

一种适于高速、多路通信系统的小色散单模光纤*

宋 健 范崇澄 杨知行

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 给出了色散系数分别为(± 2 ps/km/nm)的小色散单模光纤一种可能的折射率分布及主要的设计参数, 并讨论了此光纤在系统中的应用。结果表明小色散单模光纤具有的适当色散, 既可有效抑制四波混频, 又不致造成严重的色散限制, 故适于高速、多路光纤通信系统采用。在系统中同时使用色散补偿技术时, 在相邻在线放大器间采用 ITU-TG. 652 常规单模光纤结合负小色散单模光纤的方案不仅可有效地抑制四波混频并减小光纤色散限制, 使 10×10 Gb/s、10 级掺铒光纤放大器系统占用带宽从 16.2 nm 压缩到 9.4 nm; 甚至可能实现等间距信道传输, 从而大大简化了此类系统的设计。

关键词 小色散单模光纤, 四波混频, 色散限制, 色散补偿。

1 引 言

光纤通信系统的扩容可以采用提高单路码率和利用波分复用(WDM)技术等方案。对于前者而言, 随着单路码率的提高, 系统将主要受到电路元器件和光纤色散的限制。文献[1]给出了在任意眼图恶化量 X 、归一化脉宽 P 和光源线宽展宽因子 α 下的色散限制公式,

$$B^2L = \mathcal{Y}(c/|D|\lambda^2), \quad \mathcal{Y} = \begin{cases} (2\pi/P^2) \{ (\sqrt{q^2\alpha^2 + q^2 - 1} - \alpha)/(1 + \alpha^2) \} & D \geq 0 \\ (2\pi/P^2) \{ (\sqrt{q^2\alpha^2 + q^2 - 1} + \alpha)/(1 + \alpha^2) \} & D < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 B 为单路码率; L 是系统无再生中继距离; \mathcal{Y} 为系统色散因子; c 是真空中光速; D 为光纤色散系数; λ 是光源的工作波长; q 为相对脉宽展宽因子, 系眼图恶化量 X 和归一化脉宽 P 的函数, 在 $X = 1$ dB 和 $P^2 = 8 \ln 2$ 的典型参数下, $q \approx 1.21$ 。

由(1)式可知: 色散限制反比于光纤色散系数的绝对值 $|D|$, 因此大容量系统要求采用 $|D|$ 尽可能小的光纤(如 ITU-TG. 653 色散位移光纤(DSF)或增加信道数; 后一方案可充分利用掺铒光纤放大器(EDFA)的带宽, 但随着系统中信道数的增加, 将面临光纤中非线性效应的限制, 其中四波混频(FWM)效应通常是对陆上干线通信系统(总长数百公里)影响最严重的一种非线性效应。抑制四波混频应设法增加信道间距(系统总带宽增加, 可能超过级联掺铒光纤放大器的有效带宽)和/或光纤色散系数的绝对值 $|D|$ ^[2] 如 ITU-TG. 652 常规单模光纤(CSMF), 但与色散限制相矛盾)。所以, 迫切需要设计一种新型的小色散单模光纤

* 本研究工作受到国家自然科学基金支持。

收稿日期: 1995年8月31日; 收到修改稿日期: 1996年1月8日

(SDSMF), 它既有一定色散从而能有效抑制四波混频、其色散又不大, 可避免严重的色散限制。

2 小色散单模光纤的主要参数指标

新设计的小色散单模光纤应满足以下要求:

1) 考虑到单级掺铒光纤放大器的带宽约40 nm, 故要求小色散单模光纤零色散波长 λ_0 应在1530~ 1570 nm 范围外, 以保证在信号波长下其色散不为0, 不会出现严重的四波混频。由于其 λ_0 仍在 1.5 μm 波段, 故小色散单模光纤也可看成是某种特殊的色散位移光纤;

2) 光纤色散系数绝对值 $|D|$ 一般在 1550 nm 处为~ 2 ps/km/nm, 以保证不会出现严重的色散限制;

3) 模场直径与常规单模光纤参数接近, 以保证两者间的熔接损耗足够小;

