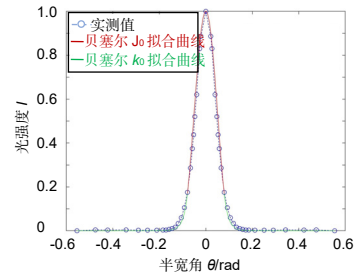




DOI: 10.12086/oe.2021.200308

基于远场可变孔径的贝塞尔函数拟合法求单模光纤模场直径

胡越¹, 项华中¹, 赵仁燕¹, 涂建坤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, 上海 200093;²上海电缆研究所, 上海 200093

摘要: 模场直径作为单模光纤的一个重要参数, 远场可变孔径法是 GB.15972.45-2008 中推荐的测量方法。本文分析了单模光纤中传播光场的分布, 其中光场的模式行为是亥姆霍兹方程的解, 理论上应满足贝塞尔函数。对此, 本文基于远场可变孔径法提出一种利用贝塞尔函数拟合光纤出射光场分布, 进而由拟合得到的模场分布曲线计算模场直径。与目前常用的远场可变孔径法相比, 在测量数据正常时, 本方法与常用方法测量精度相当。当测量数据存在误差时, 本方法仍能保证测量结果的稳定性与准确性。

关键词: 光纤; 模场直径; 远场可变孔径法; 贝塞尔函数拟合; 模场分布

中图分类号: TN818

文献标志码: A

胡越, 项华中, 赵仁燕, 等. 基于远场可变孔径的贝塞尔函数拟合法求单模光纤模场直径[J]. 光电工程, 2021, 48(4): 200308
 Hu Y, Xiang H Z, Zhao R Y, et al. Mode field diameter measurement of single mode fiber using Bessel function fitting method based on variable aperture in far field[J]. *Opto-Electron Eng.* 2021, 48(4): 200308

Mode field diameter measurement of single mode fiber using Bessel function fitting method based on variable aperture in far field

Hu Yue¹, Xiang Huazhong¹, Zhao Renyan¹, Tu Jiankun², Zheng Gang^{1*}¹Interventional Medical Device Engineering Research Center, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China

Abstract: The mode field diameter is an important parameter of single-mode fiber, and the GB.15972.45-2008 recommends using the far-field variable aperture method to measure it. This paper analyzes the distribution of the propagating light field in a single-mode fiber. The mode behavior of the light field is the solution of the Helmholtz equation, which in theory should satisfy the Bessel function. In this regard, a method using Bessel function to fit the optical field distribution of the fiber based on the far-field variable aperture method is proposed, and the mode field diameter is calculated from the fitted mode field distribution curve. Compared with the commonly used far-field variable aperture method, when the measurement data is normal, this method has the same measurement accuracy. When there are errors in the measurement data, this method can still ensure the stability and accuracy of the

收稿日期: 2020-08-18; 收到修改稿日期: 2021-02-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61605114)

作者简介: 胡越(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: 905683357@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©2021 中国科学院光电技术研究所

measurement results.

Keywords: optical fiber; mode field diameter; far field variable aperture method; Bessel function fitting; mode field distribution

1 引言

光纤在通信、工业工程、生物医学领域都有着广泛的应用^[1-2]。随着技术的不断发展,对光纤的性能提出了更高的要求。降低光纤损耗是当前各类光纤应用中的研究重点^[3]。模场直径作为单模光纤的一个重要参数^[4],由它可以导出单模光纤的连接损耗、弯曲损耗、微弯损耗以及光纤的色散等参数^[5-7]。因此准确快速地测量模场直径,有助于更深入地了解光纤特性,提高并保证光纤在工业工程中的应用质量。我国国标 GB15972.45-2008 中对模场直径的测量给出了四种方法^[8],分别是直接远场扫描法^[9]、远场可变孔径法^[10]、近场扫描法^[11]、光时域反射计法^[12]。其中,直接远场扫描法是测量单模光纤模场直径的基准试验法。它直接按照柏特曼(Petermann II)远场定义^[4],通过测量光纤远场辐射图计算出模场直径。但该方法测量动态范围大,对测量系统有较高要求,不易实现。作为第一替代方法,远场可变孔径法凭借其操作简单、测量精度高的优点而被广泛采用。近些年,熊婷婷^[13]等人通过后向散射法对光纤模场直径进行测量,后向散射法主要利用常规光时域反射仪(OTDR)通过双向测量法对光纤接头损耗的精确测定以及在测试中对高阶模影响的有效控制,使其模场直径测量结果具有很好的准确性。Nakamura^[14]等人通过改进的光时域计法对双模光纤的 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模场直径进行了测量,并通过仿真验证了其方法的有效性。Matsui^[15]等人通过实验验证得出远场可变孔径法和远场扫描法均可以得出准确有效的模场直径数值。徐圣杰^[16]等人发现在模场直径多次测量过程中后向散射法仍存在结果的不稳定性,仍须以远场可变孔径法测量结果为准。通过远场可变孔径法测量模场直径,需要测量一组透过不同尺寸大小孔径的光功率数据,然后由采集到的光功率数据经处理并计算得出模场直径。该方法在测量过程中,须对正光纤中心和各个透光孔中心。而在连续的电机转动测量过程中,有可能产生对正偏差,从而引起模场直径的测量误差。

