

G.654.E 光纤长距离传输性能研究

Study on Long Distance Transmission Performance of G.654.E Fiber

Sergejs Makovejs¹, John Downie¹, 董浩¹, Michael Mlejnek¹, 陈皓² (1. 康宁公司, 纽约州康宁 14831; 2. 康宁光通信中国, 上海 200233)

Sergejs Makovejs¹, John Downie¹, Dong Hao¹, Michael Mlejnek¹, Chen Hao² (1. Corning Incorporated, Corning NY 14831, USA; 2. Corning Optical Communication China, Shanghai 200233, China)

摘要:

对 ITU-T G.654E 光纤的传输性能进行了研究,总结了该类型光纤的一些新的特性。研究表明, G.654.E 光纤的品质因子(FOM——Figure of merit)比常规 G.652 光纤高 3 dB 左右,实际 400G 系统测试结果显示 G.654.E 光纤比 G.652 光纤的传输距离提升 60% 以上。同时也讨论了配有拉曼放大器的传输系统工作在 G.654.E 光纤(泵浦光工作在光纤截止波长以下)时出现的新特性。

关键词:

G.654.E 光纤; 400G; 品质因子; 拉曼放大; 截止波长
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2018.06.003
中图分类号: TN929.11
文献标识码: A
文章编号: 1007-3043(2018)06-0010-04

Abstract:

It studies the transmission properties of ITU-T G.654.E and summarizes some new characteristics of this type of fiber. The results shows that G.654.E fiber can provide about 3 dB improvement in figure of merit relative to G.652 fiber. The actual test results of the 400G system show that the transmission distance of G.654.E fiber is more than 60% higher than that of G.652 fiber. At the same time, the new characteristics of the transmission system with a Raman amplifier operating at G.654.E fiber (below the cut-off wavelength of the fiber) are discussed.

Keywords:

G.654.E fiber; 400G; FOM; Raman amplifier; Cut-off wavelength

引用格式: Sergejs Makovejs, John Downie, 董浩, 等. G.654.E 光纤长距离传输性能研究[J]. 邮电设计技术, 2018(6): 10-13.

1 概述

随着新的应用(如虚拟现实、物联网等)不断兴起, IP 流量在未来 5 年预计增加 3 倍^[1], 全球的网络运营商都面临着网络容量急速增加的挑战。增加网络容量的有效方式是提高频谱效率, 如通过高阶调制或者提高单波的波特率等方式, 将现有 100G 网络升级到 200G 甚至更高速率的网络。

然而, 提升频谱效率的这些方式都会导致系统对光信噪比(OSNR)更高的要求, 从而降低系统的传输

距离。100G 的陆地通信系统传输上千千米的传输相对容易实现, 但在 200G 或者更高速率, 最大传输距离只有几百千米, 这极大地限制了长途传输网络的性能。当运营商的网络向更大容量升级时, 采用常规方式需要使用更多的中继站或拉曼放大器, 这些方式将导致额外高额的投资。

因此业界开始探讨使用更具性价比的新型光纤技术, 来支持高速传输系统。兼具超低损耗和大有效面积特性的光纤可以支持高速系统传输更远距离和更长跨段, 2016 年 ITU-T 讨论通过了 G.654.E 标准。这种新型光纤与常规 G.652 光纤相比, 有效面积更大, 截止波长更长(1 530 nm), 对 C 波段的传输性能进行

收稿日期: 2018-05-17

了优化,也具有支持未来L波段的能力。本文将结合400G的传输技术和放大技术,重点探讨G.654.E光纤应用于这些传输技术时的工作性能。

2 G.654.E 光纤传输性能研究

为了研究G.654.E光纤的传输性能,采用康宁公司满足该标准的TXF光纤作为研究对象,该光纤在1550 nm的典型衰减是0.168 dB/km,典型的有效面积为 $125\ \mu\text{m}^2$,色散为 $21.2\ \text{ps/nm/km}$ 。最大截止波长为1520 nm,不仅支持传输系统在C波段工作,也具有支持未来系统在L波段上传输的能力。另外该光纤属于硅芯光纤,其非线性折射率系数(n_2)比掺锗光纤要低,这也进一步改善了光纤的非线性特性,有助于传输性能的提高。

