

基于激光光场非等距双向传播的光束质量测量

景文博^{1*}, 罗秦¹, 刘鹏², 翁跃¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对传统光束质量测量方法中等距传播面上光场信息采集耗时长、效率低等问题, 提出一种非等距双向传播的光束质量测量方法。基于非等距传播步长的更新条件建立非等距双向传播模型, 实现激光传播廓形拟合中传播步长的迭代, 完成光束质量的测量。实验结果表明: 非等距双向传播模型的光束质量测量误差为 $\pm 1.9\%$ 。该方法可有效提高光束质量测量的效率。

关键词 激光光学; 激光光场; 光束质量; 传播步长; 非等距双向传播

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1205002

Measurement of Laser Beam Quality by Non-Equidistant and Bidirectional Propagation

Jing Wenbo^{1*}, Luo Qin¹, Liu Peng², Weng Yue¹

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² School of Electronic Information and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Traditional beam-quality measurement methods face problems such as excessive time consumption and low efficiency of optical field information acquisition on the equidistant propagation plane; to combat these, a non-equidistant and bidirectional propagation method to determine beam quality is proposed. A non-equidistant and bidirectional propagation model is established by updating the condition of non-equidistant propagation step, while the iteration of the propagation step in the fitting of laser propagation profile is realized to determine beam quality. Experimental results show that the error of beam-quality measurement is $\pm 1.9\%$ in the non-equidistant and bidirectional propagation model. The proposed method can effectively improve the efficiency of laser beam-quality measurement.

Key words laser optics; laser field; beam quality; propagation step; non-equidistant and bidirectional propagation

OCIS codes 140.3295; 140.3430; 140.3460

1 引言

光束质量是评价激光光束的重要指标之一^[1-3], 为激光技术的广泛应用提供了保障。通常利用激光在传播方向不同位置处的光场信息模拟激光的传播过程, 解算光束质量。激光光束质量测量的关键就是得到传播路径上不同采样位置的光场分布^[4], 因此光场位置分布是光束质量测量过程中的重要影响

因素之一。

近年来, 已有多位专家学者在激光光束质量测量领域取得了进展, 文献[5-11]均是利用传播路径上不同采样位置的光场信息来实现光束质量的解算, 在传统的 M^2 因子测量方法上加以改进, 使得测量结果更加准确, 测量方式更加多样化。但这类方案并未讨论传播路径上不同采样位置的光场分布, 也未给出各个采样位置的分布条件; 这类方法在求

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-07-18; 录用日期: 2019-09-03

基金项目: 吉林省科技厅项目(20170623004TC, 20160204009GX)、科技部项目(2018YFB1107600)

* E-mail: wenbojing@cust.edu.cn

解激光质量因子的过程中需要在不同位置多次拍摄光斑图像,不仅求解速度慢、效率低,而且对于设备要求高,需要图像采集卡、精密导轨、控制测量软件等^[12]。同时,还存在光路准直误差对光束质量测量精度的影响^[13]。

为解决以上问题,本文提出一种基于激光光场非等距双向传播的光束质量测量方法,该方法通过已知的初始传播平面的光场和非等距双向传播模型,应用衍射的角谱传播理论重构非等距采样位置上的激光光场信息,拟合激光传播廓形曲线,解算激光光束质量。本文方法讨论了传播路径上不同位置的光场分布问题,给出了传播位置分布的具体条件,为光束质量测量带来了极大的便利,并且大大提高了激光质量因子 M^2 的解算效率。

2 非等距双向传播的光束质量测量理论

2.1 激光的传播

在激光光学中,由激光谐振腔发出的 TEM_{00} 称为基模,其在横截面上的光强分布为一圆斑,中心处光强最强,从中心向边缘方向光强呈指数衰减,能量集中,呈高斯型分布,因此也称为高斯光束。高斯光束在其传输轴线附近可近似看作是一种球面波,其曲率大小随着传输过程不断发生改变,但其振幅和强度在传播路径上不同位置范围内始终保持高斯分布特性,如图 1 所示,其中 Δz 为传播路径上不同位置间的传播距离

