

文章编号: 0258-702X(2001)07-0645-05

啾啾光脉冲在高阶色散控制光纤链中的稳定传输

郭淑琴¹ 李仲豪² 肖 燕² 薛文瑞¹ 周国生^{2,3}

(¹物理系, ²电子系, 山西大学, 太原 030006
³北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 基于一种二阶和三阶色散补偿的光纤级联系统模型,用数值法对啾啾皮秒光脉冲作了传输模拟。结果表明,完全补偿的高阶色散控制系统消除了三阶色散所引起的脉冲边沿部的振荡,减弱了脉冲峰的时间移动;另外,在确定的配置下,给输入脉冲附加一最佳的频率啾啾,可使得色散控制孤子稳定传输。脉冲宽度和啾啾以及光强度都围绕在初始值附近波动,在每个补偿周期末端,基本恢复到初始值,最佳啾啾的选取与二阶色散的配置有关,与三阶色散的配置无关;文中画出了 100 Gbit/s 码率的 64 位随机高斯光脉冲序列在完全补偿系统中传输 10000 km 后的眼图。由清晰的眼图可知,这种完全补偿系统减弱了脉冲之间的相互作用。

关键词 啾啾超短光脉冲,完全色散补偿,高速光通讯

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Stable Propagation of Chirped Picosecond Optical Pulse in Optical Fiber Links under Higher Order Dispersion Managed

GUO Shu-qin¹ LI Zhong-hao² XIAO Yan² XUE Wen-rui¹ ZHOU Guo-sheng^{2,3}

(¹Physical Department, ²Electronic & Information Science Department, Shanxi University, Taiyuan 030006
³National Laboratory on Local Fiber-optic Communication Networks & Advanced Optical Communication System, Peking University, Beijing 100871)

Abstract It is shown that by numerical simulation, pre-chirped picosecond optical pulse can transmit stably in full-dispersion compensation optical fiber links considering not only second, but also third-order dispersion compensation using dispersion shift fiber with opposite dispersion signs; it eliminates waveform distortion and peak shift due to the third-order dispersion. The optimal pre-chirp is relevant to second-order dispersion map. During each compensation optical fiber link, pulse width, chirp and peak shift vary around their initial values. It demonstrates that the pre-chirp and high order dispersion compensation are two key elements at high bit rate transmission system.

Key words chirped ultra-short optical pulse, full dispersion compensation, high speed optics communication

1 引 言

由于英特网和各种新兴服务业的推动,全球通讯容量正在快速增长。人们对光纤传输的信息容量的要求越来越高,同时希望传输的距离越远越好。尽管波分复用、时分复用及二者相结合的技术已可使系统容量达 Tbit/s 量级,但人们对如何提高单信道的容量仍保持着浓厚的兴趣。掺铒光纤放大器(EDFA)的出

现使光纤通讯的一大障碍——损耗得以解决,至此,色散问题便成为限制传输距离和传输容量的主要原因。为了解决色散导致的脉冲展宽,人们已经提出了许多方案,如利用色散补偿光纤或啾啾光纤光栅进行色散补偿、频谱反转、预啾啾和光纤孤子传输等。

目前,几十皮秒的光脉冲在标准单模光纤(SMF)中传输时由色散造成的脉冲展宽可采用相反符号大色散量的色散补偿光纤(DCF)来补偿^[1,2]。由于脉冲较宽,二阶色散量也较大,因此高阶色散对脉冲传输所造成的影响可以忽略。但是,当脉冲宽度减小到 10

ps 以下时,由于色散长度大大缩短,色散作用增强,脉冲难以在 SMF 光纤中传输较远距离,此时,可考虑采用色散量较小、符号相反的不同种非零色散位移光纤(NZ-DSF)组成补偿光纤链^[3]。在这种补偿系统中,二阶色散量较小,有益于短脉冲传输。但是,当考虑的脉冲很短时,三阶色散的影响必须考虑。正如文献[4]中指出的那样,三阶色散会使脉冲在传输过程中波形变得不对称,峰值发生移动,并在边沿部产生振荡结构,继而使脉冲在传输过程中向外辐射能量。近年来,人们对光纤中三阶色散的补偿问题研究比较多,比如,在脉冲压缩激光器中,通过三阶色散补偿来抑制其造成的不利影响,进而提高压缩比^[5]。在传输系统中,通过三阶色散补偿能有效扩大高比特率的传输距离,提高系统的性能^[6,7]。这里,我们通过数值模拟发现,在由非零色散位移光纤(NZ-DSF)组成的色散完全补偿光纤链中,1 ps 脉宽的无啁啾高斯型光脉冲传输 2000 km 脉宽改变 7% 左右。如果对高斯光脉冲加以适当的啁啾,则可使短脉冲在这种完全补偿系统中传输达 10000 km 以上,而波形的畸变很小,基本上能稳定传输。在传输过程中,脉宽、啁啾和光强度都围绕在初始值附近波动,在每个补偿周期末端,这三个量基本恢复到初始值。整个过程只需用放大器对光纤的损耗作周期性补偿,而无需对脉冲作整形处理。可见,预啁啾和色散补偿相结合的方法可使短脉冲很好地传输。