本文提出一种基于远场可变孔径并通过贝塞尔函数拟合光功率分布的方法求出模场直径。通过电磁矢量在圆形光纤介质中传输的精确解(由第一类和第二

类变型贝塞尔函数描述)对由远场可变孔径法采集测量出的二维远场光功率分布进行拟合,得到光纤中远场的真实模场分布曲线。再由拟合出的由贝塞尔函数表征的模场分布曲线根据柏特曼(Petermann II)远场定义求出模场直径。本方法通过函数拟合的方式能有效消除远场可变孔径法中可能出现的由于光纤中心与透光孔中心不对正产生的偶发误差或其他误差,并将远场可变孔径法中计算过程的矩形近似积分替换为函数曲线积分,有效地提高了模场直径测量结果的准确性和稳定性。

2 测量原理分析

本文测量方法的基础是远场可变孔径法。将通过远场可变孔径法采集得到的不同孔径光功率数据作为原始数据,通过两段贝塞尔函数进行拟合并得到模场分布曲线,然后依据柏特曼(Petermann II)远场定义式直接计算得出模场直径。将本方法的测量结果与 OFM 光纤多参数测试仪^[17]的测量结果进行比较,从而验证本方法测量的准确性与稳定性。OFM 光纤多参数测试仪由原机械工业部上海电缆研究所(国家电缆检测检验中心)遵循我国国标 GB.15972 与国际通信标准 IEC 60793 的测试方法开发研制。该测试仪可以测试光纤的衰减、模场直径、截止波长等参数,是目前国内外光纤光缆研究、生产及使用等单位的常用仪器。

2.1 光纤波导的电磁理论解

光纤是一种圆形介质波导。光在光纤内传播的本质是电磁波在介质波导内的传输。光波电磁矢量的精确解根据电磁场理论经过严格的求解得到,它们满足均匀圆形介质波导边界条件的麦克斯韦方程组^[18-19]。由于光在光纤中的传播方向角几乎为零,所以只要先求出光波的轴向分量就可以根据麦克斯韦方程组得到其他的横向分量。轴向场分量对应的圆柱坐标系下亥姆霍兹方程为

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

式中: r 为距光纤中心的距离, φ 为光纤端面的方向角,

z 为距光纤端面的距离, n 为光纤的折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是真空中的波数, λ 为真空中的波长。

为简便只分析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如下式:

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

其中: $E(r)$ 为场分布, 在纤芯与包层中 n 是不同的, n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。对于阶跃型光纤, 纤芯和包层折射率均为常数。上式是典型的贝塞尔方程, 方程中的参数 m 为 φ 方向上电场变化的周期数, 称为贝塞尔方程的阶, β 为光纤的纵向传播常数。

图 1 为远场可变孔径法测量的远场模场分布图。在光纤纤芯区电场幅值必然是有界的, 而且随 r 做震荡变化, 因此模场的精确解在纤芯中用第一类贝塞尔函数描述。在包层区, 当 r 趋向无穷大时, 场强应趋近于零, 所以在包层中用第二类变型贝塞尔函数来描述。在工程应用中也常使用其近似解高斯函数来描述场分布^[20-21], 由于高斯函数具有局限性, 本文将使用精确解贝塞尔函数对场分布进行描述。

通过如下两段贝塞尔函数对单模光纤模场分布进行精确描述, 光强与相对半径 R_a 的关系为^[19]

$$I(R_a) = \begin{cases} J_0^2(UR_a), & R_a \leq 1 \\ J_0^2(U) \frac{k_0^2(WR_a)}{k_0^2(W)}, & R_a \geq 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $R_a = r/a$ 为归一化半径, r 为光纤半径, a 为纤芯半径, U 为归一化横向相位参数, W 为归一化横向

