

# 相位共轭技术对光纤中互相位调制效应的补偿研究

陈红霞<sup>1</sup>, 曹文华<sup>2</sup>, 徐平<sup>2</sup>

(1. 五邑大学信息科学研究所, 广东 江门 529020; 2. 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:**针对两束波长不同的信号脉冲的传输情况,通过理论分析和数值计算,研究了采用频域相位共轭技术和时域相位共轭技术分别对互相位调制效应的补偿情况。结果表明:时域相位共轭技术无法补偿互相位调制引起的信号失真,频域相位共轭技术则能完全补偿。对于高斯脉冲,经频域相位共轭技术补偿的输出与输入信号脉冲完全相同;对于不同啁啾值的高斯脉冲,虽然信号脉冲中途展宽的程度不同,但最终经频域相位共轭技术补偿的输出与输入信号脉冲基本一致;对于超高斯脉冲,在前半段光纤中,虽然脉宽随着高斯指数的变大而变大,但输出脉冲与初始信号脉冲一样;对于高斯脉冲串,经频域相位共轭技术后输出端的脉冲是输入脉冲的复共轭和完全的时间反转。

**关键词:**光纤通信;互相位调制;数值计算;时域相位共轭;频域相位共轭

**中图分类号:**TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.012

## Compensation of cross-phase modulation in optic fiber by phase conjugation

CHEN Hong-xia<sup>1</sup>, CAO Wen-hua<sup>2</sup>, XU Ping<sup>2</sup>

(1. Institute of Information Science, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** We analyzed theoretically and calculated numerically the compensation between two optical pulses with different wavelength based on spectral phase conjugation (SPC) and temporal phase conjugation (TPC). The results showed that TPC can't compensate waveform distortion caused by XPM, while SPC can compensate waveform distortion caused by XPM. For Gaussian pulse, the output pulse from SPC system is the same as the input signal pulse. For chirped Gaussian pulse, the signal pulse broadened is different in the midway, but the output pulse from SPC system is almost the same as the input signal pulse. For super-Gaussian pulse, the broadened factor increases with the increasing of Gaussian parameter in the first half of the optical fiber, but the output pulse from SPC system is the same as the input signal pulse. For pulse train, the output signal pulse from SPC system is both the complex conjugation and temporal reversion of the input pulse.

**Key words:** fibre-optic communication; cross-phase modulation (XPM); numerical calculation; temporal phase conjugation (TPC); spectral phase conjugation (SPC)

### 1 引言

当两束或多束具有不同波长的光脉冲在光纤中同时传输时,彼此之间会受到互相位调制(XPM)效应的作用。XPM是光纤折射率与光强度有关的一种非线性现象,即:当不同波长或不同传输方向或不

同偏振态的光波在光纤中共同传输时,一种光波引起另一种光波的非线性相移。在多波长信号同时传

作者简介:陈红霞(1985-),女,在读硕士,主要研究方向为高速光纤通信系统。E-mail:kindj45@yahoo.com.cn

收稿日期:2011-02-21

输时(如波分复用光波系统),XPM 效应表现为每个光信道的相位都同时受所有信道的平均功率和比特率的影响,光纤色散把相位变化转化为振幅起伏,很大程度上影响了信噪比(SNR),这就限制了多束光脉冲在光纤中的传输<sup>[1-3]</sup>。

时域相位共轭(TPC)是在光纤传输距离的中点对脉冲的时域进行相位共轭变换,实现对群速度色散(GVD)、自相位调制(SPM)和脉冲内拉曼散射(IRS)等效应的补偿<sup>[4]</sup>,但其不能补偿 XPM 导致的信号失真。频域相位共轭是在光纤传输距离的中点在频域对脉冲的相位进行共轭变换,最后输出的脉冲相当于初始输入脉冲的相位共轭和时间反转,同时实现对各阶色散、SPM 以及 XPM 等效应的补偿<sup>[4-5]</sup>。

本文对 SPC 如何补偿 XPM 引起的光脉冲传输失真进行了理论推导,数值计算了信号脉冲分别为高斯脉冲、啁啾高斯脉冲、超高斯脉冲以及高斯脉冲串等情况下基于频域相位共轭技术的脉冲失真复原,并对它们分别进行了分析和讨论。

