

· 学术论文与技术报告 ·

光纤传输特性及其在光网中的应用设计分析*

张宏斌** 邱 昆 周 东

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 对光纤的衰减、色散、非线性效应等传输特性作了阐述。结合应用要求,对光纤的种类及设计情况作了详细介绍和分析,并对光纤的选择应用作了分析说明。

关键词 光纤; 衰减; 色散特性; 非线性效应; 波分复用

中图分类号 TN913.24

自70年代光纤商用化以来,光纤以惊人的速度得到推广应用,尤其是随着信息产业急剧膨胀,信息的传输向着高速率、大容量、多业务的方向发展,光纤以通信容量大、中继距离长、抗干扰能力强以及经济效益好等优点正迅速取代传统的同轴电缆,成为有线信息传输的最佳介质。目前光纤的应用正步入成熟期,世界上一些主要国家和地区已经拥有庞大的光传输网络系统,我国也基本建成了覆盖全国省会城市和重点地区并连至世界的“八纵八横”光纤传输骨干网,骨干网中敷设的光纤路由已达 1.73×10^5 km,而整个网络中的光缆已远远超过 10^6 km^[1]。

目前对光纤、光缆的应用已深入到通信领域的诸多方面,不同的应用场合对光纤有不同的要求,如何优化设计光纤、优化应用光纤,关系到光通信网络运行成本的高低和运行性能的优劣。许多重要的研究机构和开发公司(如朗讯贝尔实验室和美国康宁玻璃公司等)对此作了大量研究开发工作,已有不少性能优良、适合不同应用环境的光纤种类面世。本文介绍了光纤的传输特性,面向各种不同的应用要求,分析了光纤的种类设计及开发情况。

1 光纤传输特性

带宽、衰减及色散是光纤的基本传输特性,在高功率条件下则要产生非线性光学特性。

1.1 衰减特性与波长窗口

光信号在光纤中传输时,一部分能量会被吸收或散射,从而导致光信号减弱,这一现象称为光纤的衰减特性。吸收损耗和散射损耗与传输光波的波长有关,典型的光纤损耗波长曲线如图1所示。吸收损耗是材料中的粒子吸收光能产生振荡发热所致,分固有吸收和杂质吸收两种。固有吸收分紫外吸收和红外吸收。杂质吸收主要为残留在光纤中的OH⁻离子吸收光能所致。氢氧根有两个吸收峰,其中吸收峰基波在720 nm附近,吸收峰两次谐波在1380 nm附近。图示情况表明,两次谐波吸收对长波长光能量的损耗最大,影响最严重,应设法加以克服。散射损耗是以光能形式将能量辐射,其中最主要的是瑞利散射。瑞利散射是一种弹性散射,与波长4次方成反比。

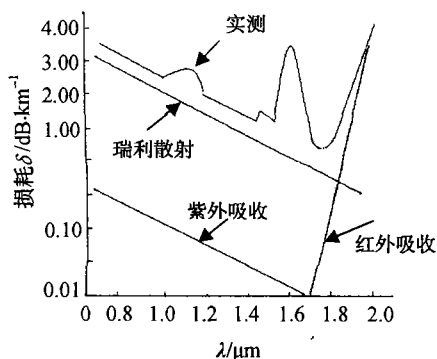


图1 光纤损耗波长曲线

2000年5月26日收稿

* 四川省青年科技基金、四川省学术和技术带头人培养基金资助项目

** 男 36岁 在站博士后 副教授

根据光纤的损耗波长曲线, 光纤的典型工作波长窗口有3个, 即850 nm、1 310 nm 和1 550 nm。3个窗口中以1 550 nm 窗口损耗最低, 该窗口也是目前被广泛采用的窗口。850 nm 窗口为早期第一代光通信系统所采用, 由于其损耗较高, 现在已很少利用这一窗口。目前正在开发1 600 nm 波段(L-Band), 这一窗口被定义为第四窗口。在1 350~1 530 nm 波段, 由于OH⁻离子的二次谐波吸收峰位于其间, 所以未能得到很好利用。朗讯公司已开发出能消除“水峰”的制造工艺, 已制造出一种称为全波的光纤, 可望用于此波段, 使得1 400 nm 窗口的利用成为可能, 这一窗口被定义为第五波长窗口^[2]。

