

陆地 G.654.E 光纤在喇曼放大系统中的实际应用考虑

刘丽娜¹,张磊²,徐健³,周红燕²,孙淑娟³,吴俊²,罗杰²

(1.中国电力工程顾问集团 中南电力设计院有限公司,武汉 430071;

2. 光纤光缆制备技术国家重点实验室 长飞光纤光缆股份有限公司,武汉 430073;3.武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205)

摘要:针对 G.654.E 光纤的截止波长大于喇曼泵浦波长是否对系统性能造成影响的问题,实际测试和理论分析了 G.654.E 光纤的喇曼增益系数,并通过对实际喇曼放大系统,验证了 G.654.E 光纤较长的截止波长并不会对喇曼增益造成明显影响。相比于 G.652.D, G.654.E 光纤具有超低损耗、大有效面积及低的自熔熔接损耗,不仅能提升系统光信噪比(OSNR)且具有更佳的综合系统性能,可适用于陆地喇曼放大系统。

关键词:G.654.E 光纤;光缆截止波长;喇曼增益系数;喇曼放大

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)06-0059-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Practical application consideration of land G.654.E fiber in Raman amplification system

LIU Lina¹, ZHANG Lei², XU Jian³, ZHOU Hongyan², SUN Shujuan³, WU Jun², LUO Jie²

(1. Central Southern Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China;

2. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, China; 3. Wuhan Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: Aiming at the problem whether the cut-off wavelength of G.654.E fiber is larger than the Raman pump wavelength, and whether it will affect the system performance, the Raman gain coefficient of G.654.E fiber is measured and theoretically analyzed. The long cut-off wavelength of G.654.E fiber has no obvious effect on Raman gain through the practical Raman amplification system. Compared with G.652.D, G.654.E fiber has ultra-low loss, large effective area and low self-fusion loss. It can not only improve the optical signal noise ratio(OSNR) of the system, but also have better integrated system performance. It can be applied to land Raman amplification system.

Key words: G.654.E fiber; optical cable cut-off wavelength; Raman gain coefficient; Raman amplification

0 引言

近几年来,高清数字视频、移动互联网、物联网和大数据中心等宽带业务的快速发展,光传输网络对通信传输容量的需求呈指数级增长。为了支持光纤传输系统实现长距离、大容量传输,光纤厂家研发制备出了具有超低损耗、大有效面积的 G.654.E 光纤。

收稿日期:2019-04-18。

作者简介:刘丽娜(1975-),女,高级工程师。主要从事信息通信设计及其管理工作。1997~2010年,完成大量电力系统信息、通信方面规划、设计、专题研究和编制工作。曾多次获得电力行业优秀工程设计奖、全国优秀工程勘测设计奖、优秀工程咨询成果奖以及全国电力行业企业管理创新成果奖。



G.654.E 光纤能够提高光纤传输系统的光信噪比(OSNR),成为长距离、大容量光纤传输系统使用的最佳光纤。

超低衰减和大有效面积的设计赋予 G.654.E 光纤高的 OSNR 性能。超低衰减减小了整个光纤链路的光功率损耗,延长了光纤传输系统的光信号传输距离;增大光纤有效面积,可以降低光纤非线性效应,从而提高了入纤光功率和系统 OSNR。为了进一步推广 G.654.E 光纤在长距离、大容量光纤传输系统的使用,2016 年 11 月,ITU-T 正式发布 ITU-G.654《截止波长单模光纤和光缆特性》(第 10 版)。该建议将 G.654 光纤细分为 A、B、C、D 和 E 5 个子类。而 G.654.E 光纤具有高的 OSNR,可支持陆地高速率(100Gb/s 及超

100Gb/s)、长距离数字相干传输系统。

在陆地长距离传输系统中,分布式喇曼放大器经常用来辅助掺铒光纤放大器(EDFA)产生信号增益^[1]以提高系统的 OSNR。由于喇曼泵浦波长在 1450nm 附近,而 G.654.E 光纤规定的截止波长为 $\lambda_c \leq 1530\text{nm}$,因此,当 G.654.E 光纤被应用在分布式喇曼放大系统中时,人们考虑到如果一部分泵浦光以高阶模传输,喇曼增益系数可能会降低,且增益随着时间而波动,最终影响系统综合性能。本文通过对喇曼增益系数的理论分析和实际测试,验证即使喇曼光纤放大器的泵浦波长低于 G.654.E 光纤的光缆截止波长,也不会对喇曼增益造成明显影响;同时验证 G.654.E 光纤不仅能提升系统的 OSNR,而且能赋予系统更佳的综合系统性能,特别适合陆地高速率、长距离相干光纤传输系统使用。

