

# 基于空间光调制器的光束质量测量

孙 野

四川大学锦江学院电气与电子信息工程学院, 四川 眉山

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年5月15日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘 要

提出了一种利用空间光调制器测量激光束传输比 $M^2$ 的快速简便的方法。该方法基于光在自由空间传播过程的数字模拟, 从而不必使用探测器在传播方向上扫描。本文提出了两种方法来实现这一点, 这两种方法都不需要研究中的激光束的任何信息, 也不需要任何移动的光学元件, 与理论预测的比较显示出高度的一致性, 并证明了该技术的准确性。

## 关键词

空间光调制器, 光束质量测量, 全息图, 拉盖尔 - 高斯光束

# Beam Quality Measurement Based on Spatial Light Modulator

Ye Sun

School of Electrical and Electronic Information Engineering, Sichuan University Jinjiang College, Meishan Sichuan

Received: April 22, 2026; accepted: May 15, 2026; published: May 26, 2026

## Abstract

A fast and simple method for measuring the laser beam propagation ratio  $M^2$  using a spatial light modulator is proposed. The method is based on digital simulation of light propagation in free space, thus eliminating the need for scanning with a detector along the propagation direction. Two approaches are presented to achieve this, both of which require no prior information about the laser beam under investigation and no moving optical components. Comparisons with theoretical predictions show excellent agreement and demonstrate the accuracy of the technique.

## Keywords

Spatial Light Modulator (SLM), Beam Quality Measurement, Hologram, Laguerre-Gaussian Beam

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

激光光束质量通常被理解为对光束传输特性的评价, 由于其简单性, 一个非常常见和广泛的参数已经成为  $M^2$  值, 它将被测光束的光束参数乘积(束腰半径和发散半角的乘积)与基本高斯光束的光束参数乘积进行比较[1]。对于一般的光学光束的光束传播比  $M^2$  的定义及其测量的说明可以在 ISO (国际标准化组织)标准中找到[2] [3]。在此, 提出了用照相机在不同平面上测量光束强度的方法, 它可以确定光束的二阶矩, 从而确定  $M^2$  值。已经提出了几种技术来测量  $M^2$ , 例如刀口法或可变孔径法[1][4]。然而, 尽管这些方法可能很简单, 但它们产生的结果误差较大, 并不可靠[1]。此外, 另一种测量  $M^2$  的方法是使用 Shack-Hartmann 波前传感器, 但是对于多模态光束显示出的结果并不准确[5]。符合 ISO 标准的测量方法, 包括在固定平面和几个旋转透镜组合后面测量光束强度[6], 使用衍射光栅的多平面成像[7], 来自标准具的多次反射[8], 通过专门设计的透射滤波器直接测量光束矩[9], 以及通过模态分解进行场重构[10]-[12]。

实际上, 所有确定光束传播比的方法都需要对不同的光束尺寸或不同的曲率进行多次测量。一般这是通过允许给定尺寸和曲率的光束在自由空间中传播来实现的; 即, 自然界通过衍射提供了光束参数的变化。这样做的一个明显后果是, 探测器必须随着传播场移动, 即在传播方向上扫描所有区域。在此, 我们特别说明, 这是有可能的, 以实现所需的传播与数字全息图: 自由空间传播没有自由空间。

随着光电子技术的快速发展, 基于空间光调制器(SLM)和数字微镜器件(DMD)的现代光束表征技术因其灵活性、可重构性和非侵入性等优势, 已成为光束质量测量领域的研究热点, 相关技术不断迭代升级并拓展应用场景。基于数字全息干涉的表征方法通过 SLM 加载参考光全息图, 与被测光束产生干涉, 结合相位恢复算法可同时获取光束的振幅和相位信息, 实现对光束波前畸变、相位分布的高精度表征, 该方法在自适应光学、精密测量等领域应用广泛[13][14]。数字微镜器件(DMD)作为另一种重要的空间光调制器件, 凭借其高帧频、高填充因子和高对比度的优势, 在光束表征领域形成了与 SLM 互补的技术路径。DMD 通过快速切换微镜状态, 实现对光束强度、偏振态的高速采样, 结合单像素成像原理, 可完成对弱光光束、瞬态光束的快速表征, 突破了传统探测器的采样速率限制[15]-[17]。