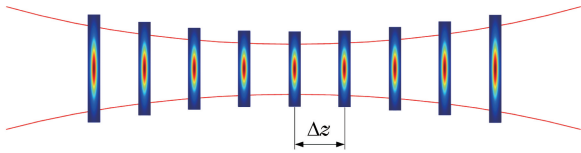


图 1 激光光束传播强度分布特性示意图

Fig. 1 Schematic of intensity distribution characteristics of Gaussian beam propagation

2.2 衍射的角谱传播理论

传播路径上不同位置处的光场分布可利用衍射的角谱理论^[14]实现测量。设初始传播面 Z_0 到目标平面 Z_i 的传播步长为 Δz ,其中, $i \in (0, 1, \dots)$ 为平面传播序号,其空间位置如图 2 所示。

初始传播面 Z_0 与目标平面 Z_i 上激光光束的光场复振幅分布分别为 $U(x, y, 0)$ 和 $U(x, y, z)$, 其对应的角谱分布为 $A_0(u, v)$ 和 $A_i(u, v)$, 其中 x, y, z 分别为传播空间中三轴坐标, u, v 分别表示 x, y 方向的频率。根据角谱理论, $A_0(u, v)$ 和 $A_i(u, v)$ 分别是 $U(x, y, 0)$ 和 $U(x, y, z)$ 的傅里叶变换,

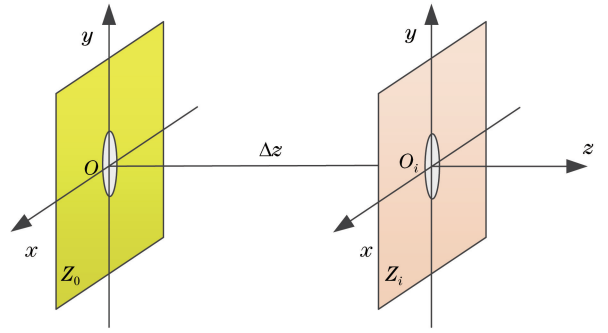


图 2 初始传播面与目标平面空间位置示意图

Fig. 2 Schematic of spatial positions of initial propagation surface and target plane

则有

$$A_0(u, v) = \mathcal{F}\{U(x, y, 0)\}, \quad (1)$$

$$A_i(u, v) = \mathcal{F}\{U(x, y, z)\}. \quad (2)$$

在确定目标平面的角谱后,可通过傅里叶逆变换得到目标平面处高斯光束的复振幅分布^[15]。角谱传播规律为

$$A_i(u, v) =$$

$$A_0(u, v) \exp[jkz \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}], \quad (3)$$

式中: λ 表示波长; j 表示虚数单位; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 表示波矢量大小。令传递函数 $H(u, v)$ 为 $H(u, v) = \exp[jkz \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}]$, 则有

$$\begin{cases} U(x, y, 0) = g(x, y, 0) \exp[j\varphi(x, y, 0)] \\ U(x, y, z) = g(x, y, z) \exp[j\varphi(x, y, z)] \end{cases}, \quad (4)$$

式中: g 表示激光的振幅; φ 表示激光的相位。激光初始传播平面的强度 $I_0 = |g(x, y, 0)|^2$, 传播到 z 处的强度 $I_z = |g(x, y, z)|^2$, 将 $H(u, v) = \exp[jkz \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}]$ 代入角谱传播公式(3)式,可得激光的角谱传播公式为

$$I_z(x, y, z) = | \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ \sqrt{I_0(x, y, 0)} \cdot \exp[j\varphi(x, y, 0)] \} \cdot H(u, v) \} |^2. \quad (5)$$

利用离散傅里叶变换 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 和逆变换 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 对角谱理论进行衍射计算,且无论激光光束的传播步长是否满足傍轴条件,衍射的角谱理论都遵从严格的标量衍射理论,因此其可用于精确地描述激光光束的传播过程。

2.3 非等距双向传播模型

建立如图 3 所示的空间坐标系,按初始瑞利范围 Z_{R_0} 划分激光传播区域, $\pm 1.5Z_{R_0}$ 为区域 Area1, $1.5Z_{R_0} \sim 3Z_{R_0}$ 为区域 Area2, 其他为区域 Area3, 其区域划分范围示意图如图 3 所示。

