

DRC-MME 直通标定随机误差估计及最优配置分析

苗政委^{1,2,3}, 汤媛媛^{1,2*}, 魏凯^{1,2}, 张雨东^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 椭偏仪实现高精度测量的关键在于模型值的精准标定, 而随机误差是影响标定精度的重要因素。从椭偏仪随机误差的产生原因入手, 针对零阶噪声受限、一阶噪声受限、二阶噪声受限三种可能存在的系统, 对测量结果随机误差进行了数值估计。为了降低测量结果的随机误差, 采用枚举法和遗传算法, 得到了三种系统下的最佳配置。数值分析和实验结果表明, 比起常用的配置, 最佳配置下的随机误差可以降低 1/3 以上。本文虽然仅给出三种噪声受限系统的最佳配置, 但是噪声估计结果和优化方法可以适用于多种噪声模型共同存在的模型。

关键词 测量; 椭偏测量; 参数标定; 随机误差; 遗传算法

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2412003

Random Error Estimation and Configuration Optimization of Dual-Rotating Compensator-Mueller Matrix Ellipsometer Calibration Experiments

Miao Zhengwei^{1,2,3}, Tang Yuanyuan^{1,2*}, Wei Kai^{1,2}, Zhang Yudong^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The proper calibration of the model values is crucial for high-precision ellipsometer measurement, and random error is critical in determining calibration accuracy. This study discusses random error estimation in the ellipsometer. The random errors encountered in measurement results are numerically evaluated for dark noise-limited, shot noise-limited, and light-source fluctuation-noise-limited systems. To reduce the random errors in measurement results, this study adopts the enumeration method and a genetic algorithm to find the best configuration for the aforementioned three noise-limited systems. Numerical analysis and experimental results show that compared with the commonly used configuration, the random error under the proposed optimal design can be reduced by more than 1/3. Although only the optimal configurations of three noise constrained systems are given in this paper, however, the noise estimation results and optimization methods can be employed in real-world models with various noise models.

Key words measurement; ellipsometry; parameter calibration; random error; genetic algorithm

OCIS codes 120.3940; 120.2130; 150.1488

1 引言

近年来, 随着固体物理、纳米光栅等行业的快速

发展, 各种新型材料大量出现^[1-3]。对于这些材料表面微观结构的表征和材料光学参数的精确测量变得极为重要。椭偏仪通过测量材料表面光的偏振态变

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-23; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 中科院信息工程领域核心关键技术攻关项目

通信作者: *yytang001@126.com

化,计算出样品的 Mueller 矩阵,通过数据反演得到被测样品的待测参数^[4]。其中,双旋转补偿器式 Mueller 矩阵椭偏仪(DRC-MME)以不同的角速度旋转两个补偿器,对入射到被测样品前后的偏振光进行调制,可以在单个测量周期内得到被测样品 Mueller 矩阵的全部分量^[4]。由于 DRC-MME 具有宽光谱的高稳定性、易于标定的特点,是目前椭偏仪很常用的一种结构^[5-6]。

作为一种测量仪器,提升椭偏仪的测量精度一直是研究的核心问题。椭偏仪的测量过程实际上是模型值和测量值的数据拟合过程,因此对系统模型参数的准确标定对提升椭偏仪的测量精度十分重要^[7]。为了降低标定实验的复杂度,提升标定精度,以空气为样品的直通法是目前最常用的一种标定方式^[6]。在直通标定实验中,模型值和测量值之间的误差是影响标定精度的主要因素,这一误差包括模型值建模不准造成的系统误差和测量噪声引起的随机误差。其中,对系统模型的优化已经做了大量研究^[8-13],目前标定过程的真实值和测量值的偏差很小。在这种情况下,系统的随机误差对标定结果的精度影响十分明显。现在已经有研究使用条件

数理论,对 DRC-MME 的系统配置进行优化,以降低系统对误差的敏感性^[14]。但是,很少有人对直通标定实验的随机误差进行数值分析,通过估计值给出标定实验的最优配置。

本文从标定过程的随机误差产生原因入手,分析了三种噪声情况下测量结果的随机误差随系统参数配置的数值关系,并得到了使得测量结果随机误差最小的系统配置。

2 DRC-MME 的标定原理

DRC-MME 标定实验的结构如图 1 所示,包括光源、起偏器、两个分别以 ω_2 和 ω_3 为角速度匀速转动的补偿器、检偏器及光谱仪。本实验的待标定参数包括两个偏振片的起始方位角 α_1 和 α_4 、两补偿器的相位延迟 δ_2 和 δ_3 、初始方位角 α_2 和 α_3 共 6 个参数。然而本实验无法标定出所有的参数,其原因在于四个光学元件同时旋转相同的角度后,测量的结果完全相同。换言之,四个方位角在标定过程中并不完全独立,因此只能标定出四个方位角中的三个。在本实验中,起偏器透光轴的方位角设置为 0° 。