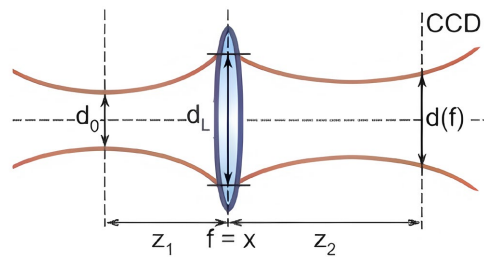
在本文中, 我们采用了两种不同的方法, 都使用空间光调制器(SLM)来控制入射光的相位。这两种方法都要使用空间光调制器 SLM, 第一种是作为可变透镜, 第二种是用以控制光束的空间频谱。在这两种情况下, 强度都是用 SLM 后面固定位置的相机测量的, 不需要移动组件。这两种方案被证明能够实现光束质量的精确测量, 且容易快速实现。

## 2. 光束质量测量

在第一种方法中, 我们通过编程一个可变焦距的数字透镜来实现所需的光束曲率变化, 在这种情况下, 曲率在一个固定的平面(全息图的平面)内变化; 因此, 不是在几个平面上探测一个光束, 而是在一个平面上有效地探测几个光束(每个全息图可以与新光束的产生相关联)。例如, 考虑图 1 中描述的几何情形。使用高斯光学定律, 可以直接表明在焦距为  $f$  的透镜后面测量的光束直径  $d$  可以描述为:

$$d(f) = 2\sqrt{\left(\frac{2\lambda z_2 M^2}{\pi d_L}\right)^2 + \frac{d_L^2}{4}\left(1 + z_2\left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{f}\right)\right)^2}, \quad (1)$$

利用在透镜位置  $R_L = z_1 \left\{1 + \left[\pi d_0^2 / (4\lambda z_1 M^2)\right]^2\right\}$  处的波前曲率半径，光束直径在透镜位置  $d_L = \left\{d_0^2 / 4 + \left[2M^2 \lambda z_1 / (\pi d_0)\right]^2\right\}^{1/2}$ ，透镜前面的束腰直径  $d_0$ ，图 1 中定义的距离  $Z_1$  和  $Z_2$ ，以及波长  $\lambda$ ，现在可以使用等式(1)作为拟合函数以识别未知参数。因此，根据参数集  $(d, d_0, z_1, z_2, f, \lambda, M^2)$ ， $f$  和  $\lambda$  是已知的， $d$  和  $Z_2$  是测量的，并且  $d_0$ 、 $Z_1$  和  $M^2$  被用作拟合参数。因此，使用 SLM 作为可变透镜，通过显示相位图案  $\bar{\Psi}_f = \pi/\lambda f (x^2 + y^2)$ ，这在下文中被称为方法 A，产生光束传播比  $M^2$ ，作为将测量数据与等式(1)的理论曲线拟合的结果。



**Figure 1.** Geometric diagram for determining the value of  $M^2$  by measuring the beam diameter  $d(f)$  as a function of different lens focal lengths  $f$

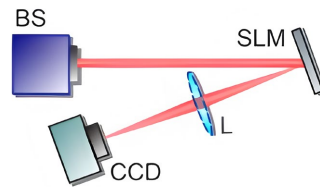
**图 1.** 通过测量光束直径  $d(f)$  作为不同透镜焦距  $f$  的函数来确定  $M^2$  值的几何示意图

其中， $d_0$  为腰部直径； $d_L$  为透镜平面内的直径； $Z_1$  和  $Z_2$  分别为腰部 and 透镜之间的距离，以及透镜和 CCD 平面之间的距离。

