

文章编号: 0258-7025(2005)04-0475-06

# 自陡峭效应对相位共轭系统脉冲传输的影响

步 扬, 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 光学相位共轭(OPC)技术能够同时且高效地补偿光纤传输过程中色散及非线性效应所导致的信号失真,且该技术同脉冲调制方式无关。从理论上分析了在自陡峭效应(SS)作用下高斯脉冲信号在中距相位共轭系统中的传输演化特性,数值模拟了在其作用下超短飞秒高斯脉冲的动态传输过程,讨论了自陡峭效应对中距相位共轭系统复原性能的影响。结果表明自陡峭效应将导致高斯脉冲信号发生峰值漂移和脉冲后沿变陡,相位共轭系统不能补偿由此导致的脉冲失真和畸变。引入合适的色散可以减小这种信号失真,并使得相位共轭系统能够同时补偿由于色散、自相位调制和自陡峭效应而引起的信号失真。

**关键词** 非线性光学; 光学相位共轭; 自陡峭效应; 色散; 自相位调制

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## Effects of Self-Steepening on Pulse Propagation in Optical Fiber System Using Optical Phase Conjugation

BU Yang WANG Xiang-zhao

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

**Abstract** Optical phase conjugation (OPC) is a promising optical technology that can compensate for the distortion due to dispersion and nonlinear effects simultaneously in pulses propagating through a single-mode optical fiber. The pulse propagation characteristics influenced by self-steepening (SS) on the optical fiber system using midway OPC are analyzed theoretically. Dynamic evolution of ultra-short Gaussian pulses in the system is simulated numerically. Effects of SS on the compensation for the distortion are discussed. The results demonstrate that the SS can affect pulse propagation dynamics. The distortion due to the SS cannot be compensated by the OPC. The distortion can be counteracted by the small dispersion.

**Key words** nonlinear optics; optical phase conjugation; self-steepening effect; dispersion effect; self-phase modulation

### 1 引 言

当脉冲信号在光纤中传输时,光纤的色散效应和非线性效应通常会导致脉冲产生失真和畸变。目前已提出了多种应用技术和解决方案对由此导致的失真信号进行补偿和复原,其中,光学相位共轭(OPC)技术由于能够同时补偿色散和非线性效应,补偿效率高,且该技术同信号调制方式无关,因而得到了比较深入的研究,成为补偿技术中最有前景的技术之一<sup>[1~5]</sup>。但是在相关研究中,只考虑了群速

度色散(GVD)和自相位调制效应(SPM),没有考虑高阶非线性效应对系统复原性能的影响。随着飞秒光脉冲的产生,非线性效应,特别是高阶非线性效应对光纤中传输脉冲信号的作用逐渐增强<sup>[6~8]</sup>,这就必须考虑和分析高阶非线性效应对相位共轭光纤系统信号失真复原性能的影响。

由于光脉冲的自陡峭效应(SS)是群速度和光强的相关性造成的,它将导致脉冲后沿的自陡峭和展宽频谱的不对称,这必然使得传输信号产生失真

收稿日期: 2004-02-12; 收到修改稿日期: 2004-06-22

基金项目: 国家 863 计划(2002AA404050)和上海市纳米专项计划(0214nm091, 0359nm004)资助项目。

作者简介: 步 扬(1973—),男,江苏扬州人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事相位共轭技术的应用研究。E-mail: ipt26267@mail.shenc.ac.cn

和畸变<sup>[9~11]</sup>。本文讨论了超短光脉冲在中距相位共轭光纤系统传输过程中的传输演化特性以及在该过程中自陡峭效应与群速度色散、自相位调制效应之间的相互关系。

## 2 基本方程

典型的相位共轭传输系统采用中距相位共轭方式,如图 1 所示。入射端(Tx)初始输入信号经过前半段光纤系统(0~L)的传输,信号光发生了失真。该失真信号经过置于系统中点的光学相位共轭器,产生了失真信号的复共轭。再经过后半段光纤系统(L~2L)的传输,在输出端(Rx)得到初始信号的复共轭。于是,系统在传输过程中,由于群速度色散和自相位调制效应所引起的信号波形失真和畸变得到准确补偿。