1.2 色散

在光纤中传输的光信号, 其不同成分的时间延迟不同, 从而使光脉冲展宽, 这一现象称为色散。光纤色散包括模式色散、色度色散和偏振模色散。模式色散是由于波场的传输模式不同而引起的, 显然只存在于多模光纤中。色度色散包括材料色散和波导色散。材料色散是由于光纤的折射率随波长不同而改变所引起的, 而波导色散是由光纤几何结构等参数决定的一种色散, 是由部分光功率进入包层中传输, 而包层中的光速比芯中的快所引起的时差。在多模光纤中主要是模式色散和材料色散, 波导色散可忽略; 在单模光纤中材料色散是主要的, 波导色散也不可忽视。

理想圆对称光纤可以在给定的距离以相同的传输时间传输两个正交的HE₁₁模。但实际光纤的纤芯椭圆度和残留各向异性应力破坏了正交模的简并, 使两个正交偏振模的延迟不同, 其中在短轴方向的偏振模传输较快, 在长轴方向的偏振模传输较慢, 称为偏振模色散(PMD)^[3]。PMD对传输有线电视的模拟系统和长距离、高速率的数字系统的影响是不可忽视的。由于色散要使脉冲展宽从而使传输信号失真, 所以一方面要设计和制造出色散小、色散平坦的光纤, 另一方面则要尽量使用已有光纤的小色散窗口。

1.3 光纤的非线性效应

当光纤中所传输的光信号功率足够高时, 光信号会与光纤发生相互作用使光信号发生改变, 称为光纤的非线性效应, 会使光信号发生畸变从而影响系统的性能^[4-7]。非线性效应可分为受激散射和非线性折射率两类。

1.3.1 受激散射

受激散射包括喇曼散射(SRS)和布里渊散射(SBS), 这两种散射属于非弹性散射^[8], 即光波和光纤介质相互作用时交换能量, 光波损失能量, 波长变长。SRS和介质的光学性质有关, 频率较高的“光学支”声子参与散射; SBS与介质的宏观弹性性质有关, 频率较低的“声学支”声子参与散射。产生SBS的功率门制在所有非线性效应中是最低的, SBS的门限值与光源谱线宽度及光纤特性有关, 而与通道数无关^[4]。通过改善光源的谱线宽度可以较容易地提高SBS的门限值, 从而有效控制SBS效应^[9]。SRS的功率门限值较高, 与光纤、传输的通道数、通道间隔、每个通道的平均功率以及信号非再生系统长度等因数有关。SRS的典型门限值大约为1 W^[4], 因其功率门限值较高, 目前在光网络的推广应用不会产生严重影响。

1.3.2 非线性折射率

理想的石英光纤的折射率在传输光功率较低时为不变的常量, 但当光功率足够高时, 折射率便会随光信号的强度变化而变化, 从而产生非线性折射率效应。非线性折射率可分为三种基本类型, 即自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)^[8]。

自相位调制是光脉冲对自身相位的一种调制效应。由于在光脉冲间隔内各处的强度随时间而变, 因而会产生相应变化的折射率分布。这种变化的折射率反过来会对所传输的光波相位进行调制, 从而使光脉冲的波长谱宽展宽。这种展宽严重时会使密集分复用(DWDM)系统中的相邻通道相互遮盖, 影响传输性能。采用低色散或零色散光纤能减小SPM对系统性能的影响; 采用大模场面积的光纤可降低光功率密度, 从而减小SPM的影响, 这对抑制其他非线性效应同样有效。

交叉相位调制(XPM)的产生机理与 SPM 相同,只不过 XPM 是某一通道上的光脉冲对其他通道的光脉冲的相位产生的一种调制效应。XPM 只在多通道复用系统中存在,而 SPM 在单通道系统和多通道系统中均存在。

当两个或两个以上光波长在同一光纤中同时传输时,在一定条件下会产生一个或多个新的光波长,称为四波混频(FWM)^[7]。FWM 效应可表示为

$$f_4=f_1\pm f_2\pm f_3 \quad (1)$$

式中 f_1 、 f_2 、 f_3 为所传输的光波频率; f_4 为 FWM 效应产生的新频率。由于四波混频过程需要满足相位匹配条件,所以大多数“±”组合的新波长都不可能产生,只有

$$f_4=f_1+f_2-f_3 \quad (2)$$

这一组合最容易满足相位匹配条件,所以 FWM 效应实际上可表述为式(2)。四波混频效应可能使复用系统所传输的信道功率严重流失到新的波长信道中,使传输信号减弱,而且新的波长信道还会产生信道干扰,影响系统的传输质量。FWM 的影响对于信道间隔较小的 DWDM 系统尤为严重,需加以有效控制。其有效抑制方法是利用适当的色度色散来破坏信号间的相位匹配条件,从而抑制 FWM 的产生。