本文用品质因子(FOM)来评估G.654.E光纤相对于G.652光纤的传输性能差异,用于比较的G.652光纤包括康宁的低损耗G.652.D SMF-28 Ultra光纤(1550 nm的典型衰减是0.18 dB/km)和常规G.652.D SMF-28e+光纤(1550 nm的典型衰减是0.19 dB/km)。式(1)包含了影响传输性能的4个关键的光纤参数:衰减、有效面积、色散和非线性折射率系数 n_2 ^[2]:

$$\text{FOM}(\text{dB}) = \frac{2}{3}10\log\left[\frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{eff,ref}}}\frac{n_2}{n_{2,\text{ref}}}\right] - \frac{2}{3}(\alpha_{\text{dB}} - \alpha_{\text{dB,ref}})L - \frac{1}{3}10\log\left[\frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff,ref}}}\right] + \frac{1}{3}10\log\left[\frac{D}{D_{\text{ref}}}\right] \quad (1)$$

使用FOM来评估光纤传输性能的优势在于:它不依赖于具体传输设备的性能(不同的放大器噪声系数)、型号(不同厂家的设备)、实际工程设计的规则(系统冗余数值)。它比较的是2种光纤传输性能的相对值,而不是某一具体的性能指标。从FOM的定义也可以看出,它等效于不同光纤对传输系统Q因子的差异。

图1显示了G.654.E光纤和低损耗单模光纤在不同跨段长度时,与常规G.652.D光纤比较后FOM的差异。图1上面绿色部分代表G.654.E光纤,下面红色部分是低损耗G.652.D光纤,以常规光纤作为基准(横坐标)。图1表明,系统的跨段长度越大,G.654.E光纤的传输性能越好,因为更长跨距下,光纤衰减对系统性能的影响更显著^[3]。本文研究了长度为60~120 km的跨段,G.654.E光纤相对于常规G.652.D光纤FOM有2.4~3.2 dB的优势,相对于低损耗G.652.D光纤FOM有2.2~2.8 dB的优势。

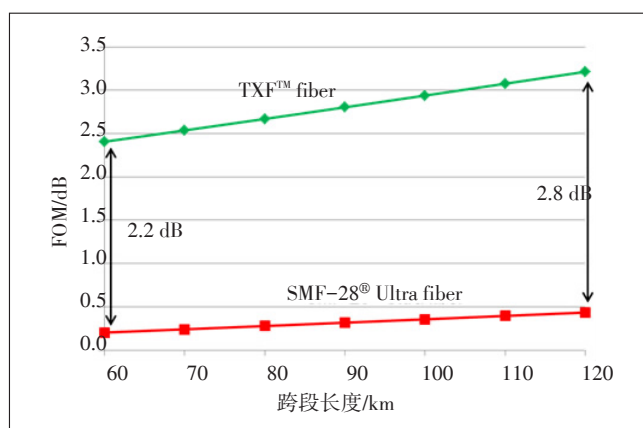


图1 G.654E、低损耗G.652D与常规G.652D光纤的FOM比较

3 G.654.E 光纤系统实测性能

在实验室对不同类型的光纤进行实际的系统测试。测试采用了双载波16QAM调制的400 Gbit/s传输系统,采用EDFA和Raman放大2种方式^[4]。考虑到实际系统的传输距离和系统余量设置有很大关系,这里采用3 dB的系统Q余量。

实验的结果如图2所示,由图2中可以得出2个重要结论。

a) 在只有EDFA的系统中,G.654.E光纤的传输性能比G.652.D更好(传输距离更远)。当使用拉曼放大器时,采用1 W泵浦功率的拉曼放大器和采用0.5 W泵浦功率的拉曼放大器相比,对G.654.E性能提升更加明显。

b) 使用EDFA+G.654.E配置的系统 and Raman + G.652.D配置的系统传输性能接近。因此在使用拉曼放大器非常困难的场景下,可以用G.654.E光纤来替代拉曼放大器,实现等效的传输性能。总体上看,G.654.E支持EDFA和拉曼放大器2种传输方式,和常规G.652.D光纤相比,G.654.E可以提升400G系统60%以上的传输距离。

