

光纤非线性效应对10 Gb/s 波分复用 色散补偿系统的限制

宋 开 范崇澄

(清华大学电子工程系光通信研究所, 北京 100084)

摘 要 对信道间距为100 GHz的8路10 Gb/s波分复用色散补偿系统进行了计算机仿真,分析了光纤的色散和自相位调制(SPM)、互相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等非线性效应在具有级联光放大器系统中的作用。四种色散补偿方案是: SMF(常规单模光纤)+ DCF1(色散斜率为正的色散补偿光纤)、SMF+ DCF2(色散斜率为负的色散补偿光纤)、TW1(色散为正的 nonzero 色散光纤)+ TW2(色散为负的非zero色散光纤)和 TW2+ TW1。结果表明: TW2+ TW1方案具有最好的传输性能,此时色散、自相位调制、互相位调制和四波混频具有几乎同等的作用; SMF+ DCF1方案的传输性能最差,原因是自相位调制使短波长信道的脉冲严重畸变。

关键词 波分复用系统, 色散补偿, 光纤非线性。

1 引 言

随着2.5 Gb/s波分复用(WDM)光纤通信系统技术的日趋完善和商业应用的扩大,10 Gb/s以上的超高速波分复用系统已成为研究热点,而色散补偿和色散管理是该类系统中重要的技术环节。

对于陆上长距离传输的10 Gb/s波分复用系统,最有希望获得实际应用的色散管理方法主要包括: 1) 利用具有高负色散的色散补偿光纤(DCF)对常规单模光纤(SMF)进行补偿,其优点是能有效抑制四波混频(FWM)和互相位调制(XPM)等非线性效应,且便于已敷设的常规单模光纤系统升级;但各信道色散的不均匀性和自相位调制(SPM)是影响传输性能的主要因素。利用负色散斜率的色散补偿光纤可以进一步改进其宽带补偿能力。2) 利用非zero色散光纤(TW)传输,其在1550 nm波长处的色散系数约为 $\pm(2.5\sim 4)$ ps/nm/km,色散斜率为 0.085 ps/km/nm²。即使不进行色散补偿,这类光纤也可使10 Gb/s的数字信号传输300 km左右,且对四波混频有一定的抑制作用。但各信道色散的不均匀性和光纤的非线性效应对长距离传输系统的影响不可忽略。

本文将比较由常规单模光纤、色散斜率为正的色散补偿光纤、色散斜率为负的色散补偿光纤、色散为正的nonzero色散光纤($D > 0$)、色散为负的非zero色散光纤($D < 0$)组成的四种陆上波分复用系统(SMF+ DCF1, SMF+ DCF2, TW1+ TW2, TW2+ TW1)的传输性能(TW2+

SMF 系统的残余色散量与 TW2+ TW1 系统大致相同, 但前者的自相位调制作用强于后者, 系统性能一般不会优于后者, 故在本文中未予分析)。首先考察它们在同一光功率下的传输距离, 其次比较自相位调制、互相位调制和四波混频在系统中的作用, 最后分析系统传输性能随信号功率的变化关系。与文献[1]不同的是; 1) 文献[1]是针对海缆传输系统的仿真, 系统的放大器间距较小, 信号功率较低, 光纤的非线性效应弱; 2) 文献[1]没有分析 TW1+ TW2 和 TW2+ TW1 两种系统的区别, 未考虑光纤的四波混频效应, 本文均给予了分析。

2 系统参数和色散分布

所分析的系统为 8×10 Gb/s SMF+ DCF1, SMF+ DCF2, TW1+ TW2, TW2+ TW1 四种色散补偿系统, 8 个信道波长 ($\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_8$) 以波长 $\lambda_{av} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \lambda_j$ 为中心对称分布。激光器的线宽为 10 MHz, 初始啁啾为 0, 信道间距 100 GHz, 光放大器标称间距 80 km (对于使用常规单模光纤的两种系统, 常规单模光纤的长度为 80 km, 色散斜率为正的色散补偿光纤和色散斜率为负的色散补偿光纤的长度由 $\lambda = \lambda_{av}$ 下光放大器间的残留色散为零确定, 不计入标称间距, 故放大器的实际间距大于 80 km; 对于使用非零色散光纤的两种系统, 色散为正的色散补偿光纤和色散为负的非零色散补偿光纤的长度均为 40 km, 故光放大器的实际间距与标称间距相同)。调制码流为非归零 32 比特伪随机码流 (NRZ 32-bit PRBS), 且各信道的码流互不相关。信号脉冲的传输用光纤的非线性薛定谔方程描述^[2], 传输性能以眼图代价 (eye opening penalty, 定义为传输前后的眼图最大开启度之比) 评价。光纤参数如下^[3]:

