

文章编号 1004-924X(2022)12-1418-11

应用于光束质量测量的阵列光纤串扰校正

罗杰^{1,2,3}, 秦来安^{2,3*}, 侯再红^{2,3}, 朱文越^{1,2,3}, 张巴龙^{2,3}

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:为降低光束质量测量系统中阵列光纤输出串扰导致的测量误差,本文提出了硬件设计与算法构建相结合的串扰校正方法,并就此展开了相关的原理研究与方法验证。首先,基于光束质量测量要求和光纤传光原理分析了阵列光纤的串扰影响;其次,结合朗伯散射原理和实验结果验证了校正串扰的原理:使用朗伯体降低阵列光纤输出光发散角差异,并建立统一的弥散光斑串扰模型,再采用反卷积算法复原到靶光斑;再次,介绍了针对性的反卷积算法原理,并就相关参数的设计展开了讨论;最后,对真实光斑、光纤输出的未校正光斑及已校正光斑进行对比分析,实验验证了校正方法的可行性。实验结果表明:与未校正光斑相比,校正后光斑强度分布的相对均方根误差由36.06%降至4.67%,桶中功率的相对均方根误差由7.79%降低至0.73%,86.5%桶中功率所在束宽的测量相对误差由10.83%降至3.46%,结合校正算法的图像处理 and 参数计算总时间约为8 s。

关键词:光束质量测量;阵列光纤;串扰校正;反卷积

中图分类号:TN206;TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223012.1418

Crosstalk correction of array fibers applied to beam quality measurement

LUO Jie^{1,2,3}, QIN Laian^{2,3*}, HOU Zaihong^{2,3}, ZHU Wenyue^{1,2,3}, ZHANG Silong^{2,3}

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

* Corresponding author, E-mail: laqin@aiofm.ac.cn

Abstract: To reduce the error in a beam quality measurement system, which is caused by the output crosstalk of array fibers, a correction method combining hardware design and algorithm construction is proposed, and related principal research and method verification are conducted. First, the crosstalk effect of the array fibers is analyzed based on beam quality measurement requirements and the fiber transmission principle. Second, the principle of crosstalk correction is verified by combining the Lambertian scattering

收稿日期:2022-01-12;修订日期:2022-02-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41875033)

principle and experimental results: the Lambertian scattering principle is used to reduce the divergence angle difference of the output light of fibers, establishing a unified diffuse model to correct spot crosstalk, and the deconvolution algorithm is then used to restore the target spot. Third, the principle of a targeted deconvolution algorithm is introduced, and the design of the relevant algorithm parameters is discussed. Finally, a comparison and analysis of the real spot, the uncorrected spot, and the corrected spot output produced by the fiber are conducted, and the experiment is found to verify the feasibility and effectiveness of the correction method. The experimental results reveal that compared to the uncorrected spot, the relative root mean square error of the intensity distribution of the corrected spot is reduced from 36.06% to 4.67%, and the relative root mean square error of the power in the bucket is reduced from 7.79% to 0.73%. The relative error of the beam width where the power in the bucket is 86.5% is reduced from 10.83% to 3.46%. The total time of image processing and parameter calculation using correction algorithm is about 8 s.

Key words: beam quality measurement; array fiber; crosstalk correction; deconvolution

1 引 言

光束质量研究在激光器设计、激光传能、激光通信、激光探测等多领域都具有重要意义,其典型测量方法为取样光束,传输剖面光斑至探测元件,对响应值分布进行复原和校正得到强度分布,进一步计算相关参数完成质量评价^[1-2]。相关的研究重点在于取样、传输和探测系统等硬件的设计,以及复原算法和参数计算的优化^[3-6]。

近年来,阵列光纤由于突出的综合特性在光束质量测量系统中得到多方面应用。作为取样元件,光纤芯径小,分辨率高,且对于数值孔径(Numerical Aperture, NA)对应角度内入射的光可以全反射低损通过,实现多角度下的高一致性取样^[7-8];作为衰减元件,发散输出的光纤配合适当距离放置的探测器可以实现 $10^3\sim 10^4$ 倍的衰减^[9];作为传光元件,高透过率的柔性光纤通过接收端稀疏、输出端密集的排布方式能够对大面积光斑实现缩束,进而使用外径毫米级的电感耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)靶面在无需考虑成像畸变的前提下测量分米级的光束截面^[10-11]。光束质量的有效测量基于光斑分布的准确获取,因此要求阵列光纤具有高一致性的传输效率和输出光场,以实现探测元件对各光纤输出光能的响应度一致,一般要求传输效率和响应度的非均匀性不超过6%^[12-14]。目前不同NA和透光率的光纤都已有成熟的制造工艺,可以保证传输效率的可控^[15];而光纤的输出光场较为复杂,

一般表现为发散光束,易相互串扰;且发散角度和远场光斑分布受到光束入射角度^[16]、光纤NA^[17]、弯曲曲率^[18]等多方面因素的综合影响,导致串扰难以单纯使用算法进行预测和校正。增大单元间距可以有效降低串扰但限制了系统的取样分辨率;另外使用CCD相机对阵列光纤的输出端面进行成像,而非使用探测器直接采集发散光,在原理上可以忽略发散光的串扰。但在实际应用中发现,阵列柔性光纤在实现转向、缩束时难以达到弯曲程度的一致,导致各光纤输出发散角的差异,进一步造成相机拍摄的各光纤输出的单元光斑发生程度不一的弥散,在像面上相互串扰。

