
G.654E 光纤长距离传输性能研究

Sergejs Makovejs¹, John Downie¹, 董浩¹, Michael Mlejnek¹, 陈皓²

(1. 康宁公司, 纽约州康宁; 2. 康宁光通信中国, 上海 200233)

摘要: 本文对 ITU-T G.654E 光纤进行了传输性能的研究, 总结了该类型光纤的一些新的特性。研究表明, G.654E 光纤的品质因子 (Figure of merit, FOM) 比常规 G.652 光纤高 3dB 左右, 实际 400G 系统测试结果显示 G.654E 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.654E 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.654E 光纤, 400G, 品质因子, 拉曼放大, 截止波长

G.654.E fiber performance characterization research in long haul transmission

Sergejs Makovejs¹, John Downie¹, Hao Dong¹, Michael Mlejnek¹, Hao Chen²

1, Corning Incorporated, Corning NY, 14831, USA

2, Corning Optical Communication China, Shanghai, 200233

Abstract: This paper summarizes our recent findings on ITU-T G.654E fiber transmission performance, for which we used Corning TXF fiber. Our model shows that G.654E fiber can provide almost up to 3 dB improvement in figure of merit relative to G.652 fiber. Further experimental results showed that G.654E can allow for ~60 % reach improvement relative to G.652 fiber. Advanced topics related to the use of G.654E fiber in Raman-assisted systems are also discussed.

Key words: G.654E fiber, 400G, FOM, Raman amplifier, cut-off wavelength

1 简介

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。

然而, 提升频谱效率的这些方式都会导致系统对光信噪比 (optical signal-to-noise ratio, 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公里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公里, 这极大的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, 但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.654E 标准。这种新型的光纤与常规 G.652 光纤相比，有效面积更大，截止波长更长(1530nm)，对 C 波段的传输性能进行了优化，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.654E 光纤应用于这些传输技术时的工作性能。

2 G.654E 光纤传输性能研究

为了研究 G.654E 光纤的传输性能，我们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 1550nm 的典型衰减是 0.168 dB/km，典型的有效面积为 125 μm^2 ，色散为 21.2 ps/nm/km。最大截止波长为 1520nm，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。

本文中，我们用品质因子 FOM 来评估 G.654E 光纤相对于 G.652 光纤（用于比较的 G.652 光纤包括康宁的低损耗 G.652D SMF-28 Ultra 光纤，1550nm 的典型衰减是 0.18dB/km，和常规 G.652D SMF-28e+光纤，1550nm 的典型衰减是 0.19 dB/km）的传输性能差异。公式 1 包含了影响传输性能的四个关键的光纤参数：衰减，有效面积，色散和非线性折射率系数 n_2 [2]：

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

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）。它比较的是两种不同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。

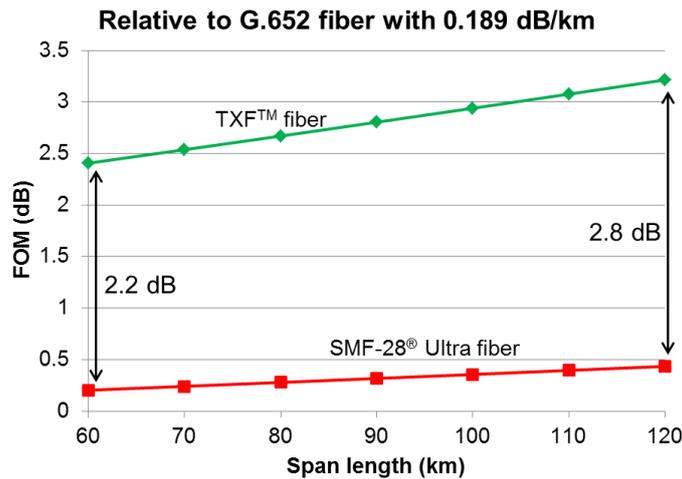


图 1， G.654E 和低损耗 G.652D 光纤品质因子(FOM)与常规 G.652D 光纤的比较

图 1 显示了 G.654E 光纤和低损耗单模光纤在不同跨段长度时，与常规 652D 光纤比较后 FOM 的差异。其中上面绿色部分代表 G.654E 光纤，下面红色部分是低损耗 G.652D 光纤，以常规光纤作为基准（横坐标）。上图表明，系统的跨段长度越大，G.654E 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]。我们研究了长度为 60

– 120 公里的跨段，G.654E 光纤相对于常规 G.652D 光纤 FOM 有 2.4 – 3.2 dB 的优势，相对于低损耗 G.652D 光纤 FOM 有 2.2 – 2.8 dB 的优势。

3. G.654. E 光纤系统实测性能

接下来我们在实验室对不同类型的光纤进行了实际的系统测试。测试采用了双载波 16QAM 调制的 400 Gb/s 传输系统，采用 EDFA 和 Raman 放大两种方式^[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。