衰减参数。 U 、 W 值均与归一化频率 V 值相关。

$$V = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}, \quad (4)$$

$$U = V\sqrt{1-b}, \quad (5)$$

$$W = V\sqrt{b}, \quad (6)$$

式中 b 为归一化相位常数。

用式(3)对远场可变孔径法测量的模场分布数据进行拟合, 可以得到光纤内模场分布函数, 由该函数代入柏特曼远场定义式即可求得模场直径。由贝塞尔函数表示的光纤模场分布三维效果图如图 2 所示。

2.2 分段拟合与模场直径的计算

根据上节, 光波导在纤芯区传输用第一类贝塞尔函数 J_0 描述, 在包层中传输用第二类变型贝塞尔函数 k_0 描述。在对远场可变孔径法采集测量的一组数据进行拟合时, 应该选取合适的分段点以避免对拟合结果产生影响。由式(3)可知, 在纤芯半径位置处为两段函数的分界点, 其对应的光功率为 $J_0^2(U)$ 。

在确定了被测光纤特定工作波长下的归一化频率 V 值后, 归一化横向相位参数 U 和归一化横向衰减参数 W 均为定值。对常用的型号为 G.652 的单模光纤, 在工作波长为 1310 nm 时, 其归一化频率 V 值为 2.4, 可得其模场分布曲线如图 3 所示。

$R_a = 1$ 为第一类贝塞尔 J_0 函数曲线与第二类变型贝塞尔 k_0 函数曲线的分段点。 $R_a = 1$ 即 $r=a$ 为光纤纤芯半径位置, 此处对应的归一化光场强度 $J_0^2(U)$ 为定值, 可根据被测光纤归一化频率 V 值求出。对由远场可变孔径法采集的远场光功率数据进行归一化处理, 得到其归一化场强值, 对大于分界点的数据采取第一类贝塞尔 J_0 函数拟合, 对小于分界点的数据采取第二

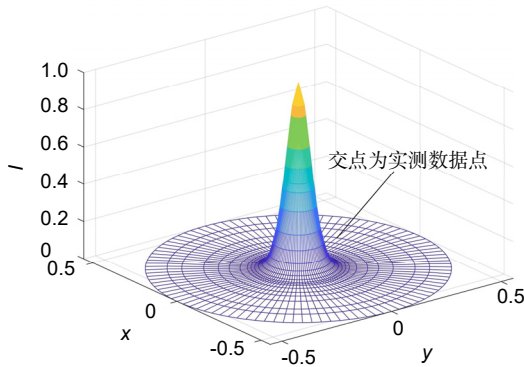


图 1 实测数据模场分布图

Fig. 1 Mode field distribution of the measured data

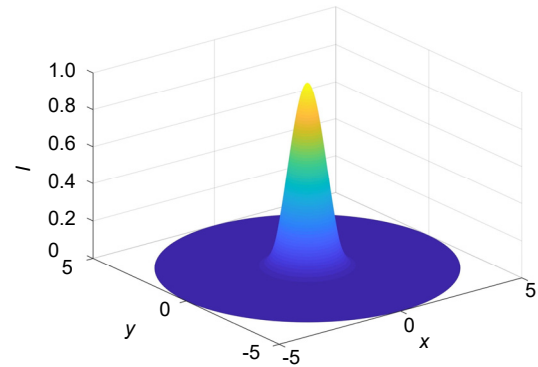


图 2 贝塞尔函数模型模场分布图

Fig. 2 Mode field distribution of Bessel function model

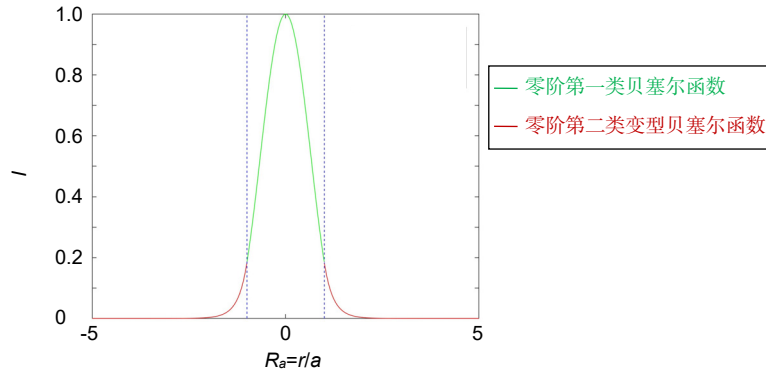


图3 G.652 光纤在 1310 nm 工作波长下模场分布函数

Fig. 3 The mode field distribution function of G.652 fiber at 1310 nm working wavelength