1 喇曼增益系数的理论分析与实际测试

喇曼光纤放大器泵浦方式常采用分布式泵浦,即分布式喇曼放大。分布式喇曼放大指传输的光信号在光纤中因受激喇曼散射过程产生增益的过程。本文通过采用开关增益法测试光纤的喇曼增益系数,其后向泵浦受激喇曼散射(SRS)增益系数测试实验装置如图 1 所示。

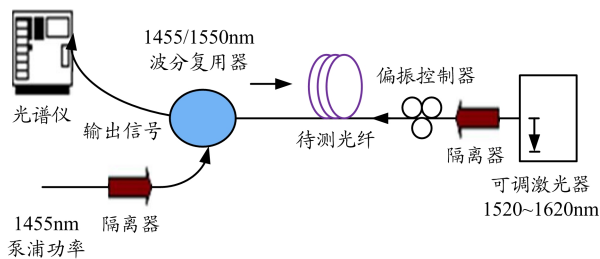


图 1 光纤 SRS 增益系数测试实验平台

$P_{S,off}(L)$ 和 $P_{S,on}(L)$ 分别为泵浦光关闭和开启时,光谱仪(OSA)测得的信号光的功率。那么,信号光的实际喇曼增益 G 为:

$$G=10\log_{10}\left(\frac{P_{S,on}(L)}{P_{S,off}(L)}\right)=4.434g_R\frac{P_0}{A_{eff}}L_{eff} \quad (1)$$

则 SRS 增益系数 $\frac{g_R}{A_{eff}}$ 为:

$$\frac{g_R}{A_{eff}}=\frac{G}{4.434P_0L_{eff}} \quad (2)$$

其中, L 是光纤实际长度; P_0 是入纤光功率; A_{eff} 是光纤的有效面积; L_{eff} 是光纤的有效长度; g_R 是喇曼系数。

本文将 3 种被测光纤试样的关键性能参数进行比较如表 1 所示。通过表 1 的测试结果可以得到 2 个结论:

①相比于 G.652.D,G.654.E 光纤具有更低的喇曼增益系数 g_R/A_{eff} ,在波长为 1550nm 时 G.652.D 的 59% (0.226/0.38)。G.654.E 光纤因其芯层是纯硅芯结构,其喇曼系数 g_R 是芯层掺 Ge 结构 G.652.D 的 90% ($2.9 \times 10^{-14}/3.2 \times 10^{-14}$)。另外,G.654.E 光纤是 G.652.D 有效面积的 152% (125/82)。因此, G.654.E 光纤具有较低的喇曼增益系数 g_R 和较大的有效面积 A_{eff} ,二者比例刚好是 59% (90%/152%),且并未观察到因高阶模式的原因导致喇曼增益恶化。因此,G.654.E 光纤的喇曼增益可以认为只与芯层材料以及基模 LP_{01} 的有效面积 A_{eff} 相关^[2,3]。

②为比较不同截止波长的 G.654.E 光纤的喇曼增益效果,我们选取与其它参数基本一致仅截止波长不同 (1439nm&1531nm) 的具有同样大小有效面积的 2 种 G.654.E 光纤进行测试,测试结果如图 2 所示。可以看出,不论泵浦波长低于或高于 G.654.E 光纤的截止波长,喇曼增益系数仍然基本一致,即截止波长的大小对喇曼增益系数并无明显影响。

表 1 被测光纤试样的性能参数

特性	单位	被测光纤性能参数		
		G.654.E 试样 1	G.654.E 试样 2	G.652.D
衰减系数 @1550nm	dB/km	0.168	0.169	0.187
有效面积典型 @1550nm	μm^2	125	125	80
光缆截止波长	nm	1439	1531	1180
喇曼系数 g_R	m/W	2.9×10^{-14}	2.9×10^{-14}	3.2×10^{-14}

