

小弯曲半径下光纤宏弯损耗测试的拟合方法研究

宁四平

(特恩驰(南京)光纤有限公司, 南京 210006)

摘要: 光纤在小弯曲半径下, 为提高测试准确性, 新版 IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b 2017 推荐了以浸入高折射率溶液中测试得到的本征宏弯损耗值为参考, 根据特定波长测量点的精度比较, 选择最佳的拟合方法为测试方法。选择 G. 657. A1 光纤为研究案例, 通过对小弯曲半径下宏弯的多种拟合方法进行比较和研究, 确定以 1550nm 和 1625nm 波长下宏弯拟合值的准确度为参考依据, 作为小弯曲半径下光纤宏弯损耗最佳拟合方法选择的思路。

关键词: 宏弯损耗; 小弯曲半径; 本征值; 加权最小二乘法

中图分类号: TN818 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)04-0023-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fitting methods study of optical fiber macro-bend loss measurement at small bending radius

NING Siping

(Twensche (Nanjing) Fibre Optic Ltd., Nanjing 210006, China)

Abstract: In order to improve test accuracy under small bending radius, the new edition IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b 2017 recommends intrinsic macro-bend loss value tested in immersion high refractive index solution is given as recommended fitting reference, and based on the precision of measuring point of specific wavelength, the best fitting method is selected as the testing method. This paper takes G.657. A1 optical fiber as the research project. By comparing various fitting methods of macro-bend under small bending radius, taking the best measurement accuracy of the fiber macro-bend loss at 1550nm and 1625nm under the small bending radius as the benchmark, the idea of selecting the fitting method for the measurement of the fiber macro-bend loss under the small bending radius is provided.

Key words: macro-bend loss; small bending radius; eigenvalue; weighted least square method

0 引言

2014 年, 本文作者及其同事撰写的论文“用加权的最小二乘法测试单模光纤的宏弯损耗”(“Use of weighted least square fitting methods in macrobending loss tests on single-mode fibres”)在美国罗德岛普罗旺斯举行的 63rd IWCS 学术研讨会议上发表。该方法解决了小弯曲半径下光纤宏弯损耗图谱震荡造成测试结果不准确的问题。在推动该方法纳入 IEC 和 GBT 标

准的过程中, 国际和国内专家们在认可加权最小二乘法的同时, 提出了其它拟合方法是如何影响测试结果的问题。本文解答了这个疑问。

新版 IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b 2017 Optical fibres – Part 1-47 Measurement methods and test procedures – Macrobending loss (Annex D Small bend radius) 的修订是基于本文以及“用加权的最小二乘法测试单模光纤的宏弯损耗”论文的精炼。

1 宏弯损耗曲线震荡形成的原理

当单模光纤用于接入网时, 光纤的设计在兼顾使用寿命与损耗要求的前提下, 旨在追求尽可能小的弯曲半径。弯曲不敏感光纤的设计要求在小弯曲半径(5~15mm)下光纤的传输性能基本不受影响。然而, 当我们在测试弯曲不敏感光纤在小弯曲半径下的宏

收稿日期: 2018-12-18。

作者简介: 宁四平(1967-), 男, 硕士, 高级工程师。2000 年开始从事光纤光缆行业, 主要研究方向为光纤光缆的设计、制造、工艺、质控和应用。中国“通信光电缆专家委员会”委员, 中国电器工业协会电线电缆分会“通信电缆及光纤光缆专家委员会”委员。现任特恩驰(南京)光纤有限公司项目总监, 同时负责光纤光缆的质控工作。



弯损耗时,发现宏弯损耗曲线是随波长变化无规律震荡的。这是由于在小弯曲半径情况下,传输的光信号从弯曲的纤芯中辐射出去,并在纤芯以外的弯曲界面(如芯层-包层界面、包层-涂覆层界面或涂层-空气界面)上发生反射,形成类似回音壁模式。如果弯曲状态的样本长度不足以抑制辐射模,包层和涂覆层中的辐射模将会干扰传播模,从而导致宏弯损耗曲线随波长变化而震荡。