类贝塞尔 k_0 函数拟合。得到两段贝塞尔函数描述的模场分布后通过柏特曼(Petermann II)远场定义式由远场光功率分布确定模场直径 $2w_0$ ^[22]。

$$2w_0 = \frac{\sqrt{2\lambda}}{\pi} \left[\frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_F[\theta] \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_F[\theta] \sin^3\theta \cos\theta d\theta} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中: $P_F[\theta]$ 为模场分布曲线, 即式(3), θ 为可变孔径半宽角。

3 测量结果与讨论

为检验本文贝塞尔函数拟合方法的测量效果, 实验采用 OFM 光纤多参数测试仪, 对光纤型号为 G.652、G.655 的常用通信光纤进行模场直径测量。OFM 测试仪对模场直径的测试性能指标如下: 可测试波长 1310 nm、1550 nm, 重复性 $\leq 0.1 \mu\text{m}$, 最大数值孔径 0.30, 测试速度 2 min, 所有性能指标均符合国标 GB 15972.45-2008 中的要求。该测试仪采用标准的国标中推荐的远场可变孔径法, 原理图如图 4 所示。光源经

单色仪由注入系统进入待测光纤, 旋转圆盘使光纤出射光透过圆盘上不同大小的孔径光阑, 并测量通过不同孔径光阑的功率传输函数 $\alpha(\theta)$, 它是透光孔半宽角 θ 的函数。模场直径(MFD)为^[17]

$$D_{\text{MFD}} = \frac{\sqrt{2\lambda}}{\pi} \left[\int_0^{\infty} \alpha(\theta) \sin 2\theta d\theta \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

式中:

$$\alpha(\theta) = 1 - \frac{P(\theta)}{P_{\text{max}}}, \quad (9)$$

$$\tan\theta = \frac{x}{L}, \quad (10)$$

其中: $P(\theta)$ 为采集到的通过透光孔的光功率, P_{max} 为光纤出射总功率, x 为透光孔径的半径, L 为光阑孔平面与光纤端面之间的距离。

本文提出的贝塞尔函数拟合法求模场直径的计算式同式(7), 即先对同一光纤采集到的光功率离散数据通过两段贝塞尔函数进行拟合, 从而得到由贝塞尔函数表征的光纤内模场分布函数 $P_F[\theta]$, 最后由式(7)计算

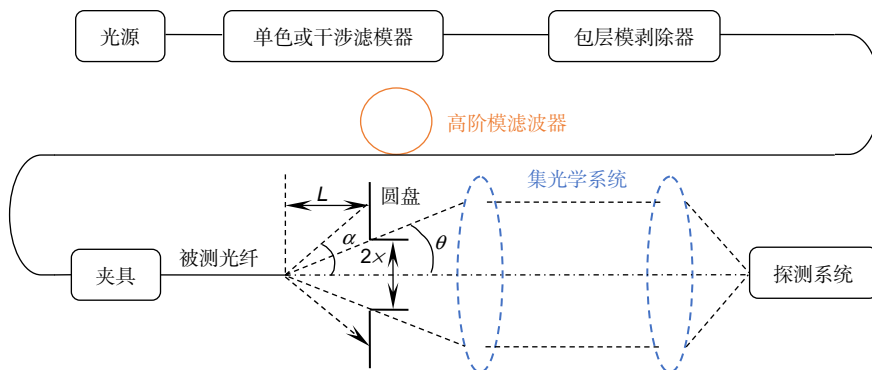


图4 远场可变孔径法测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of remote field variable aperture measurement

出模场直径。式(7)与式(8)在模场直径的测量上具有一致性, 并可以通过数学方法进行相互转换^[20]。

3.1 正常情况下光纤模场直径测量

使用 G.652 单模光纤, 测试波长为 1310 nm, 将光纤涂覆层剥离且用酒精棉擦洗干净后, 安置在 OFM 光纤多参数测试仪的注入光纤夹上, 完成校准后仪器自动有序地采集该被测光纤透过不同尺寸孔径的光功率。得到的一组实测数据如图 5(a)所示, 由图 5(a)可见, 收集到的光功率值随着孔径的增大逐渐增大, 直到光功率不再随着孔径增大而继续增大(即出射光功率被完全收集)。

