

两种相位共轭技术对光纤中超短光脉冲传输失真的补偿比较

陈红霞¹, 曹文华², 徐平²

(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:通过理论分析和数值计算,比较了时域相位共轭技术和频域相位共轭技术对光纤中由于色散和非线性引起的超短光脉冲传输失真的补偿效果。结果表明,在仅考虑群速度色散和自相位调制效应时,时域相位共轭技术与频域相位共轭技术的补偿效果一致;当需要考虑三阶色散时,频域相位共轭技术的补偿效果优于时域相位共轭技术;当需要考虑脉冲内拉曼散射时,时域相位共轭技术的补偿效果优于频域相位共轭技术;当上述四种效应同时考虑时,频域相位共轭技术的补偿效果略优于时域相位共轭技术。同时还对上述两种补偿技术的应用进行了讨论。

关键词:光纤通信;色散补偿;数值计算;非线性效应;时域相位共轭;频域相位共轭

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Comparison of two phase conjugation techniques for distortion compensation of ultrashort optical pulse transmission in optical fibers

CHEN Hong-xia¹, CAO Wen-hua², XU Ping²

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

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

Abstract: By theoretical analysis and numerical calculation, we have made a comparison between two phase conjugation techniques, i. e., temporal phase conjugation and spectral phase conjugation when use them for distortion compensation of ultra-short optical pulse transmission in optical fibers. Results show that: when only consider the group velocity dispersion and self-phase modulation, the distortion compensation of temporal phase conjugation and spectral phase conjugation are the same; When the third order dispersion is needed to be considered, the distortion compensation of spectral phase conjugation is better than temporal phase conjugation; When the inter-pulse Raman scattering is to be considered, the distortion compensation of temporal phase conjugation is better than spectral phase conjugation; When considering the four effects mentioned above, the distortion compensation of spectral phase conjugation is a little better than temporal phase conjugation. Discussion about the application of these two compensation techniques is also presented in this article.

Key words: fibre-optic communication; dispersion compensation; numerical calculation; nonlinear effect; temporal phase conjugation(TPC); spectral phase conjugation(SPC)

1 引言

光脉冲在光纤中传播时,色散和非线性效应会使得光接收机接收到的光脉冲产生畸变,导致信号无法识别。为此,需要在光接收机前对脉冲的失真

进行复原和补偿。1979年 Yariv 等人^[1]首次提出时

作者简介:陈红霞(1985-),女,硕士生,主要研究方向为高速光纤通信系统。E-mail: kindji45@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-07-20

域相位共轭(TPC)用于光纤通信系统的色散补偿,即通过在光纤传输距离的中点对脉冲进行时域相位共轭变换,使前半段光纤传输过程中所引起的脉冲失真与后半段光纤传输过程中的失真相抵消,实现对群速度色散(GVD)的补偿。之后的研究表明 TPC 也可用于对自相位调制(SPM)和脉冲内拉曼散射(IRS)等效应进行补偿^[2-3],早期是在光纤链路中点实现四波混频(FWM)从而产生 TPC 波来补偿色散和非线性效应^[4],现在大多数实验是在周期性极化铌酸锂(PPLN)波导中产生 TPC 波^[5]。然而,TPC 只能补偿偶阶色散却无法补偿奇阶(如三阶)色散,而有些情况下,即当入射脉冲的波长在光纤的零色散波长附近或脉宽为皮秒量级甚至飞秒量级时,三阶色散(TOD)效应变得不可忽略。因此近年来又报道了基于频域相位共轭(SPC)的补偿技术^[6-7],通过在光纤传输距离的中点在频域对脉冲进行共轭变换,可实现对奇、偶阶色散、SPM 和自陡(SS)等效应的补偿。SPC 技术可以通过在两段 GVD 符号相反的光纤中来实现,在前半段光纤的中点产生简并 FWM,而在后半段光纤的中点产生非简并 FWM^[8]。本文讨论了 TPC 和 SPC 对光纤中脉冲传输失真的补偿原理,并对几种常见情况下的补偿效果进行了数值计算和比较。

