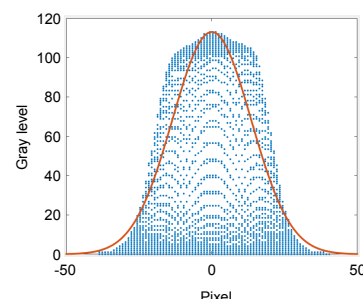




DOI: 10.12086/oe.2020.190247

光纤灰度分布的高斯函数拟合法 测量光纤几何参数

李一鸣¹, 涂建坤², 项华中¹, 江斌², 郑刚^{1*}¹上海理工大学上海市介入医疗器械工程研究中心,教育部应用光学仪器重点实验室,上海 200093;²上海电缆研究所,上海 200093

摘要: 光纤的几何参数影响着光纤的光学传输和机械性能等,是衡量光纤质量的重要指标。近场光分布法是国标 GB 15972.20-2008 中推荐的几何参数测量方法。该方法在对光纤纤芯的测量中需对光纤通光照明,以区分纤芯和包层的边界。通光的纤芯端面是一个边缘并不清晰的发光亮斑,因而无法准确判断纤芯与包层的真实边缘。本文分析了光纤内光传播模场的分布,理论上光纤模场电磁矢量的解满足贝塞尔函数,但在近似情况下也可以用高斯函数代表光纤模场分布。因此本文利用高斯函数拟合光纤纤芯端面灰度分布,进而由拟合后的高斯函数得到纤芯与包层的真实边缘。本方法是对国标 GB15972.20-2008 的测量方法的进一步完善。实验测量结果表明,当光纤的切割效果不佳或成像质量较差时,模场灰度分布的高斯函数拟合法仍能保证测量的重复精度和测量数据的稳定性。

关键词: 光纤几何参数; 模场分布; 高斯函数; 边缘提取

中图分类号: TN818

文献标志码: A

引用格式: 李一鸣,涂建坤,项华中,等. 光纤灰度分布的高斯函数拟合法测量光纤几何参数[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 190247

Measurement of optical fiber geometry parameters by gray distribution fitting with Gaussian function

Li Yiming¹, Tu Jiankun², Xiang Huazhong¹, Jiang Bin², Zheng Gang^{1*}¹Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Device, Key Laboratory of Ministry of Education for Applied Optical Instruments, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China

Abstract: The geometry parameters of optical fiber affect the optical transmission and mechanical properties, which are the important indexes to measure the quality of fiber. Near-field light distribution method is recommended in GB15972.20-2008 for the measurement of geometry parameters. In order to distinguish the boundary between fiber core and cladding, the method needs to illuminate the fiber. The end face of the fiber core is a bright spot with unclear edge, so the true edge of the core and cladding cannot be accurately judged. In this paper, the distribution of

收稿日期: 2019-05-15; 收到修改稿日期: 2019-08-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61605114)

作者简介: 李一鸣(1995-),男,硕士研究生,主要从事光电测试技术和生物医学光子学方面的研究。E-mail: 276087885@qq.com

通信作者: 郑刚(1962-),男,博士,教授,主要从事光电测试技术和生物医学光子学方面的研究。E-mail: gangzheng@usst.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

mode field in optical fiber is analyzed. Theoretically, the solution of electromagnetic vector of mode field satisfies Bessel function, but Gaussian function can also be used under approximate conditions. Therefore, Gaussian function is used to fit the distribution of the fiber core in this paper, and the real edge of the fiber core and cladding can be obtained from the Gaussian function after fitting. This method is a further improvement on the measurement method of GB15972.20-2008. The experimental results show that when the cutting effect of the fiber is not good or the imaging quality is poor, the Gaussian function method fitting with mode distribution can still ensure the repeatability of the measurement and the stability of the measured data.

