

采用 G.654E 光纤的 1234.2 km 和 600 Gb/s 传输实验

胡先志,易亚军*,杨博,雷大刚,廖伯勋

(广州工商学院,广州 510850)

摘要:为了满足陆地长途干线实现超高速率、超长距离传输需要,研究人员开发出具有超低损耗、大有效面积和小弯曲损耗的 G.654E 光纤。基于陆地长途干线系统对光纤性能的要求,讨论了 G.654E 光纤折射率分布结构与性能,重点介绍了在 G.654E 光纤上实现 1234.2 km 和 600 Gb/s 的传输实验实例。

关键词:超低损耗;大有效面积;G.654E 光纤;光信噪比;陆地长途干线

中图分类号:TN915.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)09-0027-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



1234.2 km and 600 Gb/s transmission experiments with G.654E optical fiber

HU Xianzhi, YI Yajun*, YANG Bo, LEI Dagang, LIAO Boxun

(Guangzhou College of Technology and Business, Guangzhou 510850, China)

Abstract: In order to meet the needs of ultra-high speed and ultra-long distance transmission in terrestrial long-distance trunk, researchers have developed G.654E optical fiber with ultra low loss and large effective area and small bending loss. Based on the requirements of the long-distance trunk system for optical fiber performance, the design and performance of refractive index distribution structure of G.654E fiber are discussed. The transmission experiment examples of 1234.2 km and 600 Gb/s on G.654E fiber are mainly introduced.

Key words: ultra-low loss; large effective area; G.654E optical fiber; optical signal to noise ratio; terrestrial long-distance trunk

0 引言

为了满足光网络流量每年以 50%~80% 的速度增长需要,超高速相干传输系统正在陆地长途干线中使用 G.654E 光纤开展传输实验研究。超高速相干光纤传输系统通过采用高阶调制,提高频谱效率,扩大系统传输容量;使用光纤放大器,补偿光纤线路传输损耗;利用相干检测技术,提高接收机灵敏度,延长系统传输距离;借助数字信号处理技术,减小光纤色散和

偏振模色散限制,提高系统传输速率。这些方法都是提高系统光信噪比(OSNR)的有效途径。

本文从光纤的结构设计出发,主要讨论超高速系统陆地长途干线使用的 G.654E 光纤折射率分布结构设计、性能特点及其实现的 600 Gb/s 超高速率和 1234.2 km 超长距离传输实验实例。

1 陆地长途干线对光纤的性能要求

与风平浪静的海底光缆路由环境不同,陆地长途干线光缆路由环境复杂,光缆线路路由变化多,光缆纤芯数多,光缆结构不同,光缆铺设方法各异。为了确保 600 Gb/s 陆地长途干线光纤传输系统实现超高速率、超长距离和超大容量(简称三超)传输,陆地长途干线光缆使用的光纤必须具有超低损耗、大有效面积和小弯曲损耗(弯曲不敏感)等性能。

自 2013 年以来,各国光纤研究人员针对陆地长途干线光缆路由使用环境复杂、光缆路由频繁弯曲、光缆纤芯数多等特点,开发出具有超低损耗、大有效

收稿日期:2020-04-15。

基金项目:光纤通信技术和网络国家重点实验室开放课题(项目编号:2020OCTN-01)资助;光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题(项目编号:SKLD1704)资助;2019 年广州工商学院校级特色专业建设项目“电子信息工程”(项目编号:TS201902)资助。

作者简介:胡先志(1953—),男,湖北武汉人,教授,主要研究方向是光纤通信。主持起草国家通信行业标准 3 个,已出版光纤通信方面的学术著作 24 部,译作 11 部,发表论文 76 篇,先后荣获省部级科研成果奖励 4 项。

*通信作者:易亚军(E-mail: 358923678@qq.com)。



面积和弯曲不敏感性能的 G.654 光纤。国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) 在 2016 年 11 月 13 日颁布的最新 G.654 光纤建议中,根据衰减系数、模场直径、色散系数、宏弯损耗和应用环境不同,将 G.654 光纤被分为 G.654A、G.654B、G.654C、G.654D 和 G.654E 等 5 个子类。其中,前 4 个子类光纤都用于海底系统,G.654E 光纤因其在 1530~1625 nm 工作波长具有超低损耗、大有效面积和小弯曲损耗特点,主要用于 100 Gb/s 及其以上陆地长途干线系统^[5]。

2 G.654E 光纤折射率分布结构与性能

2.1 G.654E 光纤折射率分布结构设计

光纤的折射率分布结构决定光纤的传输性能。G.654E 光纤的折射率分布结构设计的目标是确保 G.654E 光纤能够获得超低衰减、大有效面积和小弯曲性能。G.654E 光纤折射率分布结构设计的具体做法是:减小衰减系数和纤芯-包层折射率差,增加模场直径和色散系数。图 1 是长飞公司的 G.652D 光纤折射率分布结构与纯硅芯超低损耗、大有效面积 G.654E 光纤 1 (远贝超强 A110) 和 G.654E 光纤 2 (远贝超强 A130) 的折射率分布结构对比示意图^[3]。