OFM 光纤参数测试仪将采集得到的数据通过处理后由式(8)计算得出模场直径, 其中积分过程采用了 GB.15972.45-2008 中建议的矩形近似积分方法, 其积分函数 $a(\theta)\sin 2\theta \sim \sin\theta$ 关系图如图 5(b)所示。最后得到的模场直径计算结果为 9.210 μm 。

贝塞尔函数拟合法则将不同孔径的光功率数据处

理后得到 23 个模场分布离散点, 使用两段贝塞尔函数对其进行拟合, 其结果如图 5(c)所示。实测的模场分布离散点几乎都落在拟合得到的贝塞尔函数曲线上。拟合曲线的相关系数 R^2 接近于 1 为 0.9956, 表示拟合优度极佳。将通过拟合得到的模场分布即两段贝塞尔函数代入式(7), 计算得到模场直径为 9.208 μm , 与 OFM 测量仪的相对误差为 0.02%。

在 1310 nm 波长下, 对 G.652 和 G.655 光纤进行了重复测量, 并将两种方法的测量结果进行比较, 其结果见表 1。由表中数据可知, 在测量条件正常情况下, 贝塞尔函数拟合法与 OFM 测量仪标准方法所测结果几乎相同, 表明本方法具有良好的准确性。在多次测量过程中, 由最大偏差数据可以看出, 本方法在测量结果的稳定性(重复性)方面甚至更优于 OFM 标准仪器。

3.2 异常情况下光纤模场直径测量

远场可变孔径法在测量过程中可能由于光纤端面

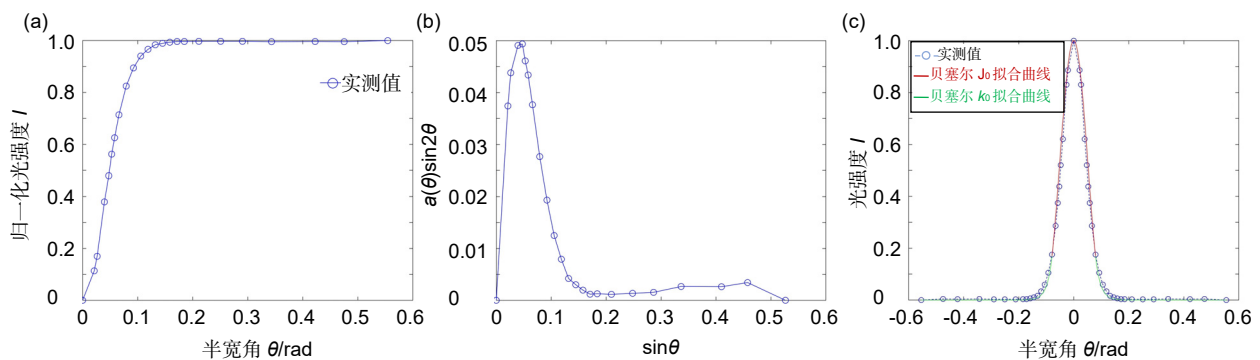


图 5 正常情况下模场直径测量结果图。

(a) OFM 测试仪光强分布图; (b) 积分函数 $a(\theta)\sin 2\theta \sim \sin\theta$ 关系图; (c) 贝塞尔函数模场分布拟合结果图
 Fig. 5 Measurement results of modulus field diameter under normal conditions. (a) Light intensity distribution of OFM tester; (b) Graph of the integral function $a(\theta)\sin 2\theta \sim \sin\theta$; (c) Fitting results of Bessel function modulus field distribution

表 1 在 1310 nm 波长下不同型号单模光纤两种测量方法的测量结果比较

Table 1 Comparison of measurement results in two measurement methods at 1310 nm wavelength

测试组	G.652 单模光纤		G.655 单模光纤	
	W _{OFM} / μm	W _{Bessel} / μm	W _{OFM} / μm	W _{Bessel} / μm
1	9.210	9.208	7.780	7.794
2	9.220	9.221	7.790	7.806
3	9.190	9.192	7.770	7.804
4	9.210	9.209	7.810	7.819
5	9.200	9.204	7.800	7.808
平均值	9.206	9.207	7.790	7.806
最大偏差	0.016	0.015	0.020	0.015