按照激光传播区域给出非等距双向传播的步长

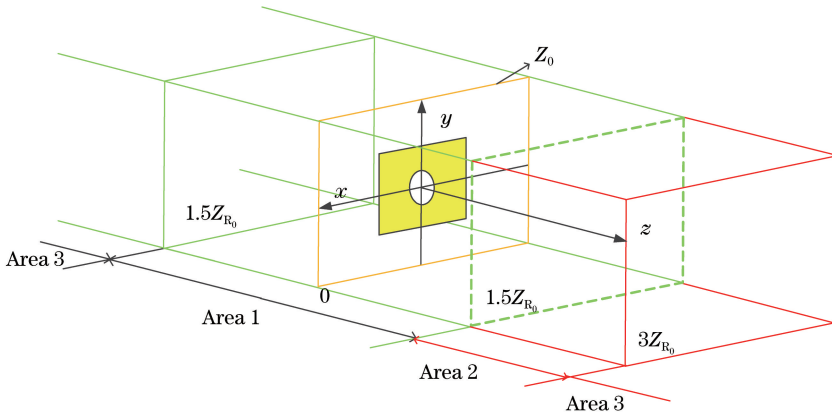


图 3 激光传播区域分类示意图

Fig. 3 Schematic of laser propagation area classification

更新条件,可表示为

$$\Delta z_{i+1} = \begin{cases} \epsilon^{-1} \Delta z_i, & z \in (-1.5Z_{R_0}, 1.5Z_{R_0}) \\ \epsilon \Delta z_i, & z \in (1.5Z_{R_0}, 3Z_{R_0}) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Δz_{i+1} 为更新后的传播步长; Δz_i 为更新前的传播步长; ϵ 为传播步长放缩系数。当 $i=0$ 时, Δz_i

为初始传播步长。

3 非等距双向传播的光束质量测量方法

假设初始传播步长为 Δz_0 ,根据初始传播步长 Δz_0 使初始传播面 Z_0 的光进行传播,传播后可得到如图4所示的目标平面光场分布。

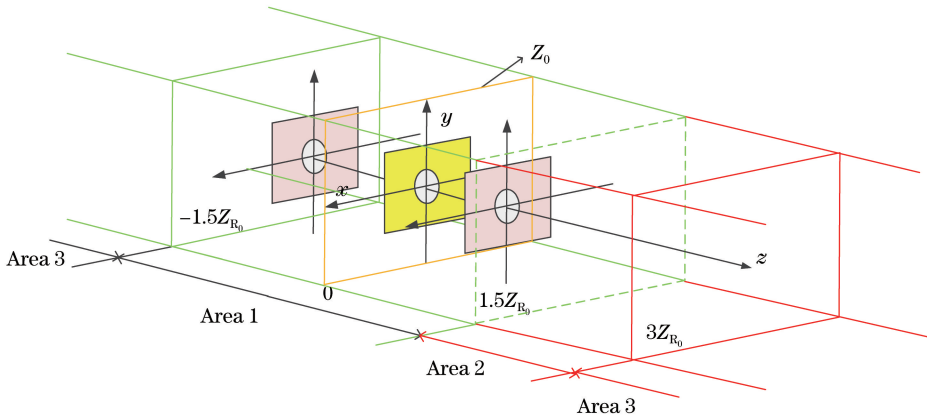


图 4 目标平面光场分布示意图

Fig. 4 Schematic of light-field distribution at target plane

激光传播廓型曲线 C_i 的表示式为

$$d_i^2(z) = a_i + b_i z_i + c_i z_i^2, \quad (7)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为曲线参数; $d_i = (d_{i0}, d_{i1}, \dots, d_{in})$ 为 $i+1$ 次更新后,传播路径上所有采样点(设总数为 n)的光斑的大小; $z_i = (z_{i0}, z_{i1}, \dots, z_{in})$ 为 $i+1$ 次更新后,传播路径上 z 轴的位置坐标。根据该组目标平面光场强度分布图像,由(7)式拟合出初始激光传播廓型曲线 C_0 ,进而得到其曲线参数 a_0 、 b_0 、 c_0 ,再通过(8)式更新瑞利范围 Z_{R_i} ,再通过(6)式更新传播步长 Δz_i ,进而更新激光传播区域。

$$\begin{cases} M^2 = \frac{\pi}{8\lambda} \sqrt{4ac - b^2} \\ Z_R = \frac{1}{2c} \sqrt{4ac - b^2} \\ \theta = \sqrt{c} \end{cases} \quad (8)$$