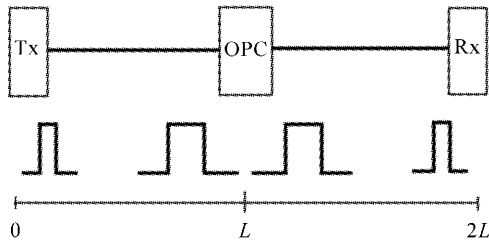


图 1 中距相位共轭光纤传输系统结构图

Fig. 1 Schematic of optical fiber system using midway optical phase conjugation

光纤系统中,脉冲信号的传输通常采用非线性薛定谔方程来描述<sup>[9]</sup>。假定非线性响应是瞬时的,则自频移效应可以忽略,只考虑自陡峭效应,该方程为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) \right], \quad (1)$$

其中  $A, z, \alpha, \gamma, T$  分别表示信号的复振幅、传输距离、衰减系数、非线性系数和传输时间,  $\beta_2$  表示信号的二阶色散系数<sup>[9]</sup>,  $\omega_0$  为信号中心频率。

令线性算符  $D_T$  为

$$D_T = -\frac{\alpha}{2} - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2}, \quad (2)$$

非线性算符  $N_T$  为

$$N_T[A(z, T)] = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{A\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) \right], \quad (3)$$

右侧二项分别表示自相位调制效应、自陡峭效应。

经过传输距离  $L$ , (1) 式的解可写为

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

在中点处对信号脉冲共轭,即对(4)式取相位共轭,有

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

忽略衰减,算符

$$D_T^* = -D_T, \quad (6)$$

$$N_T^*[A(z, T)] = -i\gamma \left[ |A|^2 - \frac{i}{A\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) \right], \quad (7)$$

当信号  $A^*(L, T)$  传输相同距离  $L$  时,假设光纤的传输特性相同,有

$$A(2L, T) = \exp \left\{ LD_T + \int_0^L N_T[A(z, T)] dz \right\} A^*(L, T) = \exp \left\{ \int_0^L \left[ -\frac{2\gamma}{A\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) \right] dz \right\} A^*(0, T), \quad (8)$$

(8) 式表明,在相位共轭系统中,自陡峭效应所导致的信号畸变和失真不能得到补偿,而是累积起来,进一步恶化了信号的传输。从物理意义上说,由于自陡峭效应所导致的脉冲失真只是发生在脉冲的后沿,经过共轭之后,由于频谱分布的不均匀性,其失真不会得到复原。必须采取相应的措施以补偿这种信号失真和畸变。

## 3 数值计算结果及分析

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<sup>[2,3]</sup>。考虑结果的可比性,需要对(1)式归一化。引入:

时间归一化标量  $\tau: \tau = T/T_0$ , 其中  $T_0$  为信号初始脉宽;归一化振幅  $U: A = \sqrt{PU}$ , 其中  $P$  为信号初始入射功率;归一化传输距离  $x: z = xL_D$ , 其中  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  为二阶色散长度。(1) 式有如下归一化形式

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -i \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + iN^2 \left[ |U|^2 U + i\text{s} \frac{\partial (|U|^2 U)}{\partial \tau} \right], \quad (9)$$

当信号光经过光学相位共轭器转换成相位共轭光之后,其传输可以用(9)式的复共轭形式描述,传输方程为

$$\frac{\partial U^*}{\partial x} = i \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 U^*}{\partial \tau^2} - iN^2 \left[ |U|^2 U^* - i s \frac{\partial(|U|^2 U^*)}{\partial \tau} \right], \quad (10)$$

其中  $N^2 = L_D/L_{NL}$ , 非线性长度  $L_{NL} = (\gamma \cdot P)^{-1}$ , 自陡峭系数  $s = 2/(\omega_0 T_0)$ , 自陡峭长度  $L_s = \omega_0 T_0 (\gamma P)^{-1}/2$ 。