2 理论推导

2.1 TPC 的补偿原理

脉冲在光纤中传输,其慢变包络满足广义非线性薛定谔方程^[9]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}aA - \frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma\left(|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}|A|^2 A - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T}\right) \quad (1)$$

式中, z 是传输距离; A 为脉冲包络的慢变振幅; a 是衰减系数; β_2 是 GVD 系数; β_3 是 TOD 系数; γ 是非线性系数; ω_0 是脉冲的中心频率; T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度($T = t - z/v_g$), T_R 是与拉曼增益曲线有关的非线性响应系数。等式右边依次代表了光纤损耗、GVD、TOD、SPM、SS 和 IRS 效应。把方程(1)改成如下形式:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2)$$

式中, \hat{D} 是差分算符,它表示线性介质的色散和吸收; \hat{N} 是非线性算符,它决定了脉冲传输过程中光纤的非线性效应。与式(1)对应,这些算符为:

$$\hat{D}_T = -\frac{a}{2} - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} \quad (3)$$

$$\hat{N}_T = i\gamma\left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial T}(|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T}\right] \quad (4)$$

对初始输入脉冲为 $A(0, T)$, 经过传输距离 L , 解方程(2)得输出脉冲为:

$$A(L, T) = \exp\left\{L \hat{D}_T + \int_0^L \hat{N}_T(z) dz\right\} \times A(0, T) \quad (5)$$

这样,输入脉冲若由输出脉冲表示,由式(5)得:

$$A(0, T) = \exp\left\{-L \hat{D}_T - \int_0^L \hat{N}_T(z) dz\right\} \times A(L, T) \quad (6)$$

对式(6)两边取复共轭:

$$A^*(0, T) = \exp\left\{-L \hat{D}_T^* - \int_0^L \hat{N}_T^*(z) dz\right\} \times A^*(L, T) \quad (7)$$

忽略光纤损耗、TOD 和 SS,由式(3)、式(4)得:

$$\hat{D}_T^* = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} = -\hat{D}_T \quad (8)$$

$$\hat{N}_T^* = -i\gamma\left(|A|^2 - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T}\right) = -\hat{N}_T \quad (9)$$

将式(8)、式(9)代入式(7)得:

$$A^*(0, T) = \exp\left\{L \hat{D}_T + \int_0^L \hat{N}_T(z) dz\right\} \times A^*(L, T) \quad (10)$$

比较式(10)和式(5)可看出,如果在光纤传输距离 L 的末端采用 TPC 技术,将 $A(L, T)$ 变换为 $A^*(L, T)$,那么,当变换后的 $A^*(L, T)$ 再次经过一段长度为 L 的光纤,便得到 $A^*(0, T)$,即最后输出的脉冲相当于初始输入脉冲的相位共轭,同时实现了对 GVD、SPM 以及 IRS 等效应的补偿。应说明的是,TPC 不能补偿光纤损耗、奇阶色散和 SS 效应导致的信号失真。

2.2 SPC 的补偿原理

与 TPC 相反,SPC 是在频域进行相位共轭,这相当于对式(6)两边取复共轭,同时用 $-T$ 代替 T :

$$A^*(0, -T) = \exp\left\{-L \hat{D}_{-T}^* - \int_0^L \hat{N}_{-T}^*(z) dz\right\} \times$$

$$A^*(L, -T) \quad (11)$$

忽略光纤损耗和 IRS 得:

$$\hat{D}_{-T}^* = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} = -\hat{D}_T \quad (12)$$

$$\hat{N}_{-T}^* = -i\gamma \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) \right] = -\hat{N}_T \quad (13)$$

将式(12)、式(13)代入式(11),同时用 $2L - z'$ 代替 z 得:

$$A^*(0, -T) = \exp \left\{ L \hat{D}_T + \int_0^L \hat{N}_T(2L - z') dz' \right\} \times A^*(L, -T) \quad (14)$$