光纤结构及其对应结构的折射率大小分布示意图如图 1 所示。一般情况下外涂层折射率 n_3 >内涂层折射率 n_2 >芯层折射率 n_0 >包层折射率 n_1 >空气折射率 n_4 。因折射率差,光纤在芯层和外涂层分别形成全反射的条件。当入射光因光纤弯曲而辐射出去,在内涂层、外涂层发生折射后辐射光进入外涂层,其中满足全反射条件的光在外涂层形成全反射;同样因为光纤的弯曲,辐射出去的光在不断反射和折射后进入光纤包层和芯层,最终形成了因宏弯引起的损耗震荡现象。

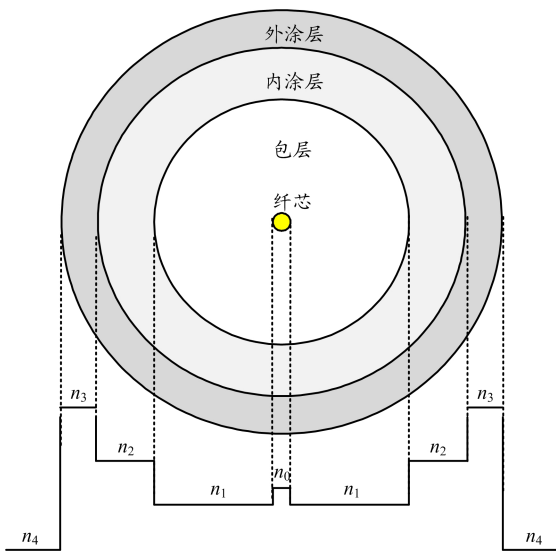


图 1 光纤结构及其对应结构折射率大小分布示意图

基模和高阶模光在辐射出芯包层后,在外涂层形成全反射的传输示意图如图 2 和图 3 所示。

当我们了解了光纤在小弯曲半径情况下产生“回音壁模式”的干扰原理后,就很容易理解在小半径弯曲情况下宏弯损耗出现的震荡现象。图 4 是 G.657.A1 光纤宏弯损耗的实测图谱,在长波长时震荡更加明显。

IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b 2017 Optical fibres - Part 1-47 Measurement methods and test procedures - Macrobending loss(Annex D Small bend radius phenomena)给出了用拟合方法推导出对应波长的宏弯损耗值