## 2 理论推导

在单模光纤中,两个偏振态相同但波长不同的信号光脉冲共同传输由下述耦合方程组描述<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{a_1}{2} A_1 = i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{a_2}{2} A_2 = i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2 \quad (2)$$

式中, $z$  是传输距离; $A_j$  是脉冲慢变振幅; $v_{gj}$  是脉冲的群速度; $\beta_{2j}$  是群速度色散系数; $a_j$  是损耗系数; $\gamma_j$  是非线性系数。

假设入射脉冲传输时线偏振态保持不变,忽略光纤损耗(长距离传输可通过集总方式补偿),令

$$\xi = \frac{z}{L_D} \quad (\text{其中}, L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_{21}|}, T_0 \text{ 为脉冲初始半宽度}),$$

$$\tau = \frac{t - z/v_{g1}}{T_0}, u_j = \frac{A_j}{P_1^{1/2}}, \text{ 得到归一化方程}^{[7-8]} \text{ 为:}$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \text{sgn}(\beta_{21}) \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} = iN^2 (|u_1|^2 + 2|u_2|^2) u_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \varepsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} = iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} (|u_2|^2 + 2|u_1|^2) u_2 \quad (4)$$

其中, $N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} (L_{NL} = \frac{1}{\gamma_1 P_1}, P_1$  为信号脉冲 1 的初始

峰值功率); $\varepsilon = \text{sgn}(v_{g1} - v_{g2})$ ;  $L_W = \frac{T_0}{d} (d = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1} v_{g2}})$  是两脉冲间群速度失配的量度; $\omega_j$  是光学角频率。把方程(4)改成如下形式:

$$\frac{\partial u_2}{\partial \xi} = [\hat{D}_2(\tau) + \hat{N}_2(\tau)] u_2(z, \tau) \quad (5)$$

式中, $\hat{D}$  是差分算符,它包含了脉冲各自的 GVD 以及两脉冲由于群速度失配引起的相互走离; $\hat{N}$  是非线性算符,包含了 SPM 和 XPM 两种非线性效应。即:

$$\hat{D}_2(\tau) = -\varepsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \quad (6)$$

$$\hat{N}_2(\tau) = iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} (|u_2|^2 + 2|u_1|^2) \quad (7)$$

设信号脉冲 2 的初始归一化振幅为  $u_2(0, \tau)$ , 则经过传输距离  $L$  后,解方程(5)知输出脉冲为:

$$u_2(L, \tau) = \exp\{L \hat{D}_2(\tau) + \int_0^L \hat{N}_2(\tau) dz\} \times u_2(0, \tau) \quad (8)$$

若用输出脉冲表示输入脉冲,则由式(5)得:

$$u_2(0, \tau) = \exp\{-L \hat{D}_2(\tau) - \int_0^L \hat{N}_2(\tau) dz\} \times u_2(L, \tau) \quad (9)$$

SPC 是在频域对脉冲的相位进行共轭,这相当于在时域对脉冲进行相位共轭和时间取反,即:

对式(9)两边取复共轭,同时用  $-\tau$  代替  $\tau$  得:

$$u_2^*(0, -\tau) = \exp\{-L \hat{D}_2^*(-\tau) - \int_0^L \hat{N}_2^*(-\tau) dz\} \times u_2^*(L, -\tau) \quad (10)$$

由式(6)和式(7)可推出:

$$\hat{D}_2^*(-\tau) = \varepsilon \frac{L_{D1}}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} = -\hat{D}_2(\tau) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{N}_2^*(-\tau) &= -iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} (|u_2|^2 + 2|u_1|^2) \\ &= -\hat{N}_2(\tau) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(11)、式(12)代入式(10)得到经过  $2L$  长光纤后输出脉冲为:

$$u_2(2L, \tau) = u_2^*(0, \tau) = \exp\{L \hat{D}_2(\tau) + \int_0^L \hat{N}_2(\tau) dz\} \times u_2^*(L, -\tau) \quad (13)$$