Table 1. Parameters of optical fibers

	$D(\lambda = \lambda_{av}) /$ (ps·km ⁻¹ ·nm ⁻¹)	$S_0 /$ (ps·km ⁻¹ ·nm ⁻²)	$\alpha /$ (dB·km ⁻¹)	$\gamma /$ (W ⁻¹ ·km ⁻¹)
SMF	17	0.08	0.22	1.12
DCF1	-95	+0.2	0.5	5.04
DCF2	-95	-0.2	0.5	5.04
TW1	+2.5	0.085	0.22	2.0
TW2	-2.5	0.085	0.22	2.0

表中 D 、 S_0 、 α 、 γ 分别为光纤的色散系数、色散斜率、损耗系数和非线性系数。信道 1~ 4 的残留色散为负, 信道 5~ 8 的残留色散为正。四种色散补偿系统的色散分布如图 1(a)、(b)、(c)、(d) 所示。

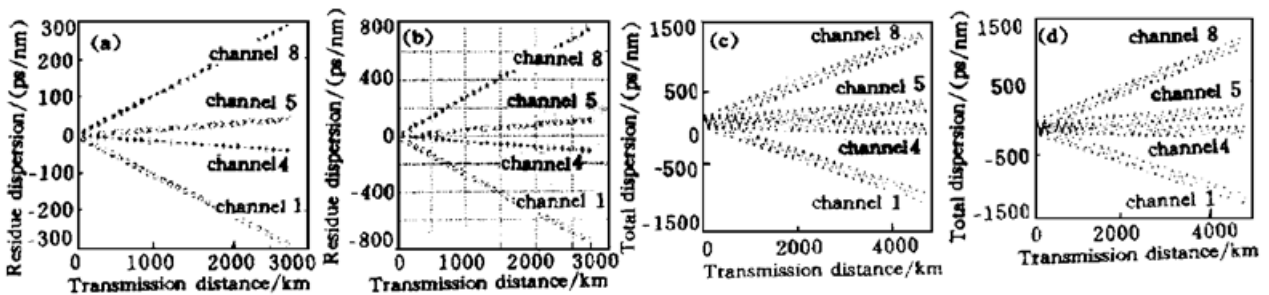


Fig. 1 Total dispersion with respect to transmission distance in various dispersion compensation systems: (a) SMF+ DCF1, (b) SMF+ DCF2, (c) TW1+ TW2, (d) TW2+ TW1

3 传输性能比较

3.1 传输长度

图2(a)、(b)、(c)、(d)给出了SMF+ DCF1、SMF+ DCF2、TW1+ TW2、TW2+ TW1四种色散补偿系统中各信道经过传输后的眼图代价。每信道的平均入纤功率为3 dBm。可以看到:

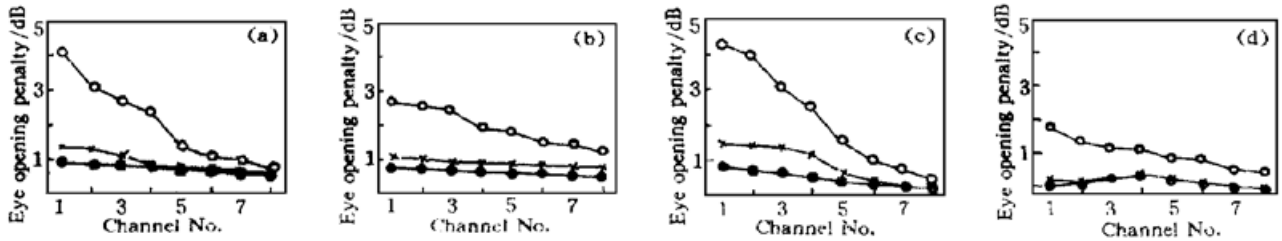


Fig. 2 Eye opening penalty in various dispersion compensation systems: (a) SMF+ DCF1, (b) SMF+ DCF2, (c) TW1+ TW2, (d) TW2+ TW1, - ●- 480 km, - ×- 800 km, - ○- 1600 km

1) 对每种系统, 信道1和信道8的总残余色散量的绝对值都相同, 但前者的眼图代价明显高于后者, 说明限制传输长度的更重要的因素是光纤的非线性效应。前三种系统中, 自相位调制(SPM)是占主导地位的非线性效应。信道1具有最大的累积负色散, 自相位调制引起的脉冲展宽和眼图代价最大; 信道8具有最大的累积正色散, 自相位调制对脉冲有压缩效应, 眼图代价最小; 而在TW2+ TW1系统中, 随着传输距离的增大, 自相位调制逐渐取代四波混频成为主导非线性效应。