2 理论模型及计算方法

设光纤级联系统每一单元由三段非零色散位移光纤 NZ-DSF 和 EDFA 组成,EDFA 放置在每个单元的末端,用来补偿一个单元中的总损耗,如图 1 所示。

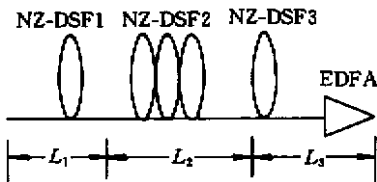


图 1 传输模型图

Fig. 1 Model of systems

皮秒脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程为

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{\alpha}{2} A + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中 Z 为脉冲在光纤中传输的距离, T 为随群速度移动坐标中的时间, α, γ 分别为光纤的损耗和非线

性系数, $A(Z, T)$ 为脉冲的慢变振幅, 作如下变换: $t = T/T_0, \zeta = Z/L_a, L_{2D} = T_0^2/|\beta_2|, L_{3D} = T_0^3/|\beta_3|, U = e^{\alpha Z/2} A/\sqrt{p_0}$, 其中 T_0 为脉冲的初始宽度, p_0 为脉冲的入射峰值功率。经上述变换后, 方程(1)变为

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} + \frac{i}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{L_a}{L_{2D}} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{L_a}{L_{3D}} \text{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} = i\gamma p_0 e^{-\alpha L_a \zeta} |U|^2 U \quad (2)$$

用数值法解方程(2), 注意到每一单元末端 EDFA 补偿了单元中的总损耗, 采用分步傅里叶变换法^[4], 将(2)式写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \zeta} &= (\hat{D} + \hat{N})U \\ \hat{D} &= -\frac{i}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{L_a}{L_{2D}} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \frac{L_a}{L_{3D}} \text{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3}{\partial t^3} \\ \hat{N} &= i\gamma p_0 e^{-\alpha L_a \zeta} |U|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

光脉冲在光纤中由 ζ 传输到 $\zeta + \Delta\zeta$ 可分两步计算, 在前半步中只有色散算符起作用, 在后半步中也只有色散算符起作用, 将整个长度 $\Delta\zeta$ 上的非线性作用在中点一并给以考虑。这样

$$\begin{aligned} U(\zeta + \Delta\zeta, t) &= F^{-1} \left\{ \exp\left(\frac{h}{2} D\right) F \right. \\ &\left. \left\{ \exp\left(h \cdot \hat{N}\right) F^{-1} \left\{ \exp\left(\frac{h}{2} \hat{D}\right) F \{U(\zeta, t)\} \right\} \right\} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

对任意给定的初始脉冲 $U(0, t)$, 由线性算符 \hat{D} 和非线性算符 \hat{N} 可通过(4)式求出其传输一定距离 ζ 后的脉冲形状 $U(\zeta, t)$, 在计算过程中, 光纤链中的色散参量分段均匀。

3 计算结果及分析

本文中, 考虑色散完全补偿, 即在一个补偿周期中, $\beta_2 = 0, \beta_3 = 0$ 。放大周期与色散补偿周期相同。考虑到脉冲在光纤链中传输时不能展宽太大, 这里选用较短的补偿周期。为清楚起见, 将光纤链中所用的参数列在下面: 色散补偿周期 $L_a = 20$ km, $L_1 = 5$ km, $L_2 = 10$ km, $L_3 = 5$ km。在每一种 NZ-DSF 光纤中, $|\beta_2| = 0.5$ ps²/km, $|\beta_3| = 0.1$ ps³/km, 在整个光纤链中, 损耗和非线性系数分别为 $\alpha = 0.22$ dB/km, $\gamma = 1.27$ W/km。中心波长 $\lambda = 1.55$ μ m。

输入脉冲波形 $U = \exp[-(1 + iC)T^2/2T_0^2]$, C 为脉冲的初啁啾。初始脉宽 $T_0 = 1$ ps, 入射脉冲的峰值功率 $p_0 = 1$ mW。这样, 二阶和三阶色散长度分别为 $L_{2D} = 2$ km, $L_{3D} = 10$ km, 非线性长度 $L_{NL} = 787$

km, 由 $L_{NL} \gg L_{2D} > L_{3D}$ 可知, 二阶和三阶色散的作用相当大, 而非线性作用很弱。因此, 除了对二阶色散作补偿外, 也必须对三阶色散作相应补偿。

