

文章编号: 0253-2239(2004)11-1525-5

基于高阶色散管理和相位共轭技术的色散补偿*

步 扬 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 相位共轭技术能够同时且高效地补偿二阶色散及非线性效应,且该技术同信号比特率、调制方式无关,是最有前景的色散补偿技术之一。理论分析了在高阶色散作用下,超短高斯脉冲信号在中距相位共轭通信系统中的传输演化特性,数值模拟了二阶、三阶和四阶色散作用下,飞秒高斯脉冲信号在基于中距相位共轭技术的光纤色散管理链中的动态传输过程。结果表明,相位共轭技术和高阶色散管理相结合,不仅可以补偿和复原包括奇数阶和偶数阶色散在内的全部色散和非线性所引入的信号失真和畸变,而且能够减弱时分复用系统中脉冲之间的相互作用,使得信号在传输一个周期后恢复波形,从而提高了相位共轭系统对失真信号的补偿性能。

关键词: 光纤光学; 相位共轭; 色散管理; 三阶色散; 四阶色散

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

Compensation for Dispersion by Higher-Order Dispersion Management in Fiber Communication System with Midway Optical Phase Conjugation

Bu Yang Wang Xiangzhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 23 October 2003; revised 11 March 2004)

Abstract: Optical phase conjugation (OPC) is a promising optical technology that can compensate for dispersion and nonlinearity effects simultaneously in pulse propagation through a single-mode fiber. In optical fiber communication system with midway OPC employing dispersion management, effects of higher-order dispersion are analyzed theoretically. Dynamic evolution of ultra-short Gaussian pulses in the system is simulated numerically. The results demonstrate that the higher-order dispersion-managed OPC system can not only compensate for all n th-order dispersion including even order and odd order, but also eliminate the interaction of pulses, hence improve the compensation performance for the distortion.

Key words: fiber optics; optical phase conjugation; dispersion management; third-order dispersion; fourth-order dispersion

1 引 言

在超高速光纤通信系统中,限制系统传输速度和传输容量的一个关键因素是高阶色散导致的波形失真和畸变^[1~6]。例如:当初始脉宽 $T_0=0.1$ ps,二阶色散(Group velocity dispersion,GVD)系数 $\beta_2=$

1 ps²/km,三阶色散(Third-order dispersion,TOD)系数 $\beta_3=0.1$ ps³/km时,二阶色散长度 L_D 与三阶色散长度 L_{D3} 相等,两者对脉冲信号的影响相同。又如:当传输速率为 1 Tb/s 时,由于四阶色散(Fourth-order dispersion,FOD)的作用,脉冲信号的传输距离不超过 20 km^[3]。因此,必须考虑对高阶色散所引起的信号失真进行补偿。

通过合理配置不同种类光纤可以实现对二阶色散、三阶色散的补偿,但该方法不能补偿四阶色散^[5]。通过使用可编程相位控制器件如相位调制器、干涉仪阵列可以实现对三阶色散、四阶色散的补

* 国家 863 计划(2002AA404050)和上海市纳米专项计划(0214nm091,0359nm004)资助课题。

E-mail: ipt26267@mail.shnc.ac.cn

收稿日期:2003-10-23;收到修改稿日期:2004-03-11

偿^[7~10],但这些方法的应用受到相变采样频率的限制。同时,上述两类方法不能补偿非线性效应,且相关设计参量较多,设计复杂,难于控制额外色散的引入。

相位共轭技术由于能够同时且高效地补偿二阶色散及非线性效应,补偿效率高,而且该技术同信号比特率、调制方式无关,因而得到了较深入的研究^[11~17]。当传输速度提高到数百 Gb/s 以上,脉冲宽度缩窄至飞秒脉冲时,或者传输信号中心波长接近于零色散波长时,高阶色散作用逐渐增强,必须考虑这种因素对相位共轭系统的影响。本文分析了高阶色散作用下,超短高斯脉冲信号在中距相位共轭

系统中的传输特性,提出了利用高阶色散管理和相位共轭技术来补偿和复原包括奇数阶和偶数阶色散在内的全部色散所引入的信号失真和畸变的补偿模式,数值模拟了二阶色散、三阶色散、四阶色散和非线性作用下,中距相位共轭光纤通信系统中飞秒高斯脉冲的传输演化过程,并对此进行了讨论。

2 理论分析

一个具有慢变振幅包络 $A(z, t)$ 和中心频率 ω_0 的超短光脉冲 $E(z, t) = A(z, t)\exp(-i\omega_0 t)$, 其在光纤中的传输场分布满足广义非线性薛定谔方程:

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = \{D_T + N_T[A(z, T)]\}A(z, T), \quad (1)$$

其中 z, T 分别表示信号的传输距离和传输时间。线性算符 D_T 为

$$D_T = -\frac{\alpha}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} i \frac{\beta_n}{n!} \left(i \frac{\partial}{\partial T} \right)^n, \quad (2)$$

其中右侧的第一项表征系统的衰减, α 为信号的衰减系数;其余项表征系统的第 n 阶色散, β_n 为信号的 n 阶色散系数。

本文不考虑高阶非线性效应,算符 N_T 为

$$N_T[A(z, T)] = i\gamma |A|^2, \quad (3)$$

其中右侧项表示自相位调制, γ 为信号的非线性系数。

经过传输距离 L , (1) 式的解可写为

$$A(L, T) = \exp\left\{LD_T + \int_0^L N_T[A(z, T)]dz\right\}A(0, T), \quad (4)$$

由(4)式可得^[1,18]

$$A(0, T) = \exp\left\{-LD_T - \int_0^L N_T[A(z, T)]dz\right\}A(L, T). \quad (5)$$

对(5)式取复共轭,

$$A^*(0, T) = \exp\left\{-LD_T^* - \int_0^L N_T^*[A(z, T)]dz\right\}A(L, T), \quad (6)$$

忽略衰减因子,线性算符 D_T^* 为

$$D_T^* = \sum_{n=2}^{\infty} -i \frac{\beta_n}{n!} \left(-i \frac{\partial}{\partial T}\right)^n = (-1)^{n+1} D_T, \quad (7)$$

同理,

$$N_T^*[A(z, T)] = -N_T[A^*(z, T)], \quad (8)$$

将(7)式、(8)式带入(6)式,则

$$A^*(0, T) = \exp\left\{(-1)^{n+2}LD_T + \int_0^L N_T[A^*(z, T)]dz\right\} \times A^*(L, T). \quad (9)$$

当不考虑奇数阶色散时,(9)式和(4)式具有完全相同的形式。这表明当入射信号 $A(0, t)$ 经过系统总长度为 $2L$ 的相位共轭系统,在输出端可以得到 $A^*(0, t)$,是输入信号完整的复共轭,偶数阶色散、自相位调制所导致的信号失真和畸变可以得到完全复原和补偿。当考虑奇数阶色散时,上述关系不成立,色散所导致的失真和畸变不能得到补偿。

忽略衰减因子,将(2)式改写为

$$D_T = \sum_{n=1}^{\infty} i \frac{\beta_{2n}}{(2n)!} \left(i \frac{\partial}{\partial T} \right)^{2n} + \sum_{k=1}^{\infty} i \frac{\beta_{2k+1}}{(2k+1)!} \left(i \frac{\partial}{\partial T} \right)^{2k+1}. \quad (10)$$

传输光纤 L 可分为两段等效色散长度 L_1 和 L_2 , β_{2k+1,L_1} 、 β_{2k+1,L_2} 分别为等效长度 L_1 、 L_2 部分的奇数阶色散系数。根据上文所述,偶数阶色散 β_{2n} 的符号与数值不影响相位共轭系统的补偿,当奇数阶色散系数 β_{2k+1} 满足

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{L_1 \beta_{2k+1,L_1}}{(2k+1)!} + \frac{L_2 \beta_{2k+1,L_2}}{(2k+1)!} \right) = 0. \quad (11)$$

根据(11)式,则(7)式变为

$$D_T^* = D_T, \quad (12)$$

将(12)式、(8)式代入(6)式,则

$$A^*(0, T) = \exp \left\{ LD_T + \int_0^L N_T [A^*(z, T)] dz \right\} \times A^*(L, T). \quad (13)$$

在相位共轭通信系统中引入高奇数阶色散管理后,(13)式和(4)式具有完全相同的形式,这表明,在该模式下,包括偶数阶色散和奇数阶色散在内的全部色散、非线性效应所导致的信号失真和畸变可以得到完全的复原和补偿。而且由于只需要补偿奇数阶色散,这就降低了系统设计难度,提高了系统可靠性。

3 数值计算及分析

周期性信号放大器的使用使得信号的抖动和衰减对系统的影响可以忽略不计^[11,15]。考虑三阶色散、四阶色散,(1)式归一化后,表示为

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -i \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{\text{sgn}(\beta_3)}{6} \frac{L_D}{L_{D_3}} \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} + i \frac{\text{sgn}(\beta_4)}{24} \frac{L_D}{L_{D_4}} \frac{\partial^4 U}{\partial \tau^4} + iN^2 |U|^2 U, \quad (14)$$