2 光传输网中光纤的种类及设计分析

2.1 多模光纤

多模光纤推广应用于70年代后期至80年代初期,有很大的芯径(50 μm),其 ITU-T 标准为 G.651。多模光纤商用后很快就被衰减小、容量大的单模光纤所取代,目前多模光纤几乎只在距离不到1 km 的楼宇系统中才有应用。单模光纤以其低损耗、超带宽的优良特性自80年代初以来迅速得到推广应用,结合光纤的传输特性和应用要求,目前已开发出多种类型的单模光纤,分别介绍如下。

2.2 常规单模光纤(G.652)

G.652标准光纤也称非色散位移光纤(USF),于1983年开始应用,在1 310 nm 处理论色散值为0,在1 550 nm 处损耗最低。该光纤目前在世界上应用最广,我国敷设的几乎都是 G.652光纤^[1]。由于目前光纤放大器的工作窗口为1 550 nm,所以现有的波分复用系统均采用第三波长窗口。G.652光纤在此波长窗口有较大的色散,能有效抑制四波混频效应,但其缺点是会严重损坏 WDM 系统的传输性能。所以用该光纤作为传输介质的 WDM 系统需用色散补偿光纤(DCF)进行色散补偿,或用其他新型光纤,如非零色散光纤(NZDF)代替 G.652光纤作为传输介质。

2.3 色散位移光纤(G.653)

色散位移光纤(DSF)于1985年开始应用,其特点是将零色散点从常规光纤的1 310 nm 移至1 550 nm,实现了将光纤的最低损耗窗口和零色散窗口统一在1 550 nm 波长上。但 DSF 光纤并不适合于波分复用系统,尤其是 DWDM 系统。因为 DSF 光纤在1 550 nm 处为零色散,给 WDM 系统带来严重的 FWM 效应,所以 DSF 一般只用于长距离单波长通道的传输系统。

2.4 1 550 nm 波长处损耗最小光纤(G.654)

该光纤与 G.652一样,其零色散点仍然位于1 310 nm,只是其设计重点为尽可能降低1 550 nm 波长处的衰减值。其纤芯用纯石英玻璃制成,而包层则深度掺杂,以降低光纤对弯曲损耗的敏感性。由于制造该种光纤难度较大,因此价格昂贵,其主要应用于不要求进行中继的海底系统中,以保证在不需要插入有源部件的同时实现长距离传输。

2.5 非零色散光纤(NZDF, G.655)

为了克服色散位移光纤的不足,出现了非零色散光纤。朗讯公司专门为 DWDM 系统设计的一种名为真波的新型光纤,该光纤已被 ITU-T 采纳,列入 G.655光纤。这种光纤在1 550 nm 窗口同时具有较小损耗和色散(但不为零),尤其是对其色散值进行了合理的折中设计,即此色散值一方面

要足够大,以保证能有效抑制四波混频效应(FWM);另一方面应足够小,以保证在单通道传输速率为10 Gb/s、传输距离大于250 km时不需要进行色散补偿^[2]。NZDF已被广泛应用于长距离海底和陆上传输网络系统中。

2.6 色散平坦光纤(DFP)

随着光纤通信的迅速发展,不应只满足于某一波长附近具有零色散或低色散,应力争实现在整个光纤通信的长波长段(1 300~1 600 nm)具有低损耗和低色散,满足这样要求的光纤称为色散平坦光纤。该类光纤对 WDM 技术实现在一根光纤上同时承载多个光载波有很大价值,其种类有 W 型 DFP 或多层包 DFP,是采用特殊的两包层或多包层结构以改变折射率的分布,获得宽波段内平坦的小色散特性。英国南安普顿大学光电研究中心报道了一种采用特殊工艺制造的多气孔光纤^[9]。其气孔呈阵列式按一定规律轴向分布在光纤中,具有平坦的色散特性,能在很宽的波长范围内传输单模光波,在波分复用系统中采用非常理想,但这种光纤制造工艺复杂,目前还处于试验研制中,实验室制造长度仅为50 m。

2.7 色散补偿光纤(DCF)

现有的 WDM 系统大部分建构于 G.652常规单模光纤上,且工作波长窗口为1 550 nm,而 G.652 光纤在此波长窗口处有较大的色散。显然,现有的 WDM 系统需要一种能对色散能进行补偿的光纤,色散补偿光纤正是因此目的而研制的。DCF 光纤要求产生的负色散越大越好,可缩短补偿光纤的长度,减小占用空间。目前研制出的 DCF 已达到-548 ps/nm.km。