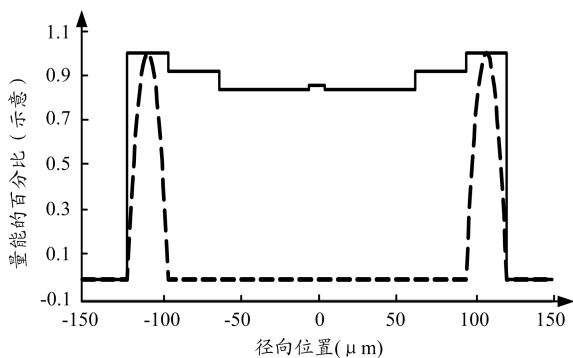


图 2 基模在光纤外涂层形成全反射的传输示意图

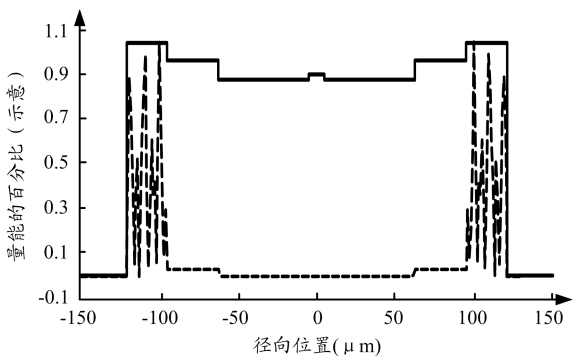


图 3 高阶模在光纤外涂层形成全反射传输的示意图

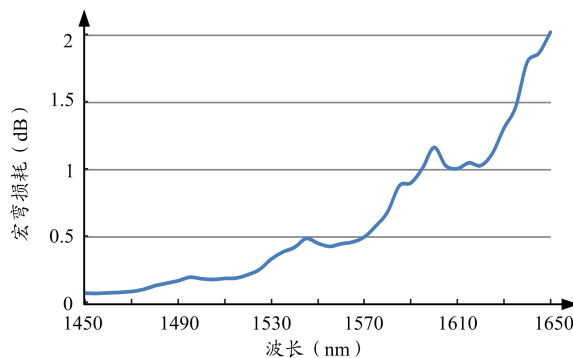


图 4 G.657.A1 光纤宏弯损耗的实测图谱

的建议,并推荐了多种拟合方法,包括最小二乘法、最小平均值与中值差法、最小均值法、最小中值法以及线性后加权最小二乘法等,应用时需要选择合适的拟合方法使测试结果更精确。

2 新版 IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b 2017(Annex D)的重要变化

2017 版 IEC 60793-1-47 Ed. 4.0 b (Annex D)对小弯曲半径下的光纤的宏弯损耗测试推荐进行了较大的修订,主要体现在以下方面。

①给出了多种不同的拟合方法,并清晰定义:

▲最小二乘法:最小化“拟合值和测试值之间的差值的平方和”。

▲最小平均值与中值差法:最小化“拟合值和测试值之差的绝对值的平均值与拟合值和测试值之差的绝对值的中值”之差的绝对值。

▲最小均值法:最小化“拟合值与测试值差值的绝对值的平均值”。

▲最小中值法:最小化“拟合值与测试值差值的绝对值的中值”。

②介绍了以 Microsoft Excel 的 Solver (规划求解) 工具来实现拟合的方法。

③通过变式 $\ln \gamma = \alpha \lambda + \ln A$ 可实现线性拟合, 并推荐了“加权最小二乘法”的拟合方法。

④以浸入高折射率溶液的宏弯测试结果为光纤本征宏弯损耗为参考基准, 使拟合推导值更精确。

⑤给出了从多种拟合方式中选择最优的评判方法, 以特定波长与参考基准的精确度为评判拟合方法的依据。

⑥指出选取测试波长点数时需考虑在滤除高阶模基础上测试点选择越多准确度越高。

3 宏弯损耗本征值的获取方法

3.1 浸入高折射率溶液

基于第 1 节所述原理, 消除震荡的方法可以通过将光纤浸入高折射率溶液(如食品添加剂肉桂酸乙酯(Ethyl Cinnamate), 其折射率为 1.558)中测试。光纤浸入高折射率溶液后的结构折射率示意图如图 5 所示。光纤浸入高折射率溶液后, 在外涂层外的溶液折射率

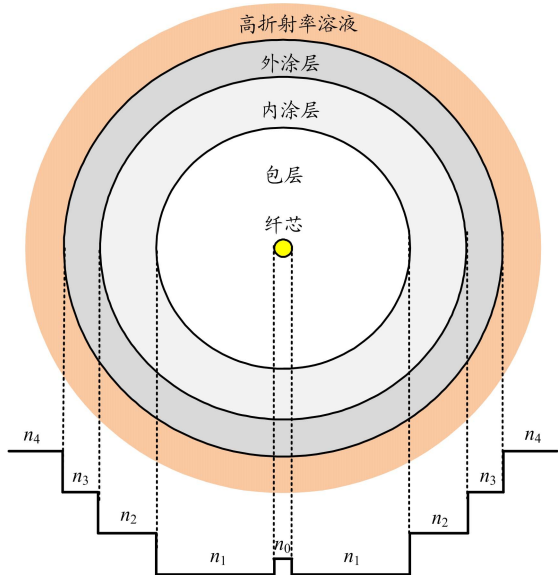


图 5 光纤浸入高折射率后的结构折射率示意图

$n_4 >$ 外涂层的折射率 n_3 , 在外涂层与空气层形成全反射的条件遭到破坏, 由芯层和包层辐射出来的光强被溶液吸收, 光纤的宏弯损耗因“回音壁模式”消失, 从而使宏弯损耗得到准确的波长相关结果。

3.2 空气中与浸入高折射率溶液中测试结果比较

图 6 和图 7 为同一根 G.657.A1 光纤(弯曲半径为 10mm、弯曲 1 圈)分别在正常空气环境中 and 浸入高折射率溶液中连续取样 10 次, 得到的宏弯损耗曲线。

