

全波段大有效面积新型光纤的设计探讨

杨小琳¹, 李馨春¹, 张留风¹, 满运锋²

(1. 郑州天河通信科技有限公司, 郑州 450100; 2. 河南省通信工程局有限责任公司, 郑州 450000)

摘要: 为提升光通信传输容量, 通过分析 G. 652.D、G. 654.E 光纤的优势和局限性, 以及光纤传输的典型应用场景, 提出全波段大有效面积光纤的研究目标。基于光纤品质因数和兼容性的假设性推断, 从光纤折射率分布、光纤的归一化频率、局部孔径等公式分析计算得出全波段大有效面积光纤的渐变折射率分布幂指数 g , 并探讨新型光纤的衰减、弯曲性能的解决思路, 为实现能够兼容 G. 652.D、G. 654.E 光纤性能的新型光纤开发拓展了新的方向。

关键词: 全波段; 大有效面积; 新型光纤

中图分类号: TN818 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0088-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Discussion on the design of new type of optical fiber with full-band large effective area

YANG Xiaolin¹, LI Xinchun¹, ZHANG Liufeng¹, MAN Yunfeng²

(1. Zhengzhou Tianhe Communication Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450100, China;

2. Henan Communications Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To improve the transmission capacity of optical communication, the research goal of full-band large effective area optical fibers is proposed by analyzing the advantages and limitations of G.652.D and G.654.E optical fibers, as well as typical application scenarios of optical fiber transmission. Based on the hypothetical inference of fiber quality factor and compatibility, the power exponent g of the gradient refractive index distribution of the full band large effective area fiber is analyzed and calculated from formulas such as fiber refractive index distribution, normalized frequency of the fiber, and local aperture. The solution ideas for the attenuation and bending performance of the new fiber are discussed, which expands new directions for the development of new fibers that can be compatible with the performance of G.652.D and G.654.E.

Key words: full band, large effective area, new optical fiber

0 引言

随着物联网、云计算、大数据、超高清视频等业务的快速发展, 光纤通信系统带宽和速率需求持续提高。根据香农定理, 光纤的传输速率越快, 无误码传输所需要的信噪比就越大。当系统升级到更高速率时, 入纤功率越高, 系统的信噪比就越高。然而, 在光纤有效面积不变的情况下, 增大入纤功率也会导致非线性

效应的增大^[1]。为克服大功率的全波长光信号耦合进一根光纤出现的非线性效应, 业界研究并开发了低损耗大有效面积 G.654.E 光纤^[2], 该光纤虽然提高了截止波长, 且降低了非线性效应, 但限制了 G.654.E 光纤在 1 530 nm 波长的应用。本文通过对 G.652.D 和 G.654.E 光纤的优势及局限性进行分析, 结合实际应用, 提出全波段大有效面积光纤的设计思路, 在不增加光纤品种的前提下, 满足绝大多数 G.652.D 或 G.654.E 光纤应用场景, 降低建设、维护 and 应用的复杂性。

1 光纤及其应用场景分析

1.1 G.652.D 光纤的优势及局限性

随着光纤制造技术的发展, 传统单模光纤经历了低水峰光纤、零水峰光纤的演进, 当前使用的 G.652.D

收稿日期: 2023-06-21。

作者简介: 杨小琳(1986—), 女, 河南扶沟人, 硕士, 中级工程师, 中国通信学会会员。现就职于郑州天河通信科技有限公司, 主要从事光纤、光缆及光器件产品的研发、生产及工艺优化, 曾荣获省部级科技进步奖 1 项, 获专利 20 余项。



光纤,已基本消除氢氧根离子(OH⁻)吸收,3种光纤水峰损耗如图1所示。当前使用的G.652.D光纤已经基本消除氢氧根离子(OH⁻)吸收,波长覆盖从1 260 nm到1 675 nm的415 nm宽度范围,因此G.652.D光纤可以提供最宽的波长范围和支持最多的波长应用数量。图1中6个波段对应的划分表如表1所示。

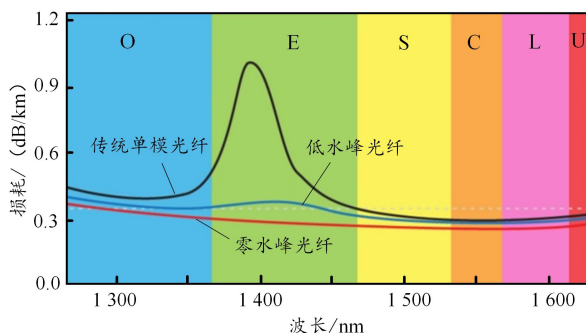


图1 3种光纤水峰损耗

表1 波段划分表

波段名称	波长范围/nm
初始(O)波段	1 260~1 360
扩展(E)波段	1 360~1 460
短(S)波段	1 460~1 530
常规(C)波段	1 530~1 565
长(L)波段	1 565~1 625
超常(U)波段	1 625~1 675