式中: M^2 为光束质量因子; Z_R 为瑞利长度; θ 为发散角。

在传播的过程中保持初始传播面 Z_0 不变,始终将 Z_0 面的光场分布作为已知条件,根据图4中的初始传播面 Z_0 可获得一组新的目标平面,其目标平面光场分布如图5所示。

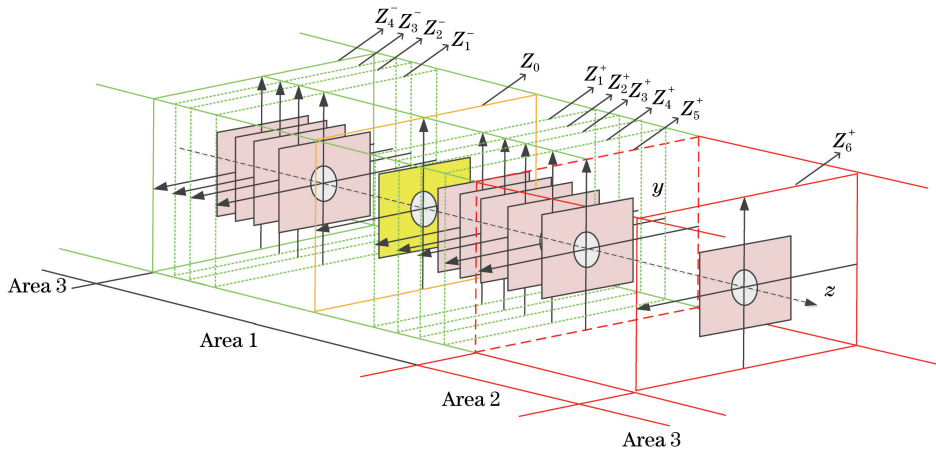


图 5 一组新的目标平面光场分布示意图

Fig. 5 Schematic of a new set of light-field distribution at target plane

同样,根据一组新的目标平面光场强度分布图像,可求解出激光传播廓型曲线 C_i ,进而更新瑞利范围 $Z_{R_{i+1}}$,更新传播步长 Δz_{i+1} ,更新激光传播区域。

以此规律进行循环,直至激光传播目标平面个数不小于 10,且 Area 2 中至少有 1 个目标平面,此时停止传播步长更新。

4 实验结果与数据分析

非等距双向传播的光束质量测量装置,如图 6 所示,该装置主要由激光器、衰减器、反射镜、分光棱镜、BeamWave-500 激光光束分析仪(BW)、M²-200s 光束质量测量仪(BQM)和计算机系统组成。激光器发射出激光光束,经反射镜和分光镜分别进入到 BW 和 BQM,以 BW 来获取初始传播平面 Z_0 处的光场信息,以 BQM 测量的激光 M^2 、瑞利长度和发散角作为真值。

实验中相关技术参数如下:激光器波长为 632.8 nm;衰减组为美国 Spiricon 公司的衰减组合 LBS-100 系列,其口径大小为 19 mm×19 mm,工作

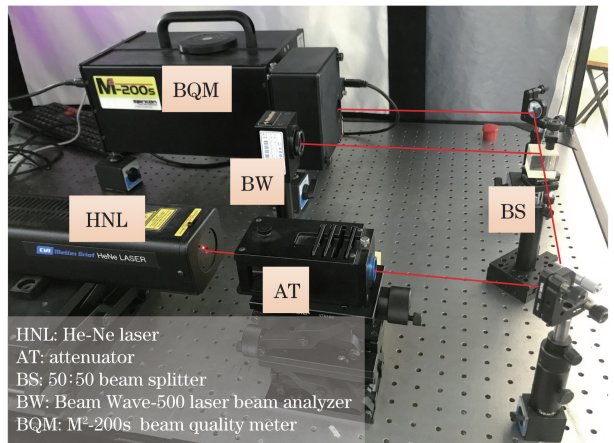


图 6 非等距双向传播的光束质量测量光路示意图

Fig. 6 Schematic of optical path for beam quality measurement by non-equidistant and bidirectional propagation
的波长范围为 400~900 nm。在此基础上对本文提出的基于激光光场非等距双向传播的光束质量测量方法展开验证实验。

