

G.654.E 光纤光缆的工程实践

Engineering Practice of G.654.E Optical Fiber Cable

贺永涛,李经章,黄劲松(中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007)

He Yongtao, Li Jingzhang, Huang Jinsong (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

摘要:

中国联通哈密—巴里坤、济南—青岛2个试验段是世界上第1次实际部署G.654.E陆地光缆干线,其自然地理和气候环境复杂,敷设方式多样,可以涵盖全球95%以上的光纤光缆施工和运行环境。中国联通在这一领域内的积极探索,将为光纤通信的发展提供坚实的实践经验,并推进ITU、IEC和CCSA等组织的标准化工作,受到了国内外广泛关注。

关键词:

G.654E; 光纤; 标准化

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2019.10.003

中图分类号:TN913

文献标识码:A

文章编号:1007-3043(2019)10-0016-06

Abstract:

China Unicom's two trial sections Kumul—Barkol and Jinan—Qingdao are the world's first actual deployment of G.654.E terrestrial optical cable trunk line. Their physical geography and climate environment are complex, laying methods are diverse, which can cover more than 95% of the global optical fiber cable construction and operation environment. China Unicom's active exploration in this field will provide solid practical experience for the development of optical fiber communication, and promote the standardization work of ITU, IEC and CCSA, which has attracted wide attention at home and abroad.

Keywords:

G.654.E; Optical fiber; Standardization

引用格式:贺永涛,李经章,黄劲松. G.654.E 光纤光缆的工程实践[J]. 邮电设计技术,2019(10):16-21.

1 G.654.E 光纤简介

G.654 光纤具有有效面积大、衰减低和非线性系数低的特点,可有效改善光传输指标,增大复用段长度,避免干线网络结构的大规模改动,从而降低陆地传输系统的建设成本。

从海洋到陆地,工作环境要求更严苛,甚至可能会影响干线光缆的结构。中国联通建设的哈密—巴里坤和济南—青岛2个试验段,探讨了G.654.E光纤的

相关指标以及陆地应用能力。

1.1 G.654 的传统应用

越洋G.654海缆系统中,复用段最高可达14 000 km以上,可充分发挥其损耗低、传输距离长的优点。相比陆缆,海缆的结构设计和工作环境的差别主要体现在以下几方面。

a) 越洋海缆通常为4~6纤芯对,采用不锈钢中心管式结构,同时外护层仍有聚乙烯护套和钢丝铠装等硬保护,在正常工作时海纤基本不受外部应力影响。

b) 海缆光纤一般采用数十公里大盘长设计,尽量减少接头,提升系统性能。

收稿日期:2019-07-16

c) 海缆的工作环境通常位于大洋底部,温度恒定到 $-1^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$,终年无变化;而陆地光缆受昼夜温差(中国北方地区冬夏温差可达 70°C 以上)、拉拽和侧压等机械应力影响巨大。

考虑到海缆和陆缆的以上区别,在传输系统升级到400 Gbit/s及以上的需求日益迫切的当前,对G.654光纤进行陆地环境论证,可保护工程投资,使光通信技术稳健发展。

1.2 G.654.E的进展和标准化

400 Gbit/s技术的主要挑战是高频谱效率和长距离传输之间的平衡。考虑到物理限制和实际传输距离,400G的频谱效率很难达到100G(2 bit/s/Hz)的4倍,但是显著的提升还是必要的。高阶QAM调制是最简单的提高频谱效率的方法,这需要更高的OSNR,对激光器的相位噪声和光纤非线性效应也更敏感(例如16QAM对相位噪声的敏感程度是QPSK的4倍),因此导致传输距离下降。

从系统接收OSNR和光纤品质等因素来看,降低衰减系数、增大有效面积是延长传输距离的主要手段,这也是当前新型光纤技术发展的2个主要方向。

目前提升400G系统传输性能主要有以下3种解决方案。

a) 进一步提升设备性能,包括降低背靠背OSNR容限,增强FEC极限纠错能力,这存在技术难度,而且会增加成本。

b) 在现有纯EDFA放大技术的基础上,引入新型的光放大技术,包括拉曼放大器以及拉曼/EDFA的混合放大器,这也将带来成本和安全性的问题。

c) 在现有G.652/G.655干线光纤网络中,引入更低衰减系数、更低非线性效应的光纤。

方案c目前是最简洁可行的。增大有效面积,可降低光纤中的能量密度,实现低非线性;同时超低损耗减少了光放引入的ASE噪声积累,这使传统上用于海底通信的G.654光纤进入了陆地应用环境。

