

引用本文: 吴广哲, 齐放, 夏小萌, 等. G.654.E 光纤传输链路的 MPI 研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 99-102.

G.654.E 光纤传输链路的 MPI 研究

吴广哲¹, 齐放², 夏小萌¹, 陈佟¹, 刘亚萍³, 张立岩³,
金炜¹, 张成², 马超¹, 邓黎¹, 周新艳³, 吴俊³, 李伯中^{1*}

(1. 国家电网有限公司 信息通信分公司, 北京 100761; 2. 国网湖北省电力有限公司 信息通信公司, 武汉 430077;

3. 长飞光纤光缆股份有限公司 光纤光缆制备技术国家重点实验室, 武汉 430073)

摘要: G.654.E 光纤应用于传输系统中, 因截止波长大以及与收发端设备的耦合方式, 可能产生多路径串扰(MPI)从而影响传输性能。为了探究 MPI 的影响因素, 通过窄带外腔激光器/光功率计法在 1310 nm 光源波长下分析了光纤类型、光纤长度、打圈条件、连接方式和尾纤类型对 MPI 的影响。实验结果表明: 对于短距离链路, 可通过热熔代替活动连接器以及打圈滤模来减小 MPI; 而对于长距离链路, 尽量避免不同类型光纤的混合连接。

关键词: 光纤传输; G.654.E 光纤; 多路径串扰; 短距离链路; 长距离链路

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0099-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



MPI study of G.654.E fiber in transmission link

WU Guangzhe¹, QI Fang², XIA Xiaomeng¹, CHEN Tong¹, LIU Yaping³, ZHANG Liyan³,
JIN Wei¹, ZHANG Cheng², MA Chao¹, DENG Li¹, ZHOU Xinyan³, WU Jun³, LI Bozhong^{1*}

(1. State Grid Information & Telecommunication Branch, Beijing 100761, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company Information & Telecommunication Branch, Wuhan 430077, China; 3. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, China)

Abstract: G.654.E fiber is used in the transmission system, because of the large cut-off wavelength and the coupling method with the transceiver end equipment, multi-path interference(MPI) may occur, which will affect the transmission performance. In order to explore the influencing factors of MPI, this paper analyzes the effects of fiber type, fiber length, looped condition, connection mode and the tail fiber type on the MPI through the narrow-band external cavity laser/optical power meter method in 1310 nm light source wavelength. The experiment results show that, for short-distance links, it is possible to reduce MPI by means of circular filtering and hot-splicing instead of active connectors, for long-distance links, try to avoid mixed connections of different types of optical fibers.

Key words: fiber transmission, G.654.E fiber, multi-path interference, short-distance links, long-distance links

0 引言

G.654.E 光纤具有更低的损耗和更大的有效面积等特点, 能够有效延长传输距离, 降低非线性效应的影响, 被越来越多地应用于高速率陆地通信网络^[1]。在

G.654.E 光纤通信系统中, 一般使用 1550 nm 波段。因为临近 1530 nm 时, 如果光纤链路较短, 其截止波长通常大于 1310 nm, 难免存在光功率的损失(特别在收发端尾纤较短、连接器多的地方), 而基模的损失可能会导致光功率从 LP_{01} 模式完全耦合到更高阶的 LP_{11} 模式^[2], 模式耦合会产生串扰。另外, 光源或光发射机发出的光波信号在光纤链路传输途中, 有一部分经过了多次的反射、散射或者高阶模式耦合变成了多路传输, 而非直接沿着光纤链路传输, 由于经不同路径传输的各部分光波信号实际传输的距离不同, 它们到达接收器或探测器时会产生相位差, 这也会引起串扰^[3-4]。以上串扰被称为多路径串扰(MPI)^[5]。当前, 采用超长

收稿日期: 2021-12-09。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1800903)资助。

作者简介: 吴广哲(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 工作于国家电网有限公司信息通信分公司, 主要研究方向为电力通信网络建设、超长距光传输、新型光纤光缆和分布式光纤传感技术。

* 通信作者: 李伯中(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力信息通信的研究设计。



吴广哲,齐放,夏小萌,等:G.654.E 光纤传输链路的 MPI 研究

跨段传输技术已成为电力通信网发展的必然趋势,因此研究 G.654.E 光纤的 MPI 问题能为后续电力通信工程应用提供参考。本文通过实验分析光纤类型、光纤长度、打圈条件、连接方式以及尾纤类型对 G.654.E 光纤 MPI 的影响。

1 实验装置

图 1 为 MPI 测试链路图,该链路包括 O 波段窄线宽光源、扰偏器、G.652 尾纤和功率计,待测光纤通过熔接的方式接入。图 1 和目前机房的真实连接状态比较接近,该测试方法参考窄带外腔激光器/光功率计法^[6]。如果待测光纤带有连接器,也可以将 G.652 尾纤更换为带连接器的跳线与待测光纤连接。

