量精度。

## 5 结论

波片延迟测量系统的优点在于:

- 1) 补偿器和待测波片的相位延迟同时被测量,实现了补偿器相位延迟的自校准,理论上消除了测量系统中补偿器的相位延迟定标不准确带来的系统误差,使得不同波长处波片延迟的同时测量成为可能;
- 2) 利用双区域测量法消除了元件方位角误差引起的一阶测量误差,通过优化检偏器的方位角减

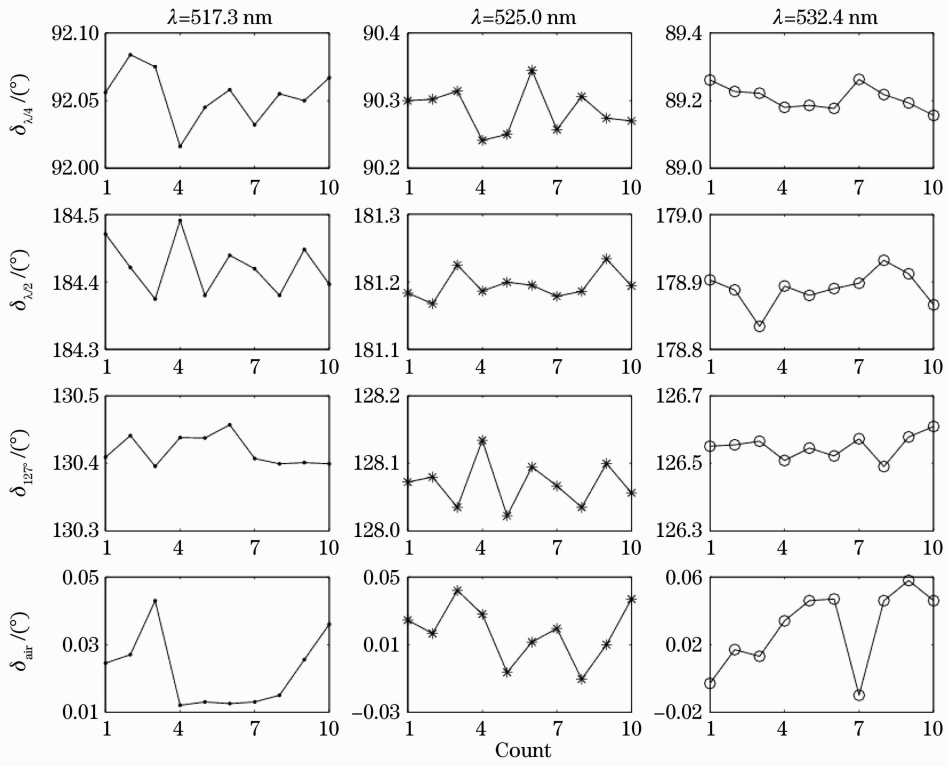


图 7 测量结果

Fig. 7 Measurement results

小了二阶甚至更高阶误差,优化结果表明当检偏器方位角  $\theta_a \approx 31^\circ$  时系统方位角影响较小,实现了任意相位延迟波片的高精度测量;

3) 由于不再使用空矩阵定标系统的偏振参数(例如相位延迟),实验测量中空气的相位延迟值  $0.029^\circ \pm 0.024^\circ$  代表该系统的测量精度,测量结果与误差分析中的模拟结果基本一致。

参 考 文 献

1 P. A. Williams, A. H. Rose, C. M. Wang. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6466~6472

2 J. H. W. G. den Boer, G. M. W. Kroesen, F. J. de Hoog. Spectroscopic rotating compensator ellipsometry in the infrared: retarder design and measurement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(5): 484~492

3 Dill. Rotating-Compensator Ellipsometer [P]. US Patent, 4053232, 1977-10-11

4 L. Shyu, C. Chen, D. Su. Method for measuring the retardation of a wave plate[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(22): 4228~4230

5 Li Fanyue, Han Jie, Zeng Aijun *et al.*. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208003  
李凡月, 韩杰, 曾爱军等. 基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟测量方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0208003

6 Wang Jun, Chen Lei, Wu Quanying *et al.*. Retardation measurement of wave plate using white-light Michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508001  
王军, 陈磊, 吴泉英等. 一种基于白光迈克耳干涉仪波片延迟的测量方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508001

7 T. Oakberg. Measurement of waveplate retardation using a photoelastic modulator[C]. *SPIE*, 1997, **3121**: 19~22

8 B. Wang, T. C. Oakberg. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(10): 3847~3854

9 Su Meikai, Song Lianke, Li Yi *et al.*. Compensation method for measuring wave plates [J]. *Applied Lasers*, 1990, **10**(5): 220~222  
苏美开, 宋连科, 李艺等. 波片测量中的补偿法[J]. *应用激光*, 1990, **10**(5): 220~222

10 Yun Maojin, Li Guohua. Phase retardation measurement with  $\lambda/4$  wave-plate[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(5): 328~330  
云茂金, 李国华. 晶体相位延迟测量的  $\lambda/4$  波片法及理论研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(5): 328~330

11 X. Zong, W. Liu, S. Zhang. Measurement of retardations of arbitrary wave plates by laser frequency splitting [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(3): 033602

12 Liu Weixin, Liu Ming, Zhang Shulian. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(30): 5562~5569

13 Liu Weixin, Zhang Shulian, Ding Ming *et al.*. Error analysis and experimental testing of measuring wave plate based on laser frequency splitting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 54~59  
刘维新, 张书练, 丁铭等. 激光频率分裂测波片的误差分析和实验评价[J]. *光电工程*, 2010, **37**(2): 54~59

14 Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong *et al.*. Phase retardation measurement with least square fitting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812001  
侯俊峰, 王东光, 邓元勇等. 基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812001

15 R. Kleim, L. Kuntzler, A. E. Ghemmaz. Systematic errors in rotating-compensator ellipsometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(9): 2550~2559

- 16 Miao Jie, Lin Qiang, Zhang Yanli *et al.*. Four-zone method to eliminate influence of polarizing prism's imperfections on measurement of phase retardation of wave plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1938~1941  
缪洁, 林强, 张艳丽等. 四区域法消除偏振棱镜缺陷对波片相位延迟测量的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1938~1941
- 17 J. Sheng. Shengjin's Formulas[OL]. <http://baike.baidu.com/view/1382952.htm>
- 18 F. Stabo-Eeg. Development of Instrumentation for Mueller Matrix Ellipsometry [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2009. 8~11
- 19 E. Compain, S. Poirier, B. Drévilion. General and self-consistent method for the calibration of polarization modulators, polarimeters, and Mueller-matrix ellipsometers[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3490~3502

栏目编辑:何卓铭