目前各厂商的陆地用G.654光纤模场直径不同,相应的有效面积范围在 $110 \sim 130 \mu\text{m}^2$ 甚至 $150 \mu\text{m}^2$ 。光纤衰减系数也可以大致分为2类,一类在 0.190 dB/km 左右,与G.652.D光纤相近;另一类则采用纯硅纤芯达到 0.170 dB/km 以下。

在国际标准领域,ITU-T自2013年7月开始讨论适用于陆地传输系统的G.654.E光纤。目前,由中国联通牵头组织编制的G.654行业标准《截止波长位移

单模光纤特性》已获批准,其中G.654.E子类将主要用于干线长距离传输,指标对比如表1所示。中国标准的G.654.E具有相同的宏弯和偏振模色散指标,有效面积增加了40%~60%,色散略大于G.652.D,但在相干传送系统中并不会增加很大负担。

表1 G.652.D与G.654.E关键指标比较

关键指标	G.652.D	G.654.E
模场直径	$8.8 \sim 9.2 \mu\text{m} \pm 0.4 \mu\text{m}$,有效面积约 $80 \mu\text{m}^2$	$11.5 \sim 12.5 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$,有效面积 $110 \sim 130 \mu\text{m}^2$,增加40%~60%,但容差较大
衰减系数	可控制在 0.190 dB/km 以下	可控制在 0.170 dB/km 以下
宏弯损耗	30 mm半径,100圈, $0.1 \text{ dB}@1550 \text{ nm}$	与G.652.D相同
色散	$13.3 \sim 18.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ @ 1550 nm	$17 \sim 23 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})@1550 \text{ nm}$,略大于G.652.D,增加约20%
偏振模色散	PMDQ为 $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ($M=20, Q=0.01$)	PMDQ为 $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ($M=20, Q=0.01$),与G.652.D相同

宽泛的MFD标称值和容差范围可能会导致接续损耗较大,并不利于实践推广。后续在G.654.E光纤逐步成熟完善后,应进一步缩严指标。

2 外场试验概述

2016年开始,中国联通安排8家企业的G.654.E产品在一条光缆中参与试点项目,分别进行架空和管道敷设测试与验证,提出新型光纤的成缆工艺和施工规范,并开展400G及以上速率WDM系统性能测试,验证传输距离和性能的实际提升能力。同时,构建光纤性能长期监测系统,研究温湿度、机械受力等环境变化对性能的影响,分析G.654.E的工作环境普适性。

2.1 环境选择

相对于海底,陆地敷设环境更为复杂,具有温度范围变化大、光缆周期性受力大、陆缆结构脆弱、施工工艺差异大等影响因素,中国联通主要考虑针对上述特殊性来选择试点地域。

考虑到中国西部地区气温年较差、日较差大且风力较大,为验证光纤的使用环境和机械性能,在新疆哈密—巴里坤二级干线光缆工程中引入G.654.E光纤。架空敷设约150 km光缆,运行温度为 -40°C 到 70°C ,最大风力12级,海拔从800 m(哈密市区)上升到2900 m(天山山口)再降低到1500 m(巴里坤草原),由康宁、长飞、住友、烽火、OFS、中天和亨通提供G.654光纤,西古光通负责光缆生产。

同时,在东部地区选择济南—青岛一级干线,验证人工和气流法管道敷设,对400G WDM系统的传输

性能进行测试比对。管道敷设约 430 km 光缆, 由康宁、长飞、住友、烽火、OFS 提供 G.654 光纤, 亨通光电负责光缆生产。

上述 2 个典型应用环境可以充分验证新型光纤的陆地适应性, 为“海缆登陆”打下坚实的基础。

2.2 哈密—巴里坤试验段和光缆监测系统

哈密—巴里坤段属于省内干线, 采用 48 芯 G.652+16 芯 G.654.E 光纤, 地处高海拔、高寒地区, 是全国第一条实际部署 G.654.E 光纤的光缆线路。该项目穿越海拔 4 000 m 的天山南北, 山口附近区域从 10 月到来年 4 月冰雪封路, 积深超过 1 m。施工人员克服高海拔、低含氧量、大风等困难争抢工期, 在没有大型施工机械辅助的情况下, 完全用人力完成了 100 多 km 的杆路施工。