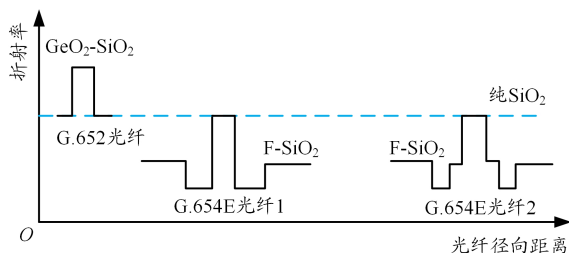


图 1 G.652D 光纤折射率分布与纯硅芯 G.654E 光纤折射率分布对比示意图

与掺杂 $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ 的 G.652D 光纤折射率分布结构相比,G.654E 光纤 1、G.654E 光纤 2 的折射率分布结构特点是:①采用纯硅 (SiO_2) 纤芯,减小瑞利散射损耗,确保光纤获得超低损耗。②低掺氟包层降低包层折射率,以达到所需要的纤芯-包层相对折射率差。③以掺氟的下凹环形包层或离开纤芯一定距离的掺氟下凹环形包层,扩大光纤有效面积,减小光纤非线性效应,限制光功率的泄漏,改善光纤的弯曲性能。

以图 1 所示的 2 种 G.654E 折射率分布结构为基础,通过精确控制光纤预制棒的沉积过程,优化光纤拉丝张力与速度,选择小杨氏模量的软预涂覆层等措施,才有可能制造出具有超低损耗、大有效面积和小弯曲损耗的 G.654E 光纤^[4]。

2.2 G.654E 光纤的超低损耗性能

G.654E 光纤折射率分布结构由纯 SiO_2 纤芯和掺氟的包层组成,纤芯不掺杂和包层少掺氟,减小了浓度作用,降低了瑞利散射损耗。采用小杨氏模量的软预涂覆层是降低光纤波导损耗和弯曲损耗的有效方法。在 1550 nm 波长处,硅芯光纤的衰减系数最小值小于 0.15 dB/km,为光纤传输系统实现超长传输提供了必要的条件^[1]。

2.3 G.654E 光纤的大有效面积性能

波分复用 (WDM) 技术是一种能提高系统传输容量、降低系统设备成本的技术。WDM 技术的缺点是容易产生光纤非线性效应。四波混频 (FWM) 是 WDM 系统主要的传输损伤,光纤的 FWM 效率 η 可以用式 (1) 表示。

$$\eta \propto \left[\frac{n_2 P}{A_{\text{eff}} D (\Delta \lambda)^2} \right]^2 \quad (1)$$

其中, P 为注入通路的光功率, n_2 为光纤的非线性折射率, A_{eff} 为光纤有效面积, D 为光纤色散系数, $\Delta \lambda$ 为波长间隔。由式 (1) 得知, η 与 $\Delta \lambda$ 的四次方成反比, $\Delta \lambda$ 越小, η 越大, η 对 $\Delta \lambda$ 最敏感。 η 与 A_{eff} 和 D 的平方成反比,增大 A_{eff} 、提高 D 是降低 FWM 的有效途径。G.654E 光纤具有大有效面积,能减小光纤非线性效应影响,降低 η 值^[2]。

2.4 G.654E 光纤的小弯曲损耗性能

宏观弯曲损耗是由光纤传输线路接头盒中的盘绕处产生的光损耗,而微观弯曲损耗则与光缆受到使用环境的温度变化和应力作用有关。G.654E 光纤是将截止波长位移到 1530 nm 以上,确保光信号尽可能在光纤纤芯中传输。如果光纤折射率分布结构设计合理,G.654E 光纤就能获得好的抗宏观/微观弯曲损耗性能。

表 1 是 G.652D 光纤标准和 G.654E 光纤标准中

表 1 G.652D 光纤与 G.654E 光纤产品的主要性能参数的对比

参数	光纤类型			
	G.652D 标准	G.654E 标准	藤仓 G.654E	长飞 G.654E1
模场直径/ μm	8.6~9.2 $\pm$ 0.4	11.5~12.5 $\pm$ 0.7	11.8	11.8 $\pm$ 0.4
衰减系数/ (dB $\cdot$ km ⁻¹)	0.30	0.22	0.163	$\leq$ 0.17
色散系数/ (ps $\cdot$ nm ⁻¹ $\cdot$ km ⁻¹)	17	17~23	17~23	17~23
截止波长/nm	1260	1530	1390	1530
宏弯损耗/dB	0.1	0.1	0.10	$\leq$ 0.005

规范的主要性能与藤仓 G.654E 光纤产品和长飞 G.654E1 光纤(远贝超强 A110)产品的主要性能参数的对比情况。

从表 1 可知,与 G.652D 光纤相比,G.654E 光纤具有的主要性能特点体现在衰减系数更小、模场直径更大、截止波长更长和宏弯损耗更小。近两年来,国内外研究人员纷纷开展了在 G.654E 光纤上进行“三超”传输实验,以便全面验证与评估 G.654E 光纤的陆地长途干线传输性能。