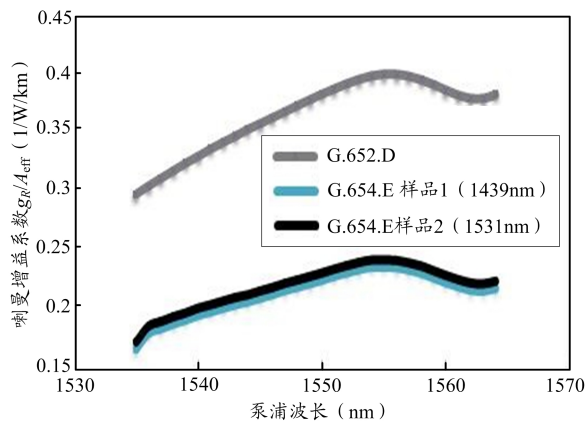


图 2 G.654.E 和 G.652.D 光纤在 C 波段的喇曼增益谱

2 G.654.E 光纤提升系统 OSNR 的性能研究

2.1 实验装置

后向喇曼放大系统实验装置如图 3 所示。单载波光信号速率为 200Gb/s,调制方式是 PM-16QAM,采用软判决前向纠错编码和 15%的纠错开销,可以纠错 2.4×10^{-2} 量级的误码率。光信号经过 EDFA 放大后,光衰减器用来调节 150km 被测光纤的跨段损耗。后向喇曼光纤放大器 (RFA) 使用的 2 个泵浦波长分别为 146x nm 和 147x nm,跨段的输出端用光谱仪来监测其的 OSNR。

2.2 入纤功率的研究

在测试系统无喇曼放大时,以背靠背 OSNR 为基准,考虑 0.5dB 的功率代价下,G.652.D 和 G.654.E 光纤的最佳入纤光功率分别为 7dBm 和 10dBm,如图 4(a)所示;入纤光功率主要是由光纤有效面积决定,最佳入纤功率下跨段损耗的理论计算和实验实测值如图 4(b)所示。从图 4(b)可以看出:①2 种光纤的理论和实测基本相符;②在各自的最佳入纤光功率下,G.654.E 光纤可以允许的系统跨段损耗更高。

2.3 喇曼增益效率的影响和 OSNR 性能比较

当喇曼光纤放大器的泵浦功率固定为 600mW,接收端的 Q 值和 OSNR 如图 5 (a)所示;喇曼增益和系

统跨段损耗如图 5 (b)所示。可以看出,G.654.E 光纤的入纤光功率比 G.652.D 光纤高 3dB,其喇曼增益仅 9.61dB,比 G.652.D 光纤低 3.57dB,但是最终的接收端 OSNR 比 G.652.D 光纤高 1.16dB。因此,即使 G.654.E 光纤因其有效面积增大在一定程度上降低了其喇曼增益效果,但在喇曼放大系统中,系统性能是光纤衰减、有效面积和喇曼增益三者折中的综合结果,而 G.654.E 光纤仍然表现出其性能优势。在工程光纤通信系统设计中,一旦实际系统中的喇曼放大系统装置已铺设且泵浦功率固定,将 G.652.D 光纤更换为 G.654.E 光纤就可以达到提升系统性能的目的。这个实验结果对采用新型光纤提升系统性能的工程设计具有一定的参考价值。

为了更进一步挖掘 G.654.E 光纤的极限传输性能,在实验中,本文通过选用不同光纤来调整所需喇曼泵浦功率,以便获得同样的接收端 OSNR 和误码率。所需提供的泵浦功率如图 6 (a)所示,G.654.E 光纤需要最高的泵浦功率;喇曼增益和跨段损耗如图 6(b)所示。G.654.E 的跨段损耗值比 G.652.D 光纤高 2.36dB,若将跨段损耗换算成跨段长度的话,G.654.E 光纤所能支持的跨段长度比 G.652.D 光纤可提高约 26%。