本文针对应用于光束质量测量的阵列光纤,结合硬件设计和算法处理提出一类串扰校正方法:在光纤输出端增设透射朗伯体,使用CCD相机拍摄朗伯体发光面,降低光纤输出发散角差异的影响;再配套相应反卷积算法,复原弥散光斑,最终测量出阵列光纤的真实输出,进而实现后续的光束质量测量。本文介绍了阵列光纤的串扰原理与影响,并基于朗伯散射原理和反卷积理论进行了串扰校正的仿真分析与实验研究:首先实验验证了所选材料的朗伯特性和作用;并以朗伯散射所成高斯光斑作为卷积核,建立相应反卷积算法,实现串扰的校正;再使用光线追迹的仿真方法选取最佳算法参数;最后对比分析了未经光纤传输的真实光斑、光纤输出未校正串扰的光斑及已校正串扰的复原光斑,实

验证了校正方法可以有效降低串扰引起的测量误差。

2 测量原理

2.1 阵列光纤串扰影响

为避免阵列光纤对截面光斑取样占空比及耦合效率过低,此应用一般使用芯径和可接收孔径角更大的多模光纤,其光传输示意图如图 1。输出光束的最大发散角 $\theta_{out,max}$ 处于 $[\theta_{in}, \theta_{NA}]$, θ_{in} 为光束输入角度, θ_{NA} 为光纤 NA 所对应的半孔径角,远场光斑分布有 Gaussian 型、近平顶型和近环形等^[19], $\theta_{out,max}$ 和远场光斑分布都会随着光纤弯曲应力的变化而变化。阵列中,各光纤所受应力和弯曲程度的差异导致各输出光束的 $\theta_{out,max}$ 在 $[\theta_{in}, \theta_{NA}]$ 内分布,即使在光束直入射的情况下,弯曲光纤的输出发散角度仍有可能达到 θ_{NA} 。拍摄时,一方面发散角的差异导致了相机视场光阑对各光纤输出光所限的入光量不同,造成拍摄失真;另一方面各光纤输出光的焦面无法统一,离焦产生的弥散斑在像面上相互串扰,且弥散程度不一,弥散量不易确定,在池化处理中统计所拍图像的强度分布时,存在难以单纯使用算法消除的误差^[20]。

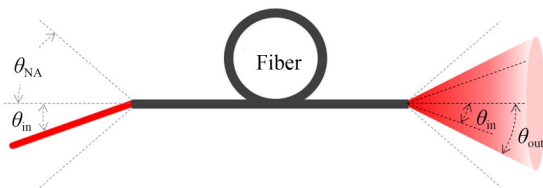


图 1 光纤光传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light transmission of fiber

2.2 朗伯散射特性

针对 2.1 节介绍的应用阵列光纤时产生的串扰,提出在光纤输出端面增设密接透射朗伯体的方法,使阵列光纤输出的不同发散角光束都转化为遵循式(1)分布的朗伯辐射光^[21]。

$$I_{\theta} = I_N \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

其中, I_N 为入射光透过朗伯体后在法线方向的输出光强, I_{θ} 则为和法线成 θ 角方向的光强,由式(1)可知朗伯辐射光的分布与入射角度无关。当

朗伯体端面与光纤输出端面密接时,即使光纤输出光的发散角不同,但其尚未在空间中自由发散就传输至朗伯体中,并转为与光纤输出发散角无关的朗伯辐射光,从而可以消除光纤输出发散角差异的影响。

式(1)为理想朗伯体的特性,而在实际应用中,还需要对所用材料进行朗伯散射特性的实验验证。本方法所用材料由透过型体散射玻璃加工而成,材料表面进行精密抛光,采用边缘压紧的安装方式与光纤输出端面保持密接。为进行朗伯特性验证,测量不同入射角度下材料的发光面光斑,如分布保持稳定,即满足消除光纤发散角差异的要求。考虑到此类应用中常用光纤 NA 一般不大于 0.6,其对应 θ_{NA} 和 $\theta_{out,max}$ 为 36.8° ,因此使用相对角度在 $[-40^{\circ}, 40^{\circ}]$ 范围内变化的 1 064 nm 激光束模拟光纤输出的不同角度发散光,入射至厚度为 0.12 mm 的材料同一位置,使用 CCD 相机拍摄材料发光面光斑,获得光斑总模拟数字单元 (Analog Digital Unit, ADU) 及光斑分布随入射角度的变化分别如图 2 和图 3 所示。图 2 中,统计光斑的总 ADU,发现其波动范围不超过 4.00%。图 3 中,光斑剖面基本一致,各角度下的剖面与正入射之间的相对均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 不超过平均值的 9.00%,可认为所选材料的发光面光斑分布基本不受入射角度的影响,具有所需朗伯特性。

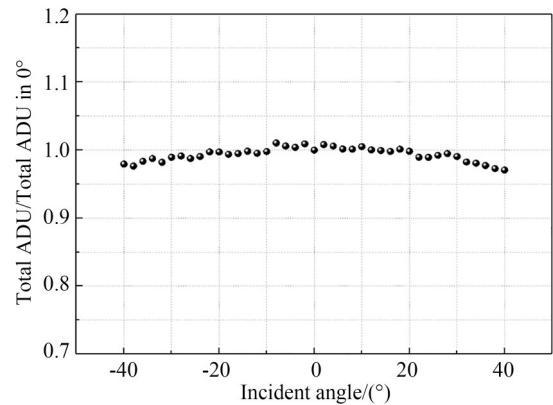


图 2 不同入射角度下材料发光面光斑的相对总 ADU
Fig. 2 Relative total ADU of the spots on the light-emitting surface of the material under different incident angles