第二种方法使用 SLM 来操纵光束的空间频谱。根据角谱方法[10][18]，光场  $U$  沿距离  $z$  沿着的传播可以描述为：

$$U(r, z) = \mathcal{F}^{-1} \left[ \mathcal{F} [U(r, 0)] \exp(ik_z z) \right], \quad (2)$$

其中  $r = (x, y)$ ， $k_z (k_x, k_y) = (4\pi^2/\lambda^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2}$ ，波矢量  $k = [k_x, k_y, k_z]$ ， $F$  和  $F^{-1}$  分别表示傅里叶变换及其逆变换。因此，使用物理透镜将感兴趣的光束平面傅立叶变换到 SLM 上，在 SLM 上显示相位图案  $\Psi_{k_z} = k_z z$ ，并使用透镜反向变换到 CCD 相机的平面，使得我们能够测量固定平面中人工传播光束的直径。根据这些直径的双曲线拟合，可以根据 ISO 标准[2]确定  $M^2$  参数。该过程在下文中称为方法 B。因此，可以执行焦散测量，非常类似于模场重构[10]的方法，但不需要任何复杂的模态分解，也不需要关于被测光束的任何先验知识。注意，如上所述，方法 A 和 B 都限于简单的模态光束。然而，这两种方法都可以通过在 SLM 上额外添加一个圆柱透镜，就可以轻松扩展为方便处理的衍射光束。



**Figure 2.** Experimental setup

**图 2.** 实验装置

其中 BS, 光源; SLM, 空间光调制器; L, 透镜( $f = 400 \text{ mm}$ , 仅在方法 B 中出现); CCD, CCD 相机。

图 2 描述了实验装置, 该装置相当简单, 仅由光源(氦氖激光器,  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $2 \text{ mW}$ )组成, 其光束被扩展到近似平面波(直径 10 毫米), 空间光调制器 SLM (Holoeye PLUTO, 硅基反射型液晶器件,  $1920 \times 1080$  像素,  $8 \mu\text{m}$  像素间距), 用平面波照射, CCD 相机(Spiricon), 以及仅在方法 B 中使用的透镜, 其中所有光学部件在测量期间保持固定。

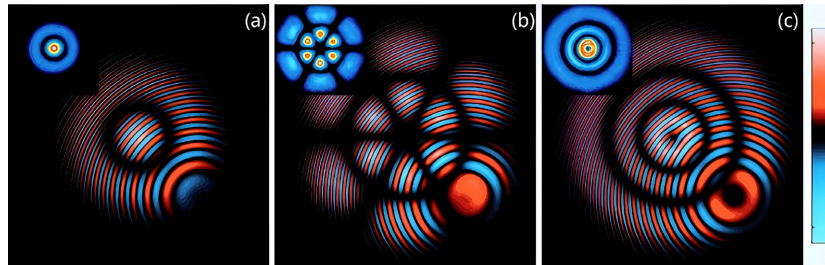


Figure 3. Using method A, digital holograms of three sample beams with a focal length of 400 mm  
图 3. 使用方法 A, 焦距为 400 mm 的三个样本光束的数字全息图

其中(a) LG10、(b) LG1 ± 3 和(c) LG21。插图(图 3)描绘了所得的测量光束强度。

### 3. 测量结果分析

本文中两种测量方法所涉及的光斑直径提取, 均采用 ISO 11146 标准推荐的二阶矩法( $D4\sigma$ ), 该方法是光束直径测量的基准方法, 具有测量精度高、通用性强的优势, 可有效避免传统测量方法(如刀口法、阈值法)带来的系统误差, 适用于各类激光光束的直径表征。

设图像的像素坐标为  $(x_{ij}, y_{ij})$ , 对应位置的光束强度为  $I(x_{ij}, y_{ij})$ , 其中  $i, j$  分别为  $x, y$  方向的像素索引。分别计算  $x, y$  方向的强度加权一阶矩(即光束的质心坐标), 公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i,j} x_{ij} I(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_{i,j} I(x_{ij}, y_{ij})}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i,j} y_{ij} I(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_{i,j} I(x_{ij}, y_{ij})}, \quad (3)$$