4) 折射率分布应与色散位移光纤相差不大, 以利于工艺实现及不引入过高的损耗。

作者从迭代有限元方法求解单模光纤的方程^[3]出发, 研究了相关算法, 并开发了在 PC 机上对于任意折射率分布的园截面单模光纤进行求解的软件包^[4]。它能快速给出具有足够精度的模场分布(本征函数)和色散(本征值的二阶导数)解。与具有精确解的阶跃折射率分布光纤相比, 其色散误差 < 5%, 在486/DX2 66微机上计算一个工作点的时间仅约20秒。利用这一模型, 得出了两种小色散单模光纤折射率分布的计算结果(见图1)。其在1550 nm 处的色散分别为+ 2和- 2 ps/km/nm, 以下分别称为正小色散单模光纤和负小色散单模光纤。它们在1500~ 1600 nm 范围内的材料色散、波导色散和总色散曲线见图2, 可见两种小色散单模光纤在1550 nm 处的色散系数分别为- 2.21和+ 2.07 ps/km/nm, 基本满足设计要求。由于小色散单模光纤的折射率分布与色散位移光纤差别不大, 故不存在制造上的特殊困难, 它在1550 nm 附近的损耗特性也将与色散位移光纤接近。事实上, 某些不合格的色散位移光纤(在1550 nm 附近的色散系数不近似为0)的色散特性可能满足小色散单模光纤的设计指标, 但它的模场直径等参数可能不满足所设计的小色散单模光纤的要求。

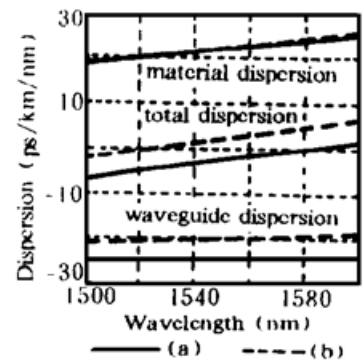
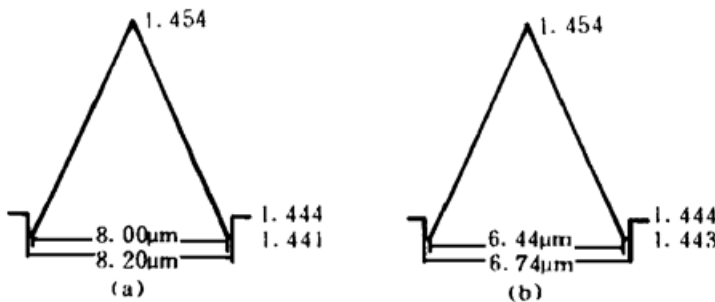


Fig. 1 Possible refractive index profile having dispersion of (a) - 2.21 ps/km/nm (negative SDSMF), and (b) + 2.07 ps/km/nm (positive SDSMF) at 1550 nm

Fig. 2 The material, waveguide and total dispersion of (a) negative SDSMF and (b) positive SDSMF within 1500~ 1600 nm

为了得到1550 nm 附近小色散单模光纤的 λ_0 和色散斜率 S_0 , 需要利用光纤色散曲线的近似计算式 $D(\lambda) = (S_0/4)(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)$ 对图2中的两条总色散曲线进行拟合, 结果示于图3, 分别得到 $\lambda_0 = 1579 \text{ nm}$ 、 $S_0 = 0.074 \text{ ps/km/nm}^2$ (负小色散单模光纤)和 $\lambda_0 = 1525 \text{ nm}$ 、 $S_0 = 0.085 \text{ ps/km/nm}^2$ (正小色散单模光纤)。图4为两种小色散单模光纤的模场直径曲线(包括近场

W_{RMS} 和远场 W_L), 可见在 1550 nm 附近, 小色散单模光纤与常规单模光纤的模场直径较为接近, 可以保证两者间的低损耗接续。

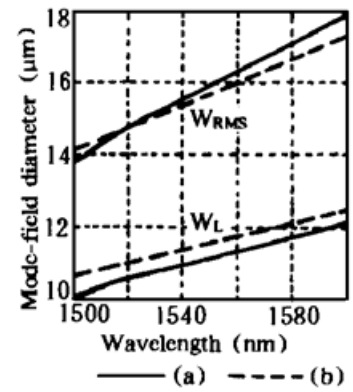
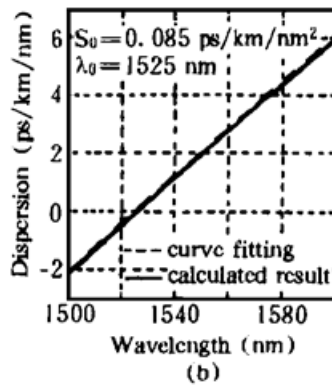
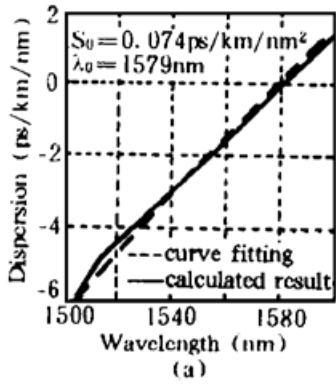


Fig. 3 Curve-fit of the total dispersion curves of (a) negative SDSMF and (b) positive SDSMF Fig. 4 The mode-field diameters (near-field W_{RMS} and far-field W_L) of (a) negative SDSMF, and (b) positive SDSMF as a function of wavelength

3 小色散单模光纤在系统中的应用

分两种情况进行讨论:

1) 系统中只采用小色散单模光纤时(以负小色散单模光纤为例): 对于一个10路× 10 Gb/s 的陆上级联掺铒光纤放大器系统, 当系统参数为: 掺铒光纤放大器级间光纤长度 $L =$

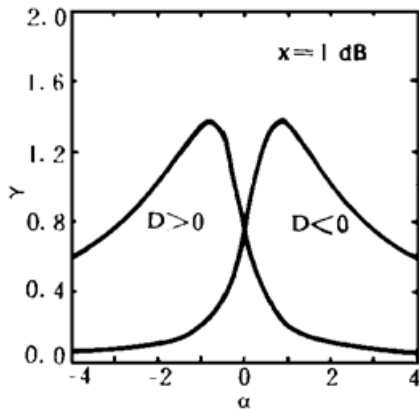


Fig. 5 System dispersion index Y as a function of linewidth enhancement factor α under positive and negative fiber dispersion index D . Here $Y = B^2 L \lambda^2 |D| / c$, and $B =$ bit-rate per channel; $L =$ regeneration span; $\lambda =$ wavelength; $c =$ light velocity in vacuum

50 km、单路光信号功率 $P_0 = 2$ mW、光信道滤波器带宽 $B = 0.2$ nm、最小信道间隔 $5B$ 且为 B 的整数倍、光信噪比 $SNR_0 = 50$ (17 dB) 时, 据计算, 应用外调制技术 (光源线宽展宽因子 $\alpha = 0$) 可实现近 500 公里的无再生中继传输, 系统占用带宽 10.4 nm^[5]。此时系统中最短信道波长 1550.0 nm, 信道间隔分别为 1.0, 1.0, 1.2, 1.4, 1.0, 1.2, 1.4, 1.2 和 1.0 nm, 在 $X = 1$ dB 和 $P^2 = 8 \ln 2$ 的典型参数下光纤色散和四波混频引入的恶化量分别小于 1 dB。与参考文献[6]的结果进行比较可以发现: 系统占用的总带宽仅为前者(16.2 nm) 的 64%, 表明本系统的信道均衡问题更易解决, 或者有能力容纳更多的信道。另一方面, 本系统的无再生中继距离偏短, 说明它主要受光纤色散的限制。为进一步克服光纤的色散限制, 根据图5给出的光纤色散分别大于、小于 0 时的色散限制曲线^[7]分析, 系统可以采用电吸收调制器

(如 $\alpha = 0.5$), 代入(1) 式进行计算, $X = 1$ dB 和 $P^2 = 8 \ln 2$ 时本系统的无再生中继距离预计约为 800 公里。需要说明的是: 四波混频引入的恶化量与掺铒光纤放大器的级数成正比, 为保持功率代价 PP 不变, L 应增至 ~ 80 km。通常陆上级联掺铒光纤放大器系统中在线放大掺铒光纤放大器间距为 80~ 150 km, 而 $L 50$ km 后, L 变化对四波混频引入恶化量的影响可以忽略^[8]。

2) 系统采用小色散单模光纤并结合色散补偿措施: 采用色散补偿技术减小光纤总色散

能够使得小色散单模光纤系统的无再生中继距离进一步加长。一种色散补偿措施是交替使用正负小色散单模光纤,使其色散相抵:当1550 nm处总色散为零时,在1530~1570 nm范围内光纤残余色散的绝对值 ≤ 1.5 ps/km/nm,从而保证使用外调制技术($\alpha=0$)的多路10 Gb/s系统在色散限制下的无再生中继距离达到近700公里($X=1$ dB和 $P^2=8\ln 2$),系统占用的带宽与仅采用负色散小色散单模光纤时大致相同。另一种更有利于克服色散限制的方案是交替使用常规单模光纤(在1550 nm处 $D\sim 17$ ps/km/nm)和负小色散单模光纤,当1550 nm处总色散为零时(长度比约为1.8),可使1530~1570 nm范围内光纤残余色散的绝对值限制在1 ps/km/nm内^[7]。典型参数为 $X=1$ dB和 $P^2=8\ln 2$ 时可以算出色散限制下的无再生中继距离将超过1000公里^[11](为使此时四波混频引入的恶化量也小于1 dB,系统仍使用10级掺铒光纤放大器,级间距离增至100公里)。若考虑到常规单模光纤色散系数大从而有利于抑制四波混频的优点,在色散补偿时将它置于小色散单模光纤之前可进一步抑制四波混频效应。换言之,在满足色散和四波混频引入恶化量分别小于1 dB的条件下,系统总带宽还能继续压窄。具体到本文给出的10路 \times 10 Gb/s陆上级联掺铒光纤放大器系统,总带宽将压至9.4 nm:最短信道波长1550.0 nm,信道间隔分别为1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.2, 1.0, 1.2, 1.0和1.0 nm。