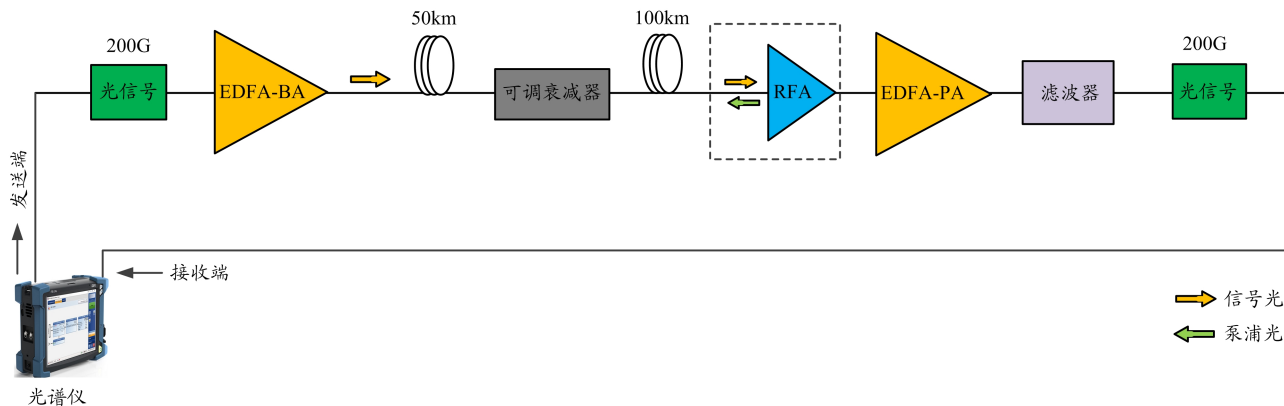


图 3 RFA 实验装置示意图

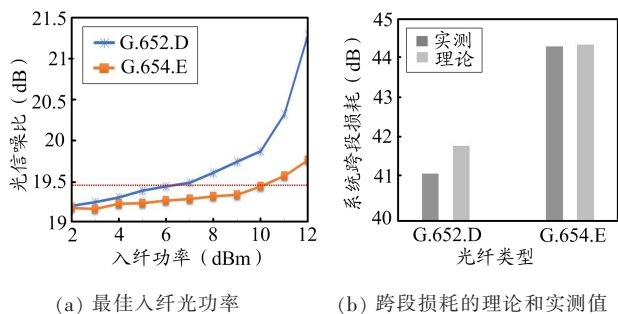


图 4 G.654.E 光纤和 G.652.D 光纤入纤光功率性能对比

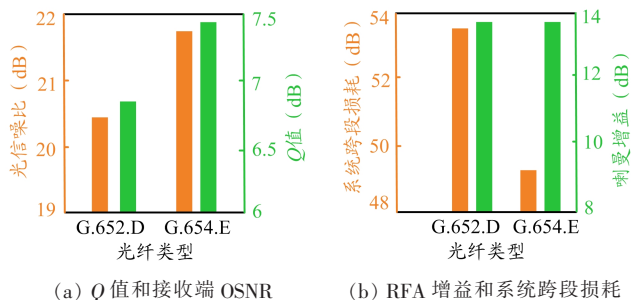


图 5 泵浦功率一定时, G.654.E 和 G.652.D 的系统性能比较

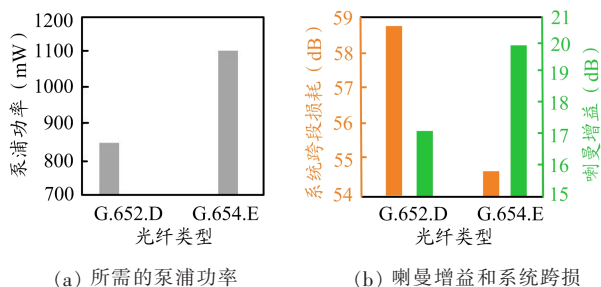


图6 G.654.E 光纤和 G.652.光纤的系统极限传输性能比较

综上所述,本文从理论计算和实验测试 2 个方面对 200Gb/s PM-16QAM 高速光信号在 G.652.D 光纤和 G.654.E 光纤中的传输性能进行验证。G.654.E 光纤可以提高入纤功率约 3dB,且在固定泵浦功率的实验中,尽管 G.654.E 光纤增大的有效面积降低了喇曼增益,但是其提高了入纤光功率和低损耗性能,从而提高了系统 OSNR 并达到了最好的整体系统性能。在极限传输条件下,G.654.E 光纤虽然需要较高的泵浦功率,但是它最终能延长跨段长度 26%。因此,要评价新型光纤在喇曼放大系统应用中的系统性能,应该综合考虑光纤衰减、光纤有效面积和喇曼增益 3 个方面。