比较式(13)和式(8)可以发现,如果在光纤传输距离  $L$  的末端采用 SPC 技术,将  $u_2(L, \tau)$  变换为  $u_2^*(L, -\tau)$ ,那么,当变换后的  $u_2^*(L, -\tau)$  再次经过一段长度为  $L$  的光纤传输,便得到  $u_2^*(0, -\tau)$ ,即脉冲通过一段长为  $2L$  的光纤,最后输出的脉冲相当于

初始输入脉冲相位的复共轭和时间反转。可见,SPC能同时实现对GVD、SPM以及XPM等效应的补偿。

与SPC相反,TPC是在时域对脉冲的相位进行共轭,即对式(9)两边取复共轭:

$$u_2^*(0, \tau) = \exp\left\{-L \hat{D}_2^*(\tau) - \int_0^L \hat{N}_2^*(\tau) dz\right\} \times u_2^*(L, \tau) \quad (14)$$

由式(6)、式(7)知:

$$\hat{D}_2^*(\tau) = -\varepsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \quad (15)$$

$$\hat{N}_2^*(\tau) = -iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} (|u_2|^2 + 2|u_1|^2) \quad (16)$$

$u_2^*(L, \tau)$ 再次经过一段长度为 $L$ 的光纤传输,得到最后输出归一化振幅为:

$$u_2(2L, \tau) = u_2^*(0, \tau) \exp\left(-2L\varepsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau}\right) \quad (17)$$

可见,TPC可以补偿GVD和SPM导致的信号失真,但由于 $L_W$ 与群速度失配量有关,故TPC不能补偿XPM所导致的信号失真。

### 3 数值计算与分析

假设信号脉冲1比信号脉冲2传输快(即 $\varepsilon = 1$ ), $\lambda_1 = 1570 \text{ nm}$ , $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$ ,对于色散位移光纤, $\beta_{21} \approx \beta_{22} = -2 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,两脉冲等宽( $T_0 = 1 \text{ ps}$ )且等振幅,光纤非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,可以算出 $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_{21}|} = 500 \text{ m}$ , $\frac{L_D}{L_W} = \frac{T_0 d}{|\beta_2|} = 15.28$ , $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} =$

1.013。设初始输入脉冲为:

$$u_1(0, \tau) = \exp\left(-\frac{1}{2}\tau^2\right) \quad (18)$$

$$u_2(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \exp\left(-\frac{1+iC}{2}\tau^{2m}\right) = \exp\left(-\frac{1+iC}{2}\tau^{2m}\right) \quad (19)$$

式中, $P_1 = P_2$ 。其中 $P_1$ 是信号脉冲1的功率; $P_2, C, m$ 分别是信号脉冲2的功率、啁啾值和高斯指数值。下面分几种不同情况分析讨论SPC的补偿效果。

#### 3.1 信号脉冲2为高斯脉冲

图1是信号脉冲2在无补偿、TPC补偿和SPC补偿下经过长为 $0.5\pi L_D$ 的光纤后输出与输入波形和频谱的比较图,其中 $C = 0, m = 1$ 。从图1(a)可以看出,GVD使得无补偿的输出脉冲波形展宽,SPM使得输出的频谱发生了变化,XPM使得波形产生了相移;图1(b)中由于TPC能补偿GVD和SPM效应,故经TPC补偿的输出波只是由于XPM作用使得波形产生了相移,波形并未改变,输出频谱也只有小小的位移;图1(c)中经SPC补偿的输出脉冲波形与频谱和输入脉冲的相同,即SPC同时补偿了GVD、SPM和XPM导致的波形失真。这与前述理论分析结果一致,即TPC无法补偿XPM产生的波形失真,SPC可以同时补偿GVD、SPM和XPM导致的脉冲畸变。因此,当多脉冲在信道中同时传输时,SPC的补偿效果肯定优于TPC的补偿效果。