同一根 G.657.A1 光纤连续 10 次取样, 理论上宏弯损耗的结果应相同, 但从图 6 可以看出, 在空气中的测试结果波动非常大, 在 1550nm 和 1625nm 要求的测试波长点, 单次测试无法得到稳定的宏弯损耗结果。

而当将同一根光纤浸入高折射率溶液测试时, 10 次取样得到几乎一致的结果, 宏弯损耗曲线平滑, 干扰现象得到充分的抑制。

我们继续加大样本的测试次数, 同一根 G.657.A1 光纤连续取样 30 次, 在弯曲半径为 10mm、弯曲 1 圈的条件, 分别在空气中和高折射率溶液中进行测试, 1625nm 波长处的测试结果如下: 在空气中的测试

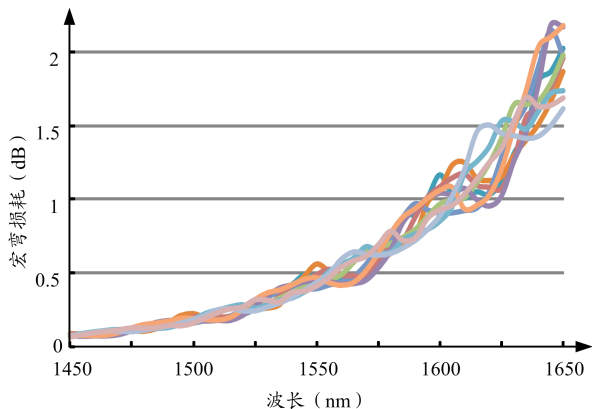


图 6 在正常空气环境中的宏弯测试图谱

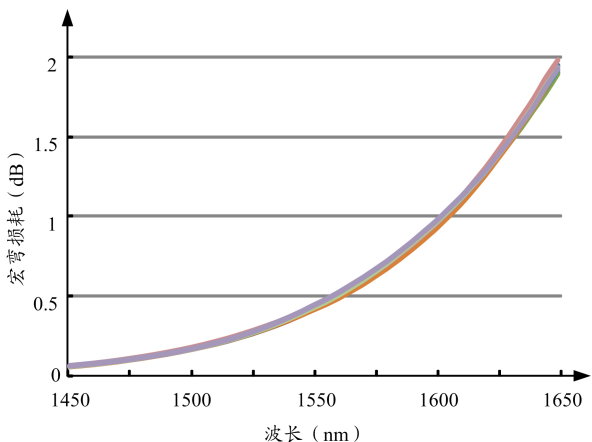


图 7 浸入高折射率溶液的宏弯测试图谱

均值(μ)和标准方差(σ)分别为 1.442dB 和 0.122dB;在高折射率溶液中的 μ 和 σ 分别为 1.433dB 和 0.054dB。可以看出,较高折射率溶液的 μ 值略大;空气中的 σ 大,反映测试结果的离散性非常高;而高折射率溶液中的测试结果的重复性(即稳定性)令人满意。

4 多种拟合方法的比较

4.1 指数拟合

光纤的宏弯损耗表示为:

$$\gamma = Ae^{\alpha\lambda} \quad (1)$$

其中, γ 表示光纤的宏弯损耗,单位为 dB; A 、 α 是由光纤设计决定的系数。由式(1)可见,宏弯损耗是和波长相关的指数函数,可以以式(1)为基础对测试数据进行指数拟合,从而推导出特定波长的宏弯损耗值。再利用规划求解器(Excel Solver)为工具,用第 2 节中新版 IEC 定义的方法进行拟合。

但利用规划求解进行指数拟合存在其不方便实施的缺点:非实时拟合、规划求解的过程相对复杂以及初始值由人为设定且影响最终结果。

4.2 基于线性拟合的加权的最小二乘法

式(1)取自然对数后,可得到线性公式(2),由此可以实现利用最小二乘法进行的线性拟合:

$$\ln\gamma = \alpha\lambda + \ln A \quad (2)$$

最小化实测值与拟合值的平方差的和:

$$\sum \Delta^2 = \sum_{i=1}^n (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2 \quad (3)$$