$L_D$ ,  $L_{NL}$  和  $L_s$  给出了沿传输方向脉冲演变过程的长度标量, 表明在此过程中, 哪一种效应起主要作用。不失一般性, 比较  $L_{NL}$  和  $L_s$  之间的关系。若两者对脉冲的作用相当, 即  $L_{NL} \approx L_s$ , 则当信号波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 入射信号初始脉宽  $T_0 \sim 2 \text{ fs}$ 。反之则表明, 当入射信号为飞秒超短脉冲时, 两者对脉冲的作用相当, 自陡峭效应不可忽略, 必须考虑该效应对脉冲信号传输过程的影响。实际上, 当信号脉宽小于  $6.25 \text{ ps}$  时, 就必须考虑自陡峭效应对系统的影响。

假设入射信号为高斯型脉冲, 脉冲信号的波形变化使用均方根脉宽  $\sigma$  表示<sup>[9]</sup>。脉冲展宽因子 (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。

求解(9),(10)式, 即可得到在相位共轭系统中入射高斯脉冲信号在光纤中的传输场分布和演化过程。系统采用如图 1 所示的相位共轭中距结构, 在中点处使用光学相位共轭器产生相位共轭信号。其中, 光纤传输长度  $2L = 4L_D$ 。为了突出自陡峭效应的作用, 自陡峭系数  $s$  取  $0.01$  和  $0.05$ , 分别对应于入射脉冲初始脉宽  $T_0 \approx 60 \text{ fs}$  和  $T_0 \approx 10 \text{ fs}$ 。

### 3.1 色散 $\text{sgn}(\beta_2) = 0$ , 自相位调制和自陡峭效应对系统起作用

图 2 和图 3 描述了当  $\text{sgn}(\beta_2) = 0$ ,  $s$  分别为  $0.01$  和  $0.05$  时, 高斯脉冲在相位共轭补偿系统中的演化过程和传输场分布。从图中可以看到: 与相位共轭技术能够完全补偿群速度色散和自相位调制效应不同, 相位共轭技术不能补偿自陡峭效应导致的波形失真和信号畸变, 虽然脉冲畸变的幅度较小。这与上文的分析也是相符合的。

当群速度色散和自相位调制效应起主要作用时, 信号脉冲的强度和宽度都发生变化, 但是脉冲的形状基本保持不变, 仍旧是对称的高斯波形分布。

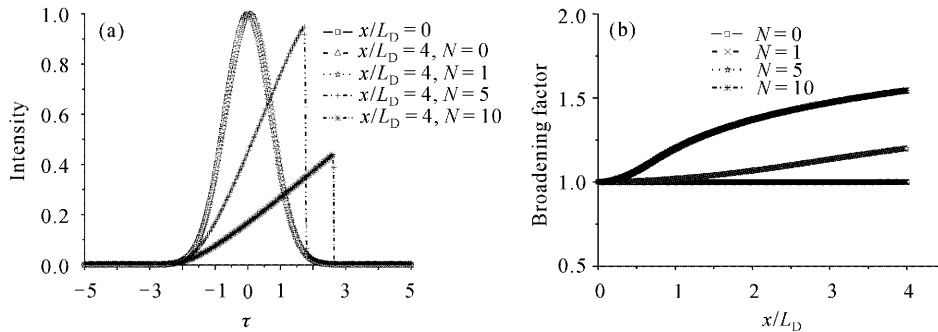


图 2 当  $s=0.01$ ,  $\text{sgn}(\beta_2)=0$  时。(a) 在  $x/L_D=4$  处, 高斯脉冲形状的变化, (b) 脉冲展宽因子随传输距离的变化

Fig. 2 Variations of (a) pulse shapes at  $x/L_D=4$  and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber when  $s=0.01$  and  $\text{sgn}(\beta_2)=0$