众所周知, 三阶色散会使脉冲在传输过程中产生畸变, 脉冲边沿部产生振荡结构, 脉冲峰值发生时移, 三阶色散补偿则可以减弱或消除上述损害作用。通过大量模拟发现, 只有当 $\beta_3 = 0$, 补偿作用较好, 而 $\beta_3 < 0$ 和 $\beta_3 > 0$ 都难以将三阶色散所造成的脉冲畸变补偿过来。这是由于 SPM 和二阶色散使脉冲发生对称性畸变, 而三阶色散则使脉冲发生非对称性畸变。图 2 为 $\beta_2 = 0$, 但 $\beta_3 \neq 0$ 时,

脉冲传输 20 个放大周期(400 km)时的波形图。其中在第一段和第三段光纤中, $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, 在第二段光纤中, $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。图 2(a) 是 $\beta_3 = -0.005 \text{ ps}^3/\text{km}$ (第二段光纤的三阶色散为 $-0.11 \text{ ps}^3/\text{km}$) 时脉冲传输后的波形, 图 2(b) 是 $\beta_3 = 0.005 \text{ ps}^3/\text{km}$ (第二段光纤的三阶色散为 $-0.09 \text{ ps}^3/\text{km}$) 时脉冲传输后的波形。可见, 当 $\beta_3 \neq 0$, 即使 $|\beta_3|$ 非常小, 脉冲边沿部的振荡和脉冲峰的时移也难以消除, 因此选用了完全补偿, 即二阶色散和三阶色散的路径平均都为零。

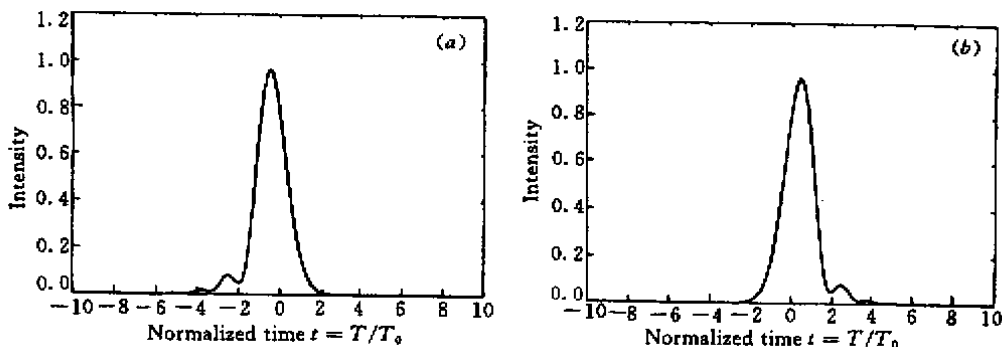


图 2 当 $\beta_2 = 0$, $\beta_3 \neq 0$ 时, 光脉冲传输 400 km 后的波形

Fig.2 Pulse's shape after transmitting over 400 km at $\beta_2 = 0$, but $\beta_3 \neq 0$

(a) $\beta_3 = -0.005 \text{ ps}^3/\text{km}$; (b) $\beta_3 = 0.005 \text{ ps}^3/\text{km}$

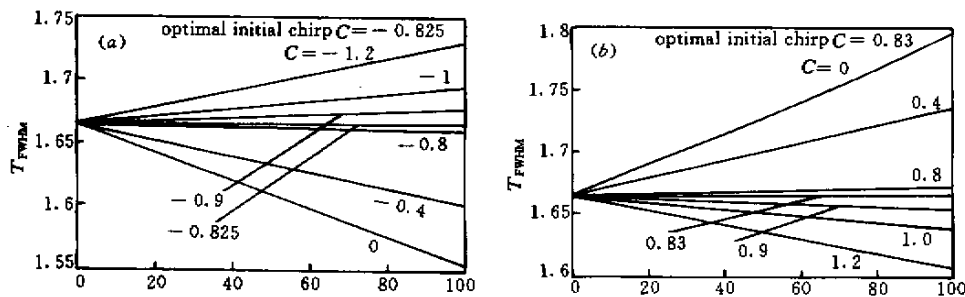


图 3 在不同的初啁啾下, 脉冲半极大全宽随距离的变化情况

Fig.3 Pulse width variations with the distance at different initial chirp

本文中, 光纤链的配置分以下几种情况:

1) 光纤链中各段的色散为: 第一段 L_1 中, $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; 第二段 L_2 中, $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; 第三段 L_3 中, $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; 当 $C = 0$ 时, 无啁啾高斯光脉冲在上述配置光纤链中传输 2000 km, 脉宽改变了 7% 左右, 而当 $C = -0.4, -0.8, -0.825, -0.9, -1, -1.2$ 时, 脉宽的改变量分别为 4%, 0.2%, 0.02%, 0.8%, 1.8%, 3.9%。图 3(a) 画出了脉冲

在几种不同的初始啁啾下传输 2000 km 时在每个补偿周期末端脉冲半极大全宽 T_{FWHM} 的变化情况。通过图 3(a) 中的几条线比较可知, 光纤链在上述配置下, 入射脉冲的初啁啾 $C = -0.825$ 时, 脉冲的传输效果较好。在上述色散参量中, β_2 的配置不变, 将各段中 β_3 的符号改变, 结果, 最佳入射啁啾也是 $C = -0.825$ 。

2) 当光纤中各段的色散为: L_1 : $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; L_2 : $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0$ 。

$1 \text{ ps}^3/\text{km}$; L_3 ; $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 最佳初始啁啾为 $C = 0.83$ 。如图 3 中 (b) 所示。如果各段中 β_2 的配置不变, 将 β_3 的符号改变, 结果最佳初始啁啾仍为 $C = 0.83$ 。

由以上几种情况比较可知, 最佳的初始啁啾决定于光纤链的具体参数配置。通过变更参数配置中二阶色散和三阶色散的符号, 最佳啁啾只与二阶色散的配置有关, 与三阶色散的配置无关。

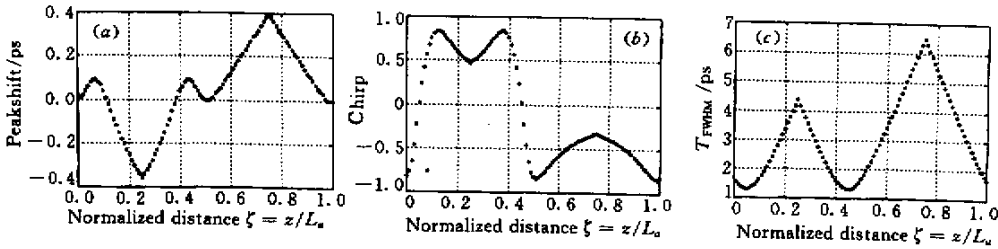


图 4 $C = -0.825$ 时, 在第一个光纤链中, 脉冲峰值移动 (a) 啁啾 (b) 以及脉冲半极大全宽 (c) 随距离的变化
 Fig. 4 Pulse peak shift (a), chirp (b) and T_{FWHM} (c) variation during the first dispersion compensation period at optimal initial chirp $C = -0.825$

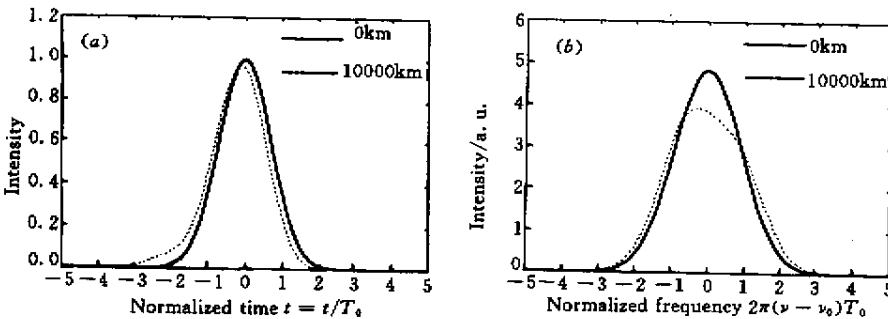


图 5 输入脉冲及传输 10000 km 后的时间波形及频谱比较
 (a) 时间波形 (b) 频谱图

Fig. 5 Temporal shape and frequency spectrum comparisons of pulses between input point and output point after transmitting over 10000 km