本项目从 2016 年中光路打通后, 截至 2019 年, G.654.E 光纤经历了 3 个冬夏季的环境交替, 通过同期建立的光缆自动监测系统数据的统计分析, 衰减指标未发生明显变化(不超过 0.01 dB/km), 可以认为各厂商 G.654.E 光纤在该段环境中具有较强的适应性。目前光纤监测系统正在运行中, 以充分验证长期环境适应能力。

2.3 济南—青岛试验段和高速传输测试系统

济南—青岛段利用高速公路硅芯管道敷设光缆, 工程主要采用气吹法敷设, 对于匝道互通、收费站等场区仍采用牵引法施工。项目在施工安装方式上没有特殊要求, 以验证 G.654.E 光纤在现有施工条件下的适用性。

施工完成后, 华为、烽火、中兴、上海贝尔、科锐安等 5 种传输设备, 在 12 芯 G.654.E 光纤(6 个型号)和 2 芯 G.652.D 光纤上进行 400G 传输系统的循环测试, 每种设备分别在 7 种不同光纤上进行, 以充分对比新型光纤和新型传输系统的相互适应能力。对于光纤技术, 验证了 G.652 和 G.654 光纤的最佳入纤光功率以及不同 G.654 光纤间的传输性能差异, 指导了光纤指标的标准化及归一; 对于 400G 技术, 验证了不同 400G 技术在 G.652 和 G.654 光纤上的传输性能, 指导后续 400G 线路设计和建设。

根据测试结果, 系统传输性能与光纤有效面积(非线性效应)和光纤衰减系数(跨段衰减)密切相关。初步结论为, 增加有效面积可以在一定程度上弥补衰减系数的劣势。同时也发现, 400G 光传输技术波道间隔分别取 37.5 GHz 与 50 GHz 时, 在传输性能上有差

异, 主要体现在 Q 值和传输代价上, 50 GHz 光谱的信号光谱较宽, 性能上略优于 37.5 GHz 光谱的 400G 信号。

G.654 标准规定光缆截止波长小于 1 530 nm, 而拉曼泵浦光源波长在 1 425 nm 和 1 455 nm 处, 截止波长过高可能会对泵浦激光器工作有一定的影响。G.654 光纤的大有效面积降低了光纤内功率密度, 会在一定程度上降低拉曼放大器的增益效率。

3 光缆的制造与运输

本次试验中要求各厂家按照约定的色谱提供着色后的光纤, 统一完成后续工序。因此本试验中着重探讨套塑及成缆对光纤光学性能的影响。

新型光纤试点工作内容如图 1 所示, 主要包括光纤入厂测试、光缆生产制造、产品运输、敷设施工、系统测试和长期监测等部分。

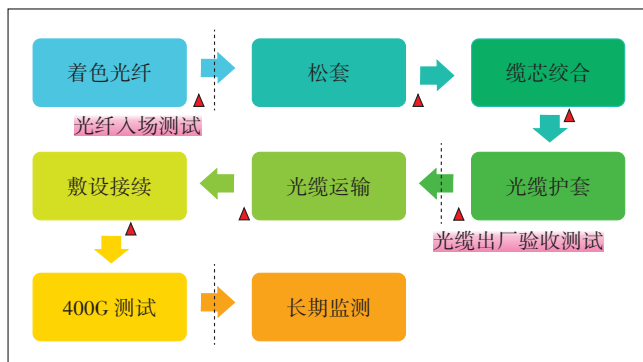


图1 新型光纤试点工作流程及内容

在光缆生产期间, 需要有关人员进行监造和检验, 测试 G.654.E 光纤的方法如表 2 所示。

试验中主要对着色后的裸纤、套塑、成盘厂验测试和到厂数据进行对比, 从而分析光缆生产工序对 G.654.E 光学性能的影响。各工序后的光纤衰减指标测试结果如表 3 所示。