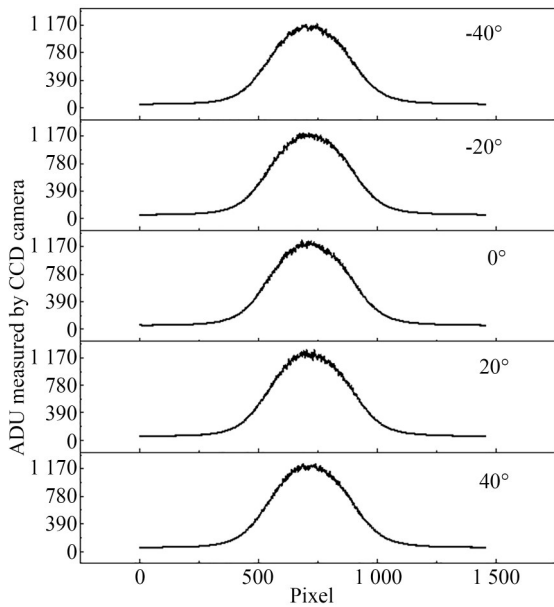


图 3 不同入射角度下材料发光面光斑剖面

Fig. 3 Profiles of the spots on the light-emitting surface of the material under different incident angles

2.3 测量原理验证

为验证并量化阵列光纤的输出串扰及增设密接朗伯体后的效果,使用 CCD 相机拍摄单纤的输出端面,实验系统如图 4 所示,此时不增设朗伯体。由于 S 型弯曲为光纤阵列应用中较为常见的弯曲方式,因此在实验中将光纤穿入管道中实现 S 型弯曲;换用管道以改变曲率半径 R , R 的取值分别为纤芯半径 (R_0) 的 120 倍、90 倍和 30 倍,以模拟柔性光纤在自由状态下不可避免的排

布差异;光源及拍摄环境不变。实验结果如图 5 (a) 所示,对比不同 R 对应的相机所摄的输出端面,其存在不同程度的弥散,叠加三幅图像可以发现其相互之间发生串扰,对每个光纤端面划分网格并统计网格之外的总 ADU 即串扰至相邻光纤的能量,分别占光纤总输出的 10.43% (120 倍)、12.84% (90 倍) 和 17.76% (30 倍),验证了直接拍摄光纤端面时,光纤排布差异将导致光纤之间的相互串扰不一致,且随着光纤的逐渐拉紧,串扰变得更加严重。为验证朗伯体的作用,在此实验系统中增设与光纤输出端面密接的朗伯体,使用相机拍摄朗伯体发光表面,改变 R 后获得光斑再进行叠加得到图 5(b),统计得到串扰能量占每根光纤总输出的 49.48% (120 倍)、48.72% (90 倍) 和 49.07% (30 倍)。朗伯体的散射使得串扰增加,但大幅降低了串扰的差异性,使所摄光斑遵循统一的弥散模型,为消除串扰的算法处理建立前提。

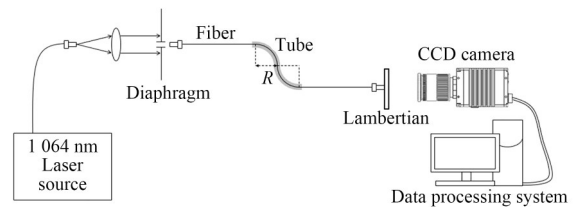
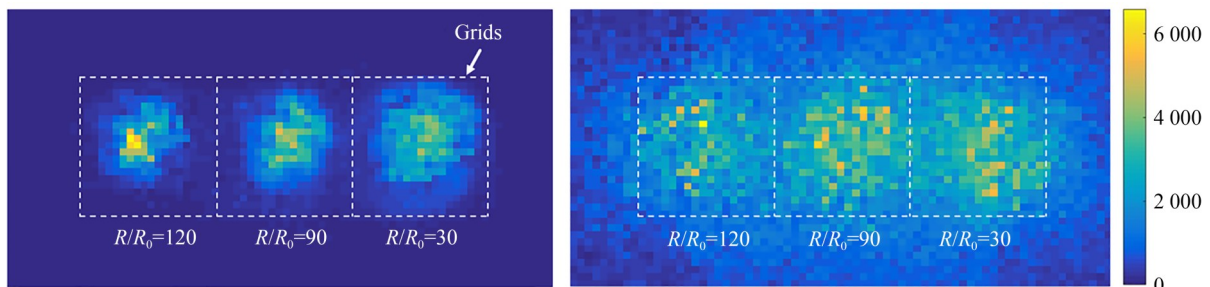


图 4 单纤端面拍摄实验系统

Fig. 4 Experimental system to photograph single-fiber end-face



(a) 统一光源输入后相机所摄不同 R 的光纤的输出端面
(a) Output faces of fibers of different R which photographed by the camera in the unified light input

(b) 统一光源输入后相机所摄不同 R 的光纤增设朗伯体后的光斑
(b) Spots of Lambertian of different R which photographed by the camera in the unified light input

图 5 实验所摄光斑

Fig. 5 Light spots in the experiment

3 校正算法

3.1 反卷积校正原理

从图 3 可知,朗伯体发光面光斑呈高斯分布,可将光斑看作经高斯模糊的卷积处理结果,卷积核可通过实验获得。当经朗伯体作用后的输出光斑和卷积核都已知时,通过反卷积处理可解得阵列光纤的真实输出。具体求解如下:其中 $I(m \times n)$ 表示朗伯体相对输入即光纤真实输出; $O(m \times n)$ 表示朗伯体相对输出, $m \times n$ 代表 m 行 n 列的阵列光纤。