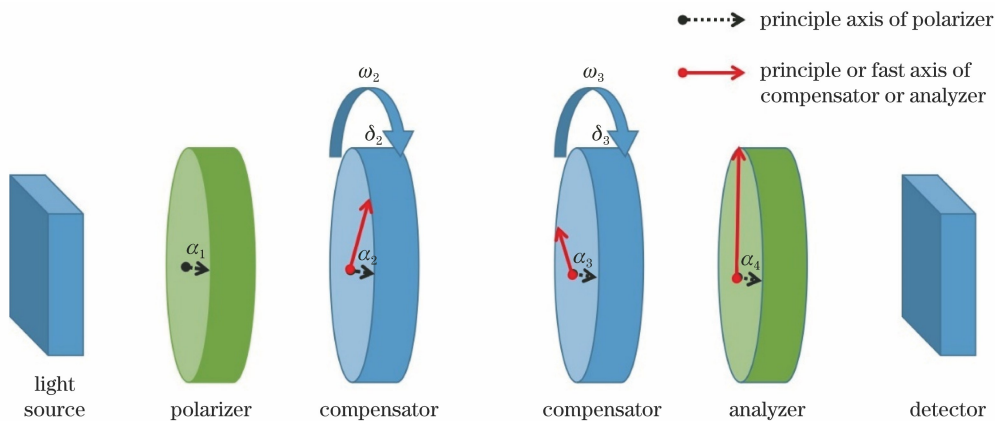


图 1 DRC-MME 标定实验光路图

Fig. 1 Optics path of DRC-MME calibration experiment

由于两个补偿器在进行匀速旋转,探测器测量的光强信号 $I(t)$ 是一个周期信号。对其某一个像素点上的采集数据进行傅里叶分析,可以得到一组傅里叶系数:

$$I(t) = I_0 \left\{ A_0 + \sum_{n=1}^{12} [A_{N_n} \cos(N_n \omega t) + B_{N_n} \sin(N_n \omega t)] \right\}, \quad (1)$$

式中: I_0 表示一个与系统光通量有关的参数; A_{N_n} , B_{N_n} 分别为 N_n 倍频的傅里叶系数的余弦项和正弦项; N_n 是椭偏仪的特征频率。在测量过程中,傅里

叶系数共有 12 组,由两补偿器的转动角速度共同决定。对于直通标定实验,共存在 5 组非零的傅里叶系数。当两补偿器的转速比设置为最常用的 5:3 时,非零的傅里叶系数分别是 $A_0, A_4, B_4, A_8, B_8, A_{12}, B_{12}, A_{16}, B_{16}, A_{20}, B_{20}$ 。由图 1 模型可以得到这些非零傅里叶系数的理论值,计算结果依赖于被标定系数,具体结果如表 1 所示^[15]。

椭偏仪的测量过程是被测样品的 Mueller 矩阵信息转化为一组傅里叶系数的过程,这一过程可以通过一个矩阵表示^[16]:

表 1 标定实验中非零傅里叶系数和标定参数的关系

Table 1 Relationship between nonzero Fourier coefficients and calibration parameters in the calibration experiment

| Nonzero Fourier coefficient | Corresponding equation |
|-----------------------------|---|
| A_0 | $I_0 \left[\frac{1}{4} + \frac{1}{16} \cos(2\alpha_4)(1 + \cos \delta_2)(1 + \cos \delta_3) \right]$ |
| A_4 | $-\frac{I_0}{8} \cos(2\alpha_2 - 2\alpha_3 + 2\alpha_4) \sin \delta_2 \sin \delta_3$ |
| A_8 | $\frac{I_0}{16} \cos(4\alpha_2 - 4\alpha_3 + 2\alpha_4)(1 - \cos \delta_2)(1 - \cos \delta_3)$ |
| A_{12} | $\frac{I_0}{16} \cos(4\alpha_3 - 2\alpha_4)(1 + \cos \delta_2)(1 - \cos \delta_3)$ |
| A_{16} | $\frac{I_0}{8} \cos(2\alpha_2 + 2\alpha_3 - 2\alpha_4) \sin \delta_2 \sin \delta_3$ |
| A_{20} | $\frac{I_0}{16} \cos(4\alpha_2 - 2\alpha_4)(1 - \cos \delta_2)(1 + \cos \delta_3)$ |
| B_4 | $\frac{I_0}{8} \sin(2\alpha_2 - 2\alpha_3 + 2\alpha_4) \sin \delta_2 \sin \delta_3$ |
| B_8 | $-\frac{I_0}{16} \sin(4\alpha_2 - 4\alpha_3 + 2\alpha_4)(1 - \cos \delta_2)(1 - \cos \delta_3)$ |
| B_{12} | $-\frac{I_0}{16} \sin(4\alpha_3 - 2\alpha_4)(1 + \cos \delta_2)(1 - \cos \delta_3)$ |
| B_{16} | $-\frac{I_0}{8} \sin(2\alpha_2 + 2\alpha_3 - 2\alpha_4) \sin \delta_2 \sin \delta_3$ |
| B_{20} | $-\frac{I_0}{16} \sin(4\alpha_2 - 2\alpha_4)(1 - \cos \delta_2)(1 + \cos \delta_3)$ |

$$\mathbf{F} = \mathbf{W}(\mathbf{b})\mathbf{M}_S^V, \quad (2)$$

式中： \mathbf{F} 是傅里叶系数合并成的 25×1 的矢量； \mathbf{M}_S^V 是被测量样品 Mueller 矩阵展开所形成的 16×1 的矢量； \mathbf{W} 是一个 25×16 的矩阵，代表椭偏仪对样品信息的转化作用；矢量 \mathbf{b} 表示椭偏仪的模型参数，代表图 1 中的 6 个参数。根据(2)式，由测量的傅里叶系数可以计算得到测量样品的 Mueller 矩阵：

$$\mathbf{M}_S^V = \mathbf{W}^+ \mathbf{F}, \quad (3)$$

式中： \mathbf{W}^+ 是 \mathbf{W} 的伪逆。利用优化算法对 \mathbf{b} 进行优化，使得测量的 Mueller 矩阵与理想结果(单位矩阵)的残差值最小，此时的优化结果即为标定的结果。