经过综合对比分析, 认为 G.654.E 光纤和 G.652.D 光纤在目前的生产工序中, 光纤衰减指标变化基本一致, 因此认为松套层绞式生产工艺亦适用于新型光纤; 而且在考虑到运输震动、温度变化等外部因素影响后, G.654.E 光纤仍保持了对 G.652.D 光纤的衰减优势。

受试验条件及工程进度等影响, 考虑到 G.654.E 光纤的折射率剖面设计和模场直径特点, 后续仍需对其进行工艺适应性研究, 尤其是增加对光纤应力变化

表2 主要参数的测试方法

序号	测试项目	引用测试方法
1	1 550 nm 模场直径/ μm	IEC60793-1-45 (可变孔径法)
2	包层直径/ μm	IEC60793-1-20 (近场光强分布法)
3	芯包层同心度误差/ μm	
4	包层不圆度/%	
5	涂覆层直径(未着色)/ μm	IEC60793-1-21 (侧视光分布法)
6	(内外涂层/包层同心度误差)/ μm	
7	光纤翘曲度特性参数/m	IEC60793-1-34 (激光束扫描法)
8	截止波长(22 m)/nm	IEC60793-1-44 (传输功率法)
9	1 550 nm 衰减/(dB/km)	IEC60793-1-40 Annex C(后向散射法)
10	1 625 nm 衰减/(dB/km)	
11	衰减点的不连续性/dB	
12	1 550 nm 色散斜率最大绝对值/(ps/(nm ² .km))	IEC60793-1-42 (相移法)
13	1 550 nm 色散系数最大绝对值/(ps/(nm ² .km))	
14	1 625 nm 色散系数最大绝对值/(ps/(nm ² .km))	
15	单根光纤PMD值/(ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	IEC60793-1-48 (干涉法)

较为敏感的参数如PMD和弯曲损耗等的分析比对,以充分论证其在现有工艺条件下的适应性。

4 工程应用问题

4.1 光缆结构和施工工艺

哈密—巴里坤和济南—青岛光缆均采用层绞式松套管结构,经走访施工现场和审查监理记录,发现这2个项目的安装工艺比较规范,光缆并未受到诸如

表3 各工序后光纤衰减指标测试值(单位:dB/km)

样品序号	裸纤衰减值	套塑后衰减值	成盘后衰减值	到货衰减值
1	0.154	0.160	0.159	0.163
2	0.150	0.148	0.161	0.164
3	0.160	0.164	0.165	0.162
4	0.160	0.165	0.167	0.168
5	0.162	0.168	0.170	0.173
6	0.163	0.167	0.169	0.170
7	0.180	0.180	0.183	0.183
8	0.183	0.184	0.184	0.179
9	0.178	0.178	0.180	0.181
10	0.179	0.180	0.182	0.184
11	0.189	0.204	0.190	0.192
12	0.185	0.187	0.190	0.194
13	0.176	0.180	0.180	0.186
14	0.181	0.184	0.182	0.186
15	0.175	0.178	0.178	0.178
16	0.173	0.176	0.178	0.179
17	0.184	0.185	0.185	0.184
18	0.182	0.187	0.191	0.193
19	0.186	0.186	0.192	0.195
20	0.181	0.185	0.189	0.193
比入厂测试值增加		0.003 25	0.004 7	0.006 3

强拉硬拽、车轧冲击之类的损伤,接续工作中,光缆开剥、裸纤的清洁、盘纤、接头盒的密封等工艺流程均为常规操作。

上述2个项目施工后的实测数据与光缆出厂数据之间的对比分别如表4和表5所示。

表4 人工架空施工后哈密—巴里坤段的衰减指标和厂验衰减指标对比(单位:dB/km)