2) SMF+ DCF2系统由于在宽频带内实现色散补偿, 故其眼图代价明显小于SMF+ DCF1系统。

3) 虽然SMF+ DCF2系统比TW2+ TW1系统的累积色散小很多, 但前者本地色散大, 自相位调制的作用强, 导致SMF+ DCF2系统的传输长度不及TW2+ TW1系统。这一结果表明, 10 Gb/s以上速率的长距离波分复用系统, 不能单纯地追求系统的残留色散量, 更重要的是应该考虑光纤非线性如自相位调制的作用。

4) TW2+ TW1系统之所以远优于TW1+ TW2系统, 是因为在TW2+ TW1系统中, 脉冲的频谱在前一段负色散光纤中被大大展宽, 这样, 在后一段正色散光纤中的自相位调制作用被大大减弱。与其它三种系统不同的是, 对于480 km和800 km的TW2+ TW1系统, 居中信道具有较大的眼图代价, 这是因为, 居中信道受到的四波混频作用(四波混频噪声和抽空)更强。

3.2 互相位调制和四波混频的作用

除了自相位调制以外, 互相位调制和四波混频也是波分复用系统中重要的非线性效应。因此有必要考察互相位调制和四波混频在以上系统中的作用。图3(a)、(b)给出了SMF+ DCF2和TW2+ TW1两种系统在单信道传输和8信道同时传输时, 信道1(最坏信道)在不同传输长度下的眼图代价。可以看到, 在SMF+ DCF2系统中, 互相位调制和四波混频相对自相位调制对系统的影响微乎其微; 在TW2+ TW1系统中, 自相位调制的作用比SMF+ DCF2系统弱, 因而互相位调制和四波混频对眼图代价的相对贡献显得略大。应该指出: 自相位调制, 互相位调制和四波混频对此系统的贡献份额将随传输距离和信号功率而变化。

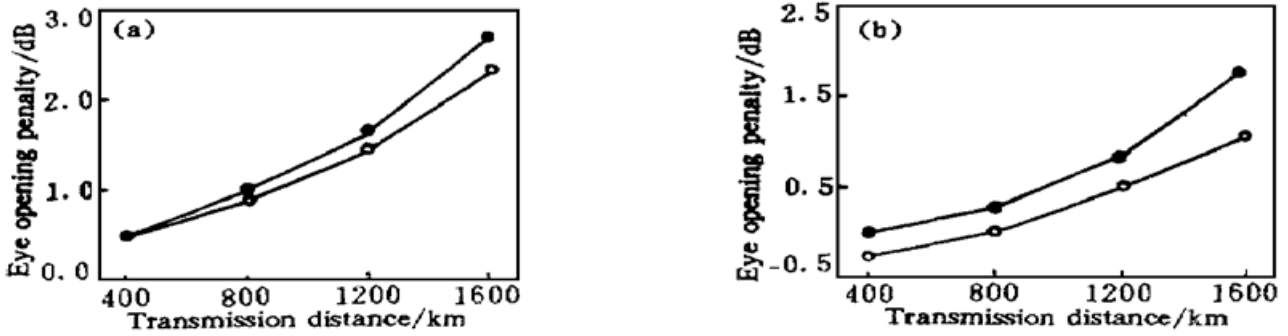


Fig. 3 Eye opening penalty of Ch1 in (a) SMF+ DCF2, (b) TW2+ TW1 systems. - ●- all channels on, - ○- only ch1 on

3.3 系统对信号功率的稳定性

如果系统中的信号功率发生变化, 光纤的非线性作用也将发生变化。现考察系统对信号功率的敏感性。图4(a)、(b)比较了SMF+ DCF2、TW2+ TW1两种系统在信号功率3 dBm/Ch和6 dBm/Ch时的眼图代价, 传输长度为800 km。