其中, 分子为强度加权的坐标和, 分母为光束的总强度, 通过该步骤可确定光束质心位置, 确保后续二阶矩计算围绕光束中心进行, 避免坐标偏移带来的误差。

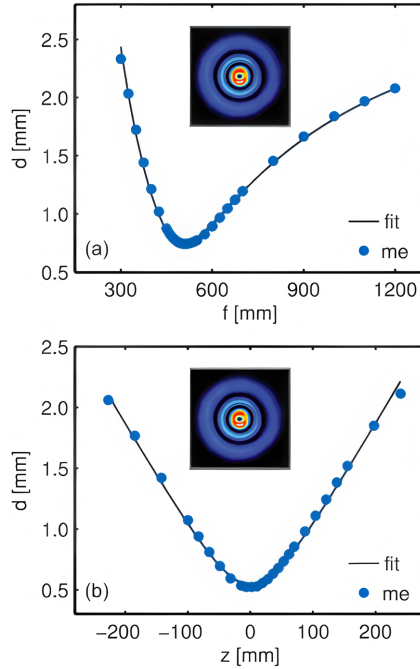
基于质心坐标, 计算  $x, y$  方向的强度加权二阶中心矩, 进而得到标准差  $\sigma_x, \sigma_y$ , 公式如下:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})^2 I(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_{i,j} I(x_{ij}, y_{ij})}, \quad \sigma_y^2 = \frac{\sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y})^2 I(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_{i,j} I(x_{ij}, y_{ij})}, \quad (4)$$

标准差  $\sigma_x, \sigma_y$  分别反映了光束在  $x, y$  方向上强度分布的离散程度, 离散程度越大, 标准差越大, 对应光束直径越大。根据 ISO 11146 标准, 光束直径  $D4\sigma$  定义为 4 倍标准差, 即  $D4\sigma_x = 4\sigma_x, D4\sigma_y = 4\sigma_y$ , 本文中所提及的光束直径  $d$  均指  $x, y$  方向直径的平均值, 即  $d = (D4\sigma_x + D4\sigma_y)/2$ 。

为了测试这两种方法, 研究了不同的拉盖尔 - 高斯模式  $\text{LG}_{pl}$  (简单衍射), 根据  $M^2 = 2p + l + 1$  和  $d_{pl} = d_{00} (2p + l + 1)^{1/2}$ , 因此可知它们的  $M^2$  值和光束直径与模式指数  $p$  和  $l$  成比例。为了方便起见, 只有一个 SLM 同时用于产生样品光束以及描绘相位图案, (在应用于未知源的情况下, 该装置仅用于分析)。通过使用[12] [13]中描述的方法显示相应的 LG 模式图案来产生样本光束, 其中本征光束直径为  $d_{00} = 1.5 \text{ mm}$ , 并将其与透镜函数  $\Psi_f$  (方法 A)或传播因子  $\Psi_{k_z}$  (方法 B)叠加以用于分析, 如图 3 所示的

方法 A 的例子。使用 SLM 也用于光束生成，如果对样本光束的傅里叶变换进行编程[参见等式(2)]，则方法 B 仅需要一个透镜。这里我们再次使用拉盖尔 - 高斯模式  $LG_{pl}$  作为研究对象，这是因为尽管具有尺度差异，但这类模式是其自身的傅立叶变换。作为一个例子，如图 4 中所示，图 4(a)描述了对于拉盖尔 - 高斯光束  $LG_{21}$  (方法 A)，在 SLM 上编程的透镜焦距函数  $f$  和拟合光束直径  $d$  之间的关系。