这一接近于等间距信道划分的结果说明:在敷设光纤时采用先常规单模光纤后小色散单模光纤的顺序,甚至可能采用等间距信道划分而保持较低的恶化量。深入研究表明:若在1550 nm处小色散单模光纤的色散系数为 -2.8 ps/km/nm($\lambda_0=1584$ nm、 $S_0=0.08$ ps/km/nm²),采用常规单模光纤加小色散单模光纤的色散补偿方案,可以实现等间距信道传输,光纤色散($\alpha=0$, $X=1$ dB及 $P^2=8\ln 2$ 条件下)和四波混频引入恶化量仍分别小于1 dB。此时系统总带宽9 nm:最短信道波长1550.0 nm,信道间隔为1.0 nm,从而完全避免了不等间距信道划分带来的波长定标等问题。

比较小色散单模光纤的两种应用方式不难发现:采用小色散位移光纤并结合色散补偿措施,能够使得系统占用的总带宽达到最小,并满足系统传输后色散和四波混频引入恶化量分别小于1 dB的条件,它具有极大的应用前景。

4 结 论

本文给出了1550 nm处色散系数分别为 ± 2 ps/km/nm的小色散单模光纤的折射率分布(计算值)及主要的设计参数。该光纤具有一定色散可有效抑制四波混频效应;且色散不大,尚不致对系统无再生中继距离造成严重的色散限制,所以适于高速(单路码率10 Gb/s)、多路(> 8 路)的陆上光纤通信系统采用。小色散单模光纤在系统应用中并结合色散补偿技术时,在相邻在线放大器间采用ITU-TG.652常规单模光纤(CSMF)结合负小色散单模光纤的方案,较之小色散单模光纤正负色散相抵方案,可更有效地抑制四波混频并减小光纤色散限制,从而在满足色散和四波混频引入恶化量分别小于1 dB的条件下,将10 \times 10 Gb/s、10级掺铒光纤放大器系统占用的总带宽从16.2 nm压缩至9.4 nm;甚至可能实现等间距信道传输,从而大大简化了此类系统的设计。

参 考 文 献

- [1] Jian Song, Chongcheng Fan. A Simplified Dispersion Limit Formula for IM/DD Systems and its Comparison with Experimental Results. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1995, 13(3): 546~550

- [2] Shibata, N., Azuma, Y., Tateda M. *et al.*. Experimental Verification of Efficiency of Wave Generation through Four-Wave Mixing in Low-loss Dispersion-shifted Single-mode Optical Fiber. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(24) ·1528~ 1529
- [3] Chiang K. S.. Finite Element Analysis of Weakly Guiding Fibers with Arbitrary Refractive-Index Distribution. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1986, **4**(8) ·980~ 990
- [4] 张国平. 任意折射率分布单模光纤传输特性的数值分析与计算. 清华大学硕士学位论文(电子工程系), 1988
- [5] Jian Song, Chongcheng Fan, Zhixing Yang. A Novel Method to Suppress FWM-induced Power Penalty in WDM+ EDFA Systems. ICRS'95, Beijing, China, 1995. 163~ 167
- [6] Forghieri, F., Tkach, R. W., Chraplyvy, A. R. *et al.*. Reduction of Four-Wave Mixing Crosstalk in WDM System Using Unequally Spaced Channel. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(6) ·754~ 756
- [7] 宋 健. 采用级联 EDFA 的光纤通信系统特性研究. 清华大学博士学位论文(电子工程系), 1995
- [8] Chongcheng Fan, Jian Song. New Dispersion Compensation Method for High-speed WDM Systems with Negligible Four-Wave Mixing Effect and Total Dispersion. *Proc. SPIE*, 1994, **2321** ·346~ 351

Small-Dispersion Single-mode Fiber for High-Speed, Multi-channel Optical Transmission Systems

Song Jian Fan Chongcheng Yang Zhixing

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 31 August 1995; revised 8 January 1996)

Abstract Possible refractive index profiles and other major parameters of the small-dispersion single-mode fiber (SDSMF) with ± 2 ps/km/nm dispersion are presented in this paper, and their applications are discussed. Results show that SDSMF is suitable for high-speed, WDM+ EDFA systems, both for its non-zero dispersion to effectively suppress the four-wave mixing (FWM) effect, and small-dispersion to avoid severe dispersion-induced degradation. When dispersion compensation is employed in the sequence of ITU-T G.652 conventional single-mode fiber (CSMF) and negative SDSMF between two adjacent in-line amplifiers in a 10×10 Gb/s, 10 stage EDFA system, it offers the advantage of not only reducing the required system bandwidth from 16.2 nm to 9.4 nm at tolerable penalties caused by dispersion and FWM, but also making it possible for equal channel-spacing transmission which significantly simplifies system design.

Key words small-dispersion single-mode fiber, four-wave mixing, dispersion limitation, dispersion compensation