Keywords: optical fiber geometry parameters; mode distribution; Gaussian function; edge detect

Citation: Li Y M, Tu J K, Xiang H Z, *et al.* Measurement of optical fiber geometry parameters by gray distribution fitting with Gaussian function[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(4): 190247

1 引言

光纤作为现代通信传输应用最为广泛的媒介之一,被广泛应用于航空、工业制造、生物医学等多个领域^[1-2]。光纤的几何参数作为最基本的性能参数,除了对光纤的光学传输、机械性能有一定影响外,更重要的是它对于光纤的连接损耗起着决定性作用^[3]。国标 GB15972.20-2008 中对光纤几何参数的定义主要包括光纤包层的直径与不圆度,光纤纤芯的直径与不圆度以及纤芯与包层的同心度误差^[4]。测量光纤性能参数常用的方法有远场光可变孔径法、近场光分布法、折射近场法、俯视图法、传输近场法等^[5-7]。其中,近场光分布法常用于测量光纤的几何参数^[8],远场光可变孔径法可以测量光纤的模场直径^[9],而折射近场法多用于测量光纤的折射率分布等^[10-12]。

通常在使用近场光分布法测量光纤几何参数时,需要对光纤端面的显微放大图像进行边缘提取,然后再对边缘点进行椭圆曲线拟合以获取光纤几何参数。此方法的测量精度主要取决于光纤边缘提取的准确性。对于光纤包层的测量,一般通过调节光纤端面的照明来提高包层与背景的对比度,从而获得清晰的包层边缘。而由于纤芯与包层都是玻璃材料,他们之间并不存在明显的灰度分界,因此只有在纤芯通光后才能得到纤芯与包层的分界面,即纤芯的边缘。实际上光在光纤中传播时并不完全集中在纤芯部分,会有部分能量泄漏到包层中^[13],通光的纤芯在灰度图像中是一个边缘并不清晰的亮斑,所以较难准确地直接从光纤端面的图像中提取纤芯的边缘。

本文提出一种利用高斯函数拟合光纤模场分布(光纤端面像),再用拟合后的高斯函数确定光纤纤芯边缘的方法。通过光学显微放大系统对光纤端面进行放大,用高分辨率的 CCD 相机接收光纤的端面图像。

用高斯函数对光纤端面灰度分布进行拟合,继而由此高斯函数确定光纤纤芯与包层的分界面,并得到纤芯的准确边缘。在获得边缘数据点后,通过平面椭圆函数曲线拟合,得到所需的光纤纤芯几何参数。对光纤包层边缘数据也作同样的处理和计算,最后得到所有的光纤几何参数。

2 原理分析

本文以近场光分布法为测量方法,对光纤的几何参数进行测量,将获取的光纤端面灰度数据作为光纤模场的原始数据参与后续的拟合过程。本方法的测量数据将与 FGM-5 光纤几何参数测量仪的测量数据进行对比,以验证本方法的测量精度与稳定性。FGM-5 光纤几何参数测量仪由(原国家机械工业部)上海电缆研究所研发,是一种基于近场光分布法进行测量的高精度几何参数测量仪,在国内外众多光纤生产大厂都有应用^[14]。图 1 所示为 200 万像素的 CCD 工业相机获取的 G652 光纤端面,该光纤为常用的单模通信光纤,图中黑色区域为不通光的包层部分,中心亮斑为通光纤芯,测量时背景使用外部光源照明,以增强背景与包层的对比度。

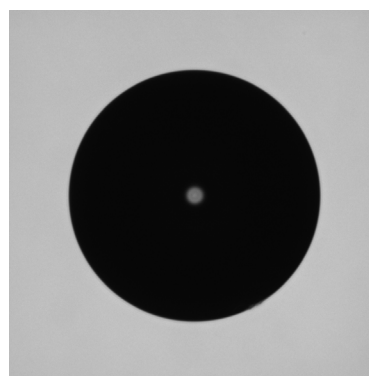


图 1 光纤端面灰度像

Fig. 1 End face image of fiber

2.1 贝塞尔函数与高斯函数近似

由于光在光纤中传播时，光的能量不能完全集中在纤芯传播，所以在研究其分布模式时，需要利用电磁场理论对光波电磁矢量进行求解，其解要满足均匀圆形介质波导边界条件的麦克斯韦方程组^[15]。由于光在光纤中的传播方向角几乎为零，所以仅对光波的轴向分量求解，即可根据麦克斯韦方程得到其他的横向分量。轴向场分量在圆柱坐标系下的亥姆霍兹方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_z = 0 \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 H_z = 0 \end{cases}, (1)$$