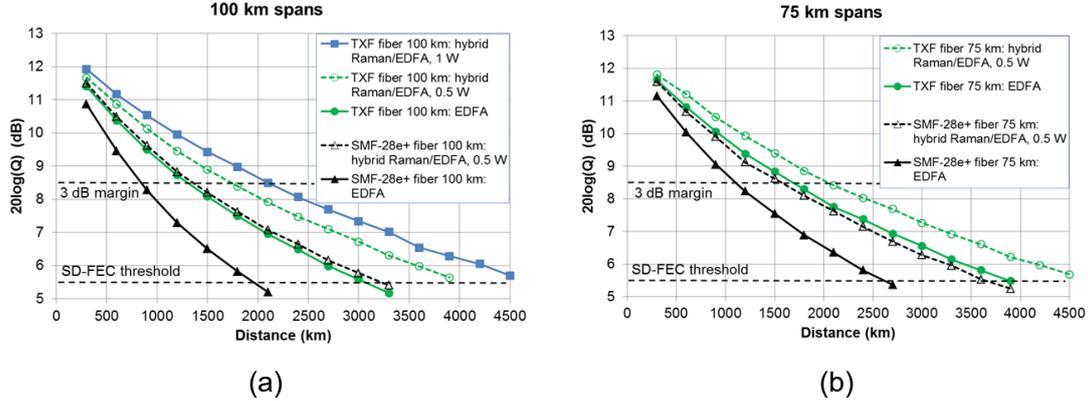


图 2,16QAM 的 400G 系统 Q 因子与传输距离的关系 (a) 100 公里的跨段距离 (b) 75 公里的跨段距离

实验的结果如图 2 所示，由图中可以得出两个重要结论：1.在只有 EDFA 的系统中，G.654E 光纤的传输性能比 G.652D 有更好（传输距离更远）。当使用拉曼放大器时，采用 1W 泵浦功率的拉曼放大器和采用 0.5W 泵浦功率的拉曼放大器相比，G.654E 性能提升更加明显。2.使用 EDFA+G.654E 配置的系统 and Raman + G.652D 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，可以利用 G.654E 光纤来替代拉曼放大器，实现等效的传输性能。总体上看，G.654E 支持 EDFA 和拉曼放大器两种传输方式，和常规 G.652D 光纤相比，G.654E 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.654E 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的使用，如应用于 G.654E 光纤，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.654E 光纤的截止波长为 1530nm，而拉曼放大器的泵浦波长一般是 1450nm^[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 6,7 研究了拉曼泵浦光 RIN 对信号光质量的影响^[6,7]，这里我们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，我们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。用公式（1）表示，这里假设基模和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：

$$MPI = \frac{P_{xtalk, total}}{P_{pump, ave}} = \frac{\sum_{n=1}^N P_{xtalk, n}}{P_{pump, ave}} \quad (1)$$

为了更清楚的描述 MPI 公式的意义，我们假设：跨段长度 100 公里，每 4 公里有个熔接点，拉曼泵浦光 LP01 模在 1450nm 的衰减为 0.21dB/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，我们假设 LP01 模和 LP11

的模式衰减相同。对于大有效面积的 G.654E 光纤，在每个跨段的两端需要和 G.652 光纤熔接进行成端，两种不同光纤的熔接时的损耗为 0.2dB。

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。这里显示了三个熔接损耗不同时 MPI 的变化。在所有极限条件下：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 80mm 的盘纤（实际情况下熔接盒一定存在有这样的盘纤，可用滤掉高阶模而极大的降低 MPI）。此时泵浦光的 MPI 和 RIN 之间有串扰和耦合，关系如下：

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

其中 f 是泵浦光的频率，而 $\Delta\nu$ 是泵浦光的线宽 (~300 GHz)。RIN 正比于 MPI，也是距离的函数，随距离的增加而变大。图 3b 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。

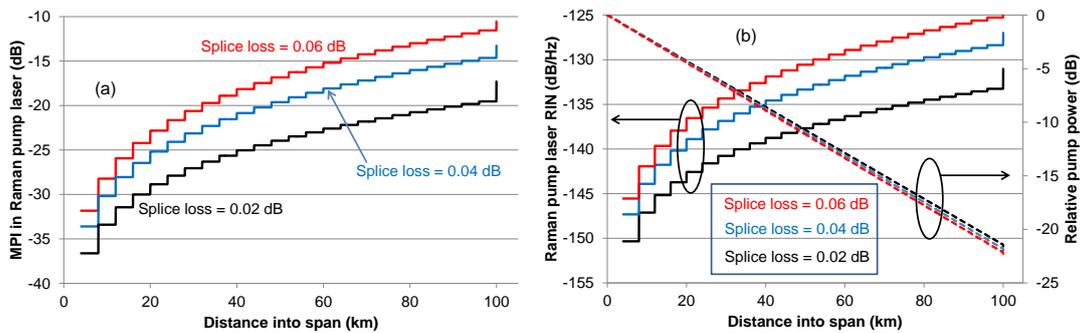


Figure 3: a) MPI growth as function of distance into span for different splice losses, b) Raman pump RIN and relative pump power level as function of distance into span.