分别求平方差的和对 $\ln A$ 和 α 的偏导,使其为 0:

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2 \right)}{\partial(\ln A)} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2 \right)}{\partial(\alpha\lambda)} = 0 \quad (5)$$

得到 A 和 α 为:

$$A = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \sum_{i=1}^n \ln\gamma_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln\gamma_i}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2} \right] \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln\gamma_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \ln\gamma_i}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2} \quad (7)$$

其中, n 代表测试的波长数量, i 代表测试波长序号。将式(6)和式(7)得到的系数 A 和 α 代入式(1)中,即为拟合得到的宏弯损耗曲线公式,可实时推导出任意波长的宏弯损耗结果。

取自然对数后的线性拟合非常方便计算,且能在生产中快速应用,但仍存在弊端,因自然对数赋予低波长(小宏弯损耗数值)更高的权重,而通常关注的高波长(1550nm 和 1625nm)因其偏大的宏弯损耗,权重反而较小,高波长拟合相关性降低。为弥补这种缺陷,可通过加权最小二乘法赋予高波长更高的权重来纠正。

以下通过几种不同权重的示例,来介绍加权的最小二乘法在拟合光纤宏弯损耗中的应用:

$$\textcircled{1} \text{ 权重 } \gamma \text{ 最小二乘法: 最小化 } \sum_{i=1}^n \gamma_i (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2;$$

$$\textcircled{2} \text{ 权重 } \gamma^2 \text{ 最小二乘法: 最小化 } \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2;$$

$$\textcircled{3} \text{ 权重 } e^\gamma \text{ 最小二乘法: 最小化 } \sum_{i=1}^n e^{\gamma_i} (\ln\gamma_i - \ln A - \alpha\lambda_i)^2;$$

与最小二乘法解析过程类似,对这 3 种方法的 $\ln A$ 和 α 分别求偏导,使其为 0,可解析出 A 和 α 的值。同样,可实时推导出任意波长的宏弯损耗结果。

4.3 拟合方法的比较

4.3.1 多种拟合方法的谱图

图 8 为 G.657.A1 光纤样本在 10mm 弯曲半径、弯曲 1 圈的情况下,在空气中和浸入高折射率溶液中的测试数据,以及不同拟合方法拟合得到的拟合数据。其中,ln air 是空气环境中的测试结果;XL LS 是最小二乘法(指数拟合);XL M-M 是最小平均值与中值差法;

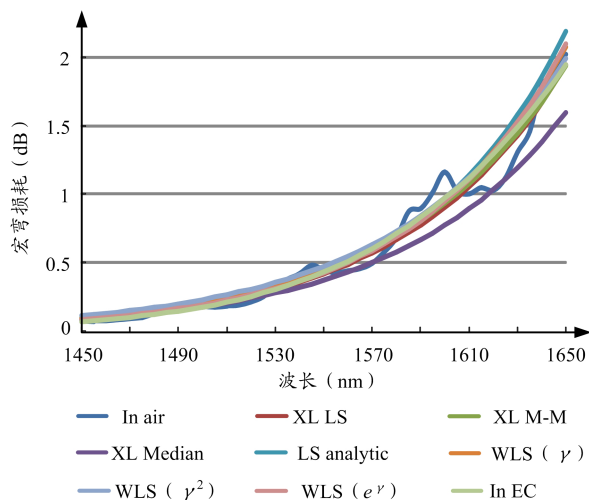


图 8 多种拟合方法的拟合图谱

XL Median 是最小中值法;LS analytic 是最小二乘法(线性解析拟合);WLS(γ)是权重为 γ 的最小二乘法;WLS(γ^2)是权重为 γ^2 的最小二乘法;WLS(e^γ)是权重为 e^γ 的最小二乘法;In EC 是浸入高折射率溶液的测试结果。