大功率多波长的光信号被耦合进一根光纤,因聚集界面很小,光纤会出现非线性效应。由于光纤的非线性效应,当入纤光功率密度超过一定值时,系统的传输性能会随着入纤光功率密度的增加而逐渐下降^[3]。G.652.D光纤有效面积小,导致光功率密度高,因此易出现非线性效应。

1.2 G.654.E 光纤的优势及局限性

G.654.E光纤比G.652.D光纤的有效面积增加了40%~60%,在非线性效应不变的情况下,最佳入纤光功率可提升1.7 dB左右^[3];同时,G.654.E光纤具有更低的衰减。以康宁公司产品为例,G.654.E TFX光纤在波长为1 550 nm时的典型衰减为0.168 dB/km,常规G.652.D SMF-28e+光纤的典型衰减为0.19 dB/km^[4]。

为了减少非线性效应,G.654.E光纤加大了有效面积,其截止波长也由G.652.D光纤的1 260 nm位移到1 530 nm。因此,目前只使用损耗较低的C和L波段,这些波段的总宽度为95 nm,其利用率约为23%。而城域网中单光模块超100G的传输系统多工作在1 310 nm波长附近(O波段),如果城域网采用G.654.E

光纤,则会限制光模块的选用和调配。

1.3 光纤应用场景分析

2022年,全国长途光缆线路、本地网中继光缆线路和接入网光缆线路长度分别达到109.5×10⁵ km、2 146×10⁵ km和3 702×10⁵ km^[5]。本地网中继光缆占比36%。

省际或省内节点间距离有限。省际以中国联通为例:中国联通现有的省际干线网中,省际干线节点间距为500 km以下的占32%,500~800 km的占33%,800 km以上的占35%^[6];省内以河南为例:全省18个地市,郑州到其它17个地市的距离分布如下:4个地市距离在100 km以下,占比23.5%;6个地市距离在100~200 km之间,占比35.3%;另有6个地市距离在200~300 km之间,也占比35.3%;最后1个地市距离大于300 km,具体为380 km,占比5.9%。

从以上数据可知:在高速率应用方面,本地网中继是最大的应用;G.654.E光纤可支持4 500 km无冗余传输,或者在3 dB冗余时传输2 100 km^[4],远大于长途干线节点间距离;而无线路放大器跨段距离的研究更有意义,可以不建光放站,减少投资;由于陆地站点位置是确定的,过度追求光纤低损耗、增加跨段距离,会使新型光纤技术复杂、成本高,影响推广应用。

2 全波段大有效面积新型光纤的设计探讨

2.1 新型光纤的研究目标

结合以上分析,新型光纤的研究目标内容如下:

- 1)波段:截止波长≤1 260 nm,与G.652.D光纤一致,与目前使用习惯相同;
- 2)光纤有效面积:最大有效面积为130 μm²,与G.654.E光纤相同,以减少非线性效应;
- 3)衰减:衰减典型值不高于G.652.D光纤,符合目前的站点设置习惯;
- 4)兼容:与G.652.D光纤、G.654.E光纤兼容。在本地网可完全替代G.652.D和G.654.E光纤,同时在省内或国内长途也可替代G.652.D和G.654.E光纤,以减少光纤品类。

2.2 新型光纤的假设性推断

2.2.1 新型光纤的兼容性评估

新型光纤的兼容性主要是接续损耗,包含了由于模场直径(MFD)不匹配引起的接续损耗和纤芯折射率差异引起的反射损耗。其中,MFD不匹配引起的接续损耗 M_1 公式如下:

$$M_1 = 20 \lg \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (1)$$

其中, ω_1 和 ω_2 分别为 2 对接光纤的 MFD。

基于新型光纤的 MFD 与 G.654.E 光纤相同这一假设,本文以 G.652.D 和 G.654.E 光纤的 MFD 为模型,进行理论接续损耗计算。由式(1)可知,由于新型光纤和 G.654.E 光纤的 MFD 相同,理论上它们的接续损耗为零;而新型光纤和 G.652.D 光纤由于 MFD 不匹配,存在大的接续损耗。以长飞光纤为例,G.652.D 光纤在 1 550 nm 波长下的 MFD 中值为 10.3 μm ,G.654.E 光纤在 1 550 nm 波长下的 MFD 中值为 12.5 μm ,计算可得这 2 种光纤的接续损耗为 0.16 dB。