如图 7 所示为初始传播平面 Z_0 处的光场信息,由图 6 实验中的 BW 直接获取。

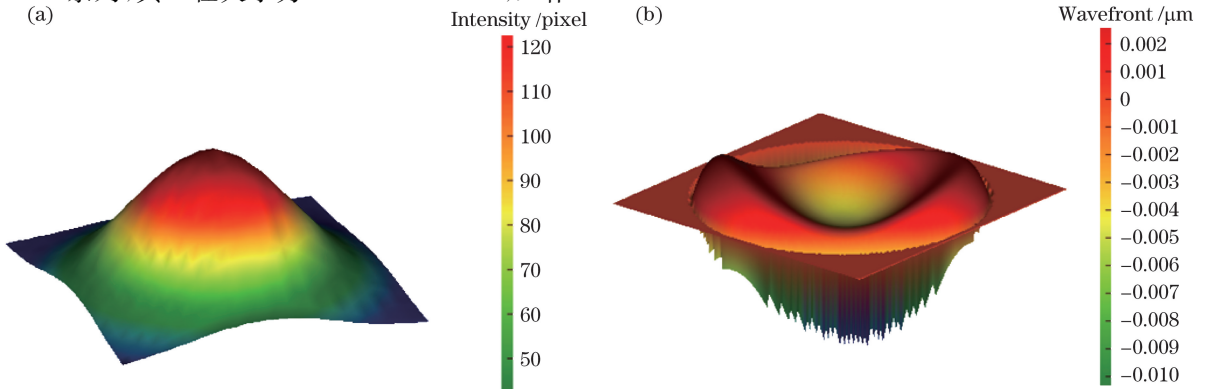


图 7 初始平面处光场信息示意图。(a)强度信息;(b)相位信息

Fig. 7 Diagrams of light-field information at initial plane. (a) Intensity information; (b) phase information

以初始平面 Z_0 为原点, 讨论传播步长放缩系数 ϵ 的取值对光束质量的影响。以 $\epsilon = 1.1$ 为例展开光束质量的测量实验, 初始采样步长 $\Delta z_0 = 80$ mm。

如图 8 所示, 根据初始传播平面 Z_0 处的光场信息、初始采样步长 Δz_0 可获得对应传播路径上多个采样位置横截面光斑的大小, 通过(7)式拟合双曲线得到初始传播曲线 C_0 , 如图 8(a)所示; 通过(8)式更新瑞利范围 Z_{R_1} 、更新传播步长 Δz_1 , 再利用非等距双向传播模型重构非等距采样位置处第二组激光光场信息, 再通过双曲线拟合得到第二次传播曲线, 如图 8(b)所示; 依此类推可得图 8(c)、图 8(d), 该三次传播的激光传播区域如表 1 所示, 至此完成了传

播步长放缩系数 $\epsilon = 1.1$ 的激光传输廓形拟合曲线的求解。

表 1 传播步长变化表

Table 1 Variation of propagation step

Number of transmissions	Propagation width Δz /mm	
	Area 1	Area 2
Second spread	73	88
Third spread	66	97
Fourth spread	60	107

同理, 可得到 $\epsilon = 1.2, \epsilon = 1.3, \epsilon = 1.4, \epsilon = 1.5, \epsilon = 1.6, \epsilon = 2.0$ 等值激光传输廓形拟合曲线, 如图 9 所示。