从图 8 可以看出,采用不同的拟合方法,得到的结果存在一定的差异,需要用合适的方法评定最优拟合方法。

为了避免单次测试的结果影响评价结果,将 3.2 节描述的同一根 G.657.A1 光纤连续取样 30 次,分别在空气中和浸入高折射率的溶液中进行测试。然后对 30 次空气中的测试结果分别用多种方法进行拟合,对几种拟合方法得到的结果与浸入高折射率溶液中的本征值进行相关性、稳定性和精确度的比较。

4.3.2 相关性水平

表 1 列出了图 8 中 7 种拟合方法在波长为 1550nm 和1625nm 处的宏弯损耗均值,以浸入高折射率的溶液测试结果的平均值作为本征参考,将选定的 7 种拟合方法得到的不同波长下的拟合结果与本征测试结果进行相关性比较。以皮尔森系数 ρ 来进行优劣比较(表 1 中列出的 ρ 值为 30 次取样的平均值)。其中 Rank 为对 ρ 的排序(Rank=1 代表相对较优)。

从表 1 可以看出,7 种拟合方法相关性都非常高,皮尔森系数全部达到 0.99 以上,且相差不大,很难通过相关性系数评定这些拟合方法的优劣。

表 1 多种测试方法的宏弯损耗值与本征宏弯损耗的相关性比较

测试方法	宏弯损耗		ρ	Rank
	波长为 1550nm	波长为 1625nm		
In air	0.449	1.353	0.9999	—
XL LS	0.435	1.350	0.9994	4
XL M-M	0.487	1.421	0.9998	1
XL Median	0.402	1.243	0.9995	3
LS analytic	0.408	1.403	0.9984	7
WLS(γ)	0.424	1.370	0.9990	5
WLS(γ^2)	0.450	1.372	0.9995	2
WLS(e^γ)	0.412	1.379	0.9985	6
In EC	0.445	1.406	1.0000	—

4.3.3 拟合数据稳定性(σ/μ)

本文再以测试均值 μ 和标准方差 σ 的概念为依据,以 σ/μ 代表测试结果值的稳定性(离散性、重复性),将图 8 选定的 7 种拟合方法得到的测试结果的 σ/μ 值进行比较,结果如表 2 所示。其中 Rank 代表对不同拟合方法得到的 1550nm 的 σ/μ 与 1625nm 的 σ/μ 平均值(Mean)的排序(Rank=1 代表相对较优)。

表 2 多种拟合方法宏弯损耗的测试结果的稳定性(σ/μ)

测试方法	σ/μ		Mean (1550/1625)	Rank
	波长为 1550nm	波长为 1625nm		
In air	0.114	0.122	0.118	—
XL LS	0.043	0.043	0.043	5
XL M-M	0.032	0.031	0.032	3
XL Median	0.061	0.065	0.063	7
LS analytic	0.031	0.033	0.032	4
WLS(γ)	0.024	0.037	0.030	1
WLS(γ^2)	0.052	0.041	0.047	6
WLS(e^γ)	0.024	0.037	0.031	2
In EC	0.026	0.027	0.026	—

从表 2 中的排序结果可以看出,权重为 γ 的最小二乘法稳定性最佳,最小中值法稳定性最差。

此方法可排除稳定性相对较差的几种拟合方法,但其余方法拟合稳定性相差不大,不能直接作为最优方法的评定方法,只可作为参考。当不能获得浸入高折射率溶液的测试结果时,也可作为一种替代评定方法。

4.3.4 拟合数据精确度

在测试光纤的宏弯损耗时,我们最关注的是测试的精确度:拟合数据的结果越接近本征值,代表测试精确度越高,也是我们测试希望达到的结果。尤其是我们最关注的波长为 1550nm 和 1625nm 的宏弯数据精确度。在本文中我们可以定义精确度为:

$$\frac{\text{拟合值}-\text{本征值}}{\text{本征值}}\times 100\%$$

(8)

1550nm 和 1625nm 的综合精确度可以定义为:2

个波长的精确度的绝对值的算术平均值(Mean)。7种拟合方法得到的测试结果的精确度比较如表3所示。比较1550nm和1625nm的综合精确度,结果如下:

以权重为 γ^2 的最小二乘法测试精度最高,排名第一,其拟合精度达到1.8%;最小二乘法(指数拟合)排名第二,精确度为3.1%;权重为 γ 的最小二乘法排名第三,精确度为3.6%;最小二乘法(线性解析拟合)排名第四,精确度为4.3%。最小中值法排名最后,精确度只有10.5%。显而易见,不同的拟合方法选择对测试结果影响很大。

因1550nm和1625nm的宏弯损耗是我们最关心的结果,其精确度评定方法可明显区分不同拟合方法的结果差异,可作为最终最优拟合方法的评定依据。

表3 多种拟合方法宏弯损耗测试结果的精确度

测试方法	精确度		Mean (1550/1625)	Rank
	波长为1550nm	波长为1625nm		
In air	0.9%	-3.8%	2.3%	—
XL LS	-2.1%	-4.0%	3.1%	2
XL M-M	9.5%	1.1%	5.3%	6
XL Median	-9.5%	-11.6%	10.5%	7
LS analytic	-8.3%	-0.3%	4.3%	4
WLS(γ)	-4.5%	-2.6%	3.6%	3
WLS(γ^2)	1.3%	-2.4%	1.8%	1
WLS(e^γ)	-7.4%	-1.9%	4.7%	5
In EC	0%	0%	0%	—

5 结束语

测试小弯曲半径下光纤的宏弯损耗时,为了消除“回音壁”而产生的宏弯损耗震荡现象,便于得到更可靠的宏弯测试结果,应该对测试数据进行拟合。为方便计算,本文对宏弯损耗的理论公式 $\gamma=Ae^{\alpha}$,取对数后得到的线性公式进行加权最小二乘法拟合,可以实时获得精确的测试结果,非常方便生产企业实践应用。通过将光纤浸入高折射率匹配溶液中,获得的宏弯损耗测试曲线作为宏弯损耗本征值的参考,以选择适宜的拟合方法。不同厂家的不同种类光纤选用的最优拟合方法可能不一致,选择最优拟合方法时,可以以指定波长(如1550nm和1625nm)下,宏弯损耗测试精确度为评定依据。测试波长范围应不引入高阶模,范围内点数越多越好,感兴趣的读者可自行研究。

参考文献:

- [1] 国际电工委员会. Optical fibres - Part 1-47 Measurement methods and test procedures - Macrobending loss. IEC 60793-1-47 Ed. 3.0 b[S]. 瑞士:国际电工委员会,2009.
- [2] 国际电工委员会. Optical fibres - Part 1-47 Measurement methods and test procedures-Macrobending loss. IEC 60793-1-47 Ed.4.0 b [S]. 瑞士:国际电工委员会,2017.
- [3] NING Siping, BRESSER Onno R, DUAN Linlin, et al. Use of weighted least square fitting methods in macrobending loss tests on single-mode fibres[C]//International Cable & Connectivity Symposium(IWCS), Dec.9-12, 2014, Rhode Island, USA. Rhode Island: IWCS, 2014.
- [4] SHARMA A B, ALANI A H, HALME SJ. Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation [J]. Applied Optics, 1984, 23(19):3297.
- [5] FYLATRA D, LASDON L, WARREN W A. Design and Use of the Microsoft Excel Solver[J]. Interfaces, 1998, 28(5): 29-55.
- [6] WEISSTEIN Eric W. Least Squares Fitting[M/OL]. From MathWorld, A Wolfram Web resource[2010-06-01]. <http://mathworld.wolfram.com/Least-SquaresFitting.html>

《中文核心期刊要目总览》2017年版入编通知(节选)

《光通信技术》主编:

我们谨此郑重通知:依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、统计和分析,以及学科专家评审,贵刊《光通信技术》入编《中文核心期刊要目总览》2017年版(即第8版)之“无线电电子学、电信技术”类的核心期刊。该书由北京大学出版社出版。书中按《中国图书馆分类法》的学科体系,列出了78个学科的核心期刊表,并逐一对核心期刊进行了著录。著录项目包括:题名、并列题名、主办单位、创刊时间、出版周期、学科分类号、ISSN号、CN号、邮发代码、编辑部地址、邮政编码、电话、网址、电子邮箱、内容简介等。

《中文核心期刊要目总览》2017年版编委会

2018年8月