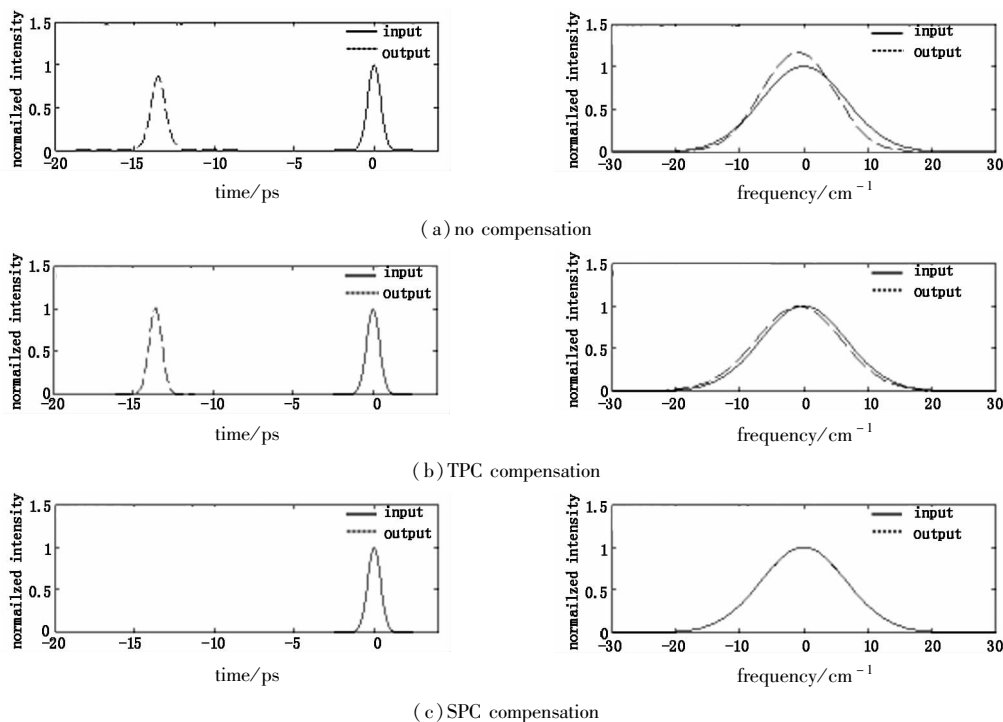


图1 信号脉冲2在无补偿、TPC补偿和SPC补偿下输出波形与频谱的比较

Fig. 1 the comparison of the output waveform and spectrum of signal light under no compensation, TPC compensation and SPC compensation

3.2 信号脉冲 2 为啁啾高斯脉冲

图 2 是不同啁啾值的信号脉冲 2 在 SPC 补偿下展宽因子随距离的变化图,此处  $T_0 = 1 \text{ ps}$ ,  $m = 1$ ,  $C$  分别为  $-2, 0, 2$ 。从图 2 可以看出,经过长为  $5 L_D$  的传输距离后,信号脉冲 2 在不同的初始啁啾值下具有不同的传输和展宽过程。这里  $\beta_2 = -2 \text{ ps}^2/\text{km} < 0$ , 当  $C < 0$  时,啁啾会加快信号脉冲 2 的展宽;当  $C > 0$  时,信号脉冲 2 展宽变慢,脉冲初期还经历了窄化过程。但不管它们中途脉宽如何变化,最终经 SPC 补偿后的输出脉宽与输入脉宽相等,即信号脉冲 2 的初始啁啾不会影响 SPC 对 XPM 所致信号失真的补偿和复原。

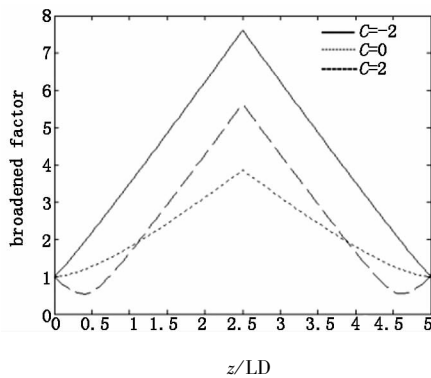


图 2 不同啁啾值的信号脉冲 2 在 SPC 补偿下展宽因子随距离的变化

Fig. 2 the broadened factor of signal light changes with the distance under different chirp in SPC system