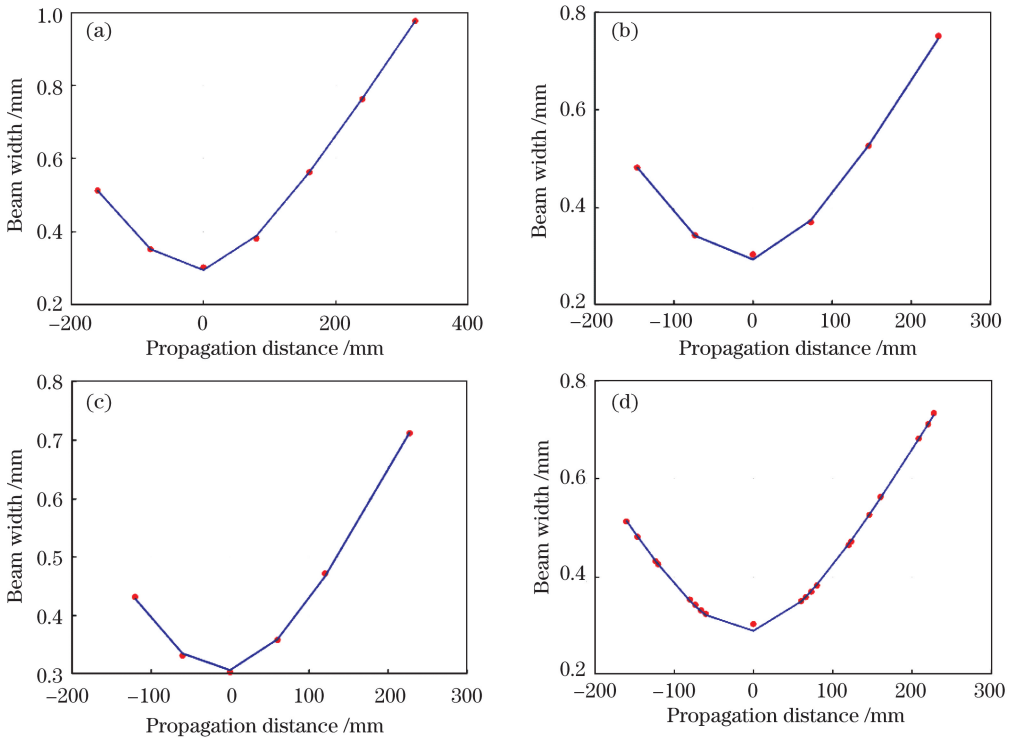


图 8 激光传播廓形曲线拟合变化图。(a)初始传播曲线;(b)第二次传播曲线;(c)第三次传播曲线;(d)最终传播曲线
Fig. 8 Fitting maps of laser propagation profile curves. (a) Initial propagation curve; (b) second propagation curve; (c) third propagation curve; (d) final propagation curve

根据图 9 可看出随着 ϵ 的增大, 传播区域 Area 1 中传播步长减小, 采样平面增加, 拟合传播曲线的数据增多, 激光传播廓形曲线区域平滑, 更加贴近真实的激光传播过程, Area 1 中的各平面位置间距较均匀; 同时, 随着 ϵ 的增大, Area 1 内采样平面增加, Area 2 中的采样平面的数量相对于 Area 1 减少, 即其对曲线拟合精度的影响减小。由图 9 可得曲线拟合方差及光束质量参数, 其结果如表 2 所示。

从表 2 可知, 当 $\epsilon = 1.5$ 时, 该曲线的标准差最小, 其曲线拟合度最好, 且光束质量参数 M^2 因子误

差误差范围为 $\pm 1.9\%$, 此时光束质量 M^2 因子为 1.018222。

如表 3 所示, 使用秒表计时, 基于 M^2 -200s 光束质量测量仪和非等距双向传播法测量激光光束质量的时间, 分别测 10 组数据, 求其平均值。需要说明的是, 采用 M^2 -200s 仪器测量时, 使用 ISO11146 标准^[11,16]中最低标准的 10 组采样数据进行测量, 这时 M^2 -200s 测量光束质量的时间最短。可以看出, 使用本文方法测量的时间比传统 M^2 -200s 光束质量测量法缩短了近 80%。