测试场景	样品1		样品2		样品3		样品4		样品5		样品6		样品7		样品8	
60盘光缆平均(厂验)	0.159	0.161	0.165	0.167	0.170	0.169	0.183	0.184	0.180	0.182	0.190	0.190	0.180	0.182	0.178	0.178
哈密—口门子	0.167	0.171	0.171	0.169	0.177	0.176	0.196	0.194	0.183	0.187	0.201	0.201	0.193	0.192	0.182	0.180
口门子—哈密	0.169	0.172	0.170	0.171	0.176	0.176	0.192	0.195	0.181	0.185	0.196	0.200	0.192	0.187	0.180	0.180
口门子—巴里坤	0.169	0.165	0.169	0.170	0.173	0.173	0.198	0.195	0.183	0.183	0.199	0.204	0.191	0.188	0.178	0.181
巴里坤—口门子	0.172	0.168	0.172	0.168	0.175	0.172	0.199	0.198	0.182	0.183	0.194	0.200	0.189	0.198	0.178	0.181

表5 气流法施工后济南—青岛段的衰减指标和厂验衰减指标对比(单位:dB/km)

测试场景	样品1		样品2		样品3		样品4		样品5		样品6	
60盘光缆平均(厂验)	0.158	0.159	0.166	0.167	0.171	0.172	0.185	0.184	0.182	0.183	0.181	0.181
济南—鹤鸽岩	0.166	0.170	0.174	0.173	0.177	0.177	0.200	0.203	0.187	0.188	0.182	0.182
鹤鸽岩—济南	0.168	0.165	0.174	0.171	0.177	0.178	0.199	0.198	0.186	0.188	0.181	0.181

工程熔接中,施工单位不区分光纤类型都采用同一种光纤熔接设备,因G.654.E光纤与常用的G.652.D光纤的有效面积不同,熔接的关键在于光纤端面的平

滑,没有毛刺或缺陷,熔接机能够正常确认。

本次试验在常规敷设手段下经历了倒盘、牵引、挂缆、气吹、拖曳等操作,敷设后初期的传输特性变化

与G.652.D光纤相似。上述事实可以说明传统光缆结构和常规敷设方式仍适用于大有效面积、低损耗新型光纤。

同时,因为这2个项目均为长途传输干线,受到高度重视,光缆结构比普通本地网级别的光缆有所加强,施工单位素质优良,因此并未经历极端条件下的野蛮施工,没有验证其在不规范的安装操作环境下的健壮性。

4.2 熔接探讨

熔接是G.654.E光纤走向陆缆工程应用不可避免的一项操作,相比海缆工程中大盘长、接头少等特点,陆缆工程中考虑到光缆装盘、运输、施工等环节的便利性,一般设置2~4 km的光缆盘长,这使陆缆光纤链路中存在大量熔接接头,控制熔接损耗成为G.654.E陆缆应用的重要问题。

4.2.1 自熔接

在成缆前,首先在西古公司和亨通公司对G.654.E裸纤进行了熔接试验,每种光纤产品进行了6次熔接试验。

熔接仪表均采用藤仓60S熔接机在Auto模式下自动完成熔接,未手动设置熔接参数,测试仪表采用EXFO FTB-400。由于受到操作水平(切割断面是否整齐等)、熔接工具等影响,不计测试误差和人工因素,6次熔接损耗的平均值为0.01~0.04 dB,G.654.E光纤和G.652.D熔接特性基本相同。

针对亨通和西古工厂测试中,成缆后光纤的318个熔接点,采用不同的熔接机,不同人员操作的条件下,双向衰减平均值如图2所示。

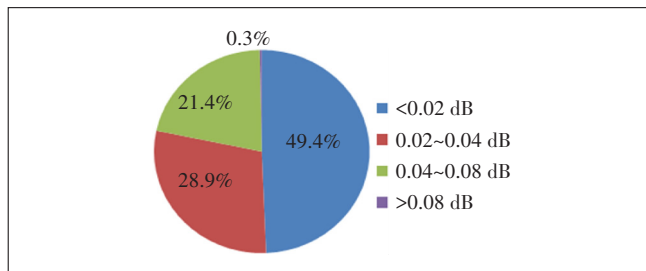


图2 成缆后的光纤熔接测试结果分布(同型号光纤熔接)

虽然各G.654.E光纤厂家均表示熔接时不需对熔接机专门进行参数设置,但由于光纤折射率剖面的设计不一致,测试中发现,某些型号的光纤熔接机采用Auto模式时,对少数G.654.E光纤无法准确识别其纤芯和包层,需要设为包层对准甚至多模模式才能熔