其中 U 、 $x = z/L_D$ 、 τ 分别是归一化振幅、传输距离和时间。 $N^2 = L_D/L_{NL}$,二阶色散长度 $L_{D_2} = T_0^2/|\beta_2|$,三阶色散长度 $L_{D_3} = T_0^3/|\beta_3|$,四阶色散长度 $L_{D_4} = T_0^4/|\beta_4|$, L_{NL} 为非线性长度。

基于高阶色散管理的相位共轭系统如图 1 所示,其中 OPC、Tx、Rx 分别为光学相位共轭器、系统

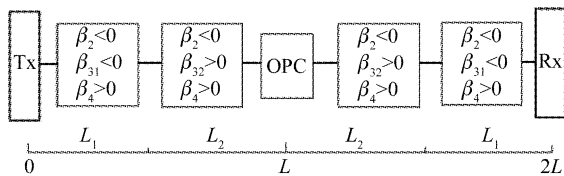


Fig. 1 Schematic of optical communication system using midway phase conjugation with higher-order dispersion management

发射端和接受端。

根据上文分析,只要 OPC 之前和之后的色散图对称分布,那么二阶色散、四阶色散系数的符号和数值不会影响相位共轭系统对失真信号的补偿。对于三阶色散,根据(11)式,只需在 L 内,三阶色散系数的分布满足

$$L_1 \beta_{3,L_1} + L_2 \beta_{3,L_2} = 0, \quad (15)$$

则该系统的三阶色散就能得到补偿。

基于上述分析,在图 1 所示的相位共轭系统中,相关参量取值如下:

输入脉冲为高斯型脉冲,入射信号波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,初始脉宽 $T_0 = 200 \text{ fs}$,二阶色散系数 $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$,光纤 L_1 段三阶色散系数 $\beta_{31} = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$,光纤 L_2 段三阶色散系数 $\beta_{32} = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$,四阶色散系数 $\beta_4 = 0.001 \text{ ps}^4/\text{km}$ 。由此计算可得 $L_D = 0.04 \text{ km}$, $L_{D_{31}} = L_{D_{32}} = 0.08 \text{ km}$, $L_{D_4} = 1.6 \text{ km}$ 。取信号为小功率(不考虑高阶非线性), $N^2 = 0.01$,则 $L_{NL} = 4 \text{ km}$ 。相位共轭系统光纤总长度 $2L$ 为 20 km ,每一段 L 为 10 km 。

脉冲信号的波形变化使用均方根脉宽 σ 表示^[1],脉冲展宽因子(Broadening factor, BF)为传输末端脉冲均方根脉宽与初始脉冲均方根脉宽之比。

3.1 单脉冲在系统中的传输

当相位共轭系统没有进行高阶色散管理时,高斯脉冲在系统中的波形变化和脉冲展宽因子的变化如图 2 所示,其中 $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $\beta_4 = 0.001 \text{ ps}^4/\text{km}$ 。

在系统的前半段,二阶色散、三阶色散、四阶色散的作用导致系统信号出现严重的失真和畸变,且能量在传输过程中不断向外辐射,脉冲的峰值功率大大降低,脉冲展宽严重。而在后半段,由于二阶色散、四阶色散的作用得到了抑制和补偿,三阶色散的积累作用不仅导致脉冲峰的前移和频率的漂移,而且产生了强烈的前沿振荡,恶化了传输信号。在模拟中也发现,即使有很小的三阶色散残留量,也会导致脉冲峰较大的时移积累。

保持二阶色散、四阶色散系数的系数不变,根据(11)式和(15)式,引入高奇数阶色散管理,对三阶色散分布图进行优化。令 $\beta_{31,L_1} = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $\beta_{32,L_2} = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$,并使得 $L_1 = L_2 = 5 \text{ km}$,显然 $L_1 \beta_{31,L_1} + L_2 \beta_{32,L_2} = 0$,则在光纤段 L , $\langle \beta_3 \rangle = 0$ 。在此条件下,高斯脉冲在系统中的波形变化和脉冲展宽因子的变化如图 3 所示。