3 DRC-MME 标定实验误差估计和最优配置分析

在椭偏仪的测量过程中，得到的数据是光谱仪 CCD 采集到的光强数据，这些数据中必然会存在噪声。这些噪声包括光源强度不稳定的噪声、CCD 探测存在的暗噪声、散粒噪声、转移噪声、电机转动频率不稳定的噪声、环境噪声等。根据前人的研究，椭偏仪测量时的随机噪声可以被建模为^[12]

$$\sigma^2 = \sigma_{SD}^2 + \sigma_{SI}^2 + \sigma_{SO}^2 = \gamma_{SD} + \gamma_{SI}S + \gamma_{SO}S^2, \quad (4)$$

式中： σ^2 是测量数据的方差值，其被分为了以 CCD

暗噪声、转移噪声、环境噪声为主体的零阶噪声，以散粒噪声为主体的一阶噪声，光源强度起伏和转动频率随机扰动所产生的二阶噪声，三部分分别用下标 SD, SI, SO 表示； $\gamma_{SD}, \gamma_{SI}, \gamma_{SO}$ 分别表示三部分的噪声系数； S 是测量的光强信号。

这些噪声会直接叠加到光强数据上，并通过傅里叶变化和矩阵乘法的形式传递到被拟合量之中，从而影响最终的标定结果。改变椭偏仪的系统参数无法改变这些噪声系数，但是会对噪声的传递过程产生影响，从而影响测量结果的随机误差。将寻找合适的椭偏仪参数，使得测量结果的随机误差最小，从而提升椭偏仪的标定精度。对于部分系统，测量结果的零阶噪声比其余两种大得多，零阶噪声是影响这种系统的主要因素，这种系统被称为零阶噪声受限系统。同理，还可能存在一阶噪声受限系统和二阶噪声受限系统。下面分别对这三种系统进行分析，得到标定实验的最佳标定配置。

3.1 零阶噪声受限系统

正如前文所述，通过傅里叶变换可以得到测量的光强数据的傅里叶系数，这个过程^[17]可以被表示为

$$A_n = \begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \cos\left(\frac{2\pi}{N}in\right), & n = 1, \dots, N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(i), & n = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \sin\left(\frac{2\pi}{N}in\right), \quad n = 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

式中： $S(i)$ 表示第 i 次的采集数据； N 表示单个测量周期总的采集数据数。对于零阶噪声受限的 DRC-MME，采集数据可以被建模为

$$S(i) = I(i) + n(i), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \gamma_{SD}, \quad (8)$$

式中： $I(i)$ 表示真实信号； $n(i)$ 表示噪声信号。结合(5)~(8)式，同时假设噪声信号是白噪声^[18]，那么傅里叶系数的协方差矩阵 $\mathbf{\Gamma}_F$ 可以被计算为一个对角矩阵：

$$\mathbf{\Gamma}_F = \begin{bmatrix} V_{ar}(A_0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & V_{ar}(A_{N_1}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & V_{ar}(B_{N_{12}}) \end{bmatrix} = \frac{\gamma_{SD}}{N} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2 \end{bmatrix} = \frac{\gamma_{SD}}{N} \mathbf{W}_{SD}. \quad (9)$$