4 拉曼放大器应用于G.654.E光纤的性能分析

随着拉曼/EDFA混合放大器在陆地传输系统中更多地使用(如应用于G.654.E光纤),我们需要考虑工作在光纤的截止波长以下时,拉曼放大器的泵浦效率是否受到影响,因为ITU-T规范中G.654.E光纤的截止波长为1530 nm,而拉曼放大器的泵浦波长一般是1450 nm^[5]。在低于截止波长的情况下,拉曼放大器泵浦光的多光路干涉(MPI)可能会导致泵浦光的相对

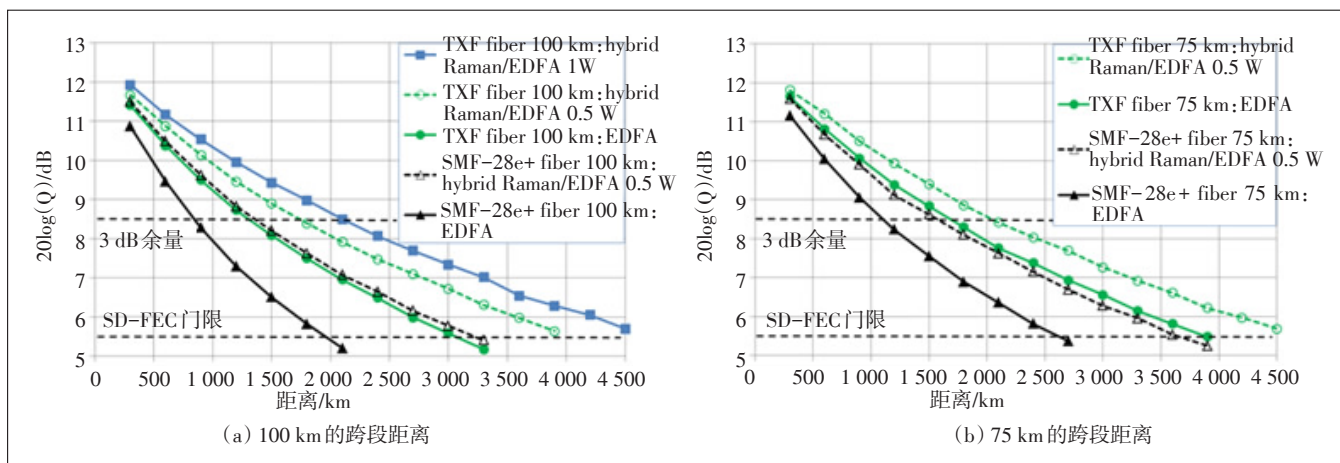


图2 16QAM的400G系统Q因子与传输距离的关系

强度噪声(RIN), RIN进而转换为信号光的相对强度噪声和相位噪声,影响传输信号的质量。文献[6]和文献[7]研究了拉曼泵浦光RIN对信号光质量的影响^[6-7],这里重点讨论跨段内非单模传输时产生的MPI转换为泵浦光RIN的强度,及其对通信系统的影响。

首先,用一个模型来估算在某个具体跨段中,当光信号低于截止波长传输时,MPI累积的数值。用式(2)表示,这里假设基模和高阶模的耦合发生在熔接点以及光纤受到微弯等影响^[8-9]。MPI定义为总的串扰信号与平均泵浦光LP₀₁功率的比:

$$\text{MPI} = \frac{P_{\text{xtalk, total}}}{P_{\text{pump, ave}}} = \frac{\sum_1^N P_{\text{xtalk, n}}}{P_{\text{pump, ave}}} \quad (2)$$

为了更清楚地描述MPI公式的意义,假设跨段长度100 km,每4 km有个熔接点,拉曼泵浦光LP₀₁模在1450 nm的衰减为0.21 dB/km。常规情况下,LP₁₁模的衰减大于LP₀₁模,为研究LP₁₁模在极限情况下对系统

的影响,假设LP₀₁模和LP₁₁的模式衰减相同。对于大有效面积的G.654.E光纤,在每个跨段的两端需要和G.652光纤熔接进行成端,2种不同光纤熔接时的损耗为0.2 dB。