切割不均匀或孔径光阑在对正过程中电机系统随机角抖动等原因导致光功率采集不完全从而使模场直径测量结果产生波动或偏离真值。

取 G.652 光纤在 1310 nm 波长下所测的异常数据对两种方法进行比较, 该组数据中第 19 个孔对应的光功率数据采集异常。

由 OFM 光纤多参数测试仪得到的测量结果如图 6(a)所示, 由于第 19 孔的光功率数据明显异常, 其积分函数如图 6(b)所示, 由此所得模场直径的测量值为 9.765 μm , 相对误差 6.02%, 严重偏离正常值, 为不可用数据, 需要进行重新测量。

对同一组采集数据, 通过贝塞尔函数的拟合结果如图 6(c)所示, 光功率分布离散点连线出现明显折线, 但拟合曲线受误差数据的影响较小, 由拟合曲线方程通过式(7)计算得到的模场直径为 9.199 μm 。相对误差 0.09%, 几乎不受误差点干扰, 完全符合我国国标 GB.15972 中规定的重复测量相对误差小于 1%的精度要求。

模拟在测量过程中出现多个(孔径)误差数据的情

况, 并用两种方法进行测量, 比较结果见表 2。其中相对偏差为存在误差数据时的测量结果与正常情况的测量结果间偏差。

根据表 2 中数据, OFM 参数测试仪传统方法在测量数据存在误差时, 无论是对 G.652 光纤还是 G.655 光纤, 其模场直径测量结果均较大程度偏离真值; 本文贝塞尔函数拟合方法则可以基本排除误差数据干扰, 在两孔存在误差情况下仍然可以符合我国国标 GB.15972 中规定的误差小于 1%的精度要求, 使模场直径测量结果的准确性得到了有效保证。

4 结 论

针对单模光纤的模场直径测量, 本文提出一种基于远场可变孔径法测量原理, 结合光纤波导理论建立的光纤模场分布的贝塞尔函数模型, 并通过此模型拟合采集到的光功率数据, 得到实际的模场分布函数, 最后通过模场直径定义式求出模场直径。实验表明, 本方法在正常测量情况下表现出与标准仪器相当的测量准确性与一致性, 而且, 当测量条件变差时, 本文

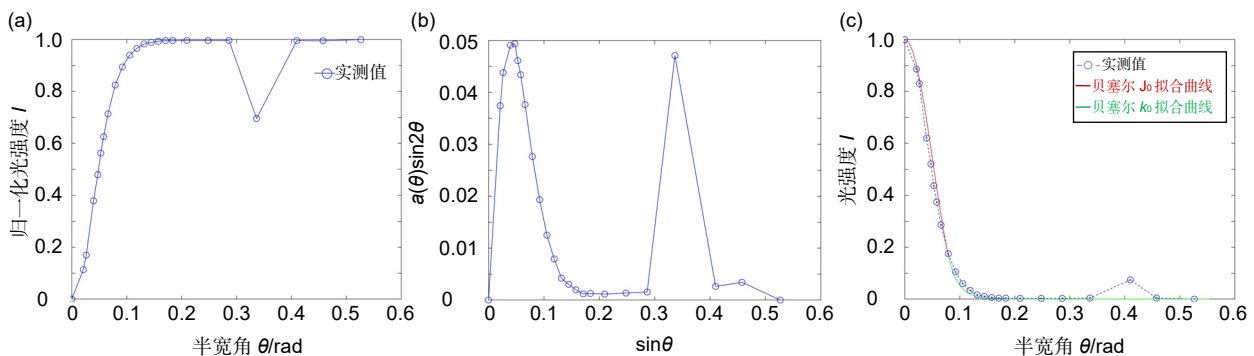


图 6 异常情况下模场直径测量结果图。

(a) OFM 测试仪光强分布图; (b) 积分函数 $a(\theta)\sin 2\theta \sim \sin\theta$ 关系图; (c) 贝塞尔函数模场分布拟合结果图

Fig. 6 Measurement results of modulus field diameter under abnormal conditions. (a) Light intensity distribution of OFM tester; (b) Graph of the integral function $a(\theta)\sin 2\theta \sim \sin\theta$; (c) Fitting results of Bessel function modulus field distribution

表 2 在 1310 nm 波长下存在误差情况两种测量方法的测量结果比较

Table 2 Comparison of measurement results of the two methods in case of error at 1310 nm wavelength