式中： r 为光纤的半径， φ 为光纤端面的方向角， n 为光纤的折射率， k_0 定义为 $k_0=2\pi/\lambda$ ， λ 为光波的波长。

为简便仅分析光波在光纤端面的分布模式。将上式变量分离，在端面上的分布规律描述如下：

$$\begin{cases} \left[\frac{d^2 E(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE(r)}{dr} + \left[(k_0^2 n_1^2 - \beta^2) - \frac{m^2}{r^2} \right] E(r) = 0, r \leq a \right. \\ \left. \left[\frac{d^2 E(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE(r)}{dr} + \left[(k_0^2 n_2^2 - \beta^2) - \frac{m^2}{r^2} \right] E(r) = 0, r > a \right. \right. \end{cases} (2)$$

对于单模阶跃光纤，纤芯与包层的折射率都为常数，可以发现上式是典型的贝塞尔方程，方程中的参数 m 为 φ 方向上的电场变化的周期数，即贝塞尔方程的阶， β 为光纤的纵向传播常数。考虑到光纤内部模场分布的实际，在纤芯部分应由第一类贝塞尔函数作为方程的解，在包层部分应由第二类贝塞尔函数作为方程的解。

数学上，贝塞尔函数是比较复杂的特殊函数，它用级数表达，无法用常规的单一函数进行描述。故在实际应用中，常采用相对简单的高斯函数对光纤的模场分布进行近似描述^[16-18]。高斯函数的形式为

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/\omega_0^2}, (3)$$

式中： I_0 为光纤纤芯中心的最大灰度， ω_0 为光纤的模场半径。当光纤的归一化频率较大时，光纤的模场直径与几何半径 a 有如下的关系：

$$\frac{\omega_0}{a} = \frac{1}{\sqrt{\ln V}}, (4)$$

式中： V 为光纤的归一化频率，定义为 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ，其中 n_1 、 n_2 分别为纤芯与包层的折射率。联立式(3)、式(4)，即可得到光纤纤芯端面灰度分布(模场分布)与其几何直径的关系：

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2 \ln V/a^2}. (5)$$

利用式(5)对由 CCD 相机获得的灰度数据进行(三维)拟合，由拟合后的高斯函数得出纤芯的几何直径及与此直径相应的灰度值。最后反推得到与此灰度值对应的纤芯边缘数据点。高斯函数拟合后的三维效果图如图 2 所示。

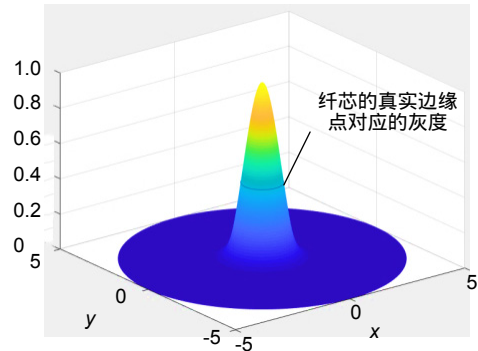


图 2 高斯函数拟合三维效果图
Fig. 2 3D rendering of Gaussian function fitting

2.2 边缘拟合与几何参数计算

由于包层与背景的对比度比较好，所以直接使用边缘提取算子对包层进行边缘提取得到精确的包层边缘点。分别对包层和纤芯的边缘数据点进行椭圆函数(二维)曲线拟合，就可以获取光纤的各几何参数^[19-20]。待测光纤的几何参数定义如式(6)~式(8)所示：

$$y = \sqrt{(x_{\text{core}} - x_{\text{clad}})^2 + (y_{\text{core}} - y_{\text{clad}})^2}, (6)$$

$$R = \sqrt{R_{\text{min}} \cdot R_{\text{max}}}, (7)$$

$$\delta = \frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{R}, (8)$$

式中： y 为光纤纤芯与包层的同心度误差， x_{core} 、 y_{core} 为纤芯的中心坐标， x_{clad} 、 y_{clad} 为包层的中心坐标， R 为纤芯或包层的等效半径， R_{max} 、 R_{min} 分别为拟合椭圆的长短径， δ 为光纤的不圆度。

3 测量数据与讨论

3.1 正常成像条件的光纤几何参数测量

实验采用 FGM-5 几何参数测量仪对常用通信光纤 G652 进行测量。待测光纤几何参数包括纤芯与包层的直径，纤芯与包层的不圆度，以及纤芯与包层的同心度。该仪器的重复测量精度如下：纤芯与包层直径小于 $\leq 0.05 \mu\text{m}$ ，包层不圆度 $\leq 0.10\%$ ，纤芯与包层的同心度误差 $\leq 0.04 \mu\text{m}$ ，优于国标 GB15972.20-2008 的