MPI(单位为 dB)计算公式^[7-8]如下:

$$MPI=20\lg\left(\frac{10^{PR/20}-1}{10^{PR/20}+1}\right) \quad (1)$$

其中,PR 是系统一定时间内在某一个波长或波长范围接收最大功率和最小功率的差值。MPI 越小,说明多路经串扰引起的功率波动越小,对系统影响越小。由于 C+L 波段的 MPI 比 O 波段 MPI 更小,本文使用的光源波长为 1310 nm,光纤长度较短的 G.654.E 光纤在传输 1310 nm 的光信号时存在高阶模式。

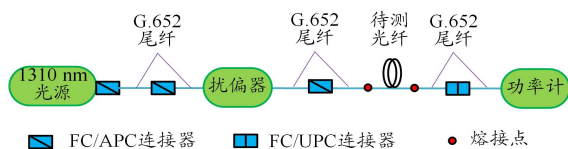


图 1 MPI 测试链路图

2 结果与分析

2.1 光纤类型、光纤长度对 MPI 的影响

为探讨不同光纤类型、光纤长度对 MPI 的影响,本文选取了 4 种光纤类型;3 种模场直径(MFD)分别为 12.1 μm、12.5 μm 和 12.9 μm 的 G.654.E 光纤以及 1 种 MFD 为 9.2 μm 的 G.652.D 光纤,这 4 种光纤的具体信息如表 1 所示。测试结果如图 2 所示。结合表 1 和图 2 可以看出,当工作波长为 1310 nm 时,G.652.D 一直处于单模工作状态,这是因为截止波长低于工作波长时,光纤中只存在基模 LP₀₁。相比 G.652.D 光纤,G.654.E 光纤更容易产生 MPI 现象,原因是截止波长高于工作波长时,光纤中会存在高阶模 LP₁₁ 传输。另外,由于高阶模 LP₁₁ 在芯层边缘传输时衰减较

表 1 待测光纤样品信息

被测样品	光纤类型	2 m 光纤 截止波长/nm	22 m 光缆 截止波长/nm	3 km 光缆 截止波长/nm	MFD/μm
A	G.654.E	1412	1346	1267	12.1
B	G.654.E	1527	1457	1313	12.5
C	G.654.E	1556	1466	1378	12.9
D	G.652.D	1314	1232	1172	9.2

注:G.654.E、G.652.D 光纤的工作波长分别为 1550 nm、1310 nm。

大,光纤长度越长传输后剩下的高阶模就越少,因此随着 G.654.E 光纤样品长度变长,其 MPI 明显减弱。

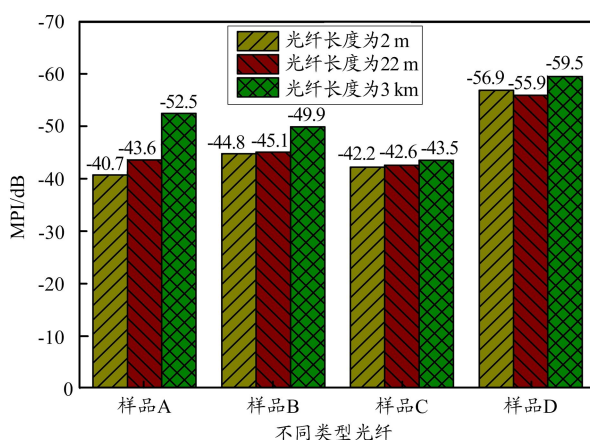


图 2 不同光纤类型及光纤长度对 MPI 的影响

2.2 打圈条件对 MPI 的影响

当待测光纤中存在高阶模时,打圈产生宏弯是常用的滤模方式。本文在 22 m 被测样品 B 上分别打不同直径的圈(80 mm 打 2 圈、60 mm 打 2 圈、30 mm 打 2 圈),使其产生宏弯,测试此时的 MPI 大小,测试结果如图 3 所示。可以看出,通过打圈的方式可以有效减小 MPI,这是因为在光纤平直时,高阶模 LP₁₁ 还是传