接,对熔接损耗有潜在影响。

在G.654.E光纤大规模应用之前,各光纤厂家应针对自己的G.654.E产品提出完整的熔接解决方案,或者在熔接机内增加针对大有效截面积G.654.E光纤的选项。

4.2.2 互熔接

由于G.654.E光纤标准仍在制定中,产品规格还未统一,目前各厂家对G.654光纤在陆缆中的应用以及支持400G技术的发展有不同的理解。

在本次研究中,对G.654光纤互熔(含同厂家不同颜色纤芯)实际测试了78个熔接点,熔接损耗平均值0.039 dB;对G.654+G.652熔接实际测试了24个熔接点,熔接损耗平均值0.119 dB。作为对比,也测试了亨通G.652光纤之间的自熔接的3个熔接点,熔接损耗平均值0.037 dB。

互熔测试结果表明,110 μm^2 和130 μm^2 之间的熔接损耗有些达到0.2 dB左右,目前难以推广不同厂家G.654.E光纤的互熔应用。同样由于G.652.D光纤和G.654.E光纤在折射率剖面设计和模场直径等方面存在明显差异,G.652.D光纤和G.654.E光纤互熔也存在熔接损耗过大、反射明显等问题,不建议工程中互熔应用。

4.3 产业成熟

中国联通作为业内的先行者率先部署了哈密—巴里坤、济南—青岛传输链路。与此同时,其他先进国家的同类项目也大量出现,截至目前,G.654陆地应用光缆已经建成万余公里,还有更多的项目正处于建设进程中。除传统运营商外,对于高速大容量传输有突出要求的云计算和IDC服务商也纷纷主导了新型光纤光缆的建设实施。这些项目和中国联通的先行工程一样,均采用G.654.E+G.652.D的混缆产品,在实现项目经济性的同时也体现技术先进性。

综合考察这些项目,可以认为G.654.E光纤已经基本成熟,目前国内外主流光纤厂商均可提供适用的产品。

5 结论和展望

针对400G及Tbit/s级的WDM技术发展趋势,中国联通携手国内外主流光纤光缆供应商开展了G.654.E光纤的现场试验,得到了通信业界的全力支持,展现了中国光纤光缆行业的进取意志和卓越水平。

G.654.E可采用与G.652.D光纤相同的成缆工艺

和生产工序、相同的敷设及熔接方法,同时无需改进和新增相应设备,在引入新型光纤光缆后不会增加运营商的维护成本。而相对 G.652.D 光纤而言,G.654.E 光纤具备优异的光学性能。

本次研究和外场试验的主要结论如表 6 所示。

表 6 G.654.E 研究和外场试验主要结论

特性	初步结论
成缆工艺特性	G.654 光纤和 G.652 光纤基本相同,成缆过程中引入的附加衰减基本相同,无特殊工艺要求
施工现场条件下的接续损耗	和 G.652 基本相同,但对熔接机的设置和操作的要求较高;个别机型需要用包层对准或者多模模式才能完成接续
施工和维护要求	G.654 不需特殊对待,可以使用目前的机具和方法
传输特性	G.654 的明显优于传统 G.652 光纤,尤其在衰减和非线性方面
熔接损耗数据	G.654 和 G.652 熔接,比同种光纤熔接时大 0.081 dB(统计数值)
法兰损耗数据	G.654 和 G.652 之间法兰连接损耗,比同种光纤法兰连接时大 0.102 dB(统计数值)
连接损耗对比	G.654 光纤之间的熔接及法兰连接损耗,与 G.652 光纤互连相比,只有微小差异,可以忽略
CD 和 PMD	G.654.E 色散略大,PMD 大致相同
应用	考虑目前 G.654.E 光纤的成本较高,现网中的前期应用可以 G.654.E 与 G.652.D 光纤的混合光缆建设光缆网;以及在设站条件受限(单跨段距离较长)的情况下,单段完全采用 G.654.E 光纤的方式建设,未来条件具备时应建设纯 G.654.E 干线光缆,平行替换原有干线传输网

新疆和山东的 G.654.E 工程实践可指导新型光纤和超 100G WDM 技术的发展和部署,支撑了国际标准界如 ITU 等的 G.654.E 光纤关键参数确定,将继续推进高速传输系统的进步,引领先进通信技术的发展。

参考文献:

[1] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2011:194-202.