(1) 求解高斯型卷积核 $G(l \times l)$, l 代表卷积核尺寸,由于后续将使用中心对齐的 same 模式,一般将 l 设置为奇数,考虑到实际拍摄画面的幅度, l 一般不超过 $(2m-1)$ 和 $(2n-1)$:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 - y^2)/2\sigma^2), \quad (2)$$

其中,由于卷积核只表征单元强度,因此其积分为 1,只求解尺度参数 σ ,求解方式为获取实验光

$$\begin{bmatrix} G_z(m, n) & \cdots & G_z(m, 1) & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ G_z(m, 2n-1) & \cdots & G_z(m, n) & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ G_z(2m-1, n) & \cdots & G_z(2m-1, 1) & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ G_z(2m-1, 2n-1) & \cdots & G_z(2m-1, n) & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_z(1, n) & \cdots & G_z(1, 1) \\ \vdots & & \vdots \\ G_z(1, 2n-1) & \cdots & G_z(1, n) \\ \vdots & & \vdots \\ G_z(m, n) & \cdots & G_z(m, 1) \\ \vdots & & \vdots \\ G_z(m, 2n-1) & \cdots & G_z(m, n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(1,1)} \\ \vdots \\ I_{(1,n)} \\ \vdots \\ I_{(m,1)} \\ \vdots \\ I_{(m,n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{(1,1)} \\ \vdots \\ O_{(1,n)} \\ \vdots \\ O_{(m,1)} \\ \vdots \\ O_{(m,n)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

求解 $II = GG^{-1} \cdot OO$, 变形 II 则可得 m 行 n 列的输入 I 。

3.2 参数设计

本算法的主要参数设计围绕卷积核 G 展开,主要参数为高斯分布的尺度参数 σ 和卷积核尺寸 l ,二者共同决定了校正的精准度。

3.2.1 高斯分布尺度参数 σ

在朗伯体的材料确定之后, σ 一般由材料厚度决定,进行单光纤与材料的组合实验及相应仿真,得到不同厚度材料的 σ 的实验值与仿真值如表 1 所示。

表 1 显示朗伯体越厚,尺度参数 σ 越大,则发光面的弥散光斑越大。原因是所用材料为体散射材料,其散射效果可视为多片薄的面散射材料叠加,因此弥散程度与材料厚度成正相关。在实

斑进行二维高斯拟合。

(2) 获取输出矩阵 O ,对实验所摄光斑需要进行池化处理,将分辨率由像素数转为光纤数;池化网格的定位需根据光纤位置预先测量。

(3) 获取卷积关系,使用 G 对 I 进行遍历,当 G 的尺寸 l 不足以访问 I 中的每个元素时,对 G 进行补零即可:构建 $(2m-1)$ 行 $(2n-1)$ 列的零矩阵,将 G 以中心位置对齐的 same 模式填入其中,得到矩阵 G_z 。 I 、 G_z 和 O 存在以下卷积关系:

$$O(x, y) = I \cdot G_z =$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i, j) \cdot G_z(m+x-i, n+y-j)]. \quad (3)$$

(4) 反卷积求解输入矩阵 I 。为使用矩阵求逆的方法方便快捷地实现反卷积,构建矩阵表达式(4)以求解式(3):

$$GG(mn \times mn) \cdot II(mn \times 1) = OO(mn \times 1), \quad (4)$$

其中, II 和 OO 分别为 I 和 O 按行变形后得到的一维矩阵,据式(3)求解出卷积核组合矩阵 GG ,可得具体表达式如下:

表 1 不同厚度材料的 σ 值

Tab. 1 Values of σ in different thicknesses

Thickness /mm	Experimental value	Simulation value	Relative error
0.12	12.22	11.43	6.46%
0.25	23.81	22.07	7.31%
0.38	34.15	32.88	3.72%
0.50	46.95	45.51	3.07%

际应用中一般使用预实验所获取的 σ 作为卷积核 G 的尺度参数而非仿真值,而本文中希望采用建模仿真方法讨论参数选取的规律,因此还在表 1 中对比了 σ 的实验值与仿真值,发现其误差不超过实验值的 8%,认为此应用下的光传输仿真具有可信度。获取尺度参数 σ 及卷积核 G 后,仿真