3 1234.2 km 和 600 Gb/s 传输实验

3.1 1234.2 km 超长距离传输实验

在 2020 年 3 月 10 日的光通信会议上,日本 NTT 公司研究人员报道,他们在 NTT 公司的现场使用的 G.654E 光纤上进行了净数据速率为 10×500 Gb/s,传输距离为 1234.2 km 的传输实验,创造了在 G.654E 光纤上实现 1234.2 km 超长距离传输的世界记录。实验通过采用超低损耗光纤和相干检测、数字信号处理等技术,提高光纤传输系统 OSNR,延长系统传输距离,减少系统中继站数量。

为了实现 1234.2 km 超长距离传输,NTT 公司研究人员采用了以下具体技术措施:①利用偏振复用-32 阶正交幅度调制格式获得单波长净数据速率为 500 Gb/s 高速光信号;②使用衰减系数为 0.184 dB/km,有效面积为 110 μm^2 的 G.654E 光纤作为系统传输介质;③用掺铒光纤放大器补偿光纤线路损耗,用喇曼光纤放大器提高系统 OSNR。经 1234.2 km 超长距离传输后,研究人员测得的系统品质因素 Q 值超过规定的 Q 值,表明超低损耗大有效面积 G.654E 光纤完全适用于陆地长途干线超长距离传输^[6]。

3.2 600 Gb/s 超高速率传输实验

在 2019 年 9 月 30 日-10 月 2 日的国际线缆会议(68th IWCS)上,日本藤仓公司研究人员报道,他们利用基于 16×600 Gb/s 波分复用传输系统,分别在 G.654E 光纤和 G.652D 光纤上成功地完成了单波长传输速率为 600 Gb/s 的传输实验,创造了采用 G.654E 光纤实现 600 Gb/s 超高速率传输的世界纪录。实验通过采用高阶调制提高频谱效率、利用偏振复用与空分复用提高传输容量、以数字信号处理补偿光纤传输损伤等技术,确保光纤传输系统实现单波长 600 Gb/s 超高速率传输。他们采用的具体技术措施如下:①利用 64 阶正交幅度调制格式获得 16 个单波长传输速率为 600 Gb/s

高速光信号;②使用衰减系数为 0.168 dB/km、有效面积为 125 μm^2 的 G.654E 光纤作为系统传输介质;③使用的衰减系数为 0.199 dB/km、有效面积为 88.8 μm^2 的 G.652D 光纤作为系统传输介质。

为了证明 G.654E 光纤超高速率传输性能,研究人员在系统误码率为 $BER=10^{-15}$ 时,在光接收机前测试 2 种光纤的 OSNR。测得的 G.654E 光纤的 OSNR 比 G.652D 光纤的 OSNR 大 2 dB。这个测试结果表明,高 OSNR 的 G.654E 光纤比 G.652D 光纤更适用于陆地长途干线实现超高速率传输^[7]。

4 结束语

用户带宽需求的快速增长,推动了陆地长途干线传输系统向“三超”传输方向发展。设计合理的光纤折射率分布结构,优化光纤制造工艺,可以制造出具有超低损耗、大有效面积和耐弯曲性能的 G.654E 光纤。在 G.654E 光纤上成功地完成的 1234.2 km 超长距离和 600 Gb/s 超高速率传输实验充分证明,G.654E 光纤是适用于陆地长途干线实现“三超”传输的最佳光纤。

参考文献:

- [1] SERGEY T. Ultra Low-loss Optical Fiber Technology[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), March 20–22, 2016, Anaheim, United States. OFC, 2016. DOI:10.1364/OFC.2016.Th4E.5.
- [2] 原荣. 海底光缆通信—关键技术、系统设计及 OA&M[M]. 北京:人民邮电出版社,2018.
- [3] 韦乐平,张成良. 光网络—系统、器件与联网技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [4] ZHANG Lei, ZHU Jihong, LI Jing, et al. Novel Ultra Low Attenuation and Large Effective Area G.654E Fiber in Terrestrial Application[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 19–23, 2017, Los Angeles, United States. Los Angeles: OFC, 2017. DOI: 10.1364/OFC.2017.W2A.23.
- [5] ITU-T. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fiber and cable: ITU-T G.654-2016[S]. Geneva: ITU-T, 2016: 7–11.
- [6] SAITO K, SASAI T, HAMAOKS F, et al. High spectral efficiency real-time 500 Gb/s / carrier transmission over field-installed G.654E fiber link using forward and backward distributed Raman amplification[C] // Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), March 8–22, 2020, San Diego, USA. San Diego: OFC, 2020: Th1D.3-1–Th1D.3-3.
- [7] GONOHE T, MATSUMOTO S, TAKAISHI H, et al. Transmission Performance of 600 Gb/s per Wavelength Signals over Installed Slotted-core Cable using G.654E Optical Fiber[C]//Proceedings of the IWCS™ 2019 International Cable & Connectivity Symposium, September 30–October 2, 2019, North Carolina, USA. North Carolina: International Cable & Connectivity Symposium, 2019: 56–62.