图 3 (a) 不同熔接损耗时 MPI 随跨段距离逐渐增加

(b) 跨段内拉曼泵浦光 RIN 随距离的变化，以及泵浦光功率随距离的变化

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，我们采用文献 6 中的方式，优化 Z 方向上的 MPI 以及由此导致的泵浦光 RIN，详细的分析在文献 5 中有描述。本文中我们选用了 G.654E 大有效面积光纤来进行模拟，拉曼泵浦光产生开关增益 19dB，1450nm 处的损耗为 0.21dB/km。我们采用 3000 公里的链路长度进行仿真，每个跨段长度为 100 公里。系统采用 32Gb/s 波特率，偏振复用，和 16PSK 和 16QAM 两种调制方式来实现 256Gb/s 的单波速率。

为了评估 MPI 导致的泵浦光 RIN 对信号的损伤，我们用误码率(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 0.07dB 时，SNR 代价非常小，熔接损耗为 0.02dB 时 SNR 代价几乎可以忽略不计。这说明拉曼泵浦光在小于 G.654E 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 LP01 模同衰减，在接头盒内没有盘纤来

减低 LP11 模)的结果。由此可以得到结论,当拉曼泵浦光在 G.654E 的截止波长以下工作时,对实际传输系统没有实质影响。

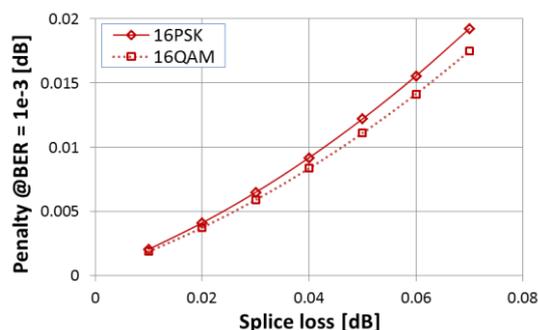


图 4 MPI 导致的泵浦光 RIN 对信号的损伤

(误码率 (BER) 阈值设定在 1×10^{-3} 时的 SNR 代价表示)

5 结论

满足 ITU-T 规范的超低损耗 G.654E 光纤为长途传输网络带来非常大的价值。我们的研究表明, G.654E 光纤可以为跨段距离为 50-90 公里的系统提升 2.2-2.8dB 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.654E 的性能, 我们进行了最大传输距离的传输实验。结果表明, G.654E 光纤可支持 4500 公里无冗余传输, 或者 3dB 冗余时传输 2100 公里。同样条件下, G.654E 比低损耗 G.652 光纤延长系统传输距离 60% 以上。我们也研究了拉曼放大器工作在 G.654E 光纤(截止波长大于拉曼泵浦波长)的传输性能, 结果表明 G.654E 的截止波长对系统传输性能无实质性影响。

参考文献

- [1] Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2015-2020
- [2] Downie J. *et al*, "Single-mode fibers for high speed and long-haul transmission", Handbook on Optical Fibers, Springer, 2018
- [3] Wood W. *et al*, "Relative importance of optical fiber effective area and attenuation in span length optimization of ultra-long 100 Gbps PM-QPSK systems", SubOptic 2013 conference
- [4] Downie, J. *et al*, "Transmission Performance of Large A_{eff} Ultra-Low-Loss Terrestrial Fibre in 200 Gb/s EDFA and Raman-Assisted Systems," ECOC 2017, paper P1.SC1.6 (2017).
- [5] Mlejnek, M. *et al*, "Analysis of Potential Terrestrial System Effects from Raman Pumps below Cable Cut-off in G.654.E Fibres," ECOC 2017, P1.SC1.14 (2017).
- [6] Cheng, J. *et al*, "Relative phase noise induced impairment in M-ary phase shift-keying coherent optical communication system using distributed fiber Raman amplifier," Opt. Lett., 38, 1055-1057 (2013).
- [7] Cheng, J. *et al*, "Relative Phase Noise-Induced Phase Error and System Impairment in Pump Depletion/Nondepletion Regime," J. Lightwave Technol., 32, 2277-2286 (2014).
- [8] Downie, J. *et al*, "Measurements and modeling of multipath interference at wavelengths below cable cut-off in a G.654 optical fiber span," Opt. Express, 25, 9305-9311 (2017).
- [9] Mlejnek, M. *et al*, "Coupled mode theory of multipath interference in quasi-single mode fibers," IEEE Photonics Journal, 7(1), 1-16 (2015).