指标。CCD 相机的性能参数对光纤端面的成像效果有很大的影响，高像素的 CCD 相机在光纤端面的边缘处有着更高的分辨率。FGM-5 仪器采用了 200 万像素的 CCD 工业相机。通常光纤端面经过光学系统放大后，200 万像素的 CCD 相机获取到的有效边缘数据点约有 1 万个像素左右，能对光纤边缘进行边缘数据拟合，像素 200 万以上的工业相机都能满足本方法对光纤几何参数的测量要求。该仪器的测量原理图如图 3 所示，光纤通过光源 1 进行纤芯通光，经背景光 1 照明的端面由显微放大系统放大后被高分辨率 CCD 接收采集，端面灰度分布即可清晰反映光纤模场分布。

图 1 所示是光纤切割平整且照明条件良好的情况下得到的 G652 光纤端面像。由仪器对该端面进行 5 次测量，测量结果如表 1 所示(表中的平均值为 5 组实验数据的均值，最大偏差为各组实测数据与平均值之差的最大值。该实验用平均值衡量测量的准确度，利用最大偏差衡量测量的重复测量精度)。

由表 1 可以看出，FGM-5 对切割平整且照明条件良好的光纤进行测量时，测得的几何参数可以保证很

高的精度，对包层与纤芯直径的重复测量精度 $\leq 0.04 \mu\text{m}$ ，对包层不圆度的重复测量精度 $\leq 0.02\%$ ，而同心度误差也 $\leq 0.02 \mu\text{m}$ ，该测量精度完全满足国标对光纤几何参数的测量要求。

对同一光纤端面采用本文提出的高斯函数拟合法进行测量。图 4 为图 1 中所示光纤纤芯的三维灰度剖面图(实际拟合时是对光纤灰度的三维数据进行拟合，此处为了简单清晰，采用了二维剖面图进行说明)，灰度数据的高斯函数拟合效果图如图 5 所示。通过该拟合即可确定纤芯的真实边缘数据点，而包层的边缘数据则直接采用边缘提取算子获取，最后分别将获得的边缘数据通过椭圆曲线拟合求得各光纤几何参数。

纤芯灰度分布的高斯函数拟合法得到的光纤几何参数测量结果如表 2 所示。

对比表 1、表 2 可看出，高斯函数拟合法测得的几何参数在均值上与仪器测得的数据基本相同，即表明本方法的测量结果具有较高的准确性。而对比最大偏差则可以发现，本方法测量结果的最大偏差更小一点，表明本方法有很好的重复测量稳定性。

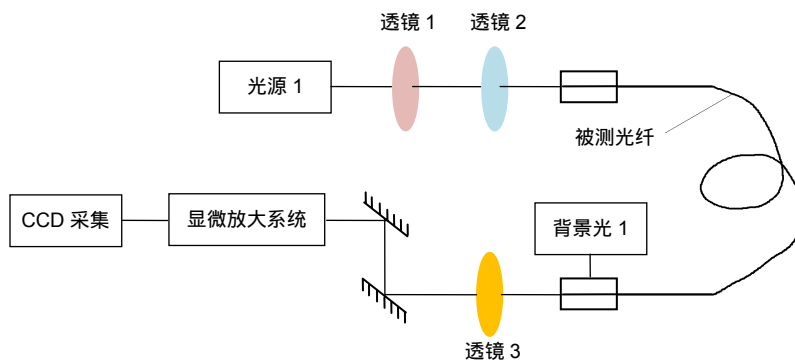


图 3 光纤测量系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of optical fiber measurement system

表 1 正常条件下 FGM-5 几何参数测试仪的测量结果

Table 1 Data measured by FGM-5 under normal conditions

实验组数	包层直径/ μm	包层不圆度/%	纤芯直径/ μm	纤芯不圆度/%	芯—包同心度/ μm
1	125.073	0.116	8.421	0.865	0.241
2	125.094	0.117	8.409	0.335	0.236
3	125.120	0.118	8.431	0.666	0.246
4	125.101	0.098	8.449	0.616	0.247
5	125.093	0.102	8.388	0.868	0.221
平均值	125.096	0.110	8.420	0.670	0.238
最大偏差	0.024	0.012	0.032	0.335	0.017