了阵列光纤的输出在不同厚度材料下的校正效 果,结果如图 6 所示,仿真条件如表 2 所示。

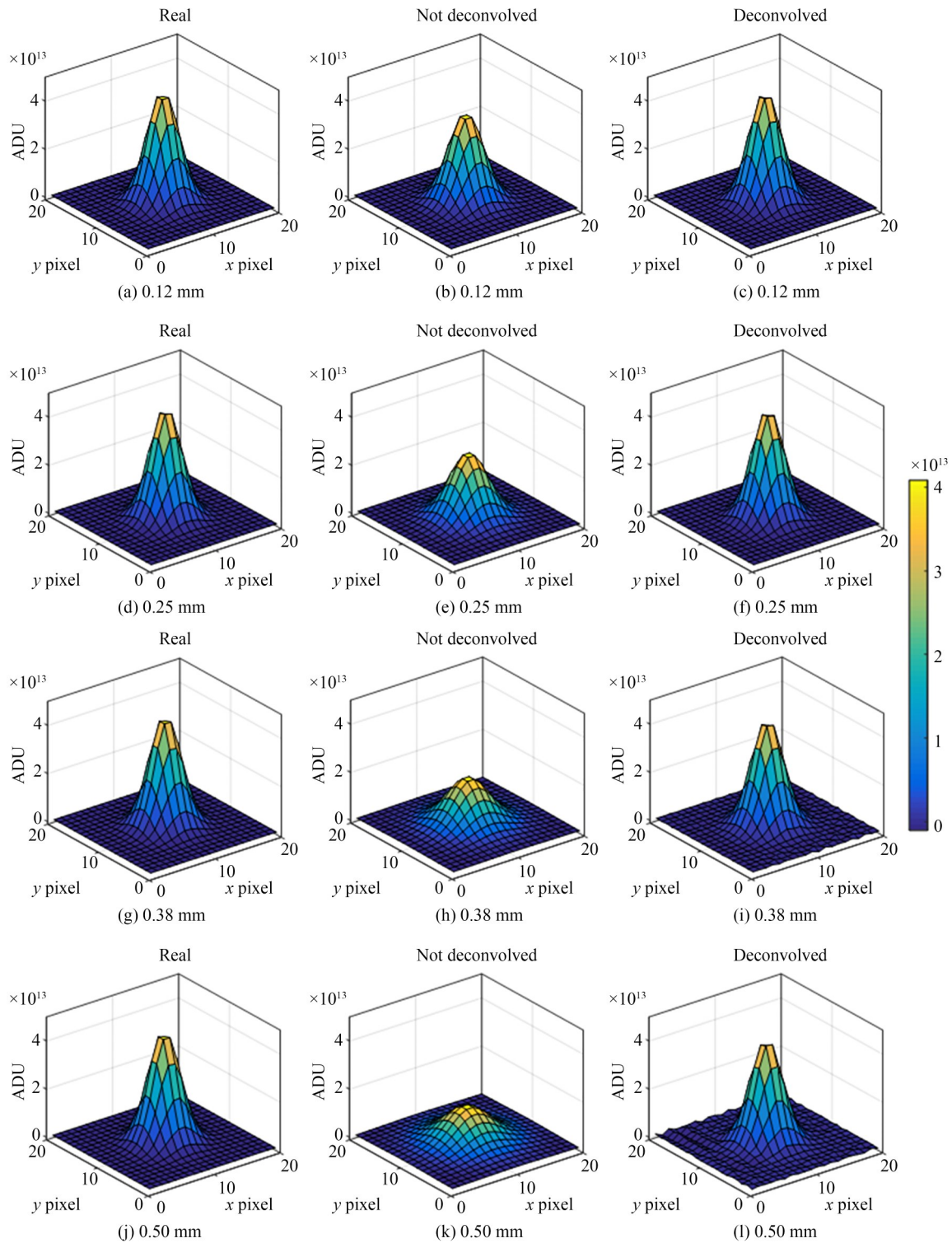


图 6 (a)、(d)、(g)、(j): 同一 20×20 阵列光源池化光斑; (b)、(e)、(h)、(k): 不同厚度材料发光面未经过反卷积处理的池化光斑; (c)、(f)、(i)、(l): 不同厚度材料经过反卷积处理的池化光斑

Fig. 6 (a), (d), (g), (j): the same 20×20 array light source pooled spots; (b), (e), (h), (k): the pooled spots without deconvolution from light-emitting surface of different thickness materials; (c), (f), (i), (l): pooled spots with deconvolution of different thickness materials

表 2 参数设计仿真条件

Tab. 2 Simulation conditions of parameters design

Source file format	File size/kB	Boundary condition
seq, txt	35,157	$m, n=20$

图 6(a)、(d)、(g)和(j)表示阵列光源,其中中心间距为光源直径 1.5 倍,对 400 单元的光源强度整体分布赋值为高斯分布,模拟光束质量测量中高频出现的高斯光斑经过阵列光纤后的输出光。图 6(b)、(e)、(h)和(k)为材料发光面未经过反卷积处理的池化光斑,随着材料厚度的增加,单纤输出光斑愈加弥散,其构成的整体光斑也逐渐散开,这会造成光束质量参数测量的误差,因此需要进行反卷积校正。由图 6(c)、(f)、(i)和(l)可知,随着弥散程度的增加,算法的稳定性有所下降,主要体现在背景噪声愈加明显。在图 6(l)中,当材料厚度为 0.50 mm 时,背景噪声的起伏已达光斑分布峰值的 4.3% 和平均值的 50.4%,对于光斑分布统计和光束质量参数计算的影响已无法忽视,因此在满足朗伯特特性的前提下,此应用一般选取最薄的材料。由于 2.2 节已验证 0.12 mm 材料的朗伯特特性的材料,结合此节的讨论及工艺限制,应用此现有最薄材料进行后续实验,此时参考表 1,对应 σ 为 12.22。

3.2.2 卷积核尺寸 l

在确定了尺度参数 σ 即材料厚度之后,对卷积核尺寸 l 进行讨论, l 一般取值为 $[3, 2m-1]$ 中的奇数,光纤行(列)数 m 在此节中取 20, l 只取奇数是利于反卷积处理时的 same 模式的中心对齐。对 0.12 mm 材料发光面的光斑进行不同大小卷积核的反卷积处理,为便于展示校正后光斑与真实光斑的对比,使用两类光斑的相对 RMSE 来表征其差异,相对 RMSE 越接近于零则差异越小,校正效果越优。分别统计了光斑强度分布的相对 RMSE 及光斑桶中功率(Power in the Bucket, PIB)曲线的相对 RMSE,前者可以展示光斑实时显示的准确度,后者以相应半径所在圆内功率的差异显示计算光束质量参数的准确度,两者共同表征了校正效果的优劣;为了讨论卷积核尺寸的选取规律,还增加了卷积核的 PIB 作为参