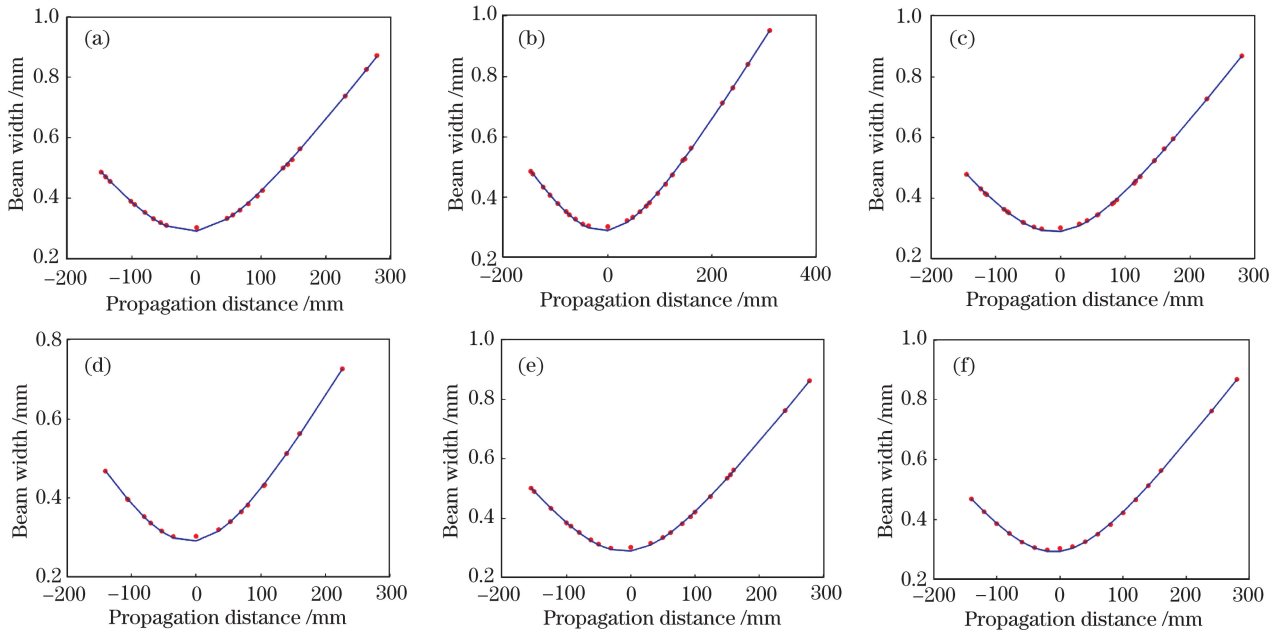


图9 不同传播步长放缩系数下的激光传输廓形曲线拟合图。

(a) $\epsilon=1.2$; (b) $\epsilon=1.3$; (c) $\epsilon=1.4$; (d) $\epsilon=1.5$; (e) $\epsilon=1.6$; (f) $\epsilon=2.0$

Fig. 9 Fitting maps of laser propagation profile curves with different scaling factors of propagation step.

(a) $\epsilon=1.2$; (b) $\epsilon=1.3$; (c) $\epsilon=1.4$; (d) $\epsilon=1.5$; (e) $\epsilon=1.6$; (f) $\epsilon=2.0$

表2 激光传播廓形曲线拟合方差及光束质量参数表

Table 2 Fitting variance of laser propagation profile curve and beam-quality parameters

Step size reduction factor ϵ	Curve standard deviation	M^2	Rayleigh length Z_R /mm	M^2 error /%
1	0.1701	1.029902	105.6341	0.780115
1.1	0.1350	1.013378	101.1075	2.372063
1.2	0.1589	1.018891	102.6250	1.840931
1.3	0.1739	1.015813	102.0595	2.137523
1.4	0.1354	1.017606	102.6632	1.964775
1.5	0.1116	1.018222	102.5693	1.905362
1.6	0.1468	1.015060	102.3856	2.210039
2	0.1603	1.020228	103.3881	1.7121
M^2 -200s	0	1.0380	100.0000	—

表3 M^2 -200s 光束质量测量仪与非等距双向传播的光束质量测量时间对比表

Table 3 Comparison of measurement time between M^2 -200s beam-quality meter and non-equidistant and bidirectional propagation method

Number of measurements	Measurement time /s	
	M^2 -200s	Non-equidistant and bidirectional propagation
1	232.48	50.62
2	229.57	51.31
3	230.71	51.23
4	227.97	51.43

续表

Number of measurements	Measurement time /s	
	M^2 -200s	Non-equidistant and bidirectional propagation
5	234.62	52.19
6	230.18	50.79
7	229.67	51.55
8	231.59	51.38
9	228.77	50.71
10	232.35	51.11
Average	230.79	51.23