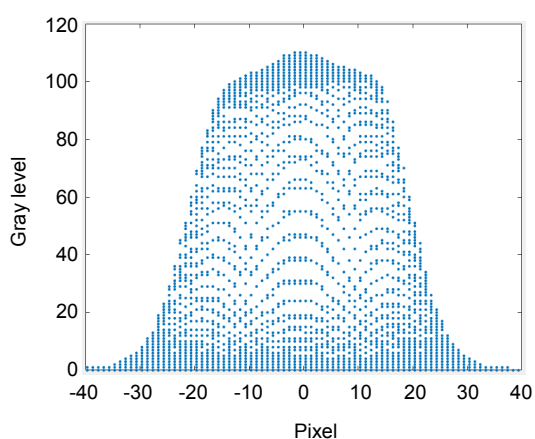


图 4 正常光纤二维灰度剖面图
Fig. 4 2D gray section of normal fiber

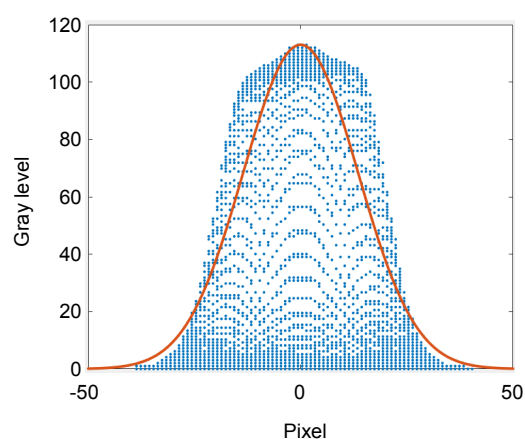


图 5 正常光纤高斯函数拟合效果图
Fig. 5 2D Gaussian function fitting rendering of normal fiber

表 2 正常条件的高斯函数拟合法测量结果

Table 2 Data measured by Gaussian function fitting under normal conditions

实验组数	包层直径/ μm	包层不圆度/%	纤芯直径/ μm	纤芯不圆度/%	芯—包同心度/ μm
1	125.081	0.108	8.379	0.116	0.226
2	125.101	0.114	8.368	0.423	0.247
3	125.125	0.111	8.413	0.102	0.238
4	125.108	0.122	8.413	0.096	0.244
5	125.097	0.114	8.412	0.269	0.237
平均值	125.102	0.114	8.397	0.201	0.238
最大偏差	0.023	0.008	0.029	0.222	0.013

3.2 非正常成像的光纤几何参数测量

光纤在切割时可能由于切割刀的老化出现边缘破损或由于照明(纤芯通光光源调节或背景照明)不佳出现较差的成像效果,当出现此类问题时,常用的测量方法经常会出现测量数据的波动或偏离真值^[21]。图 6 所示的光纤端面不仅成像效果较差,且在纤芯亮斑部

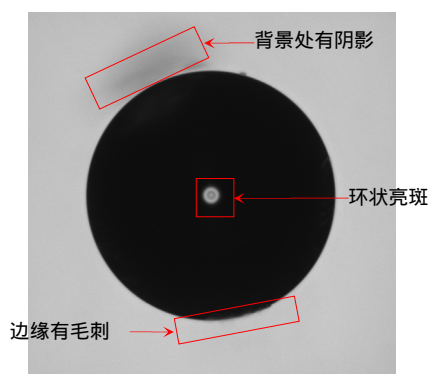


图 6 非正常成像的光纤端面
Fig. 6 Fiber end face image under improper conditions

分由于入射的通光光源调节不佳还出现了圆环状的亮斑^[22]。

使用 FGM-5 对该光纤端面进行 5 次测量,测量结果如表 3 所示。

对图 6 的光纤端面采用高斯函数拟合,拟合前后的光纤灰度分布图如图 7 图 8 所示。

高斯函数拟合法测得的光纤几何参数如表 4 所示。

对比表 1、表 3 及表 2、表 4 可以发现,当光纤端面的成像不佳时,仪器测量数据的均值较正常成像下的均值偏离较大,其重复测量精度也有所下降。特别是在纤芯部分,由于纤芯处的环状亮斑导致在测量纤芯几何参数时,准确性和稳定性都受到很大的影响。而本文提出的高斯函数拟合法在各个几何参数的测量中都保持了较高的准确性和稳定性。尤其是在纤芯部分,并没有因为环状亮斑而影响数据的测量准确性和稳定性,说明本方法相较传统方法放宽了对成像质量的要求,使测量结果具有更高的可靠性。