照,用以显示相应大小的卷积核内所占功率,如图 7 所示。

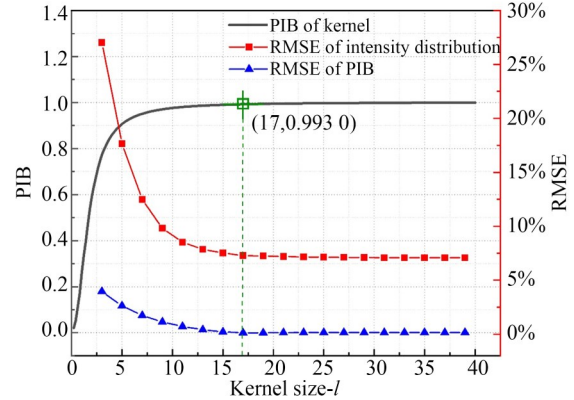


图 7 卷积核 G 的 PIB,不同卷积核尺寸 l 校正后光斑与真实光斑的强度分布的相对 RMSE,校正后光斑与真实光斑的 PIB 曲线的相对 RMSE

Fig. 7 PIB of convolution kernel G , relative RMSE of spot intensity distribution between real spot and corrected spot processed by different convolution kernel size l and relative RMSE of spot PIB curve of them

由图 7 可以发现:随着 l 的增加,两类 RMSE 逐渐降低,表明校正有效性的提升;在卷积核 l 在 $[17, 39]$ 的区间内,光斑强度分布的 RMSE(红色点线)在 7.09% 到 7.28% 之间变化,起伏不超过 0.2%;PIB 的 RMSE(蓝色点线)在 0.13% 到 0.15% 之间变化,起伏不超过 0.02%。此应用场景下,综合考虑校正算法的实时运行时间与校正效果, l 可取 17。同时对比卷积核的 PIB 曲线可以注意到, $l=17$ 所对应的 PIB 为 0.993 0,而 $l=16$ 所对应的 PIB 为 0.989 7,因此当推广至其它的卷积核尺度参数 σ 与光纤行(列)数 m 的应用时,可以选取卷积核的 PIB 为 99% 所对应的就近整数半径为最佳卷积核尺寸 l 。

4 实验验证

4.1 实验平台

为了测试应用于光束质量测量的阵列光纤串扰校正的效果,使用了自主研发的光束质量测量系统,如图 8 所示,该测量系统利用光纤阵列两端面不同疏密度的锥形排列,对截面光斑进行了

40 倍缩束以供相机进行无畸变拍摄。实验采用 1 064 nm 光源入射系统的接收端面即光纤疏排端面,由 20 行 20 列的矩形光纤阵列取样并传输至输出端面即光纤密排端面,经朗伯散射、衰减、滤光等处理后被 CCD 相机拍摄,所摄光斑经序列文件矩阵化、背景噪音过滤、光纤对应网格池化、校正算法处理、插值扩束、功率复原等实时显示为光斑强度分布,并可以开展后续的光束质量参数的计算。

4.2 实验结果

在本实验中,为了验证校正方法的效果,使用图 8 所示平台展开了已校正串扰的光斑测量实验;并设计了未校正串扰的对比实验,实验条件为:实验平台拆卸朗伯体,相机直接拍摄输出端面,且不对光斑进行反卷积处理;同时还使用漫

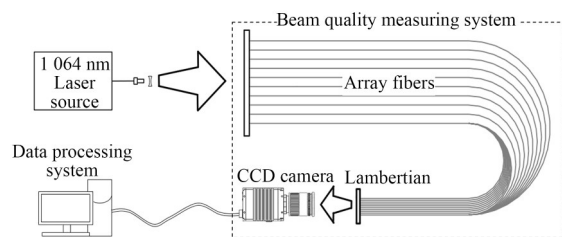


图 8 基于阵列光纤的光束质量测量系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of beam quality measurement system based on array fibers

反射法测量结果作为真实光斑,实验条件为:接收端面同一处换置漫反射屏,使用大视场 CCD 相机拍摄屏上成像光斑。分别将未校正和已校正的光斑与真实光斑进行对比分析,得到的处理过程与结果如图 9 所示,PIB 曲线对比如图 10 所示。