被测光纤	测试方法	测试最佳	1 孔存在偏差(μm)/	2 孔存在偏差(μm)/	3 孔存在偏差(μm)/
		模场直径/ μm	相对偏差	相对偏差	相对偏差
G.652 光纤	WOFM	9.210	9.765/6.02%	10.042/9.03%	10.501/14.01%
	WBessel	9.208	9.199/0.09%	9.152/0.62%	9.042/1.82%
G.655 光纤	WOFM	7.780	8.247/6.00%	8.492/8.95%	8.912/14.34%
	WBessel	7.794	7.782/0.15%	7.763/0.40%	7.630/2.10%

测量方法仍可以达到国标要求的测量精度, 是对国标 GB.15972 中建议的远场可变孔径法测量模场直径的一种有意义的补充。同时本方法通过单个光电探测器结合可变孔径代替了价格昂贵的近红外相机, 实现了近红外相机的模场获取功能, 很大程度上提高了仪器的性价比。

参考文献

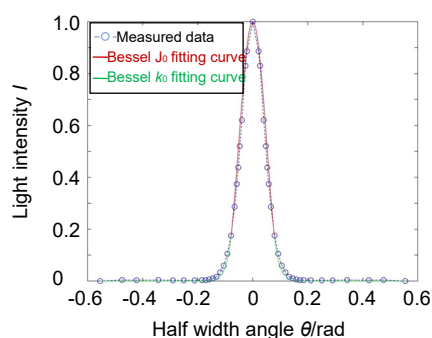
- [1] Paul B K, Islam S, Sen S, *et al.* Low material loss and dispersion flattened fiber for single mode THz-wave transmission applications[J]. *Results Phys*, 2018, **11**: 638–642.
- [2] Chen X, Himmelreich J E, Hurley J E, *et al.* Universal fiber for short-distance optical communications[J]. *J Lightw Technol*, 2019, **37**(2): 389–395.
- [3] Han J W, Zhang J. Elasto-optical correction of bend loss for Ge-free fibers with large-effective-area and ultra-low-loss[J]. *Opt Fiber Technol*, 2020, **54**: 102120.
- [4] Ohashi M, Shibata N, Sato K. Mode field diameter measurement conditions in single-mode fibres[J]. *Electron Lett*, 1989, **25**(8): 493–495.
- [5] Hoo Y L, Jin W, Ju J, *et al.* Loss analysis of single-mode fiber/photonic-crystal fiber splice[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2004, **40**(5): 378–380.
- [6] Wang J J, He L, Gu L W, *et al.* Improvement of the influence of fiber internal stress on the attenuation of low-loss single-mode fiber[J]. *Opt Fiber Electric Cable Their Appl*, 2020(1): 31–32, 35. 王建江, 何霖, 顾灵卫, 等. 光纤内应力对低损耗单模光纤衰减影响的改善[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2020(1): 31–32, 35.
- [7] Xu B B, Xi L X, Zhang X G, *et al.* Design and experimental verification of dispersion measurement prototype[J]. *Acta Opt Sin*, 2019, **39**(2): 0206004. 续贝贝, 席丽霞, 张晓光, 等. 色散测量样机的设计与实验验证[J]. *光学学报*, 2019, **39**(2): 0206004.
- [8] 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 45 部分: 传输特性和光学特性的测量方法和试验程序 模场直径: GB/T 15972.45–2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specifications for optical fibre test methods - part 45: measurement methods and test procedures for transmission and optical characteristics - mode field diameter: GB/T 15972.45–2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [9] Michtchenko A, Nava M F. Far field technique applied in single mode optical fibers for studying of modal field diameter[C]//2006 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2006: 1–3.
- [10] Yang G B, Xu T F, Song Y L, *et al.* Two methods and devices for quick measuring the mode-field radius of single-mode optical fibers[J]. *Opt Instrum*, 2004, **26**(3): 59–63. 杨高波, 徐铁峰, 宋玉兰, 等. 两种快速测量单模光纤模场半径的方法及装置[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(3): 59–63.
- [11] Parker A J. Near field measurement of fiber mode field diameters: effects of defocusing[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1995, **44**(2): 458–460.
- [12] Ohashi M, Miyoshi Y, Kubota H, *et al.* Longitudinal fiber parameter measurements of multi-core fiber using OTDR[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(24): 30137–30147.
- [13] Xiong T T, Dai W Y, Wang L P, *et al.* Application of back-scattering method on the measurement of MFD of B6 optical fiber[J]. *Opt Fiber Electric Cable Their Appl*, 2018(3): 11–13, 20. 熊婷婷, 戴唯一, 王莲萍, 等. 采用后向散射法对 B6 类光纤模场直径的测量[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2018(3): 11–13, 20.
- [14] Nakamura A, Okamoto K, Koshikiya Y, *et al.* Effective mode field diameter for LP₁₁ mode and its measurement technique[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2016, **28**(22): 2553–2556.
- [15] Matsui T, Sakamoto T, Nakajima K. Effective mode-field diameter measurement for few-mode fibers[C]//2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), 2017: 1–4.
- [16] Xu S J, Sun L B. Using two-way backscattering technology to simulate the mode field diameter test of single-mode fiber[J]. *Mod Transm*, 2020(1): 70–73. 徐圣杰, 孙林波. 使用双向后向散射技术模拟单模光纤模场直径测试[J]. *现代传输*, 2020(1): 70–73.
- [17] SECRI. OFM Optical Fiber Multi-Parameter Tester User Manual[M]. Shanghai: Shanghai Cable Research Institute, 2013. SECRI. OFM 光纤多参数测试仪用户手册[M]. 上海: 上海电缆研究所, 2013.
- [18] 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-Electron Eng*, 2020, **47**(4): 190247. 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.
- [19] Ou P. *Advanced Optics Simulation (MATLAB Version)-Optical Waveguide, Laser*[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2014: 129–134. 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: 129–134.
- [20] Guo F Y, Li L H, Wang M H. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar waveguide TE₀ mode[J]. *Chin J 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.
- [21] Song X L, Li B B, Wang S Y, *et al.* A new measurement of light intensity distribution with divergence[J]. *Semicond Optoelectron*, 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.
- [22] Miyagi K, Namihira Y, Razzak S M A, *et al.* Measurements of mode field diameter and effective area of photonic crystal fibers by far-field scanning technique[J]. *Opt Rev*, 2010, **17**(4): 388–392.