2.4 熔接性能

超低衰减大有效面积的 G.654.E 光纤作为下一代高速率长距离系统传输光纤,光纤的熔接性能是一个非常关键的参数。G.654.E 光纤的熔接主要包括 2 个方面:一是光纤链路中 G.654.E 光纤的自熔;二是 G.654.E 光纤与 G.652 光纤的互熔。G.654.E 光纤自熔损耗的平均值为 0.015dB,与 G.652 光纤自熔性能相近甚至更优,若在光纤链路中存在大量熔接点,G.654.E 光纤低的自熔损耗就会凸显其优势。G.654.E 和 G.652 的互熔发生在跨段的两端与终端设备的尾纤(G.652.D)熔接,熔接损耗平均值约 0.15dB。但由于只有链路两端才需要和 G.652 光纤熔接形成 2 个接头,光纤链路的总损耗增加不大,因此对系统总性能的影响非常小。另外,当喇曼的泵浦波长小于光纤的截止波长时,在传输过程中可能会在熔接点激发高阶模式(主要是 LP11 模),且 LP01 模与 LP11 模耦合产生的多路径干涉(MPI)可能对喇曼泵浦效率产生影响。文献[4]详细分析了 G.654.E 光纤的 MPI 效应,假设在最

极端情况下熔接带来的损耗全部转成 LP11 模的能量,并与 LP01 模耦合,此时带来的附加衰减小于 0.005dB/km。等效光纤衰减增加不到 3%。在实际情况下,LP11 模式的转化以及与 LP01 模的耦合效率都不会达到 100%。因此,等效光纤总衰减更低,对喇曼泵浦效率的影响基本可忽略不计。

3 结束语

本文对陆地用 G.654.E 光纤应用在喇曼放大系统的实际问题进行了研究。验证了在喇曼放大系统中,即使泵浦波长低于 G.654.E 截止波长,对系统稳定的喇曼放大也基本没有影响,同时从理论计算和实验测试的角度对喇曼放大系统中 G.654.E 对提升系统 OSNR 的性能进行了论证。喇曼放大系统性能是光纤衰减、光纤有效面积和喇曼增益三者的综合体现。G.654.E 光纤尽管其大有效面积在一定程度上降低了喇曼增益,但其综合系统性能优于常规 G.652.D 光纤。本文的研究成果对陆地高速率、长距离数字相干传输系统采用 G.654.E 光纤的实际工程建设具有一定的参考价值;也为利用 G.654.E 光纤构建超高速率、超长距离的超大容量的光纤传输系统提供必要理论分析和实验数据的支撑。

参考文献:

- [1] DOWNIE J D, HURLEY J, ZHU X, et al. Comparison of optical fiber types for all-raman systems [C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition. March 6-10, 2011, Los Angeles, United States. Los Angeles: OSA and IEEE, 2011.
- [2] YAMAMOTO Y, HASEGAWA T, AOSHIMA Y, et al. Practical consideration on Raman amplification for G.654.E fibers [C]// IWCS 2018 International Cable & Connectivity Symposium. October 14 - 17, 2018, Providence, USA. Providence: IWCS Symposium Committee, 2018.
- [3] YAMAMOTO Y, Practical Aspects of G.654.E Fibers for Terrestrial Long Haul Transmission [C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition. March 3-7, 2019, San Diego, USA. San Diego: OSA and IEEE, 2019.
- [4] DOWNIE J D, HURLEY J, DEPEDRO H, et al. Measurements and modeling of multipath interference at wavelengths below cable cut-off in a G. 654 optical fiber span [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9305-9311.

2019 年光通信技术征订启事

月刊

邮发代号: 48-126
定 价: 16 元/册;192 元/年
订 阅: 全国各地邮局