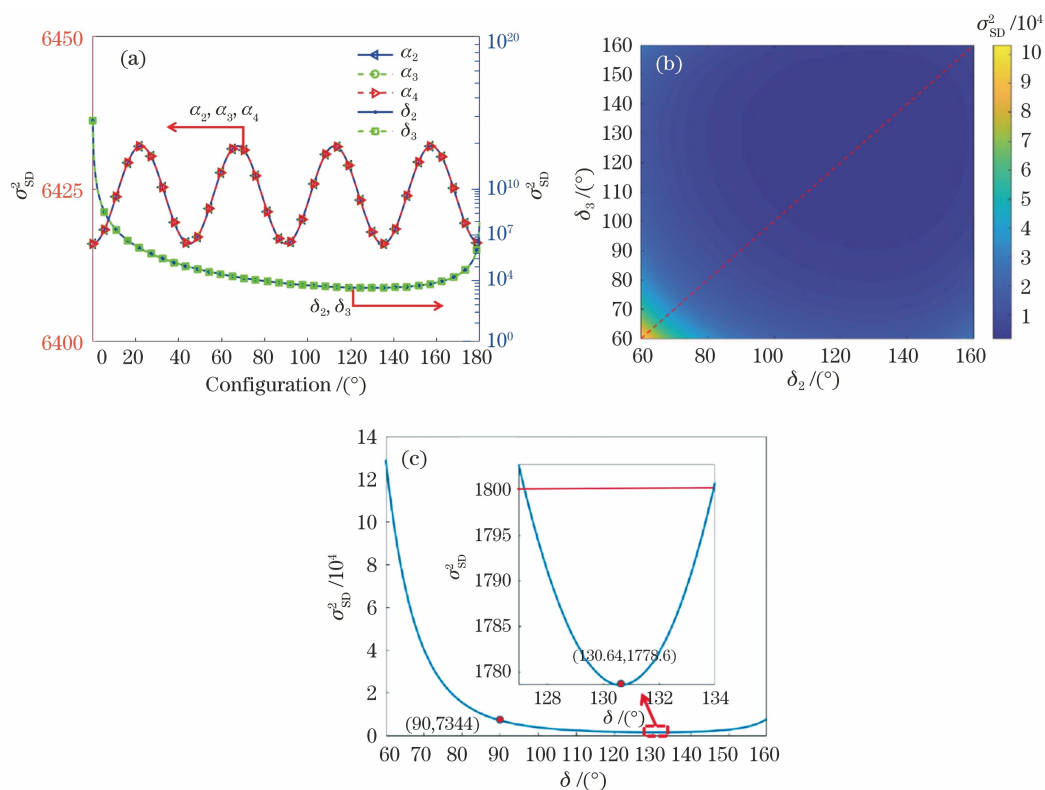


图 2 零阶噪声受限系统测量结果的随机误差。(a) 随机误差与 5 个标定参数的关系；
(b) 随机误差与两补偿器相位延迟的关系；(c) 对称轴上的结果 ($\delta_2 = \delta_3$)

Fig. 2 Random error of measurement results on zero-order noise-limited system. (a) Relationship between random error and five calibration parameters; (b) relationship between random error and phase delay of two compensators; (c) results on the symmetry axis ($\delta_2 = \delta_3$)

依照(12)、(18)式,可以计算出不同标定参数下的测量噪声。与图 2(a)类似,图 3(a)显示的是不同标定参数变化时,标定实验中测量噪声的变化。与零阶噪声受限系统类似,两补偿器的初始方位角不会明显改变测量结果的随机误差。但是在一阶噪声受限系统中,检偏器的方位角对测量误差的影响较为明显。当检偏器的方位角为 90° ,即两偏振片的透光轴

互相垂直时,系统的随机误差最小,相较于两透光轴相互平行的情况,测量结果的随机噪声降低了 40.613%。

与零阶噪声受限系统的结果类似,两补偿器的相位延迟对测量误差的影响完全相同,最佳的测量配置应在相位延迟相同的情况下产生。将两补偿器的相位延迟设置相同,并且在 $60^\circ \sim 160^\circ$ 范围内变化,测量误差的变化如图 3(b)所示,一阶噪声受限

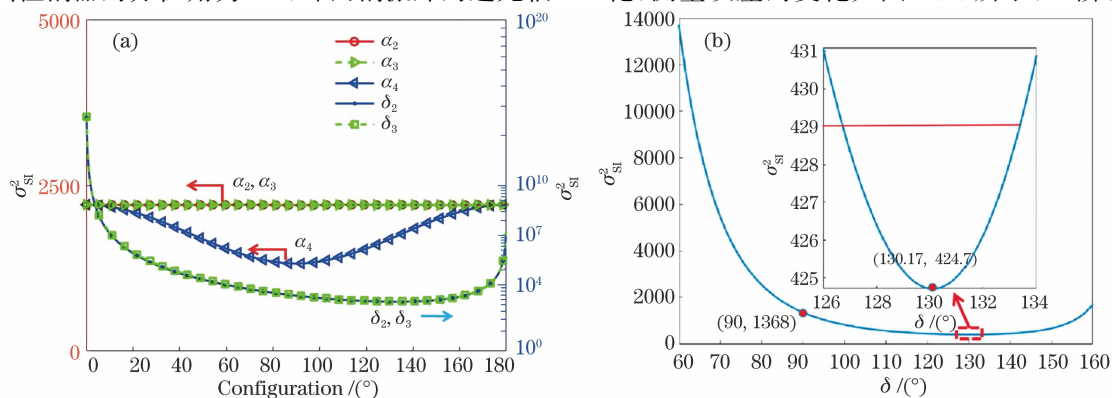


图 3 一阶噪声受限系统测量结果的随机误差。(a) 随机误差与 5 个标定参数的关系；(b) 随机误差与两补偿器相位延迟的关系 ($\delta_2 = \delta_3$)
Fig. 3 Random error of measurement results on one-order noise-limited system. (a) Relationship between random error and five calibration parameters; (b) relationship between random error and phase delay of two compensators ($\delta_2 = \delta_3$)