3.3 信号脉冲 2 为超高斯脉冲

图 3 是不同高斯指数值 ( $m$ ) 的信号脉冲 2 在 SPC 补偿下展宽因子随距离的变化图,此处  $T_0 = 1 \text{ ps}$ ,  $C = 0$ ,  $m$  分别取  $2, 3, 4$ 。从图 3 可以看出,在前半段即  $2.5 L_D$  的光纤中,信号脉冲 2 的脉宽随着  $m$  值的增大而增大,但增大的幅度比较缓慢;在后半段光纤中,信号脉冲 2 的展宽与前半段光纤中信号的展宽对称。同样的,不管它们中途脉宽如何变化,最终经 SPC 补偿后的输出脉宽与输入脉宽相等,即超高斯脉冲的指数同样不会影响 SPC 对 XPM 所致信号失真的补偿和复原。

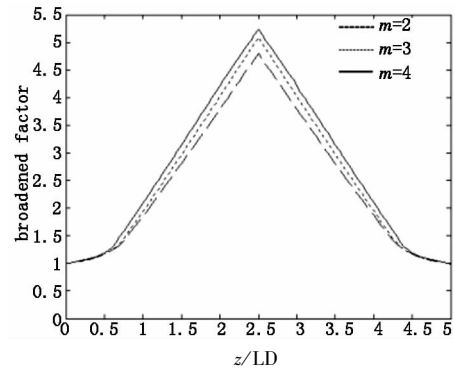


图 3 不同高斯指数值  $m$  的信号脉冲 2 在 SPC 系统中展宽因子随距离的变化

Fig. 3 the broadened factor of super-Gaussian pulse changes with the distance under different parameter in SPC system

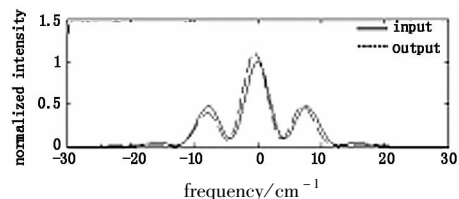
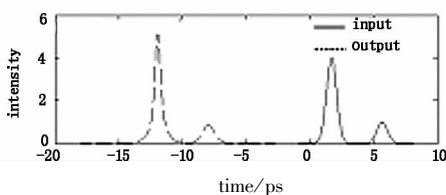
3.4 信号脉冲 2 为高斯脉冲串

为了更清楚的看出经 SPC 补偿后输出脉冲是输入脉冲的复共轭和时间反转,此处信号脉冲 1 不变,信号脉冲串的振幅不同,即:

$$u_1(0, \tau) = \exp\left(-\frac{1}{2}\tau^2\right) \tag{20}$$

$$u_2(0, \tau) = 2\exp\left[-\frac{1}{2}(\tau - 1.7)^2\right] + \exp\left[\frac{1}{2}(\tau - 5.7)^2\right] \tag{21}$$

图 4 是脉冲串在无补偿、TPC 补偿和 SPC 补偿下传输  $0.5 \pi L_D$  长的光纤后,输入与输出波形和频谱的比较图。图 4(a) 中无补偿的信号脉冲串由于 GVD、SPM 和 XPM 同时作用,输出脉冲的波形和频谱都发生了时移,同时脉宽谱宽也都发生了变化;与之相比,图 4(b) 中的输出信号脉冲串,由于 TPC 补偿了 GVD 和 SPM 效应,故输出波形和频谱形状与输入脉冲对比都未发生变化,但 XPM 效应使得波形发生了相移;图 4(c) 则再次表明了 SPC 能够极大地抑制 XPM 对系统传输性能的损害(输出波形和频谱与输入的完全重合),从图 4(c) 还可以看出,经 SPC 补偿后系统输出端的脉冲是输入脉冲的复共轭和完全的时间反转。要想得到初始脉冲,还要对输出脉冲进行复共轭和时间反转。