表 3 非正常成像条件下 FGM-5 仪的测量数据
Table 3 Data measured by FGM-5 under abnormal conditions

实验组数	包层直径/ μm	包层不圆度/%	纤芯直径/ μm	纤芯不圆度/%	芯—包同心度/ μm
1	124.832	0.077	9.092	1.529	0.288
2	124.83	0.094	9.037	1.148	0.302
3	124.869	0.089	9.037	1.754	0.302
4	124.862	0.095	9.045	0.837	0.283
5	124.837	0.091	9.01	2.016	0.278
平均值	124.846	0.089	9.044	1.457	0.291
最大偏差	0.023	0.012	0.048	0.62	0.013

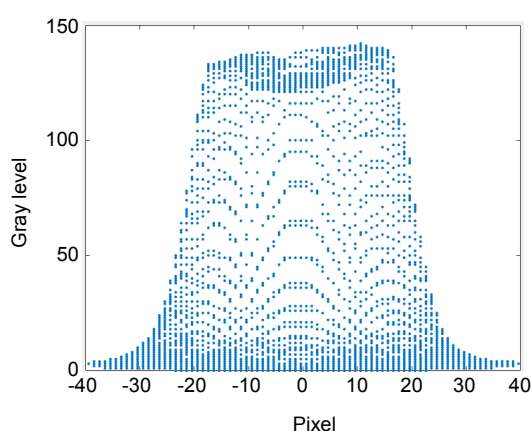


图 7 非正常条件下的光纤灰度剖面图
Fig. 7 2D gray section of abnormal fiber

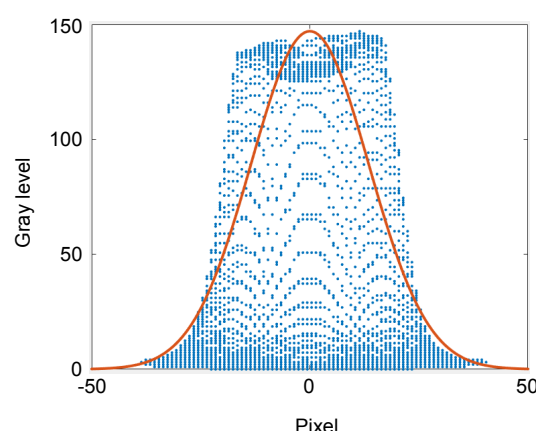


图 8 非正常条件下光纤灰度的高斯函数拟合图
Fig. 8 2D Gaussian function fitting rendering of abnormal fiber

表 4 非正常成像条件下高斯函数拟合法的测量结果
Table 4 Data measured by Gaussian function fitting under abnormal conditions

实验组数	包层直径/ μm	包层不圆度/%	纤芯直径/ μm	纤芯不圆度/%	芯—包同心度/ μm
1	124.874	0.084	8.427	0.570	0.305
2	124.857	0.072	8.410	0.295	0.300
3	124.897	0.069	8.428	0.380	0.314
4	124.885	0.078	8.416	0.736	0.310
5	124.862	0.055	8.442	0.421	0.320
平均值	124.875	0.072	8.425	0.480	0.310
最大偏差	0.022	0.016	0.017	0.256	0.011

4 结 论

本文提出了一种利用高斯函数拟合光纤纤芯端面灰度(模场)分布,实现对光纤几何参数进行测量的方法。通过高斯函数对光纤模场分布的拟合从而得到纤芯与包层分界面的边缘数据,这种方法具有可靠的理论依据,因此也是对国标 GB 15972.20-2008 测量方法