MPI模型的结果如图3所示,拉曼泵浦光的MPI是距离的函数,随距离的增加而增加。这里显示了3个熔接损耗不同时MPI的变化。包括所有极限条件:如泵浦光的RIN对信号光质量有最大的影响;拉曼泵浦光与信号光同方向(拉曼泵浦光与信号光同向传输);在熔接时,光纤没有经过直径80 mm的盘纤(实际情况熔接盒一定存在这样的盘纤,可采用滤掉高阶模的方式而极大地降低MPI)。此时泵浦光的MPI和RIN之间有串扰和耦合,关系如下:

$$\text{RIN}_p(f) \approx \frac{4 \cdot \text{MPI}}{\pi} \left[\frac{\Delta\nu}{f^2 + (\Delta\nu)^2} \right] \quad (3)$$

式中:

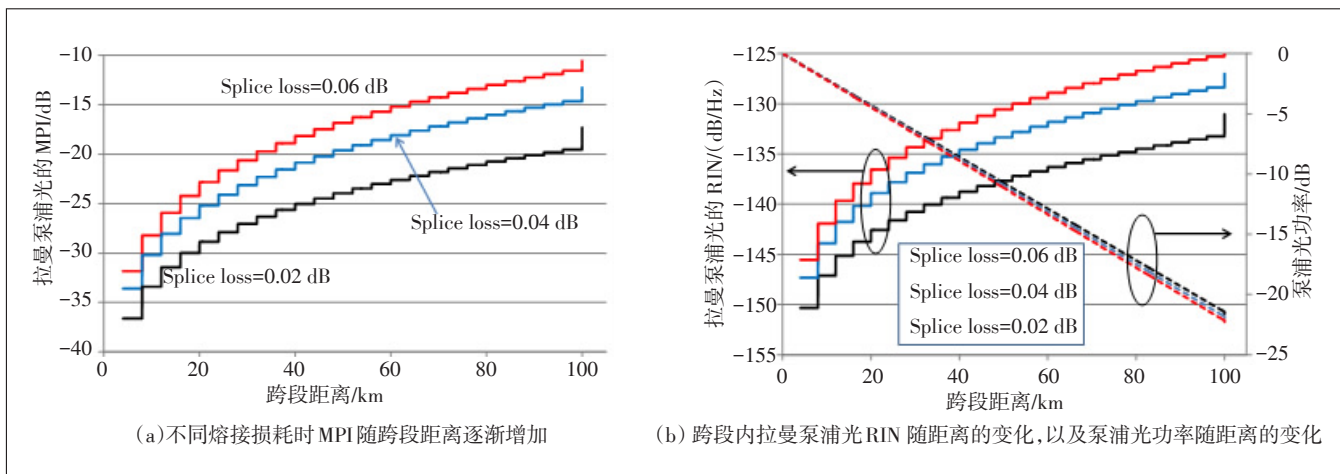


图3 MPI模型的结果

f ——泵浦光的频率

$\Delta\nu$ ——泵浦光的线宽 (~ 300 GHz)

RIN 正比于 MPI,也是距离的函数,随距离的增加而变大,图 3(b)展示了这种变化关系。在同一个跨段内,当距离变大时,MPI 会变大,功率随距离逐渐减小。在泵浦光功率最大时,由 MPI 引起的 RIN 最小。

为了说明传输拉曼放大系统中泵浦光 MPI 对信号质量的影响,采用文献[6]中的方式,优化 Z 方向上的 MPI 以及由此导致的泵浦光 RIN,在文献[5]中有详细分析。本文中选用了 G.654.E 大有效面积光纤来进行模拟,拉曼泵浦光产生开关增益 19 dB,1 450 nm 处的损耗为 0.21 dB/km。采用 3 000 km 的链路长度进行仿真,每个跨段长度为 100 km。系统采用 32 Gbit/s 波特率,偏振复用,16PSK 和 16QAM 2 种调制方式来实现 256 Gbit/s 的单波速率。

为了评估 MPI 导致的泵浦光 RIN 对信号的损伤,用误码率(BER)阈值设定在 1×10^{-3} 时的 SNR 代价作为参考。如图 4 所示,熔接损耗为 0.07 dB 时,SNR 代价非常小,熔接损耗为 0.02 dB 时 SNR 代价几乎可以忽略不计。这说明拉曼泵浦光在小于 G.654.E 的截止波长工作时,由 MPI 带来的 SNR 代价非常小。这是基于所有参数都是最坏条件假设的前提下(拉曼同向泵浦,比常规熔接损耗更高,高阶模与 LP_{01} 模同衰减,在接头盒内没有盘纤来减低 LP_{11} 模)的结果。由此可以得到结论,当拉曼泵浦光在 G.654.E 的截止波长以下工作时,对实际传输系统没有实质影响。