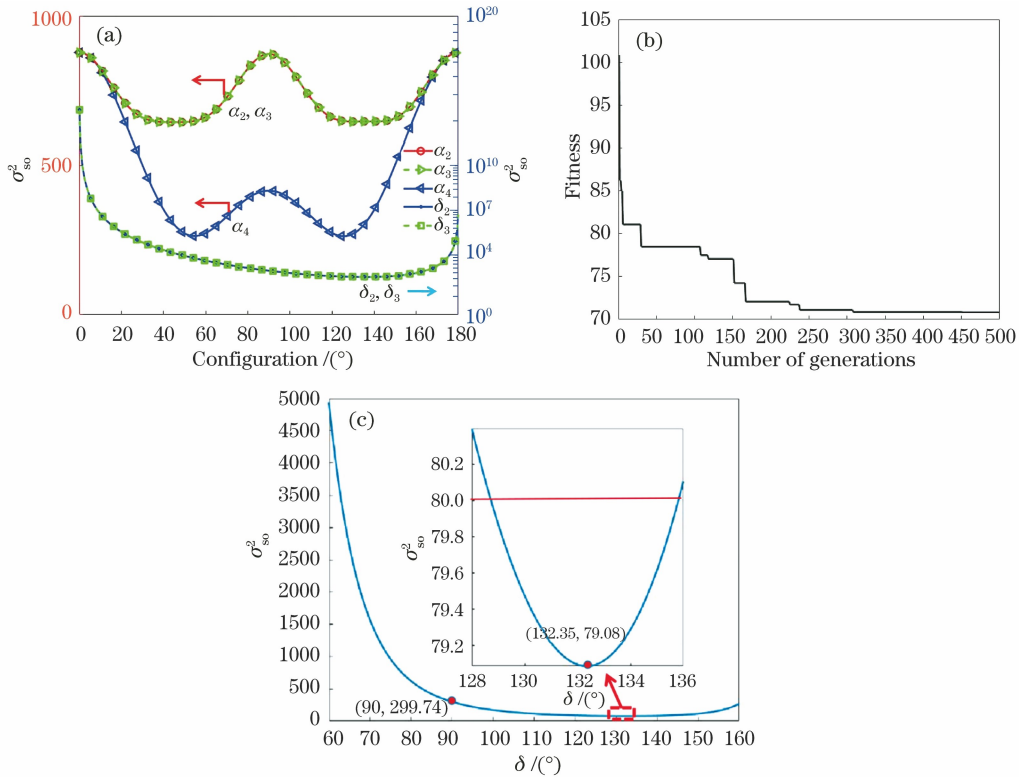


图 4 二阶噪声受限系统测量结果的随机误差。(a) 随机误差与 5 个标定参数的关系;(b) 遗传算法结果;(c) 随机误差与两补偿器相位延迟的关系($\delta_2 = \delta_3$)

Fig. 4 Random error of measurement results on two-order noise-limited system. (a) Relationship between random error and five calibration parameters; (b) result of genetic algorithm; (c) relationship between random error and phase delay of two compensators ($\delta_2 = \delta_3$)

对于这种测量系统,其零阶噪声与系统的光强无关,因此与一阶和二阶噪声没有相关性;一阶噪声显然不会对电机的旋转频率和光源光强产生影响,因此一阶噪声不会引起二阶噪声的变化;二阶噪声会直接改变系统的光强,从而对一阶噪声产生影响,但是在一般情况下,系统的二阶噪声较小,这部分噪声引起的一阶噪声更小,因此这三种噪声之间的相关性可以忽略。那么,可以将三种噪声分开计算,并得到傅里叶系数的协方差矩阵:

$$\mathbf{I}_F = \frac{1}{N}(\gamma_{\text{SD}}\mathbf{W}_{\text{SD}} + \gamma_{\text{SI}}\mathbf{W}_{\text{SI}} + \gamma_{\text{SO}}\mathbf{W}_{\text{SO}})。 \quad (27)$$

结合(27)、(10)式,可以得到这种系统下归一化 Mueller 矩阵的测量方差。

此时的最佳配置受到了系统的光强 I_0 和三种噪声系数的共同影响。对于给定的 4 个参数,那么(27)式所示测量结果的随机误差是一个关于配置参数的函数。根据这一关系,使用遗传算法、粒子群算法等最优化算法便可以得到此系统的最小随机误差值,最小值对应的位置便是此系统的最佳配置。

4 实 验

4.1 数值仿真实验

在第 3 节,估计了三种 DRC-MME 系统标定实验的随机测量误差,并给出了最优的标定配置。在本节,对(9)~(11)、(18)、(24)式给出的测量误差预测公式进行仿真验证。仿真实验的操作步骤包括如下几步:1)利用 DRC-MME 模型,结合给定的标定参数,计算出直通标定实验中的理想光强数据;2)在光强数据中分别加入三种测量噪声,仿真模拟光谱仪的真实测量数据,噪声服从高斯分布,方差分别在(8)、(14)、(20)式中给出,三种噪声系数分别设置为 1,1,0.001,系统的光通量 I_0 被设置为 1000;3)根据仿真的光强数据计算得到 Mueller 矩阵,归一化后得到最终测量值;4)重复测量 1000 组数据,计算测量结果的方差值;5)使用(11)式可以得到测量结果方差的预测值;6)在 $80^\circ \sim 140^\circ$ 的范围内,改变两补偿器相位延迟,重复步骤 1)~5),得到不同相位延迟下噪声仿真结果和预测结果,对比结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)分

别是零阶噪声、一阶噪声、二阶噪声受限系统下对比结果图,每个图中都含有除 m_{11} 外(被归一化分量)的所有 Mueller 矩阵分量信息, σ_i^2 表示 Mueller 矩阵展开后第 i 个分量的测量方差。由图 5 可知,加