的一个有意义的完善和补充。同时实验也表明,本方法与常规的近场光分布法测量相比,在保证测量准确性和稳定性的基础上,对测量条件与成像质量有更高的抗干扰能力。

参考文献

[1] Ekici C, Dinleyici M S. A practical approach for optical

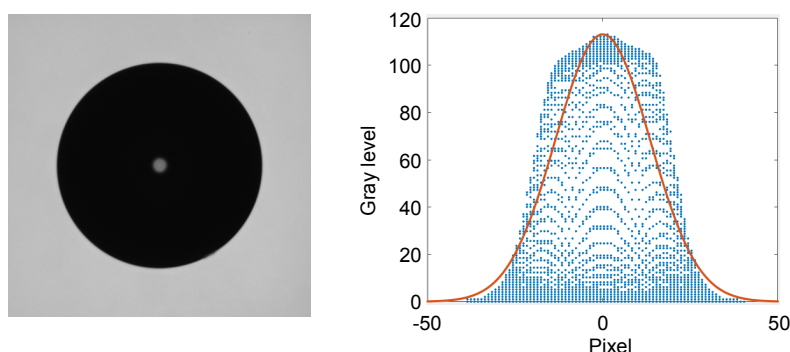
- characterization of a film coated on the optical fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **36**: 382–386.
- [2] Zhang H, Kuszmierz R, Czarske J. Miniaturized interferometric 3-D shape sensor using coherent fiber bundles[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **107**: 364–369.
- [3] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P. A novel photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4668–4676.
张晓娟, 赵建林, 侯建平. 一种新型高双折射光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4668–4676.
- [4] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Specifications for optical fibre test methods-Part 20: measurement methods and test procedures for dimensions-fiber geometry: GB/T 15972.20–2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光纤试验方法规范 第 20 部分: 尺寸参数的测量方法和试验程序 光纤几何参数: GB/T 15972.20–2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] Chen L, Chen J B, Lu R H. Automatic measurement of optical fiber geometric parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1245–1248.
陈磊, 陈进榜, 陆润华. 光纤几何参数的自动检测仪[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1245–1248.
- [6] Zhao X Y, Chen T, Ding Z X. Research on automatic measurement system for fiber end-face parameters[J]. *Optical Instruments*, 2009, **31**(4): 1–6.
赵新彦, 陈陶, 丁志雄. 光纤端面参数自动化测量系统的研究[J]. *光学仪器*, 2009, **31**(4): 1–6.
- [7] Chang Y Y, Wang L A. Silicon cored fiber diameter measurement[C]//*Proceedings of 2015 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, 2015: 1–2.
- [8] Lin Y D, Li P, Li X. Data processing method for MFD measurement by means of continuous variable aperture far field[J]. *Modern Measurement and Test*, 1999(5): 29–31, 36.
林延东, 李平, 李熙. 连续变孔径法单模光纤模场直径(MFD)测量的数据处理[J]. *现代计量测试*, 1999(5): 29–31, 36.
- [9] Gander W, Golub G H, Strebler R. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. *BIT Numerical Mathematics*, 1994, **34**(4): 558–578.
- [10] Yin A E, Jiang Z X, Zhang Y L. Refracted near-field technique for the measurement of optical fiber refractive index profiles[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(2): 181–185.
殷爱娥, 姜仲玄, 张一龙. 光纤折射率剖面的折射近场法测量的研究[J]. *光学学报*, 1989, **9**(2): 181–185.
- [11] Gao Y C. Simulation of measuring the optical fiber refractive index profiles by refraction near-field method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
高迎春. 基于折射近场法测量光纤折射率分布的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [12] Sun H G, Chu J R, Zhong L S, et al. Measurement of refractive-index profile of plastic optical fibers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2001(4): 12–16.
孙会刚, 储九荣, 钟力生, 等. 塑料光纤折射率分布的测量方法[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2001(4): 12–16.
- [13] Li C X, Li L Y, Yang S X, et al. Study on mode field diameter standard of single-mode optical fiber[J]. *Modern Transmission*, 2013(2): 72–76.
李春生, 李琳莹, 杨世信, 等. 单模光纤模场直径标准研究[J]. *现代传输*, 2013(2): 72–76.
- [14] Shen N L, Tu J K, Wang J C, et al. Research and design of optical fiber geometry testing instrument[J]. *Modern Transmission*, 2008, **34**(6): 51–54.
沈奶连, 涂建坤, 王建财, 等. 光纤几何参数测试仪的研究与设计[J]. *现代传输*, 2008, **34**(6): 51–54.
- [15] Ou P. *Advanced Optical Simulation (MATLAB Version)-Optical Waveguide, Laser*[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2014.
欧攀. 高等光学仿真(MATLAB 版)—光波导, 激光[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- [16] Guo F Y, Li L H, Wang M H. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar waveguide TE₀ mode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(2): 235–239.
郭福源, 李连煌, 王明华. 介质平面光波导 TE₀ 模模场分布的高斯近似[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 235–239.
- [17] Song X L, Li B B, Wang S Y, et al. A new measurement of light intensity distribution with divergence[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 572–575.
宋小鹿, 李兵斌, 王石语, 等. 一种测量激光光强按角度分布的新方法[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(4): 572–575.
- [18] Marcuse D. Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, **68**(1): 103–109.
- [19] Li Y M, Tu J K, Xiang H Z, et al. Measurement of optical fiber geometric parameters with Canny operator and binaryzation filtering[J]. *Optical Technique*, 2018, **44**(5): 513–518.
李一鸣, 涂建坤, 项华中, 等. 用 Canny 算子和二值化滤波的光纤几何参数测量[J]. *光学技术*, 2018, **44**(5): 513–518.
- [20] Li Y M, Zheng G, Tu J K, et al. Measurement of optical fiber geometry with arbitrary ellipse curve fitting[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(5): 180319.
李一鸣, 郑刚, 涂建坤, 等. 任意椭圆函数拟合法测量光纤几何参数[J]. *光电工程*, 2019, **46**(5): 180319.
- [21] Liu W, Tang C H, Ma X M, et al. Measurement of geometric parameters of defective fiber ends[J]. *Study on Optical Communications*, 2013(6): 35–38.
刘为, 唐春晖, 马秀梅, 等. 缺陷光纤端面几何参数的测量[J]. *光通信研究*, 2013(6): 35–38.
- [22] Mu D D, Zhu Y T, Zhang K. Modulation of annular light distribution by mechanical fiber scrambler[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(5): 996–1001.
穆丹丹, 朱永田, 张凯. 天文光纤机械扰模器调制环形光场的实验研究[J]. *应用光学*, 2012, **33**(5): 996–1001.