(a) no compensation

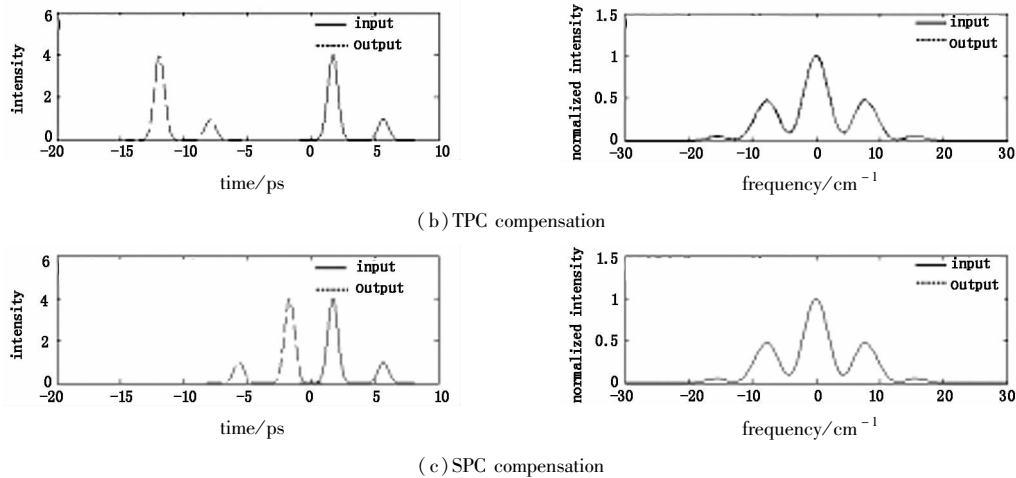


图4 信号脉冲串在无补偿、TPC补偿和SPC补偿下输出波形与频谱的比较  
Fig. 4 the comparison of the output waveform and spectrum of pulse train under no compensation, TPC compensation and SPC compensation

#### 4 结论

本文理论分析了在互相位调制(XPM)影响下多信道脉冲在时域和频域中的相位共轭变换,重点对于SPC如何补偿XPM引起的信号失真进行了分析和讨论,数值计算了在同时考虑GVD、SPM和XPM效应时,高斯脉冲、啁啾高斯脉冲、超高斯脉冲以及高斯脉冲串的不同情况下采用SPC技术的补偿结果。研究表明:经过SPC补偿后,XPM所导致的信号失真可以得到准确的复原,并且GVD和SPM所导致的信号失真在此过程中也能够得到同步补偿和复原;脉冲的初始啁啾和超高斯脉冲的高斯指数值不会影响信号传输的最终结果,它们只会影响信号脉冲的传输过程;从高斯脉冲串的补偿结果可以看出输出脉冲是输入脉冲的复共轭和完全的时间反转,输出脉冲和输入脉冲成镜像关系,因此,必须将输出脉冲重新进行复共轭和时间反转,以恢复成初始脉冲。

#### 参考文献:

[1] Du Jianxin. Degenerate four-wave-mixing noise in dispersion managed wavelength-division-multiplexed system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, (9): 2361-2367. (in Chinese)  
杜建新. 色散管理波分复用系统中的简并四波混频噪声[J]. 光学学报, 2009, (9): 2361-2367.

[2] Karfaa Y M, Ismail M, Abbou F M. Channel spacing effects on XPM crosstalk in WDM networks for various fiber types [C]//Telecommunication Technologies, 2008, 2<sup>nd</sup> Malaysia Conference on Photonics, 2008: 1-5.  
[3] Xiong Jie, Luo Bin, Pan Wei, et al. Crosstalk of signal in pump probe structure with self-phase modulation and cross-phase modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2004, (10): 1370-1374. (in Chinese)  
熊杰, 罗斌, 潘炜, 等. 自相位调制和交叉相位调制共同作用下抽运探测波结构中的信号扰动研究[J]. 光学学报, 2004, (10): 1370-1374.  
[4] M Tsang, D Psaltis. Dispersion and nonlinearity compensation by spectral phase conjugation, [J]. Opt. Lett., 2003, 28 (17): 1558-1560.  
[5] Tsang M, Psaltis D. Spectral phase conjugation with cross-phase modulation compensation, [J]. Opt. Express, 2004, 12 (10): 2207-2219.  
[6] G P Agrawal. Nonlinear fiber optics [M]. 4<sup>th</sup> ed. Singapore: Elsevier, 2009, Chapt. 7.  
[7] G P Agrawal, P L Baldeck, R R Alfano. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers [J]. Phys. Rev. A, 1989, 39 (7): 3406-3413.  
[8] G P Agrawal, P L Baldeck, R R Alfano. Temporal and spectral effects of cross-phase modulation on copropagating ultrashort pulses in optical fibers [J]. Phys. Rev. A, 1989, 40 (9): 5063-5072.