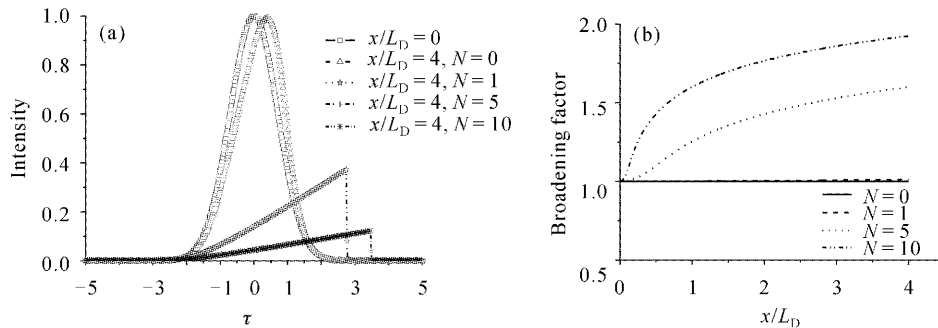


图 3 当  $s=0.05$ ,  $\text{sgn}(\beta_2)=0$  时, (a) 在  $x/L_D=4$  处, 高斯脉冲形状的变化, (b) 脉冲展宽因子随传输距离的变化

Fig. 3 Variations of (a) pulse shapes at  $x/L_D=4$  and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber when  $s=0.05$  and  $\text{sgn}(\beta_2)=0$

而自陡峭效应的作用导致脉冲形状发生不对称变化。在强度减弱的同时,脉冲峰值向脉冲后沿发生漂移,使后沿变陡,自陡峭系数的增加将加剧脉冲峰值的漂移。随着入射光强的逐渐增强,其作用将变得更加明显,脉冲后沿变得越来越陡。相应的脉冲展宽因子也随着光强的增强而迅速增大。当入射光强较弱时,光脉冲峰值只发生漂移,其波形基本不变,展宽很小。当  $s=0.01, N^2=0$  时,在  $x=4L_D$  处,脉冲展宽因子约为 1。当入射光强增强时,光脉冲不仅发生漂移,波形也发生变化,其峰值降低,而且脉冲后沿急剧变陡[图 2(a),图 3(a)]。这表明不只自

陡峭效应在起作用。实际上,根据文献[9~11],脉冲不可能无限变陡,当脉冲后沿变陡时,群速度色散效应已经不可忽略,(9),(10)式中色散项必须考虑。

### 3.2 色散效应、自相位调制和自陡峭效应同时对系统起作用

考虑光纤的正色散 [ $\text{sgn}(\beta_2) = 1$ ] 和负色散 [ $\text{sgn}(\beta_2) = -1$ ] 两种情况:

1) 当  $\text{sgn}(\beta_2) = 1$  时,对不同的自陡峭效应作用,高斯脉冲在相位共轭系统中的传输演化过程如图 4 和图 5 所示。

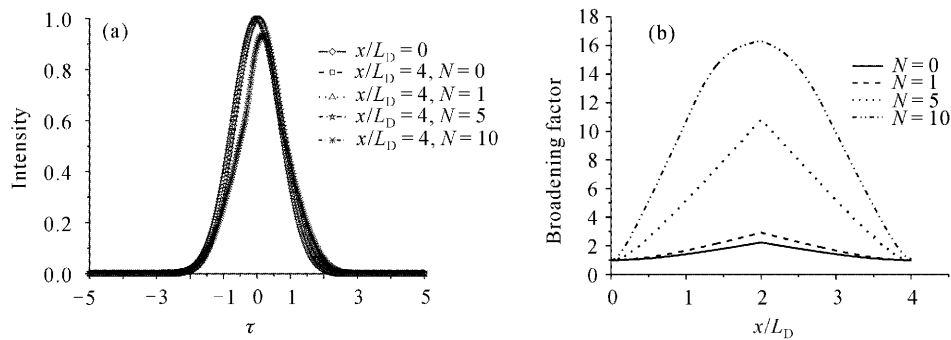


图 4 当  $s=0.01, \text{sgn}(\beta_2)=1$  时, (a) 在  $x/L_D=4$  处, 高斯脉冲形状的变化, (b) 脉冲展宽因子随传输距离的变化