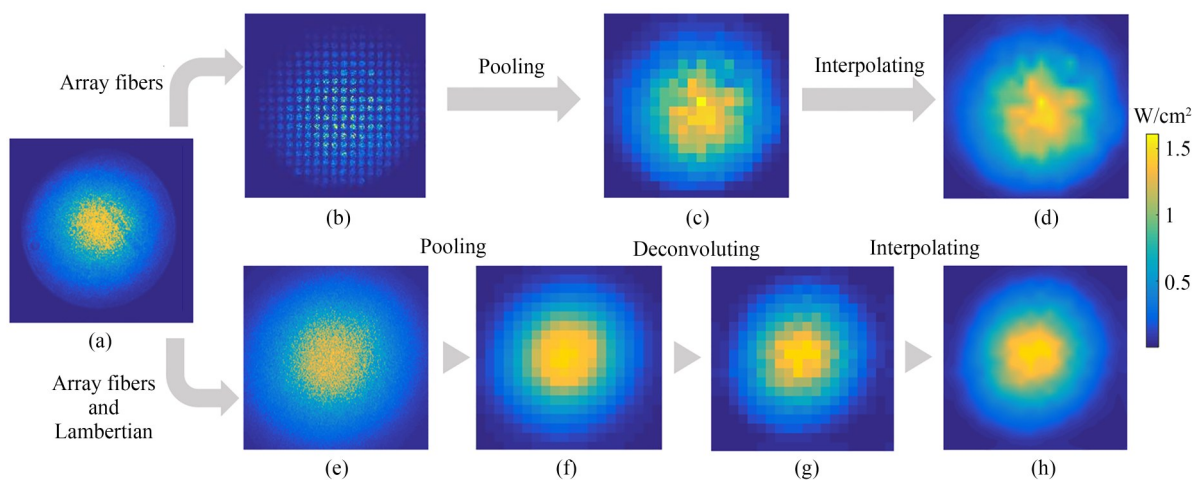


图 9 未校正串扰:(a)真实入射光斑,(b)直接拍摄画面,(c)池化结果,(d)插值结果;已校正串扰:(e)直接拍摄画面,(f)池化结果,(g)反卷积结果,(h)插值结果

Fig. 9 Without crosstalk-correction: (a) actual incident spot, (b) picture shoot directly, (c) pooling result, (d) interpolation result; with crosstalk-correction: (e) picture shoot directly, (f) pooling result, (g) deconvolution result, (h) interpolation result

从图 9 的强度分布测量中可以发现,未校正光斑(d)在强度分布上与真实光斑(a)存在着较为明显的差距,量化两者的数值矩阵并计算(d)与(a)的相对 RMSE 为 36.06%,而经过朗伯散射与反卷积的已校正光斑(h)则与(a)基本吻合,其相对 RMSE 降低至 4.67%。对图 9 的强度分布进行光束质量参数的计算,得到如图 10 所示的分

析结果。在典型束宽计算采用的 $PIB=86.5\%$ 处^[22],未校正光斑(d)的对应束宽为 60.80 mm,与真实光斑(a)束宽 54.86 mm 相差了 5.94 mm,差值占(a)束宽的 10.83%;而已校正光斑(h)的束宽为 56.76 mm,与(a)差值为 1.90 mm,差值占真实光斑束宽的 3.46%,将束宽测量的误差降低了 7.37%;另外未校正光斑(d)与(a)的 PIB 曲

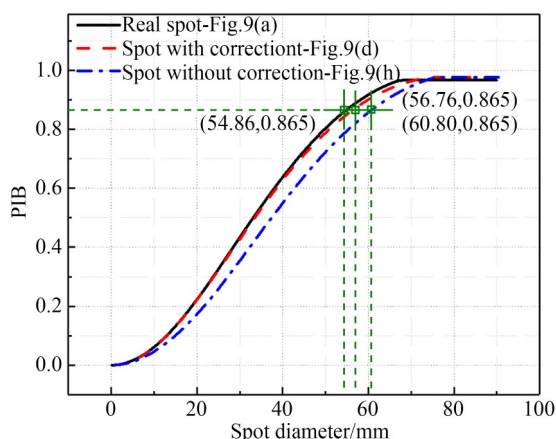


图10 未校正和已校正的光斑与真实光斑的PIB曲线
Fig.10 PIB curves of the uncorrected and corrected spots with the real spot

线的相对RMSE为7.79%，而已校正光斑(h)的为0.73%，认为校正方法可以有效降低阵列光纤串扰带来的测量误差。光斑(h)与(a)之间的差距除了校正方法本身存在的误差外，还包含了系统自带误差，如光纤阵列透过率差异未完全标定补偿等。但考虑到总误差已基本达到光束质量测量的要求^[11-13]，可以认为校正方法能够较高精度地复原到靶光斑，进而可以顺利展开后续的光束质量测量。同时光束质量测量还要求算法的快速运行，当阵列行列数 m 和 n 由10增至50时，本校正算法的运行时间由175 ms增至398 ms。考虑到CCD相机拍摄的100帧、 1000×1000 像

素的seq源文件进行光斑复原处理及质量参数计算的时间一般不低于8 000 ms，校正算法运行时间一般不超过总运行时间的5%，对总测量速度影响较小。

5 结 论

本文基于光束质量测量系统，研究了阵列光纤的输出串扰，并提出了一类串扰校正方法。结果表明：阵列光纤的输出串扰造成了光束质量测量的误差，主要表现在单元光纤输出值与测量值响应度不一致，及其造成的光斑分布和PIB曲线偏差；针对这一问题设计了增设朗伯体并结合反卷积处理的串扰校正方法，并展开了相关参数设计的研究：一般使用相对较薄的朗伯体，可以有效降低反卷积处理后的背景噪声；同时考虑卷积核尺寸时，一般选取卷积核PIB为99%所对应的尺寸，最后实验验证了校正方法的有效性。在光斑分布的测量中，校正处理使光斑分布测量的相对RMSE得到了21.67%的降低；在PIB的测量中则得到了3.41%的降低；另外在PIB=86.5%处，串扰影响使得相应束宽的测量产生了10.83%的相对误差，校正处理使得误差降低了7.37%，而校正运算时间一般不超过总运算时间的5%；综上认为校正方法快速、有效降低了阵列光纤串扰对光束质量测量造成的误差，为此类测量提供了可用的优化方向。