入的噪声无论是零阶噪声,一阶噪声还是二阶噪声,仿真计算的方差和公式预测的结果几乎相同,这说明了前文公式的正确性,也证明了前文最优配置分析的合理性。

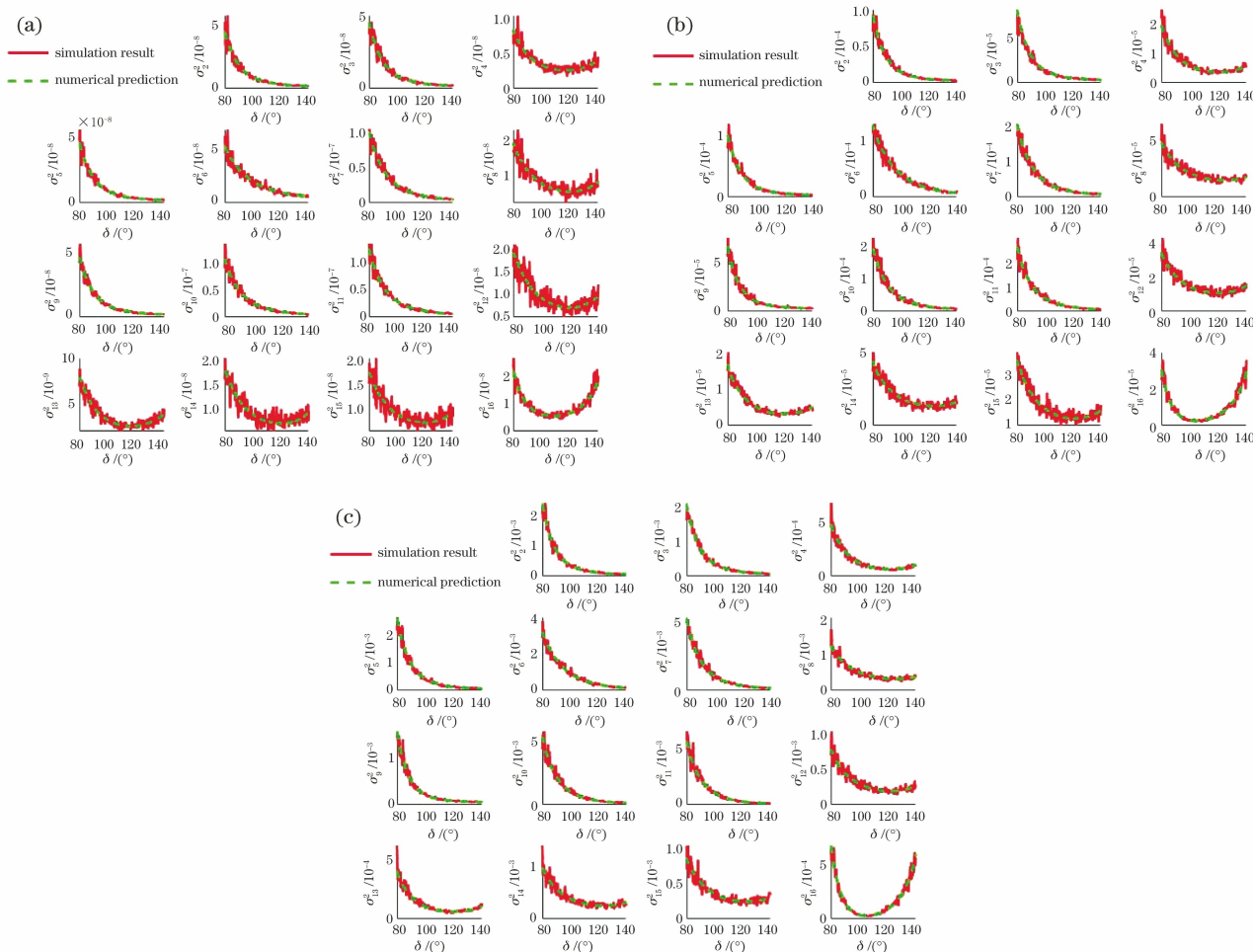


图 5 测量结果随机误差的仿真结果与数值预测结果。(a) 零阶噪声受限系统;(b) 一阶噪声受限系统;(c) 二阶噪声受限系统
Fig. 5 Simulation results and numerical prediction results of measured random errors. (a) Zero-order noise-limited system; (b) one-order noise-limited system; (c) two-order noise-limited system

4.2 实验验证

图 6 是本实验室所搭建的 DRC-MME 测量系统。其中,光源型号是海洋光学 DH-200-BAL,它通过卤素

灯和氙灯两种光源可以产生波长为 300~1300 nm 的宽谱光;光谱仪型号为海洋光学 QE-Pro,它可以测量动态范围为 0~200000DC(digital counts)的光信号。

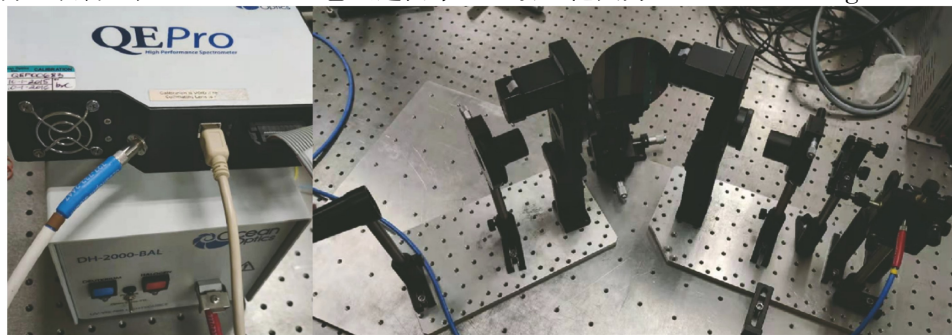


图 6 自制 DRC-MME 结构图
Fig. 6 Prototype of home-made DRC-MME structure

首先在电机不转动时,多次重复测量信号,根据测量结果可以得到不同波长下观测噪声的方差。根据(4)式进行多项式拟合,便可以得到三种噪声系数。图 7 是本系统下三种噪声的分布情况,可以观察到一阶噪声在本测量系统中占有主导地位。因此,本实验系统是所述的一阶噪声受限系统,根据优化结果,两补偿器的相位延迟在 130° 左右,两偏振片透光轴互相垂直时,系统性能最优。