Measurement of optical fiber geometry parameters by gray distribution fitting with Gaussian function

Li Yiming¹, Tu Jiankun², Xiang Huazhong¹, Jiang Bin², Zheng Gang^{1*}

¹Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Device, Key Laboratory of Ministry of Education for Applied Optical Instruments, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China



2D Gaussian function fitting rendering of normal fiber

Overview: The geometry parameters of optical fiber affect the optical transmission and mechanical properties of optical fiber. The near-field optical distribution method is a measurement method recommended in GB15972.20-2008. The main parameters to be measured include the diameter of cladding and core, the roundness of cladding and core, and the concentricity of cladding and core. In order to distinguish the boundary between fiber core and cladding, the fiber core should be illuminated during the measurement of the geometry parameters. Actually, the end face of fiber core is a bright spot with unclear edges, so it is impossible to accurately judge the true edges of fiber core, which will bring errors to the measurement of geometry parameters of fiber core. In this paper, the distribution of optical mode field in fiber was analyzed. Theoretically, the solution of electromagnetic vector of optical fiber mode field satisfies Bessel function, but Gaussian function can also be used to approximately describe the distribution of optical fiber mode field.

Therefore, Gaussian function was used to fit the gray distribution of fiber core, and the true edge of fiber core was obtained from the Gaussian function. Gaussian function fitting method mainly includes the following three steps. The first step is to obtain the image of the end face of the optical fiber by CCD and conduct appropriate image preprocessing. The image contrast is stronger and more conducive to subsequent gray data extraction by image preprocessing. The second step is to find the best Gaussian function by the fitting with gray data of the image. 3D fitting with all the gray data of fiber core end face can effectively filter out error data and reflect the true mode field distribution of fiber core. The third step is to find the true edge of the fiber core through the best-fitting Gaussian function, and fit the edge data with elliptical curves. Finally, the geometry parameters of the fiber core will be obtained. For the measurement of cladding geometry parameters, because of the high contrast of the edge, Canny operator can be directly used to extract the edge of the cladding. The cladding geometry parameters with high precision can be obtained by elliptical curves fitting.

The real edge of optical fiber core can be accurately obtained by Gaussian function fitting, and the error points in the image can be effectively filtered through fitting, so as to improve the measurement accuracy of optical fiber geometry parameters. Taking fiber core data as an example, the data of diameter and roundness measured by the standard instrument are 8.420 μm and 0.670%, respectively. When cutting effect of fiber end face or lighting condition is poor, the instrument data change to 9.044 μm and 1.457%, while the data measured in this paper are 8.425 μm and 0.480%, respectively.

Citation: Li Y M, Tu J K, Xiang H Z, *et al.* Measurement of optical fiber geometry parameters by gray distribution fitting with Gaussian function[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190247

Supported by National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (61605114)

* E-mail: gangzheng@usst.edu.cn