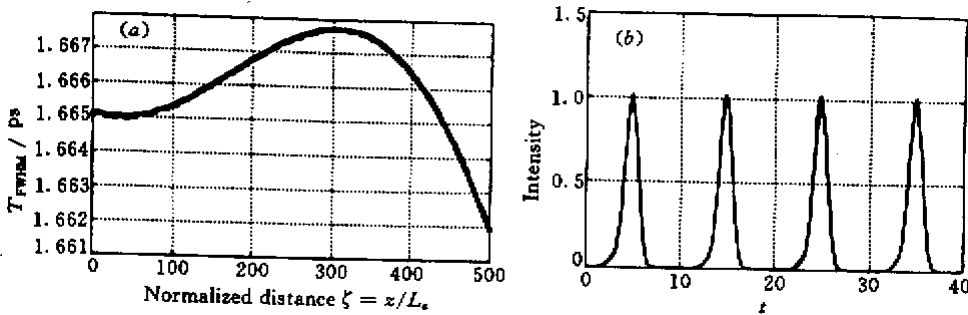


图 6 (a) 传输 500 个补偿周期时, 每个周期末端脉冲半极大全宽的变化情况 (b) 间距为 10 倍脉宽的 64 位随机码传输 500 个周期后的眼图

Fig. 6 (a) Variation of pulse half maximum full width at each dispersion compensation periods end after transmitting 500 compensation periods; (b) Eye diagrams after transmitting over 500 compensation periods

当光纤链中各段的色散参量配置为 $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $-0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$; $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $-0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时, 图 4 画出脉冲峰值的移动、啁啾及脉冲半极大全宽在第一个色散补偿周

期中的变化情况。这三个量在中间过程经历了较大的变化, 但最终基本都回到了初始值。由图 4 (b) 和 (c) 不难发现, 在每段光纤中, 当 $\beta_2 C < 0$ 脉冲宽度被压缩, 当 $\beta_2 C > 0$ 时, 脉冲则被展宽, 这与文献

[4]中给出的结论一致。脉冲峰值的移动受到二阶和三阶色散共同作用的影响,在第一段光纤中, $\beta_3 > 0$,脉冲峰移总的变化趋势沿时间轴左移,在第二段光纤中, $\beta_3 < 0$,脉冲峰右移。在第三段光纤中, $\beta_3 > 0$,脉冲峰左移。

在上述色散配置和最佳入射啁啾 $C = -0.825$ 时,脉冲在输入端与传输 10000 km 后的时间波形图及频谱图如图 5 所示。可见,完全色散补偿大大减弱了三阶色散所造成的波形和频谱的畸变。脉冲传输 10000 km 后半极大全宽为 1.6619 ps,脉宽改变了 0.19%,基本上能稳定传输,在每个补偿周期末端,脉冲宽度随距离的变化如图 6(a) 所示。

由于在实际系统中,不仅考虑单个脉冲的传输情况,而且要考虑前后脉冲之间的相互作用,这里,我们在图 6(b) 中画出了 64 位随机码在入射峰值功率为 1 mW,脉宽为 1 ps,码间距为 10 倍脉宽(相当于 100 Gbit/s)的高斯光脉冲序列在上述完全补偿光纤链中传输 10000 km 后的眼图,由清晰的眼图可知补偿系统减弱了相邻脉冲之间的作用。

4 小 结

由 NZ-DSF 光纤组成的完全色散补偿光纤链系统基本上消除了短脉冲传输时三阶色散引起的脉冲畸变,大大减弱脉冲沿部的振荡、峰的时移,及由此引起的能量辐射,减弱了相邻脉冲之间的相互作用,

在很大程度上改善了系统的传输特性。在确定的链路配置下,选择最佳的入射啁啾,可使得 100 Gbit/s 传输码率的光脉冲序列稳定传输达 10000 km 以上。最佳啁啾与二阶色散的配置有关,与三阶色散的配置无关。在该系统中,除了应用 EDFA 对光纤的损耗做周期性放大以外,无需对脉冲做整形处理。

参 考 文 献

- 1 Jianjun Yu, Kejian Guan, Bojun Yang. Effects of different compensation configurations and ratios on a high speed light wave system. *Opt. Comm.*, 1998, **14**(1~6):109~113
- 2 Zhou Guosheng, Li Xueming, Xue Wenrui *et al.*. Propagation of quasi-soliton in optical fiber link with dispersion compensation and loss balance. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10):1297~1304 (in Chinese)
- 3 Dietrich Marcuse, C. R. Menyuk. Simulation of single-channel optical systems at 100 Gb/s. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(4):564~569
- 4 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber optics*. Inc., San Diego, California: Academic press, 1989
- 5 Cao Wenhua, Liu Songhao. Soliton-effect pulse compression with third-order dispersion suppression in optical fibers. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(1):70~74 (in Chinese)
- 6 M. Murakami, H. Maeda, T. Imai. Long-haul 16 × 10 Gb/s WDM transmission experiment using higher order fiber dispersion management technique. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):898~900
- 7 J. F. L. Devaney, W. Forysiak, N. J. Doran. Reduction of collision induced timing jitter in multichannel soliton systems by dispersion management. 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98), 1998, Vol.1:89~90