由于新型光纤和常规 G.652.D 光纤采用类似掺杂技术,纤芯折射率差异小,因此它们之间的接续点反射损耗低于无掺杂的 G.654.E 光纤与常规 G.652.D 光纤之间的接续点反射损耗。超低损耗有效面积为 130 μm^2 的 G.654.E 光纤与常规 G.652.D 光纤互熔产生的统计损耗在 0.1~0.21 dB 内^[7]。据此推断,G.654.E 光纤与常规 G.652.D 光纤的互熔损耗也应在此范围内。若在常规 G.652.D 光纤中介入一段 G.654.E 光纤,2 个不匹配的接头会增加约 0.3 dB 的损耗(取中间值),但在本地网有限距离内,这种损耗不会对链路损耗预算产生显著影响。

2.2.2 新型光纤的品质因数(FOM)评估

FOM 是一个相对值,用于评估被测评光纤相对于参考光纤的性能差异,其计算公式^[4]为

$$P_{\text{FOM}} = \frac{2}{3} \left[10 \lg \left(\frac{A_1 \times N_2}{A_2 \times N_1} \right) - (\alpha_1 - \alpha_2) \times L \right] - \frac{1}{3} \left[10 \lg \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \right] + \frac{1}{3} \left[10 \lg \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \right] \quad (2)$$

其中, L 为放大器之间的跨段距离; A_1 、 α_1 、 N_1 、 S_1 和 D_1 分别为被测光纤的有效面积、衰减系数、非线性折射率、非线性长度和色散; A_2 、 α_2 、 N_2 、 S_2 和 D_2 分别为参考光纤的有效面积、衰减系数、非线性折射率、非线性长度和色散。

新型光纤参考了常规 G.652.D 光纤的设计,由于采用了梯度渐变折射率纤芯结构,其纤芯平均掺杂浓度更低。因此,其衰减典型值相比常规 G.652.D 光纤更低。在长度为 60~120 km 的跨段中,G.654.E 光纤相对于常规 G.652.D 光纤在 FOM 上有 2.4~3.2 dB 的优势,而相对于低损耗 G.652.D 光纤则有 2.2~2.8 dB 的优势^[4]。此外,低损耗 G.652.D 光纤在 FOM 上比常规 G.652.D 光纤高出 0.2~0.4 dB。

据此推理:FOM 的改善主要取决于光纤的有效面积和衰减性能。鉴于新型光纤的有效面积与 G.654.E

光纤相当,而衰减性能则与常规 G.652.D 光纤相近,本文依据常规 G.652.D 光纤和低损耗 G.652.D 光纤的 FOM 差异推算出,新型光纤的 FOM 在 60~120 km 的跨段条件下相当于 G.654.E 的 88%~92%。

FOM 改善 1 dB 对应 25% 的距离增量,2 dB 对应 60% 的距离增量,3 分贝优势对应 100% 的距离增量。与常规 G.652.D 光纤相比,G.654.E 光纤可将光传输距离延长 70%~100%。在考虑新型光纤性能降低 12% 的情况下,与常规光纤相比,新型光纤的光传输距离仍可延长 62%~88%。这种性能变化对实际应用的影响有限,因此新型光纤仍然能够满足长途传输的要求。

2.3 全波段大有效面积光纤解决思路

2.3.1 新型光纤的大有效面积解决思路

1) 光纤折射率分布。光纤分阶跃型光纤和渐变型光纤。阶跃型光纤纤芯折射率分布是均匀的,常用单模光纤采用阶跃型;渐变型光纤纤芯折射率分布是非均匀的,多模光纤常采用渐变型。

将光纤折射率 n 作为半径 r 的函数,从光纤芯轴至包层折射率随半径的变化如式(3)所示。

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta(r/a)^g}, & |r| \leq a \\ n_2, & |r| > a \end{cases} \quad (3)$$

其中, n_1 为纤芯折射率; Δ 为标准化折射率差(芯/包层相对折射率差); r 为离开光纤轴线的距离; a 为纤芯半径; g 为折射率分布幂指数; n_2 为包层折射率。