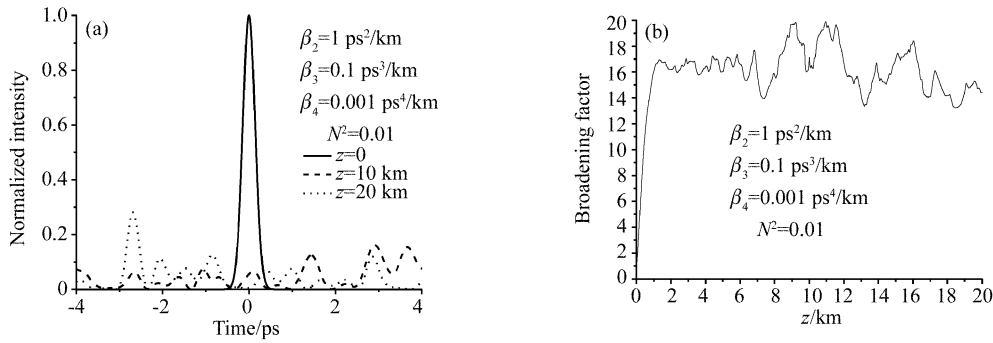


Fig. 2 Variations of (a) pulse shapes at $z=20$ km and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber without higher-order dispersion management

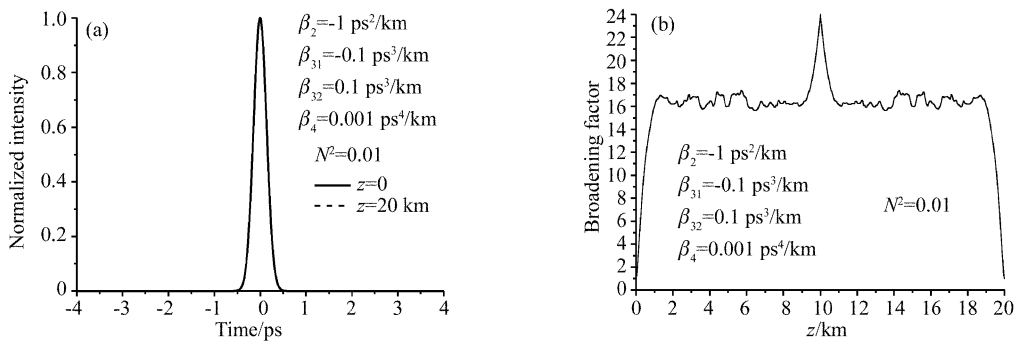


Fig. 3 Variations of (a) pulse shapes at $z=20$ km and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber with higher-order dispersion management

同图 2 对比可知,在相位共轭系统中引入高阶色散管理后,大大改善了超短脉冲在光纤中的传输,二阶色散、三阶色散和四阶色散所导致的信号失真和畸变得到了完全的复原和补偿。若以上述配置作为基本光纤传输链,超短脉冲信号就可以获得在光纤链中的稳定传输。

3.2 脉冲对之间的相互作用

当脉冲传输一定距离后,三阶色散将导致脉冲时移和频率漂移,并产生强烈的前沿或者后沿振荡,导致能量向外辐射,降低了信号峰值。当 $\beta_3 > 0$, 脉冲峰后移,振荡出现在脉冲的后沿;当 $\beta_3 < 0$, 脉冲峰前移,振荡出现在脉冲的前沿。当多个脉冲同时

传输时,一个脉冲的时移和振荡叠加在另一个脉冲上,会使脉冲之间的相互作用增强。

图 4 表示了脉宽 200 fs, 8 倍脉宽码间距(相当于 625 Gb/s)的高斯光脉冲在相位共轭通信系统中的传输波形变化。当没有引入色散管理时,色散作用所导致的脉冲边沿振荡、脉冲时移和频率漂移使得脉冲之间产生强烈的相互作用,加剧波形失真,且峰值功率大大降低,脉冲展宽严重,[见图 4(a)]。

当相位共轭系统中引入色散管理后,从图 4(b)可以看出,经过色散管理光纤链的传输,在终点处,波形恢复到初始形状。传输过程中信号由于色散和非线性效应,以及脉冲间相互作用而产生的失真和

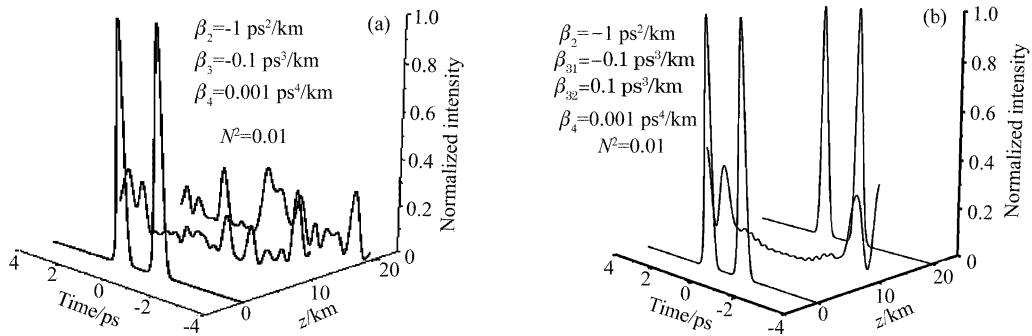


Fig. 4 (a) Variations of pulse shapes along the fiber without dispersion management, (b) the variations with dispersion management