**Figure 4.** Analysis of a Laguerre-Gaussian  $LG_{21}$  beam with  $M^2 = 6.22$  was generated by measuring the beam diameter as a function of the programmable lens focal length  $f$  and fitting it with Equation (1). (b) Method B: Measuring the beam diameter as a function of the propagation distance  $z$ . Hyperbolic fitting yielded  $M^2 = 6.04$

**图 4.** 使用(a) 方法 A: 作为编程透镜焦距  $f$  的函数测量光束直径，通过与等式(1)拟合产生  $M^2 = 6.22$  的拉盖尔 - 高斯  $LG_{21}$  光束的分析。(b) 方法 B: 作为传播距离  $z$  的函数的测量光束直径。双曲线拟合产生  $M^2 = 6.04$

可以看出，测得的直径符合方程(1)的理论值，得到  $M^2 = 6.22$ ，与理论值 6.0 仅相差 4%。使用方法 B (图 4(b))表征同一光束，根据 ISO 标准，通过双曲线拟合测量直径，得出  $M^2 = 6.04$ ，与理论值偏差 1%。

**Table 1.** Measured (A, B) and expected (th)  $M^2$  values, and the waist diameter of the sample beam

**表 1.** 测量的(A, B)和理论的(th)  $M^2$  值，以及样本光束的腰部直径

Mode	dA;th [mm]	dA [mm]	dB;th [mm]	dB [mm]	$M^2$ th	$M^2$ A	$M^2$ B
$LG_{00}$	1.50	1.58	0.43	0.43	1.00	1.03	1.04
$LG_{01}$	2.12	2.02	0.61	0.64	2.00	2.01	2.09
$LG_{10}$	2.60	2.56	0.74	0.76	3.00	3.03	3.12
$LG_{0\pm 4}$	3.36	3.30	0.96	1.00	5.00	5.25	5.05
$LG_{1\pm 3}$	3.68	3.44	1.05	1.11	6.00	6.20	6.13
$LG_{21}$	3.68	3.45	1.05	1.09	6.00	6.22	6.04

表 1 总结了方法 A 和 B 对不同阶数的拉盖尔 - 高斯  $LG$  模和两个同相叠加模态( $LG_{0\pm 4}$  和  $LG_{1\pm 3}$ )的测量结果，比较了理论和实验的腰部直径和  $M^2$  值，测量误差约为  $\Delta M^2 = 0.15$  和  $\Delta d = 10\%d$ ，包括来自拟合

的误差和来自确定强度背景水平的不确定性误差, 该不确定性从所有 CCD 帧中减去。根据先前的研究 [12], SLM 引起的光束劣化可以忽略不计。注意, 方法 A 和 B 之间的预期腰部直径不同, 因为在方法 B 中, SLM 上产生的模式图案是远场。

因此, 在所显示的模式图案的固有光束尺寸为  $d_{00} = 1.5 \text{ mm}$  和透镜焦距为  $f = 400 \text{ mm}$  的情况下, 相应的理论近场束腰直径总计为  $0.43 \text{ mm}$ 。从理论预期和测量束腰直径以及  $M^2$  值的比较中可以看出, 所有结果都非常一致。腰部直径与理论值的偏差  $\leq 7\%$ ,  $M^2$  的偏差  $\leq 5\%$ 。

#### 4. 引入空间光调制器的测量误差分析

本文实验采用的 Holoeye PLUTO 硅基反射型液晶 SLM ( $1920 \times 1080$  像素,  $8 \mu\text{m}$  像素间距), 虽能实现高精度相位调制, 但受器件固有物理特性限制, 其像素化结构、相位调制能力、填充因子及响应特性等非理想因素会引入额外误差, 叠加光场传输过程后, 最终影响  $M^2$  测量精度 [19]-[22]。结合实验装置参数、理论建模及数值模拟, 详细分析 SLM 核心误差源的产生机理, 并定量评估其对  $M^2$  测量结果的贡献。