当折射率分布幂指数 g 为 1、2、 ∞ 时的光纤折射率分布如图 2 所示。可以看出,当 $g=1$ 时,光纤呈现出三角折射率分布特性;当 $g=2$ 时,光纤呈现出平方率折射率分布特性;当 $g=\infty$ 时,光纤呈现出阶跃折射率分布特性。

2) 阶跃光纤的归一化频率。阶跃光纤的归一化频率公式为

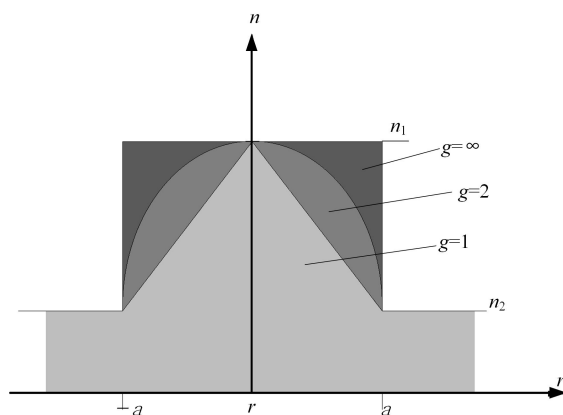


图2 光纤折射率分布

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a K_{NA} \quad (4)$$

其中, λ 为波长; K_{NA} 为数值孔径。

当 $V \leq 2.405$ 时,这种光纤仅存在单一模式,被称为单模光纤。

对于 G.654.E 光纤,为了减少非线性,本文通过增大芯半径来增加纤芯面积;同时,为了保持 $V \leq 2.405$,必须加大截止波长。但这意味着需要牺牲一定的带宽。

3)渐变光纤的归一化频率。对具有任意幂指数 g 的折射率分布,渐变光纤的极限值 V_c 的近似表达式^[8]为

$$V_c \approx V_{c\infty} \sqrt{\frac{g+2}{g}} \quad (5)$$

g 为 ∞ 时渐变光纤的归一化频率 $V_{c\infty} = 2.405$, 当 $g \rightarrow \infty$ 时, $V_c \approx V_{c\infty}$, 光纤呈现出阶跃型折射率分布特性。由式(5)可知,在单模传输条件下,渐变型光纤归一化频率高于阶跃型光纤。因此,为了降低截止波长,在保持纤芯半径不变的前提下,新型光纤纤芯采用合适 g 值的渐变折射率分布。

4) g 值的确定。新型大有效面积光纤纤芯采用渐变式折射率分布,由于折射率是变化的,因此引入了局部数值孔径的概念。其公式为

$$K_{NA}(r) = \begin{cases} \left[n^2(r) - n_2^2 \right]^{1/2} \approx K_{NA}(0) \sqrt{1 - (r/a)^g}, & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases} \quad (6)$$

$K_{NA}(0)$ 为纤芯轴向的数值孔径,其公式为

$$K_{NA}(0) = \left[n^2(r) - n_2^2 \right]^{1/2} = \left[n_1^2 - n_2^2 \right]^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (7)$$

根据阶跃型光纤数值孔径的计算公式为

$$K_{NA} = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8)$$

渐变型光纤数值孔径的计算公式为

$$K_{NA}(r) = \sin[\theta(r)] = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} \quad (9)$$

其中, $\theta_{\max}$ 为光在纤芯上的最大入射角, $\theta(r)$ 为光在离纤芯 r 处所成入射角。由式(8)、式(9)可知,阶跃型光纤数值孔径是恒定的;渐变型光纤数值孔径从芯轴到包层逐渐变小,因此芯轴的数值孔径决定了归一化频率 V 的最大值,也即决定了是单模或多模传输模式。假设新型光纤芯半径和 G.654.E 芯半径相等,新型光纤芯轴的数值孔径和 G.654.E 的数值孔径也相等,将相应常数代入式(4)、式(5)可得

G.654.E 单模传输条件为

$$2.408 = \frac{2\pi}{1530} a K_{NA} \quad (10)$$

新型光纤单模传输条件为

$$2.408 \times \frac{g+2}{g} = \frac{2\pi}{1530} a K_{NA} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{g+2}{g}}} \approx \frac{1530}{1530} \quad (12)$$