Fig. 4 Variations of (a) pulse shapes at  $x/L_D=4$  and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber when  $s=0.01$  and  $\text{sgn}(\beta_2)=1$

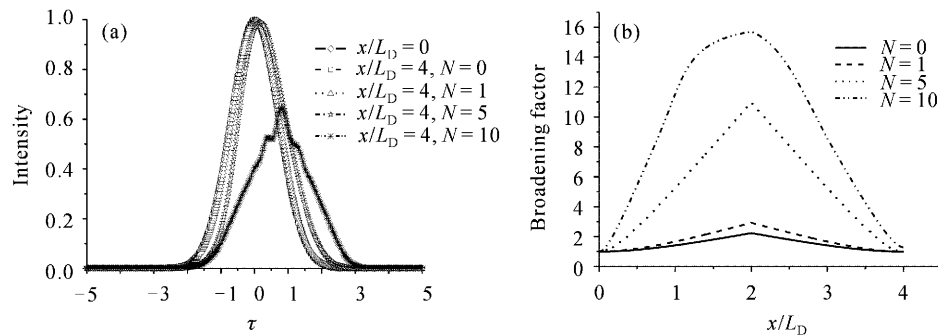


图 5 当  $s=0.05, \text{sgn}(\beta_2)=1$  时, (a) 在  $x/L_D=4$  处, 高斯脉冲形状的变化, (b) 脉冲展宽因子随传输距离的变化

Fig. 5 Variations of (a) pulse shapes at  $x/L_D=4$  and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber when  $s=0.05$  and  $\text{sgn}(\beta_2)=1$

图 4(a)显示,经过相位共轭系统的传输,自陡峭效应的作用使得光脉冲仍然发生了漂移,当  $s=0.01, N=1$  时,在  $x=4L_D$  处,脉冲的峰值在  $\tau=0.000977$  处,其归一化强度为  $|U|^2=0.99976$ ;  $N=10$  时,脉冲的峰值在  $\tau=0.166$  处,其归一化强度为  $|U|^2=0.933$ 。当系统无色散作用时,在同样条件下,  $N=1$ , 脉冲的峰值在  $\tau=0.0879$  处,是色散条件下的 90 倍;其归一化强度为  $|U|^2=0.9984$ ,基本相同;  $N=10$ , 脉

冲的峰值在  $\tau=2.6087$  处,是色散条件下的 16 倍;其归一化强度为  $|U|^2=0.4395$ ,仅为色散条件下的一半。可见,正色散的存在不仅大大减缓了这种漂移,而且即使在光强很大时 ( $N=10$ ), 脉冲形状变化也很小,这就使得相位共轭系统能够补偿和复原信号的失真和畸变。入射的高斯光脉冲在经过该系统时,脉冲在前半段会随着传输距离的增加而逐渐展宽,经过相位共轭器后,在后半段,其失真又逐渐得到了补偿。

在传输终点处,脉冲又基本恢复到初始形状[图 4(b)].当  $s=0.01, x=4L_D$  时,  $N=1$ , 脉冲展宽因子为 1.00007;  $N=5$ , 脉冲展宽因子为 1.00051;  $N=10$ , 脉冲展宽因子仅为 1.08783, 信号由于色散、非线性效应和自陡峭效应作用而导致的失真和畸变在该系统中得到了很好的补偿。

随着自陡峭效应的增强,这种作用将加剧脉冲信号峰值的漂移,并进一步导致脉冲信号的失真[图 5(a)].当  $s=0.05, N=10$  时,在  $x=4L_D$  处,脉冲的峰值已经移到  $\tau=0.8109$  处,其归一化强度降低到  $|U|^2=0.6449$ 。同  $s=0.01$  相比,同样条件下,分别增加了 4.885 倍和 0.6912 倍。即使在这种情况下,从图 5(b)可知,相位共轭系统也能够较好地补偿色散效应、非线性效应和自陡峭效应共同作用导致的脉冲失真。当  $s=0.01, x=4L_D$  时,  $N=1$ , 脉冲展宽因子为 1.00073;  $N=5$ , 脉冲展宽因子为