##### 4.1. 像素化效应引发的调制误差

实验所用 SLM 为离散像素阵列结构, 单个像素为最小相位调制单元, 而方法 A、B 中所需的可变透镜相位图案、空间频谱调控相位图案均为连续分布, SLM 需对连续相位进行空间离散采样与阶梯化近似重构, 这一过程产生的误差即为像素化效应 [19]。

根据实验 SLM 参数(像素间距  $\Delta p = 8 \mu\text{m}$ ), 其空间采样频率为  $1/\Delta p \approx 125 \text{ cycle/mm}$ , 结合奈奎斯特采样定理, 当待调制相位的空间变化频率超过  $62.5 \text{ cycle/mm}$  时, 会产生明显的空间频率混叠, 导致相位重构失真。

根据角谱衍射理论, 连续波前相位分布  $\varphi(x, y)$  经 SLM 像素离散化后, 实际输出相位可表示为:

$$\varphi_{\text{sam}}(x, y) = \varphi(x, y) \cdot \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta p}, \frac{y}{\Delta p}\right), \quad (5)$$

式中,  $\text{comb}(\cdot)$  为梳状采样函数。设置入射光束为  $\text{LG}_{00}$  模式, 模拟  $\Delta p = 8 \mu\text{m}$  像素间距下, 方法 A、B 的  $M^2$  测量偏差, 每组参数重复测量 10 次, 取平均值计算相对偏差。方法 A 的  $M^2$  平均测量值为 1.007, 方法 B 的  $M^2$  平均测量值为 1.01, 结合表 1 实验测量结果( $M^2$  最大偏差  $\leq 5\%$ ), 像素化效应是 SLM 引入的次要误差源, 其贡献占总误差的 20%~30%。

##### 4.2. 相位量化误差的建模与测量偏差评估

SLM 的相位调制能力受驱动电路位数限制, 实验所用 Holoeye PLUTO SLM 为 8 位相位调制器件, 仅能实现  $2^8 = 256$  级离散相位输出, 相位调制动态范围为  $0 \sim 2\pi$ , 单级相位量化步长为:

$$\Delta\varphi_q = \frac{2\pi}{2^N} = \frac{2\pi}{256} \approx 0.0245 \text{ rad} (1.406^\circ), \quad (6)$$

式中,  $N$  为调制位数。任意目标连续相位会被强制就近匹配至离散量化等级, 产生固有舍入误差, 形成随机相位噪声, 该噪声会破坏光束空间相干性, 导致光斑强度分布出现随机起伏, 增加  $M^2$  拟合过程中光斑半径的测量不确定性 [22]。

定义单像素相位量化误差  $\delta\varphi \in [-\Delta\varphi_q/2, \Delta\varphi_q/2]$ , 全域 SLM 相位量化误差为随机分布的静态噪声, 其对光场复振幅的扰动可表示为:

$$U'(x, y) = U_0(x, y) \cdot \exp(i\delta\varphi(x, y)), \quad (7)$$

式中,  $U_0(x, y)$  为理想光场复振幅。结合实验 SLM 参数, 采用蒙特卡洛模拟方法, 模拟调制位数为 8 时, LG<sub>00</sub> 模式的  $M^2$  测量偏差, 每组调制位数重复测量 10 次, 统计平均相对偏差与标准差。实测  $M^2$  平均值为 1.01, 实验所用 8 位 SLM 的相位量化误差对  $M^2$  测量的平均相对偏差为 1.0%, 标准差为 0.02, 结合表 1 中 LG<sub>00</sub> 模式的测量结果, 相位量化误差的贡献占总误差的 20%~30%。

### 4.3. 填充因子限制的衍射误差

SLM 单个像素由有效相位调制区域与像素间隙(遮光电极、隔离边框)组成, 填充因子  $F$  定义为单像素有效调制面积与像素总面积的比值[23]。实验所用 Hol oeye PLUTO SLM 的填充因子约为 92%, 像素间隙宽度约为 0.64  $\mu\text{m}$  (基于 8  $\mu\text{m}$  像素间距计算), 像素间隙的遮光结构会形成二元振幅光栅, 引发额外振幅调制与衍射损耗, 破坏理想纯相位调制模式, 导致光束能量分流, 进而影响  $M^2$  测量精度。