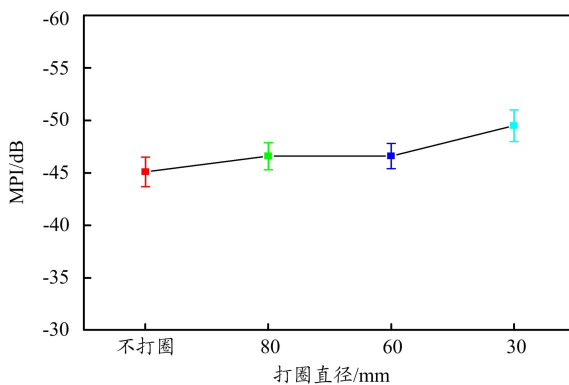


图 3 宏弯对 MPI 的影响

导模,在光纤弯曲时,高阶模 LP_{11} 就转化为漏泄模,进而减小了高阶模的串扰。另外,光纤弯曲越严重,这种模式转换得越好。

2.3 连接方式对 MPI 的影响

为了判断熔接点对 MPI 的影响,熔接若干段 2 m 长的被测样品 B 并逐渐增加熔接点个数,测试并记录对应的 MPI,测试结果如图 4 所示。可以看出,随着熔点个数的增加,MPI 也逐渐增加。这是因为熔接点可能产生的模式耦合或散射会导致 MPI 增大。另外,测试发现在熔接点数量相同时,长光纤的 MPI 比短光纤的

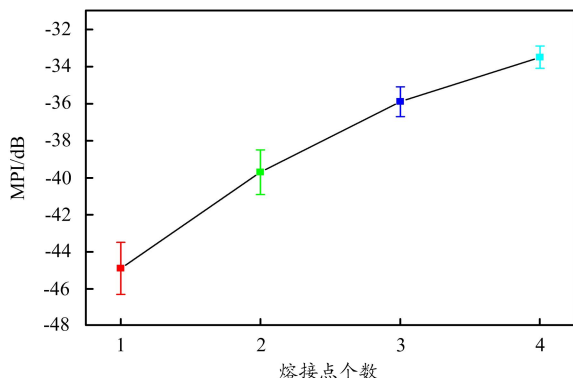


图4 熔接点对 MPI 大小的影响

低,主要原因是截止波长下移,模式串扰降低。

在实际应用中,连线方式除熔接外,还会采用活动连接器,此时,接头处的模式耦合或反射会引起 MPI。本文将 2 m 被测样品 B 与尾纤(G.654.E)一端的连接器熔接,并用活动连接器连接尾纤另一端,测试时更换连接器类型,或者加入跳线增加连接器个数,分别测试其 MPI,结果如图 5 所示。可以看出,活动连接器会引起 MPI 增大,且带角度的连接器(FC/APC)比不带角度的连接器(FC/UPC)引起的 MPI 小,说明端面反射大的 UPC 类型活动连接器引入的 MPI 更大;增加连接器个数,MPI 明显增大;9 km+2 个 FC/UPC 表示样品 A、B、C 光纤各 3 km 通过 2 个 FC/UPC 连接器连

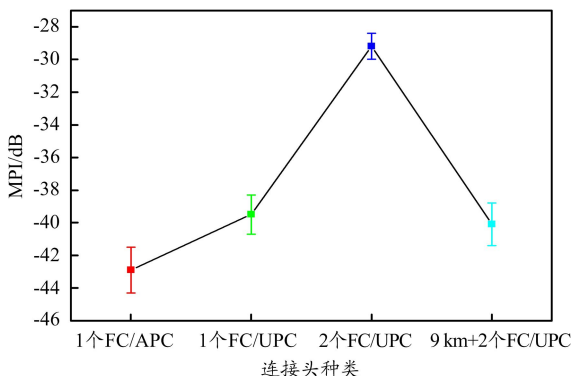


图5 连接器对 MPI 的影响

接,与短光纤链路(具有同等连接器类型和数量的前提下)相比,长光纤链路的 MPI 更低,这同样是截止波长下移的缘故。

2.4 尾纤类型对 MPI 的影响

由于本文所用扰偏器自带 G.652 尾纤,无法更换,若要测试不同尾纤类型对 MPI 的影响,只能通过以下连接方式:发射端 G.652 尾纤与 G.654.E 尾纤使用 FC/APC 连接器耦合,接收端 G.654.E 尾纤与功率计直接耦合,具体测试链路如图 6 所示。本文设 6 种条件如下:①4 m 样品 B 光纤+1 个熔接点;②4 m 样品 B 光纤+1 个 FC/APC 连接器;③4 m 样品 B 光纤+1 个 FC/UPC 连接器;④4 m 样品 B 光纤+2 个 FC/UPC 连接器;⑤22 m 样品 B 光纤;⑥样品 A、B、C 光纤各 3 km 通过 2 个 FC/UPC 连接器连接。测试得到的结果如图 7 所示。可以看出,使用 G.654.E 尾纤时,短段光纤 MPI 比使用 G.652 尾纤小 10~13 dB,这是因为短段光纤的截止波长长,模式串扰占主导,因此 MPI 减小;对于长段光纤(条件 6),使用 2 种尾纤的测试结果基本一致,这是因为长段光纤的截止波长向短波长方向移动,连接点光反射占主导,因此 MPI 没有明显差异。