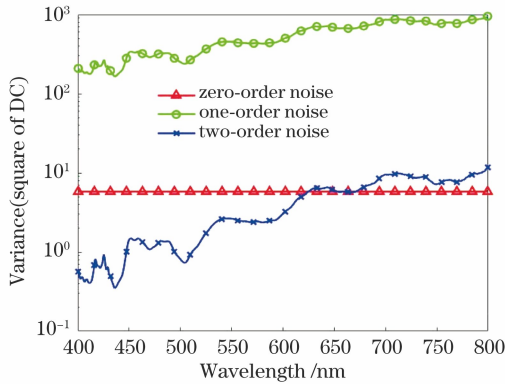
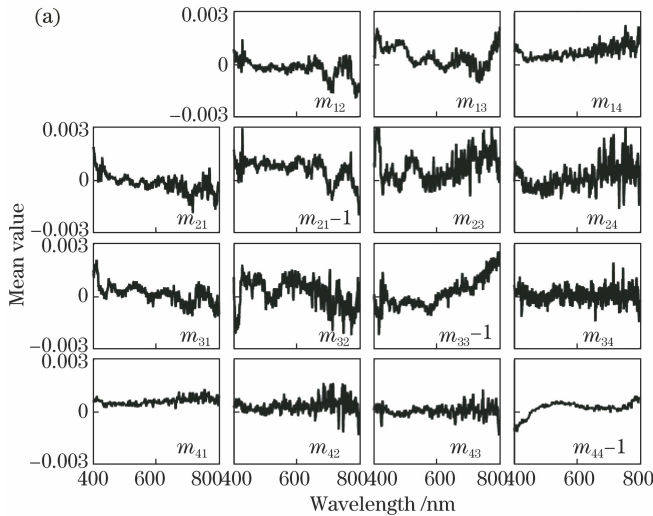


图 7 三种噪声的分布情况
Fig. 7 Distribution of three types of noise



使用自制的 DRC-MME 进行 30 次直通标定实验,空气的 Mueller 矩阵测量结果的均值和方差如图 8 所示。图 8(a)展示了测量结果的偏差情况,可以看到,偏差值在绝大多数波长处都小于 0.001,最大偏差值也没有超过 0.003,这对于椭偏仪而言是一个比较不错的测量结果。图 8(b)展示了多次重复测量结果的方差值,这一结果也是前文所提到的影响标定精度的重要因素,因此将全部波长所有分量的平均方差 σ^2 作为评价配置优秀程度的指标:

$$\sigma^2 = \frac{1}{15L} \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^L \sigma_i^2(j), \quad (28)$$

式中: i 表示被测样品 Mueller 矩阵展开成矢量后的分量位置; j 表示光谱仪测量像素点的位置; L 表示像素点的总数。

分别使用 $1/4$ 波片和中心相位延迟为 127° 附近的特制补偿器进行直通标定实验,实验结果如表 2 所示。正如前文分析的一样,使用特制补偿器明显降低了测量结果的测量误差,降低幅度为 5 倍以上;两偏振片透光轴互相垂直时可以略微降低随机误差,降低幅度大约为 18%。这一实验结果与优化配置

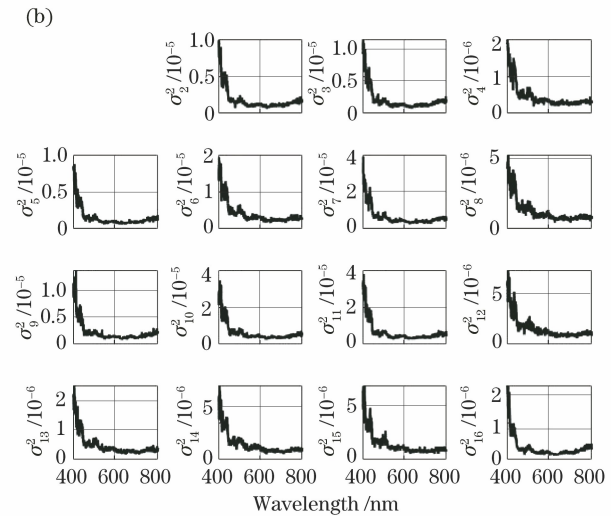


图 8 30 次直通标定的结果。(a) 均值;(b) 方差

Fig. 8 Results of 30 repeat calibration experiments. (a) Mean; (b) variance

表 2 不同配置下的直通标定实验随机误差

Table 2 Random errors of calibration experiment with different configurations

| Group | $\alpha_4 / (^\circ)$ | $\alpha_1 / (^\circ)$ | $\delta_2 / (^\circ)$ | $\delta_3 / (^\circ)$ | $\sigma^2 / 10^6$ |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 90 | 90 | 90 | 90 | 2.34 |
| 2 | 0 | 90 | 90 | 90 | 1.92 |
| 3 | 90 | 90 | 127 | 127 | 0.471 |
| 4 | 0 | 90 | 127 | 127 | 0.436 |