填充因子的计算公式为:

$$F = \frac{S_{active}}{S_{pixel}} = \frac{(\Delta p - w_g)^2}{\Delta p^2}, \quad (8)$$

式中,  $w_g$  为像素间隙宽度,  $\Delta p$  为像素间距。当  $F=100\%$  时为理想无间隙像素模型, 无振幅调制误差;  $F < 100\%$  时, 像素间隙会产生次级衍射旁瓣, 导致中心主光斑能量占比下降。填充因子误差为系统性固定偏差, 会导致  $M^2$  测量结果持续偏大, 且填充因子越低, 偏差越大。以 LG<sub>00</sub> 模式为例, 实测  $M^2$  平均值为 1.008, 实验所用 SLM ( $F=92\%$ ) 的填充因子误差对  $M^2$  测量的系统偏差为 0.8%, 结合本文实验总偏差 ( $\leq 5\%$ ), 其贡献占总误差的 20% 左右。

### 4.4. 相位响应非线性的系统畸变与 $M^2$ 偏移

理想情况下, SLM 的相位调制量与驱动灰度值呈严格线性对应关系, 但实验所用液晶 SLM 受液晶分子电光响应特性、环境温度漂移(实验环境温度约 25 $^{\circ}\text{C}$ )、液晶层厚度不均匀等因素影响, 灰度-相位响应曲线会偏离线性, 表现为低灰度区间相位调制迟缓、高灰度区间相位饱和, 形成非线性畸变[22]。

设理想线性相位响应为  $\varphi_{ideal} = k \cdot G$  ( $G$  为灰度值,  $k$  为比例系数), 实际非线性响应可拟合为三次函数:

$$\varphi_{real} = a \cdot G + b \cdot G^2 + c \cdot G^3, \quad (9)$$

非线性偏差  $\Delta\varphi_{nl} = \varphi_{real} - \varphi_{ideal}$  会引入低频像差(离焦、像散), 属于确定性系统误差, 会直接改变光束的聚焦特性与发散特性, 导致  $M^2$  测量结果出现固定偏移。以 LG<sub>00</sub> 模式为例,  $M^2$  平均测量值为 1.012, 结合表 1 实验数据, 相位响应非线性误差对  $M^2$  测量的相对偏差约为 1.5%, 是 SLM 引入的主要误差源之一, 其贡献占总误差的 30%~40%。

这四类误差中, 相位响应非线性误差(1.5%)、像素化效应(1.0%~1.5%)为主要误差贡献者, 填充因子误差(1.0%)、相位量化误差(1.0%)为次要误差源, 四类误差叠加后, 对  $M^2$  测量的总相对偏差控制在 5% 以内, 与表 1 中实验测量结果( $M^2$  最大偏差  $\leq 5\%$ )相符合。此外, 相位响应非线性误差可通过逐像素精准校准优化, 像素化效应可通过选用更小像素间距的 SLM 改善, 填充因子误差需依赖硬件升级, 相位量化误差可通过提升 SLM 调制位数降低, 为后续测量系统的优化提供理论依据。

## 5. 总结

总之, 我们提出了两种方法, 都使用可数字全息图编程的空间光调制器 SLM, 能够快速且便捷地测量光束传输比  $M^2$ 。第一种方法使用 SLM 作为可变焦距的透镜, 而在第二种方法中, SLM 用于控制光束的空间频谱。由于 SLM 帧速率高达 60 Hz, 因此  $M^2$  测量时间可低于 1 s。通过分析已知  $M^2$  的不同拉盖