2.8 全波光纤

由图1可知,由于 OH⁻离子的二次谐波吸收峰位于1 385 nm 波长附近,所以,在1 350~1 450 nm 长波范围内具有很好位置的波段一直未能得到利用。为了开发利用这一波长禁区,朗讯公司正着力于研制一种称为全波光纤的新型光纤,并开发了一种能消除“水峰”的制造工艺。全波光纤具有诱人的开发价值,可以实现对整个长波长段(1 300~1 600 nm)的完全开发利用,尤其是1 350~1 450 nm 这一波段位于1 310 nm 和1 550 nm 两个窗口之间,因此其损耗(在克服了 OH⁻二次谐波吸收峰情况下)和色散都不会太大,所以这一禁区的开发利用对 WDM 系统很有价值。同时,由于全波光纤的有效工作波长范围很大,因此可以通过增大波长通道之间的间距来降低对一些器件(如激光器、复用解复用器、波长分插器等)的要求,从而降低网络成本。

2.9 大模场面积光纤

海底光纤通信系统要求无中继距离往往在数千公里以上,这样长的无中继传输距离要求有很高的光信号功率注入,因此会引起非线性效应。为了克服这一矛盾,美国康宁公司正在研制一种大有效面积的非零色散光纤(LEAF)。由于模场有效面积较大,所以这种光纤能降低信号的功率密度,从而提高产生非线性效应的功率门限值,有效抑制非线性效应。朗讯公司研制的真波 XL 光纤也有此特性,同时这种光纤具有一定的负色散特性,能抑制调制不稳定性。

3 结束语

光纤的设计应充分结合光纤的传输特性和应用要求,目前的光纤种类 G.652、G.653、G.654、NZDF 等都是两者结合的设计产物。随着新的通信业务的产生和新的应用要求的出现,新的光纤种类必定会得到进一步开发和应用。一种光纤原则上可以应用于不同的使用环境,但实际上光纤存在优化应用问题。例如,G.653色散位移光纤对于单波长传输系统为最佳选择,但对 WDM 系统却很不适宜;而非零色散光纤(NZDF)虽然可以应用于多种环境,但对波分复用系统是最佳选择。具有大模场面积的光纤(如 LEAF 和真波 XL),对无中继距离很长、传输信号功率较大的长距离通信系统很适宜,但对像城域网(MAN)等这样的网络层应用,并不需要无中继长距离信号传输,而主要具有波长分插复用处理能力,在这种情况下选用色散平坦光纤和全波光纤则非常合适。光纤

种类的设计和选用应和应用环境要求相匹配,对提高光纤通信系统的通信性能、降低通信成本有很大意义。

参 考 文 献

- 1 Leping Wei, Yi Chen, Wong Gerald G. The evolution of China's optical fiber networks. *Bell Labs Tech J*, 1999: 125~144
- 2 Refi James J. Optical fibers for optical networking. *Bell Labs Tech J*, 1999: 246~260
- 3 原 荣. 光纤通信网络. 北京:电子工业出版社, 1999
- 4 Chraplyvy A R. Limitations of lightwave communications imposed by optical fiber nonlinearities. *J Lightwave Tech*, 1990, 8(10):1 548~1 557
- 5 Chraplyvy A R. Impact of Nonlinearities on lightwave systems. *Optical and Photonics News*, 1994, (5): 16~21
- 6 Shibata Nori, Nosu Kiyoshi, Iwashita Katsushi, *et al.* Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems. *IEEE J Select Areas Commun*, 1990, 8(6):1 068~1 077
- 7 Kyo Inoue, Hiromu Toba, Kazuhiro Oda. Influence of fiber four-wave mixing on multichannel FSK direct detection transmission systems. *J Lightwave Tech*, 1992, 10(3): 350~360
- 8 王志良, 任 伟, 林为干. 单模光纤中非均匀性有源分子的非弹性散射. *电子科技大学学报*, 1992, 21(增刊): 17~21
- 9 Bennett P J, Tanya M Monro, Richardson D J. Toward practical Holey fiber technology: fabrication, splicing, modeling, and characterization. *OPTICAL LETTERS*, 1999, 24(17): 1 203~1 205

Transmission Properties of Optical Fiber and Its Application Design for Optical Networking

Zhang Hongbin Qiu Kun Zhou Dong

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the transmission properties of fiber are investigated. According to the application requirements for optical networking, the types of fiber and its application design: are described and analyzed in detail, and the optimum application of fiber is addressed.

Key words optical fiber; attenuation; dispersion properties; nonlinearities; wavelength division multiplexing