[2] 吴达金. 地下通信(信息)管道规划及工程设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:144-148.

[3] 袁建国,叶文伟. 光网络信息传输技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2012:336-375.

[4] 卢彦召,李良川,余毅. 单波 400G 在 G.654 光纤中的长距离传输技术研究[J]. 邮电设计技术, 2018(6):74-77.

[5] 邓黎,陈皓,姜利民. G.654.E 光纤在电力通信中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2017(10):88-94.

[6] 孙淑娟,李伟华,邓黎,等. 100 Gbit/s 551 km G.654.E 光纤超长距离传输系统研究[J]. 光通信技术, 2018(6):53-55.

[7] 沈世奎,王硕,彭伟峰,等. 应用于陆地环境的 G.654.E 光纤光缆

性能评估[J]. 邮电设计技术, 2018(6):24-27.

[8] 谢桂月,陈雄,曾颖. 有线传输通信工程设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010:277-301.

[9] 叶银灿,姜新民,潘国富,等. 海底光缆工程[M]. 北京:海洋出版社, 2015:243-246.

[10] 许增宾,张楼彬,叶明. 超低损耗大有效截面积 G.654.E 光纤成缆及性能[J]. 邮电设计技术, 2018(6):32-34.

[11] 长飞光纤光缆股份有限公司. G.654.E 新型光纤为 400G 部署“铺路”[J]. 现代传输, 2016(3):25-26.

[12] 郑波. 长途光缆网高速率传输情景下的站段设置及光纤选型研究[J]. 现代传输, 2014(s1).

[13] 王光全,乔月强,孙改霞. 长途光缆骨干传输网的规划与建设[J]. 邮电设计技术, 2002(1):10-15.

[14] 曾仙荣. 通信光缆传输网络系统及其设计问题研究[J]. 电子世界, 2017(9):151-151.

[15] 吴金东. 新型光纤的设计与制作工艺研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.

[16] 冯高锋,杨军勇,沈杰. 低损耗大有效面积单模光纤的设计与制造[J]. 现代传输, 2018(2):55-57.

[17] 王海峰. 解析通信管道及线路的规划与设计[J]. 低碳世界, 2017(18).

[18] 胡江胜. 通信管道的设计与规划管理[J]. 信息通信, 2015(8):178-178.

[19] 莫文利. 关于通信管道及线路的规划与设计探讨[J]. 中国电子商务, 2012(23):254-254.

[20] 李任新. 光纤通信技术在电力系统通信中的应用研究[J]. 移动通信, 2016(7):52-53.

[21] 陈伟,袁健,张功会,等. 陆地长距离通信用 G.654.E 新型光纤的开发[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(5):21-24.

[22] SERGEJS M, JOHN D, 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):16-19.

[23] ZHANG C, ZHAO C, WANG G, et al. G.654.E Fibre Deployments in Terrestrial Transport System [C]// Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. 2017.

[24] LEI Z, ZHU J, JING L, et al. Novel ultra low loss & large effective area G.654.E fibre in terrestrial application [C]// Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. 2017.

[25] 沈世奎,王光全. 应对超高速传输需求 中国联通将逐步建设 G.654.E 光缆[J]. 通信世界, 2017(24):46-46.

[26] 王光全,金飙,李铮,等. 陆地 G.654.E 光纤 400G 传输性能验证与应用建议[J]. 邮电设计技术, 2018(6):1-4.

[27] 魏澎,黄少华. 海底光缆工程设计简介[J]. 邮电设计技术, 2006(9):36-41.

[28] 沈一春,蒋新力,范艳层,等. 超低损耗大有效面积光纤的设计[J]. 邮电设计技术, 2018(6):39-43.

作者简介:

贺永涛,高级工程师,主要从事光传输系统工程设计工作;李经章,工程师,主要从事光传输系统工程设计工作;黄劲松,高级工程师,主要从事光传输系统工程设计工作。