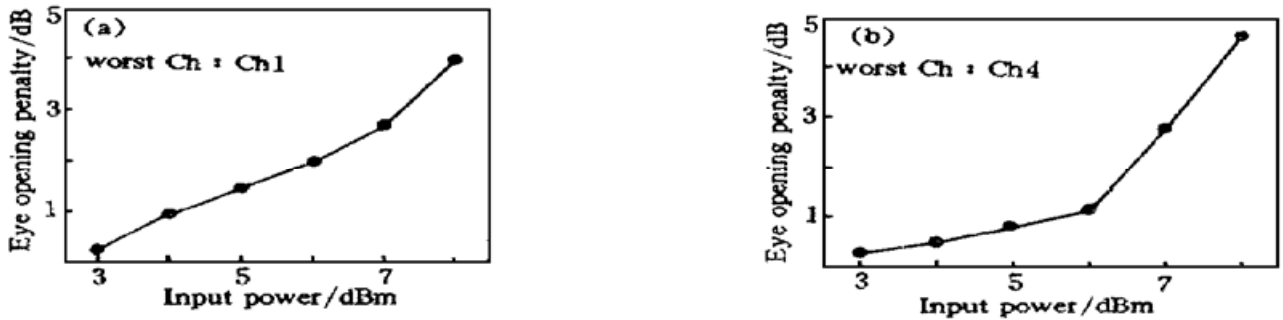


Fig. 4 Impact of input channel power on system eye opening penalty of the worst channel after 800 km transmission
(a) SMF+ DCF2, (b) TW2+ TW1

由图4可见, 两种系统对信号功率的变化都非常敏感。所不同的是, SMF+ DCF2系统中信道1最差(自相位调制所致); TW2+ TW1系统中信道4最差(四波混频所致)。如果信道的波长间距增大到200 GHz, TW2+ TW1系统受四波混频的影响会大大减弱; 而SMF+ DCF2系统会由于自相位调制的作用和残留色散的增大而变坏。

结 论 通过对SMF+ DCF1、SMF+ DCF2、TW1+ TW2、TW2+ TW1四种波分复用色散补偿系统传输性能的比较, 可以得出以下结论:

1) 在相同条件下, TW2+ TW1系统所能达到的传输距离最长, 方案最优。在同一眼图代价下的传输长度 L 的排列顺序是: $L(\text{SMF+ DCF1}) < L(\text{TW1+ TW2}) < L(\text{SMF+ DCF2}) < L(\text{TW2+ TW1})$ 。

2) 在SMF+ DCF1、SMF+ DCF2、TW1+ TW2系统中, 自相位调制效应是最主要的非线性作用, 互相位调制和四波混频的影响不大。在TW2+ TW1系统中, 自相位调制, 互相位调制和四波混频对系统有几乎均等的作用。对低功率、长距离系统, 自相位调制为主导效应; 对高功率、短距离系统, 四波混频为主导效应。

3) 信道间距为100 GHz的SMF+ DCF2和TW2+ TW1两种系统对信号功率的变化都很敏感, 传输质量表现出很强的不稳定性, 前者由自相位调制所致, 后者由四波混频所致。如果信道间距增大到200 GHz, TW2+ TW1系统受四波混频的影响可望大大减弱。

在长距离10 Gb/s 波分复用系统的传输设计中, 不仅要考虑各信道的色散补偿和均衡, 更重要的是要考虑光纤的非线性效应。对于实际的长距离10 Gb/s 波分复用系统, 当信道间距为国际电信联盟(ITU-T) 建议的200 GHz 时, 以传输质量评价, TW2+ TW1应为首选方案。SMF+ DCF2系统方案则可用于现有系统的升级。

参 考 文 献

- [1] Zhou X Y, Hayee M I, Huang S M *et al.*. Limitations in 10 Gb/s WDM optical fiber transmission when using a variety of fiber types to manage dispersion and nonlinearities. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6) ·1144~ 1152
- [2] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 1995. 45~ 46
- [3] Boskovic A, Cherikov S V, Taylor J R. Direct continuous-wave measurement of n_2 in various types of telecommunication fiber at 1.55 μm . *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24) ·1966~ 1968

Limitation of Fiber Nonlinearities on 10 Gb/s WDM Systems Using Various Dispersion Compensation Schemes

Song Kai Fan Chongcheng

(Center for Optical Fiber Communication Studies, Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 1 October 1997; revised 23 March 1998)

Abstract Wavelength Division Multiplexed (WDM) system characteristics using various dispersion compensation schemes are compared by computer simulation. In our model, eight 10 Gb/s WDM channels with channel spacing of 100 GHz are transmitted through cascaded optical amplifiers. Fiber dispersion, self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave-mixing (FWM) effects are considered. Dispersion compensation schemes include: conventional single mode fiber (SMF)+ dispersion compensating fiber with positive dispersion slope (DCF1), SMF+ dispersion compensating fiber with negative dispersion slope (DCF2), non-zero dispersion fiber with positive dispersion (TW1)+ non-zero dispersion fiber with negative dispersion (TW2) and TW2+ TW1. It is shown that TW2+ TW1 has the best performance, where SPM, XPM and FWM are roughly equal. On the other hand, SMF+ DCF1 results in the worst performance, where the combination of dispersion and SPM effect dominates, and the shorter wavelength channels suffer from severe pulse distortion.

Key words WDM systems, dispersion compensation, fiber nonlinearities.