的分析结果相同,证明了前文数值分析应用于真实实验的有效性。虽然测量结果与数值分析结果一致,但是性能的提升效果与预测值相比有微弱的不同,引起这一现象可能的原因有多个:1)每次重复实验测量过程中的微弱区别导致测量方差的结果变大;2)宽光谱下补偿器相位延迟的色散效应导致不同像素点的性能提升效果不同;3)系统中被忽略的其他两种噪声对测量结果的影响;4)实际测量过程中,器件的一些非理想因素对实验结果造成了影响。

5 结 论

从 DRC-MME 测量结果随机误差的产生原因入手,基于零阶噪声受限、一阶噪声受限、二阶噪声受限三种可能存在的系统模型,得到了 DRC-MME 直通标定实验测量误差的数值估计结果。并通过优化待标定参数,得到了最小的随机误差,从而提高标定精度。优化结果发现:零阶噪声受限系统的测量噪声仅和补偿器的相位延迟有关,且最佳相位延迟是 130.64° ;一阶噪声受限系统测量噪声还与检偏器透光轴的方位角有关,其最佳相位延迟是 130.17° ,检偏器的最佳方位角与起偏器的方位角呈 90° ;二阶噪声受限系统的测量噪声与所有标定参数均有关,两补偿器的最佳起始方位角是 4° 或 94° ,最佳的相位延迟是 132.35° ,检偏器的最佳方位角为 126.7° 或 54.6° 。虽然本优化结果仅针对这三种噪声受限系统,但是随机误差估计结果和优化方法可以适用于多种噪声模型共同存在的模型。

参 考 文 献

- [1] Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202019.
李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202019.
- [2] Luo S, Wang J Q, Zhang B. Influence of fatigue characteristics of piezoelectric ceramics actuators on correction ability of deformable mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0905002.
罗帅, 王家秋, 张彬. 压电陶瓷驱动器疲劳特性对变形镜校正能力的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0905002.
- [3] Shi Y J, Zhang Z H. Linearly polarized photoacoustic imaging based on anisotropic optical absorption[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0807001.
石玉娇, 张振辉. 基于各向异性光吸收的线偏振光声成像[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0807001.
- [4] Fujiwara H. Spectroscopic ellipsometry[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- [5] Arteaga O, Baldris M, Antó J, et al. Mueller matrix microscope with a dual continuous rotating compensator setup and digital demodulation[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2236-2245.
- [6] Gu H G, Chen X G, Jiang H, et al. Optimal broadband Mueller matrix ellipsometer using multi-waveplates with flexibly oriented axes[J]. Journal of Optics, 2016, 18(2): 025702.
- [7] Song G Z, Liu T, Chen Y Q, et al. Calibration of spectroscopic ellipsometer using multiple standard samples[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312003.
宋国志, 刘涛, 谌雅琴, 等. 利用多个标准样品校准光谱椭圆偏振仪[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312003.
- [8] Li S F. Jones-matrix analysis with Pauli matrices: application to ellipsometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(5): 920-926.
- [9] Gu H G, Liu S Y, Chen X G, et al. Calibration of misalignment errors in composite waveplates using Mueller matrix ellipsometry[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 684-693.
- [10] Li W Q, Zhang C W, Jiang H, et al. Depolarization artifacts in dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometry[J]. Journal of Optics, 2016, 18(5): 055701.
- [11] Fan Z T, Tang Y Y, Wei K, et al. Calibration of focusing lens artifacts in a dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometer[J]. Applied Optics, 2018, 57(15): 4145-4152.
- [12] Fan Z T. Research on the advanced parameters problem of Mueller matrix ellipsometry system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
范真涛. Mueller 矩阵椭圆偏测量系统高级参数问题研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- [13] Fan Z T, Tang Y Y, Wei K, et al. Measurement of polarization correlation coefficients of light source and spectrometer in spectroscopic ellipsometry[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(12): 180507.
范真涛, 汤媛媛, 魏凯, 等. 光谱椭圆系统光源和光谱仪偏振相关系数测量[J]. 光电工程, 2019, 46(12): 180507.
- [14] Vap J C, Nauyoks S E, Marciniak M A. Optimization of a dual-rotating-retarder polarimeter as applied to a tunable infrared Mueller-matrix scatterometer[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(5): 055901.
- [15] Goldstein D H, Chipman R A. Error analysis of a Mueller matrix polarimeter[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(4): 693-700.
- [16] Losurdo M, Hingerl K. Ellipsometry at the nanoscale[M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [17] Cheng X, Li M, Zhou J, et al. Error analysis of the calibration of a dual-rotating-retarder Mueller matrix polarimeter[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7067-7074.
- [18] Acito N, Diani M, Corsini G. Signal-dependent noise

modeling and model parameter estimation in hyperspectral images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(8): 2957-2971.

- [19] Wang W S, Ning T G, Pei L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J].

Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0906001.

王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0906001.

- [20] Vose M D. The simple genetic algorithm: foundations and theory[M]. Cambridge: MIT Press, 1999.