其中, $g \approx 4.21$ 。

2.3.2 新型光纤的衰减解决思路

衰减主要和纤芯掺杂浓度有关。目前,常规 G.652.D 光纤的包层由纯氧化硅构成,而芯层则由掺入了 GeO_2 的氧化硅构成。超低损耗 G.652.D 光纤的芯层由纯 SiO_2 构成,包层则由掺氟的氧化硅构成。超低损耗 G.654.E 光纤与超低损耗 G.652.D 光纤的结构类似。对于新型光纤的设计,可以考虑以下 2 种方案:

方案 1:使新型光纤的轴心掺杂浓度与常规 G.652.D 光纤的相当,但由于其纤芯采用渐变折射率结构,使得整个纤芯的平均掺杂浓度低于常规 G.652.D 光纤。因此,理论上,该光纤的衰减典型值应不高于常规 G.652.D 光纤。

方案 2:使新型光纤的纤芯轴心掺杂浓度低于常规 G.652.D 光纤,且其包层采用氧化硅掺氟的设计。与方案 1 相比,其衰减理论上会更低。

2.3.3 新型光纤的弯曲解决思路

增大光纤有效面积会导致芯径数值的增加,进而影响光纤的弯曲性能。为了克服这一弊端,本文采用文献[7]提出的下陷包层技术。

2.3.4 新型光纤的生产评估

自 20 世纪 70 年代末期开始规模生产光纤以来,随着对光纤预制棒制造技术的不断研究和完善,我们逐步形成了轴向气相沉积法(VAD)、外部化学气相沉积法(OVD)、改进的化学气相沉积法(MCVD)、等离子化学气相沉积法(PCVD)等几种主要的光纤预制棒制造技术。各个制造商结合自身使用的技术特点,摸索出了各自独特的生产工艺。

由于光纤各层不同尺寸设计会对衰减、截止波长、宏弯、色散、MFD 等产生影响,因此生产难点在于光纤剖面参数匹配、凹陷形状/宽度/深度设计,以及各层尺寸设计。由于 G.654.E 光纤生产工艺已成熟,有一定的设备和生产技术基础,因此具备 G.654.E 生产能力的纤维制造商可结合 G.654.E 光纤生产工艺进行研究实验,我公司也将和关联企业一起,通过对新型光纤的研究结合掌握的 G.654.E 光纤生产工艺,加快新型光纤的设计和试制。

杨小琳,李馨春,张留风,等:全波段大有效面积新型光纤的设计探讨

3 结束语

增加光纤波段和提高单载波速率是有效提升光通信传输容量的 2 个维度。本文从实际应用出发,对全波段大有效面积的新型光纤进行了设计探索。通过比较分析了 G.652.D 光纤、G.654.E 光纤的相应指标,并对新型光纤的设计进行了理论计算与分析,证明了该新型光纤结构的可行性。该新型光纤能够兼容 G.652.D 和 G.654.E 光纤,在省内可以基本代替 G.652.D 和 G.654.E 光纤使用。在提高光通信传输容量的同时,不增加光纤品种。同时,其规模化应用也能有效降低产品成本,为光纤的建设和维护工作提供了极大的便利。然而,由于开发费用和生产条件的限制,该光纤尚未进行详细的设计、试制和实验。

参考文献:

[1] 郝小龙. 低损耗大有效面积光纤预制棒设计及制造[C]// 中国电子

材料行业协会. 光纤材料产业技术创新战略联盟一届七次理事会暨技术交流会会议文集. 荆州: 光纤材料产业技术创新战略联盟, 2017: 104-109.

[2] 韩镭, 肖华, 钟媛, 等. 一种新型超低损耗大有效面光纤的技术研究[J]. 电信科学, 2020, 36(12): 41-48.

[3] 鲜枣课堂. 什么是 G.654E 光纤?[EB/OL]. (2022-05-15)[2023-06-21]. <https://www.eet-china.com/mp/a131858.html>.

[4] 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): 10-13.

[5] 工信部运行监测协调局. 2022 年通信业统计公报[EB/OL]. (2023-01-19)[2023-06-21]. https://wap.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2023/art_77b586a554e64763ab2c2888dcf0b9e3.html.

[6] 吕洪涛, 张曜晖, 金飙. 中国联通省际干线光缆网光纤技术和建设方式研究[J]. 邮电设计技术, 2018(6): 38-44.

[7] 李鹏, 吴俊, 邓黎, 等. 国产超低损耗光纤在超长距离通信系统中的应用[J]. 邮电设计技术 2018(6): 5-9.

[8] [德]京特·马勒克, 彼得·格森. 光缆[D]. 胡先志, 等译, 武汉: 武汉工业大学出版社, 1996.