畸变得到了完全恢复。即使在传输中点,脉冲之间也只存在相对时移,而没有相互作用。引入色散管理不仅补偿了全部色散,而且减弱了脉冲之间的相互作用,提高了相位共轭系统对失真信号的补偿性能。

结论 本文理论分析了在高阶色散作用下,高斯脉冲信号在中距相位共轭通信系统中的传输特性,模拟了二阶、三阶和四阶色散和非线性作用下,飞秒高斯脉冲信号的传输过程。数值模拟和分析结果表明,相位共轭系统能够补偿偶数阶色散、自相位调制所导致的信号失真和畸变,但是不能补偿奇数阶色散。当系统引入高奇数阶色散管理之后,相位共轭技术和高阶色散管理的结合,不仅可以完全补偿和复原包括奇数阶和偶数阶色散在内的全部色散和非线性所引入的信号失真和畸变,而且能够减弱时分复用系统中脉冲之间的相互作用,提高相位共轭系统对失真信号的补偿性能。

参 考 文 献

- 1 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Second Edition, New York: Academic Press, 1995. 75~81
- 2 Masaki Amemiya. Pulse broadening due to higher order dispersion and its transmission limit. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 591~597
- 3 Capmany J, Pastor D, Sales S *et al.*. Effects of fourth-order dispersion in very high-speed optical time-division multiplexed transmission. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11): 960~962
- 4 Cao Wenhua, Liu Songhao, Guo Qi. Soliton interaction in dispersion-shifted fibers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(6): 739~745 (in Chinese)
- 5 Guo Shuqin, Li Zhonghao, Xiao Yan *et al.*. Stable propagation of chirped picosecond optical pulse in optical fiber links under higher order dispersion managed. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(7): 587~591 (in Chinese)
- 6 Zhang Xiangyang, Wang Xiangzhao. Effect of third-order dispersion on the soliton propagation in birefringent optical fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(1): 16~20 (in Chinese)
- 7 Hellstrom E, Sunnerud H, Westlund M *et al.*. Third-order dispersion compensation using a phase modulator. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1188~1197
- 8 Takiguchi K, Kawanishi S, Takara H *et al.*. Dispersion slope equalizer for dispersion shifted fiber using a lattice-form programmable optical filter on a planar lightwave circuit. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1647~1656
- 9 Yamamoto T, Nakazawa M. Third- and fourth-order active dispersion compensation with a phase modulator in a terabit-per-second optical time-division multiplexed transmission. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 647~649
- 10 Pelusi M D, Matsui Y, Suzuki A. Fourth-order dispersion suppression of ultrashort optical pulses by second-order dispersion and cosine phase modulation. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(5): 296~298
- 11 Lorattanasane C, Kikuchi K. Design theory of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 948~955
- 12 Watanabe S, Shirasaki M. Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 243~248
- 13 Feiste U, Ludwig R, Schmidt C *et al.*. 80 Gbit/s transmission over 106 km standard fiber using optical phase conjugation in a sagnac-interferometer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 1063~1065
- 14 Kazuro Kikuchi, Ken Matsuura. Transmission of 2-ps optical pulses at 1550 nm over 40-km standard fiber using midspan optical phase conjugation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1410~1412
- 15 Fewings M R, Gaeta A L. Compensation of pulse distortion by phase conjugation via difference-frequency generation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2000, **17**(9): 1522~1525
- 16 Wang Li, Li Zhonghao, Zhou Guosheng. Analysis of transmission properties of femtosecond pulse in medium with momentum method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10): 1219~1223 (in Chinese)
- 17 Bu Yang, Zhang Xiangyang, Wang Xiangzhao. Effects of chirped super-Gaussian pulses on optical communication system using midway optical phase conjugation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(supplement): 63~64 (in Chinese)
- 18 Shen Yonghuan, Liang Zaizhong, Xu Lühu *et al.*. *Handbook of Applied Mathematics* (实用数学手册). Beijing: Science Press, 2000. 604~611 (in Chinese)