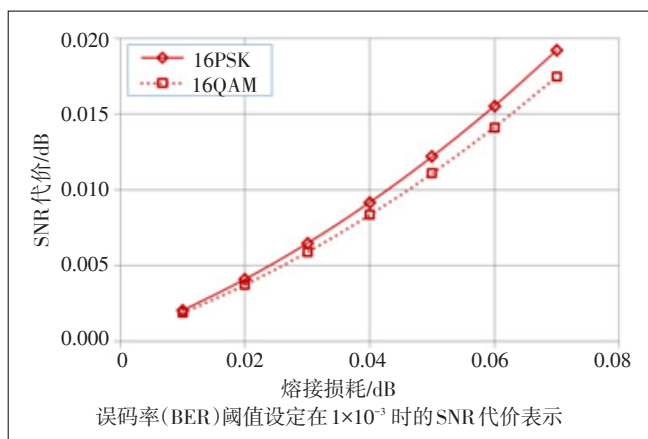


图 4 MPI 导致的泵浦光 RIN 对信号的损伤

5 结论

满足 ITU-T 规范的超低损耗 G.654.E 光纤为长途传输网络带来非常大的价值。本文研究表明,G.654.E

光纤可以为跨段距离为 50~90 km 的系统提升 2.2~2.8 dB 的 FOM,这个提升可以实现更远的传输距离,更高的系统容量,更长的跨段距离或更多的系统冗余。为进一步量化 G.654.E 的性能,进行了最大传输距离的传输实验,结果表明 G.654.E 光纤可支持 4 500 km 无冗余传输,或者 3 dB 冗余时传输 2 100 km。同样条件下,G.654.E 比低损耗 G.652 光纤延长系统传输距离 60% 以上。本文也研究了拉曼放大器工作在 G.654.E 光纤(截止波长大于拉曼泵浦波长)的传输性能,结果表明 G.654.E 截止波长对系统传输性能无实质影响。

参考文献:

- [1] INDEX V N. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010—2015 [EB/OL]. [2018-03-22]. <http://www.davidellis.ca/wp-content/uploads/2010/10/cisco-vni-forecast-2011.pdf>.
- [2] DOWNIE J. Single-mode fibers for high speed and long-haul transmission [M]//Handbook on Optical Fibers. Springer, 2018.
- [3] WOOD W, TEN S, ROUDAS L, et al. Relative importance of optical fiber effective area and attenuation in span length optimization of ultra-long 100 Gbit/s PM-QPSK systems [EB/OL]. [2018-03-22]. <http://pdfs.semanticscholar.org>.
- [4] DOWNIE J. Transmission Performance of Large A_{eff} Ultra-Low-Loss Terrestrial Fibre in 200 Gbit/s EDFA and Raman-Assisted Systems [C]//ECOC 2017.
- [5] MLEJNEK M. Analysis of Potential Terrestrial System Effects from Raman Pumps below Cable Cut-off in G.654.E Fibres [C]//ECOC 2017.
- [6] LIU D, CHENG J, TANG M, et al. Relative phase noise induced impairment in M-ary phase-shift-keying coherent optical communication system using distributed fiber Raman amplifier [J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1055-7.
- [7] CHENG J, TANG M, FU S, et al. Relative Phase Noise-Induced Phase Error and System Impairment in Pump Depletion/Nondepletion Regime [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(12): 2277-2286.
- [8] 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.
- [9] MLEJNEK M, ROUDAS I, DOWNIE J D, et al. Coupled-Mode Theory of Multipath Interference in Quasi-Single Mode Fibers [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-16.

作者简介:

Sergejs Makovejs, 博士,主要从事新型光纤技术及应用研究工作;John Downie, 博士,主要从事大容量传输系统测试工作;董浩, 博士,主要从事新型光纤技术及应用研究工作;Michael Mlejnek, 博士,主要从事传输系统测试及系统仿真工作;陈皓, 硕士,主要从事新型光纤技术及应用研究工作。