1.00942;  $N=10$ , 脉冲展宽因子仅为 1.26927, 且波形相对稳定,没有出现振荡。

2) 当  $\text{sgn}(\beta_2)=-1$  时,在自陡峭效应作用下, 高斯脉冲在相位共轭系统中的传输演化过程如图 6 所示。

图 6(a)显示出当  $\text{sgn}(\beta_2)=-1$  时,自陡峭效应和入射信号功率对系统传输性能的影响增强。当  $s=0.01, N=1$  时,在  $x=4L_D$  处,自陡峭效应的作用也导致信号发生漂移,而脉冲的形状基本不变。脉冲的峰值在  $\tau=0.02931$  处,其归一化强度为  $|U|^2=0.99931$ 。同  $\text{sgn}(\beta_2)=1$  时相比,在强度基本不变的条件下,漂移的幅度增加了 30 倍。当  $N=5$  时,信号功率的增强不仅导致漂移的幅度大幅增加,其脉冲的峰值出现在  $\tau=2.92135$  处;而且信号开始振荡。这种振荡随着入射功率的增加而增强。当  $N^2=10$  时,高斯脉冲已经严重畸变,变成振荡波形。

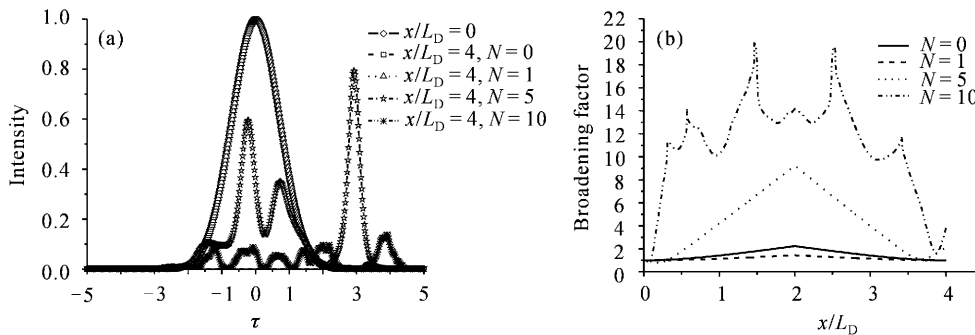


图 6 当  $s=0.01, \text{sgn}(\beta_2)=-1$  时, (a) 在  $x/L_D=4$  处, 高斯脉冲形状的变化, (b) 脉冲展宽因子随传输距离的变化

Fig. 6 Variations of (a) pulse shapes at  $x/L_D=4$  and (b) pulse broadening factor with distance along the fiber, when  $s=0.01$  and  $\text{sgn}(\beta_2)=-1$

在同样条件下,  $N=1$  时的脉冲展宽要小于  $N=0$  时的脉冲展宽[图 6(b)]. 这表明负色散的存在也有利于抑制自陡峭效应的作用。并且, 由于负色散的作用, 信号脉宽不是线性增加, 而是有一个明显的压缩过程[图 6(b)]. 这是由于色散致啁啾为负, 而非线性效应、自陡峭效应致啁啾为正, 两者的相互作用导致脉冲的净啁啾减小, 从而产生脉冲的初期窄化过程。随着传输距离的增加, 脉冲又重新开始展宽。由于相位共轭系统的对称性, 光纤中的信号脉宽分布也具有对称性, 因此, 在传输距离的终端, 脉冲又出现了末期窄化过程[图 6(b)]. 当  $s=0.01, N=1$  时, 在  $x=4L_D$  处, 负色散条件下脉冲展宽因子为 1.438, 正色散条件下脉冲展宽因子为 2.92204, 增加了 2.03 倍; 当  $N=5$  时, 负色散条件下脉冲展宽因子为 9.2368, 正色散条件下脉冲展宽因子为 10.8194, 也增加了 1.2 倍。因