参考文献：

- [1] JORGE K C, RIVA R, RODRIGUES N A S, *et al.* Scattered light imaging method (SLIM) for characterization of arbitrary laser beam intensity profiles [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4555-4564.
- [2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] SUMACHEV K E, SHARKOV V V, SAVIKIN A P, *et al.* Measurement of $194 \mu\text{m}$ YAP: Tm^{3+} laser beam quality using a CCD camera [J]. *Journal of Optical Technology*, 2020, 87(5): 262.
- [4] 冯国斌, 杨鹏翎, 王振宝, 等. 光电/量热复合式近红外高能激光光斑探测器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1417-1424.
FENG G B, YANG P L, WANG Z B, *et al.* Photoelectric-calorimetric compound beam profile detector for near-infrared high energy laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1417-1424. (in Chinese)
- [5] 王艳茹, 王建忠, 冉铮惠, 等. 高能激光光束质量 β 因子的影响因素分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 353-360.
WANG Y R, WANG J Z, RAN Z H, *et al.* Analysis of effects on the beam quality β factor of high power laser [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 353-

360. (in Chinese)
- [6] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 128-132.
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 128-132. (in Chinese)
- [7] 罗杰, 秦来安, 侯再红, 等. 激光光斑分布测量系统中光纤传光特性[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214002.
LUO J, QIN L A, HOU Z H, *et al.* Light-transmitting characteristics of optical fiber in laser spot distribution measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1214002. (in Chinese)
- [8] 管雯璐, 谭逢富, 侯再红, 等. 高功率密度激光宽角度阵列探测技术研究[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 159-166.
GUAN W L, TAN F F, HOU Z H, *et al.* Wide angle array detection technology for high power density laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 159-166. (in Chinese)
- [9] 吴勇, 杨鹏翎, 陈绍武, 等. 基于光纤阵列的激光光斑测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 276-280.
WU Y, YANG P L, CHEN S W, *et al.* Laser intensity distribution measuring method based on fiber array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 276-280. (in Chinese)
- [10] 黄伟, 马松山, 李晓芹, 等. 复合式激光远场光斑分布定量测量技术研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 1031-1035.
HUANG W, MA S S, LI X Q, *et al.* Study on quantitative compound measurement of far field spot distribution of laser [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(8): 1031-1035. (in Chinese)
- [11] GU D F, WINKER B, CHEN Y C, *et al.* *High energy laser target board apparatus*, US9423298 [P]. 2016-8-23.
- [12] PANG M, RONG J, ZHOU S, *et al.* Array detector for high energy laser based on diffuse transmission sampling [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013105.
- [13] 王振宝, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 近红外激光光斑功率密度时空分布探测器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 935-938.
WANG Z B, FENG G B, YANG P L, *et al.* Detector array for measuring spatio-temporal distribution of near infrared laser power density [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 935-938. (in Chinese)
- [14] 陈洪耀, 张黎明, 杨本永, 等. 漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1441-1445.
CHEN H Y, ZHANG L M, YANG B Y, *et al.* Diffuser reflection method for measuring power/energy of far-field laser spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1441-1445. (in Chinese)
- [15] 刘星洋, 翟尚礼, 潘望, 等. 红外传能光纤的传能特性研究进展[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 907-913.
LIU X Y, ZHAI S L, PAN W, *et al.* Research progress on energy transfer properties of infrared transmitting energy fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(8): 907-913. (in Chinese)
- [16] 张美, 魏福利, 邱孟通, 等. 不同入射角激光束在大芯径SI-PDF光纤中的传输损耗[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2406-2410.
ZHANG M, WEI F L, QIU M T, *et al.* Transmission attenuation of laser beams with different incident angles in large-core SI-PDF optical fibers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2406-2410. (in Chinese)
- [17] 周德春, 于凤霞, 谭芳, 等. 大数值孔径传像光纤的制备及其光学性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(12): 120605.
ZHOU D C, YU F X, TAN F, *et al.* Preparation and optical performance of large numerical aperture image transfer fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 120605. (in Chinese)
- [18] 谭中伟, 杨婧雅, 刘艳, 等. 基于卷积神经网络的增敏型光纤弯曲传感器[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7): 1454-1461.
TAN Z W, YANG J Y, LIU Y, *et al.* Enhanced fiber optic bending sensor based on convolutional neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(7): 1454-1461. (in Chinese)
- [19] GAMBLING W A, PAYNE D N, MATSUMURA H. Mode conversion coefficients in optical fibers [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(7): 1538-1542.
- [20] VELSINK M C, LYU Z P, PINKSE P W H, *et al.* Comparison of round- and square-core fibers for

sensing, imaging, and spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6523.

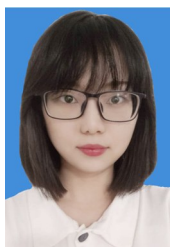
- [21] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.

YU D Y, TAN H Y. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)

- [22] 张雨秋, 黄良金, 常琦, 等. 光纤激光基模光束的 β 因子[J]. 物理学报, 2021, 70(20): 79-85.

ZHANG Y Q, HUANG L J, CHANG Q, *et al.* B factor of fundamental mode of fiber laser beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(20): 79-85. (in Chinese)

作者简介:



罗杰(1996—),女,安徽池州人,博士研究生,2018年于广西大学获得学士学位,主要从事激光大气传输及参数测量技术的研究。E-mail: jiebao517@163.com

通讯作者:



秦来安(1983—),男,河南南阳人,博士,副研究员,2006年于郑州大学获得学士学位,2011年于中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位,主要从事激光大气传输及参数测量技术的研究。E-mail: laqin@aiofm.ac.cn