5 结论

根据以上实验可知,以所提方法为条件的非等距双向传播模型,当初始采样步长 $\Delta z_0 = 80$ mm,步长的放缩系数 $\epsilon = 1.5$ 时,其曲线拟合最好,此时该曲线的标准方差为 0.1116,光束质量 M^2 因子误差范围为 $\pm 1.9\%$;若采用焦散法测量光束质量,理想条件下需要进行至少 10 次等距重复测量,而所提方法只需要单次拍摄无需运动部件即可完成测量,可以使测量仪器小型化,且在测量效率上,相对于焦散法测量光束质量,时间减少了近 80%。本文提出的非等距双向传播模型为光束质量测量过程中采样位置和传播位置的选取提供了依据,其光束质量测量误差为 $\pm 1.9\%$ 。

参 考 文 献

- [1] Feng G Y, Zhou S H. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1643-1653.
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1653.
- [2] Zhang L W, Li X T, Cen Z F, *et al.* Research on nonlinear degeneration and compensation of beam quality in high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214005.
张鲁薇, 李晓彤, 岑兆丰, 等. 强激光系统光束质量的非线性退化及补偿研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0214005.
- [3] Zhu F, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0401002.
朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲 HF 激光光束质量优化[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401002.
- [4] Kaim S, Lumeau J, Smirnov V, *et al.* Metric for the measurement of the quality of complex beams: a theoretical study[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(4): 538-548.
- [5] Du Y Z, Fu Y Q, Zheng L X. Complex amplitude reconstruction for dynamic beam quality M^2 factor measurement with self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. Applied Optics, 2016, 55(36): 10180-10186.
- [6] Zuo Q, Zhang Y, Yan A Z, *et al.* The invention relates to a laser beam quality measuring device based on variable focusing optical path: 201510851520.8 [P]. 2016-04-06.
左强, 张庸, 闫阿泽, 等. 一种基于可变聚焦光路的激光光束质量测量装置: CN201510851520.8 [P]. 2016-04-06.
- [7] Chen C, Zheng J J, Wei W, *et al.* Measurement of laser beam quality M^2 based on CCD [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(5): 642-647.
陈诚, 郑加金, 韦玮, 等. 基于 CCD 测量激光光束质量 M^2 [J]. 发光学报, 2017, 38(5): 642-647.
- [8] Pan S H, Ma J, Zhu R H, *et al.* Real-time complex amplitude reconstruction method for beam quality M^2 factor measurement [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20142-20155.
- [9] Cai J, Li S S. Analysis and measurement of beam quality of quantum cascade laser [J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 13-16.
蔡军, 李森森. 量子级联激光器光束质量分析及测量 [J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 13-16.
- [10] Tang K, Xiao L Z, Ye F X. Research on optical path correction and measurement function verification of beam quality measuring device [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(2): 163-165.
唐楷, 肖龙忠, 叶发新. 光束质量测量装置的光路矫正及测量功能验证研究 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2): 163-165.
- [11] Xiao Q, Liu X, Deng J Q, *et al.* Analysis of the influence factors on high precision measurement of laser beam parameter based on camera [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071401.
肖青, 刘侠, 邓剑钦, 等. 基于相机式激光光束参数测量精度的影响因素分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071401.
- [12] Li X M, Shen X J, Li G, *et al.* Evaluating specifications of laser beam quality based on beam profile [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502001.
李晓明, 沈学举, 李刚, 等. 基于光斑轮廓特征的激光光束质量简易评价方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502001.
- [13] Liu Q H, Feng G Y, Deng G L, *et al.* Theoretical and experimental studies on influence of collimation error on beam quality factor measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0905001.
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): 0905001.
- [14] Védrenne N, Mugnier L M, Michau V, *et al.* Laser beam complex amplitude measurement by phase diversity [J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4575-4589.
- [15] Delen N, Hooker B. Free-space beam propagation between arbitrarily oriented planes based on full diffraction theory: a fast Fourier transform approach [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(4): 857-867.
- [16] International organization for standardization. Lasers and laser-related equipment-test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios-part 1: stigmatic and simple astigmatic beams: ISO 11146-1: 2005 [S]. Switzerland: ISO, 2005.