Mode field diameter measurement of single mode fiber using Bessel function fitting method based on variable aperture in far field

Hu Yue¹, Xiang Huazhong¹, Zhao Renyan¹, Tu Jiankun², Zheng Gang^{1*}

¹Interventional Medical Device Engineering Research Center,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China



Fitting results of Bessel function modulus field distribution

Overview: As an important parameter of single-mode fiber, the mode field diameter is used to describe the mode field distribution of the fundamental mode in the cross section of the single-mode fiber. The far field variable aperture method is recommended in GB.15972.45-2008 for the measurement of mode field diameter. In the process of measurement, the method is easily affected by the fact that the center of the fiber is not aligned with the center of the previous hole or the cutting effect of the fiber is not good, which will result in the decrease of measurement accuracy. The transmission of light in a fiber is essentially the transmission of electromagnetic waves in a closed medium, and its solution should satisfy Maxwell's equations, where the mode behavior of light field is the solution of the Helmholtz equation, which theoretically should satisfy the Bessel function. Based on the far field variable aperture method, this paper presents a method to calculate the diameter of the optical field by fitting the distribution of the optical field of the fiber through Bessel function. Main steps are as follows: the first step is to preprocess the optical power data obtained by the far field variable aperture method. In the second step, two Bessel functions are used to fit the measured data respectively to obtain the real mode field distribution curve. In the third step, the Bessel curve obtained by fitting is used to obtain the mode field diameter through the Petermann (II) formula. Taking G.652 fiber as an example, under normal measurement conditions, the measurement results of the standard instrument using the standard far-field variable aperture method are 9.210 μm and 9.208 μm . This shows that this method can achieve the same precision level as the standard method. When the measurement conditions are abnormal (error data), an error data appears in the measurement data, and the measurement results of the two methods are 9.765 μm and 9.199 μm , with the relative deviation of 6.02% and 0.09%. In two error data, the measurement results of the two methods are 10.042 μm and 9.152 μm , with the relative deviation of 9.03% and 0.62%. The subsequent results have been tested for many times, all of which show that the measurement results of this method have good accuracy and stability. This method is a meaningful supplement to the far field variable aperture method proposed in GB.15972.45-2008. At the same time, it replaces the expensive near-field infrared camera by a single photodetector combined with a variable aperture, and it realizes the mode field acquisition function of near-field infrared camera, which greatly improves the cost performance of the mode field diameter measurement instrument.

Hu Y, Xiang H Z, Zhao R Y, *et al.* Mode field diameter measurement of single mode fiber using Bessel function fitting method based on variable aperture in far field[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(4): 200308; DOI: 10.12086/oe.2021.200308

Foundation item: National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (61605114)

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