此, 当系统信号入射功率较小时, 同正色散  $\text{sgn}(\beta_2)=1$  相比, 负色散、非线性效应和自陡峭效应共同作用导致的脉冲展宽程度要小, 从而更有利于满足传输系统的补偿要求。但是当信号功率增加时, 同正色散  $\text{sgn}(\beta_2)=1$  相比, 在负色散条件  $\text{sgn}(\beta_2)=-1$  下, 信号脉冲会产生振荡, 反而不利于失真信号的复原和补偿。

中距相位共轭结构模型的一个缺陷在于光学相位共轭器必须放置于系统的中点处, 系统出射光脉冲的波阵面分布才可能同入射光脉冲的光波阵面分布相同, 失真信号才会得到完全补偿。但这种情况难以保证, 因此系统输出端光脉冲脉宽总是要比输入端光脉冲的初始脉宽要宽。上述脉冲信号初期窄化和末期窄化过程的出现表明: 当系统信号入射功率较小, 且光纤色散系数为负, 即  $\text{sgn}(\beta_2)=-1$  时,

在相位共轭复原系统中,光学相位共轭器不需要放置于绝对中点,可以放在中点偏后,这就使得输出端位于系统末期窄化区,输出端脉冲脉宽要比初始脉宽窄,这就有助于改进相位共轭系统的补偿性能。

## 4 结 论

讨论了光脉冲在中距相位共轭光纤系统传输过程中的自陡峭效应,数值模拟了在自陡峭效应作用下,相位共轭光纤系统中飞秒高斯脉冲的传输演化过程。在小信号功率条件下,相位共轭系统能够复原和补偿在传输过程中由于色散、自相位调制和自陡峭效应引起的信号失真和畸变。且负色散光纤比正色散光纤更有利于失真信号的复原和系统补偿性能的改善。

### 参 考 文 献

- 1 P. Kaewplung, T. Angkaew, K. Kikuchi. Simultaneous suppression of third-order dispersion and sideband instability in single-channel optical fiber transmission by midway optical phase conjugation employing higher order dispersion management[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(6): 1465~1473
- 2 C. Lorattanasane, K. Kikuchi. Design theory of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 948~955
- 3 M. R. Fewings, A. L. Gaeta. Compensation of pulse distortions by phase conjugation via difference-frequency generation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(9): 1522~1525
- 4 U. Feiste, R. Ludwig, C. Schmidt *et al.*. 80 Gb/s transmission over 106-km standard-fiber using optical phase conjugation in a Sagnac-interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 1063~1065
- 5 D. Kunitatsu, C. Q. Xu, M. D. Pelusi *et al.*. Subpicosecond pulse transmission over 144 km using midway optical phase conjugation via a cascaded second-order process in a LiNbO<sub>3</sub> waveguide [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1621~1623
- 6 Wei Hui, Xu Shizhong, Zhang Shengjia *et al.*. A novel method for compensating deflection in temporal-spatial transform pulse shaping system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 149~152  
韦 辉, 许世忠, 张生佳等. 时空变换脉冲整形系统中实现光束复原的一种新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 149~152
- 7 Xia Lan, Qian Liejia. Serrated-aperture apodizers of high-energy ultrashort pulse-laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 57~61  
夏 兰, 钱列加. 高能飞秒激光光束锯齿光阑截趾整形[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 57~61
- 8 Li Zhonghao, Tian Huiping, Wang Tao *et al.*. Stability analysis of femtosecond optical solitary wave solution with arbitrary parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 289~292  
李仲豪, 田慧平, 王涛等. 飞秒光孤立波解传输的稳定性分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 289~292
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd Edition, San Diego: Academic Press, 2001. 28~60
- 10 Marek Trippenbach, Y. B. Band. Effects of self-steepening and self-frequency shifting on short-pulse splitting in dispersive nonlinear media[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(6): 4791~4803
- 11 J. R. de Oliveira, Marco A. de Moura, J. Miguel Hickmann *et al.*. Self-steepening of optical pulses in dispersive media[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(11): 2025~2027