尔 - 高斯模式和模式叠加,  $M^2$  参数的偏差小于 5%, 显示了较高的测量保真度。

这两种基于 SLM 的光束质量测量方法, 适用于可见光至近红外波段、 $M^2$  值 1.0~10.0、束腰直径 0.3 mm~4.0 mm、发散角 0.1 mrad~1.0 mrad 的简单模态激光光束, 在规范实验条件下, 测量偏差  $\leq 5\%$ , 可满足快速、高精度的光束质量测量需求。其中方法 A 适用于空间受限的快速测量, 方法 B 适用于高精度测量: 超出上述范围或针对复杂光束, 需优化 SLM 参数、改进拟合算法, 或采用其他辅助测量技术(如 DMD 高速采样)以提升精度。

## 基金项目

四川大学锦江学院基于光学调制的高性能激光雷达扫描系统关键技术研究(项目编号: QNJJ-2024-B04)。

## 参考文献

- [1] 吕百达, 张彬, 蔡邦维.  $M^2$  因子概念和激光光束质量控制[J]. 激光技术, 1992(5): 278-284.
- [2] ISO (2005) ISO 11146-1:2005 Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios. Part 1: Stigmatic and Simple Astigmatic Beams. <https://www.iso.org/standard/77769.html>
- [3] ISO (2005) ISO 11146-2:2005 Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios. Part 2: General Astigmatic Beams. <https://www.iso.org/standard/77770.html>
- [4] 陆治国. 激光束空间质量评价[J]. 激光杂志, 1995(2): 53-58+69.
- [5] 陆治国. 表达光束质量的参数[J]. 量子电子学, 1993(4): 382.
- [6] 牛燕雄, 汪岳峰, 刘新, 等. 激光束质量因子  $M^2$  及其测量[J]. 激光技术, 1999(1): 38-41.
- [7] 黄忠伦, 郭劲, 付有余. 评价激光光束质量的各种方法[J]. 激光杂志, 2004, 25(3): 1-3.
- [8] 于永爱, 张玲玲, 唐前进, 付文强, 胡企铨. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 255-258
- [9] 闫宏宇, 高欣, 宋健, 等. 976 nm 宽条形高功率半导体激光器的光束质量  $M^2$  评价[J]. 发光学报, 2019, 40(2): 196-203.
- [10] 李杨, 刘磊, 王钢, 等. 高能激光短距离传输光束质量测量仿真与实验研究[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(9): 306-314.
- [11] 刘敏时, 王晓曼, 景文博. 双波门自适应阈值法对光束质量  $M^2$  因子测量精度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(4): 1066-1070.
- [12] 李俊博, 刘斯靛, 韩志刚, 等. 基于远场同轴全息的激光  $M^2$  因子测量技术[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 57-64.
- [13] 杨裕, 谷一英, 胡晶晶, 等. 基于相位型空间光调制器的光束控制技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 418-426.
- [14] 王姝懿, 刘智, 林鹏, 等. 基于液晶空间光调制器的激光束散角控制技术[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1430-1438.
- [15] 吕伟振, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 基于 DMD 的高动态范围成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1167-1171.
- [16] 李铭, 袁索超, 李红光, 等. 数字微镜器件的远场焦斑测量方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 178-182.
- [17] 姚雪峰, 高毅, 龙兵, 等. 数字微镜器件(DMD)杂散光特性测试方法及装置[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 339-347.
- [18] 吕浩然, 安岩, 胡立超, 等. 基于复振幅重构的大口径离轴光束质量测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 193-200.
- [19] 马啸, 刘世杰, 张志刚, 等. 空间光调制器像素尺寸对非球面检测误差影响分析[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 214-220.
- [20] 刘亲厚, 冯国英, 邓国亮, 等. 准直误差对光束质量因子测量影响的理论与实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 157-165.
- [21] 陈椿元, 冯泽心. 基于光线映射初始相位估计和径向基函数优化的光束质量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(1): 177-184.

- 
- [22] 曾婧潇, 洪羽剑, 卢钧胜, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性的快速测量与标定方法[J]. 光学学报, 2023, 43(3): 103-110.
- [23] 蔡冬梅, 杨慧珍, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 491-495.