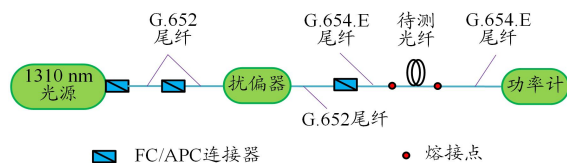


图6 MPI 测试链路(G.654.E 尾纤)

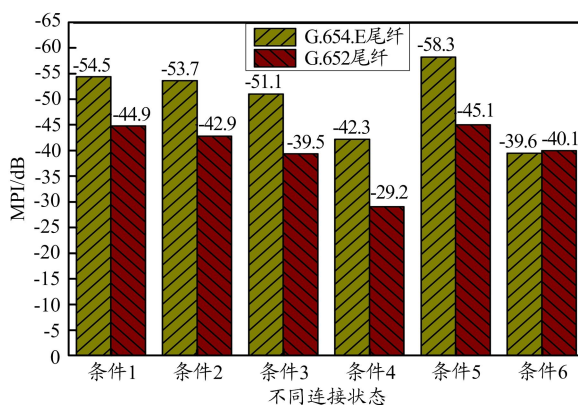


图7 不同尾纤 MPI 的对比

如果将接收端 G.654.E 尾纤再通过一条 G.652 跳线与功率计耦合,测试链路如图 8 所示,测试结果如表 2 所示。

对比图 7、表 2 中的数据可以看出,增加 G.652 跳线后,22 m 短段光纤的 MPI 明显增大,9 km 长段光纤

吴广哲,齐放,夏小萌,等;G.654.E 光纤传输链路的 MPI 研究

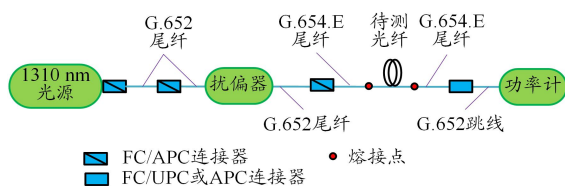


图8 MPI测试链路(G.654.E尾纤,接收端通过G.652跳线与功率计耦合)

表2 接收端采用G.654.E尾纤,且接收端通过G.652跳线与功率计耦合的MPI测试结果

被测样品	长度/m	活动连接器类型	MPI/dB
B	22	FC/APC	-39.7
B	22	FC/UPC	-34.4
A+B+C	9000	FC/UPC	-37.8

的MPI略微增大。主要原因是G.654.E光纤与G.652光纤的模场差异大,如果链路中有这2种光纤混接的连接点,特别是活动连接点,其端面反射、散射或模式耦合较为严重,因此应尽量减少G.654.E与G.652的连接点数量。

3 结束语

本文针对G.654.E光纤应用于传输系统中产生MPI的问题,通过一系列实验对不同影响因素进行了研究。实验结果表明:

①对于短距离链路,其MPI虽然比长距离链路大,但是即使在远小于截止波长的1310 nm处,MPI也小于-30 dB,在不产生较大弯曲损耗的前提下,可通过打圈的方式滤模减小MPI。此外,无论是热熔接点还是活动连接点,都会引起短距离链路的MPI增大,但对于同种光纤的连接点而言,热熔节点对MPI的影响最小,带角度的活动连接器次之,不带角度的活动连

接器影响最大。

②对于长距离链路,其截止波长向短波长移动,因此模式串扰引起的MPI减小,改变连接方式(熔接或活动连接器)对传输性能的影响很小(链路整体MPI在1310 nm处都低于-35 dB)。但不同类型的光纤混合连接会引起长距离链路的MPI劣化,建议全线路采用G.654.E连接。

参考文献:

- [1] MLEJNEK M, DOWNIE J D, O'SULLIVAN M. Examination of potential terrestrial system effects from Raman pumps below cable cutoff in G.654.E fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4282-4294.
- [2] DOWNIE J D, HURLEY J, DEPEDRO H, et al. Investigation of potential MPI effects on supervisory channel transmission below cable cut-off in G.654 fibres[C]//IEEE. Proceedings of 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communications. Dusseldorf: IEEE, 2016: 1166-1168.
- [3] NAKAZAWA M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73: 1175-1180.
- [4] HARTOG A, GOLD M. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(2): 76-82.
- [5] DOWNIE J D, JASON H, HECTOR D P, et al. Measurements and modeling of multipath interference at wavelengths below cable cut-off in a G654 optical fiber span[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9305-9311.
- [6] ITU-T G.650.1. Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable, ITU-T G 650.1—2010[S]. [S.1.]: ITU, 2010.
- [7] RAMACHANDRAN S, NICHOLSON J W, GHALMI S, et al. Measurement of multipath interference in the coherent crosstalk regime [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(8): 1171-1173.
- [8] DOWNIE J D, HURLEY J, ROUDAS I, et al. MPI Measurements of quasi-single-mode fibers [C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE Photonics Conference (IPC). Reston: IEEE, 2015: 273-274.