可见,如果在光纤传输距离 L 的末端采用 SPC 技术,将 $A(L, T)$ 变换为 $A^*(L, -T)$,那么,当变换后的 $A^*(L, -T)$ 再次经过一段长为 L 的光纤,便得到 $A^*(0, -T)$,最后的输出脉冲相当于初始输入脉冲的相位共轭和时间反转,同时实现了对 GVD, TOD, SPM 以及 SS 等效应的补偿。应说明的是,SPC 不能补偿光纤损耗和 IRS 导致的信号失真。

3 数值计算与分析

通常情况下,SS 效应相对于 GVD, TOD, SPM 以及 IRS 等效应可忽略不计,光纤损耗也可以通过集总放大或分布放大方式进行补偿,因而,忽略 SS 效应和光纤损耗,对式(1)引入量纲一变量:

$$\xi = z/L_D, \tau = T/T_0, u = \sqrt{\gamma L_D} A \quad (15)$$

式中,色散长度 $L_D = T_0^2/|\beta_2|$, $T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.763$ (对双曲正割形脉冲)为脉冲初始半宽度, T_{FWHM} 为脉冲的半级大全宽度,得到归一化后脉冲传输的非线性薛定谔方程为^[10]:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} - \text{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = i\delta \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} + \tau_R u \frac{\partial |u|^2}{\partial \tau} \quad (16)$$

式中, $\text{sgn}(\beta_2) = \pm 1$, 根据 GVD 参量 β_2 的符号确定。

$$\delta = \beta_3/(6|\beta_2|T_0), \tau_R = T_R/T_0 \quad (17)$$

设初始输入脉冲为:

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau) \quad (18)$$

下面分几种不同情况对 TPC 和 SPC 的补偿效果进行比较。

3.1 仅考虑 GVD 和 SPM 效应

当传输脉冲宽度大于 5 ps 时,高阶色散(TOD)和高阶非线性(IRS)相对于 GVD 和 SPM 效应可忽略不计,此时主要是对 GVD 和 SPM 效应进行补偿。在光纤反常色散区($\beta_2 < 0$),可以采用光孤子传输技术^[11]使得 GVD 和 SPM 效应两者相互补偿,从而实现信号的无失真传输;但对于正常色散区($\beta_2 > 0$)的脉冲传输,GVD 和 SPM 两者不能相互补偿,前者导致脉冲时域波形的展宽,后者导致脉冲频谱展宽。此时可以采用 TPC 或 SPC 补偿技术。由上节分析可知,TPC 和 SPC 都能对 GVD 和 SPM 进行完全补偿,既适合于光纤正常色散区,也适合于反常色散区,因此,在这种情况下,TPC 和 SPC 二者的补偿效果完全相同。

3.2 同时考虑 GVD、SPM 以及 TOD 效应

当传输脉冲宽度大于 5 ps 时,虽然高阶非线性(如 IRS)可忽略不计,但如果脉冲波长靠近光纤零色散波长,则 TOD 效应会导致脉冲畸变^[12],即在脉冲前沿($\beta_3 < 0$)或后沿($\beta_3 > 0$)附近形成非对称的振荡结构。此时需要同时对 GVD, SPM 以及 TOD 效应进行补偿。

设输入脉冲宽度为 5 ps ($T_0 = 2.836$ ps),脉冲中心波长为 1.55 μm ,若采用色散位移光纤,使得光纤的零色散波长位于工作波长 1.55 μm 附近,且 $\beta_2 = -0.1$ ps²/km, $\beta_3 = 0.1$ ps³/km,算出 $L_D \approx 80.433$ km,三阶色散长度 $L'_D = T_0^3/\beta_3 \approx 228.115$ km,由式(17)算得 $\delta = 0.059$ 。由于 $\beta_3 > 0$,所以双曲正割脉冲传输 10 L_D 后,无补偿与经 TPC 补偿的输出脉冲波形在其后沿应该出现振荡,但此次 β_2 不为零,且 $L_D < L'_D$,因此振荡并不明显,只是输出波形有所延迟(此处孤子效应使得输出波形基本没有展宽),如图 1(a)和图 1(b)所示,其中输出频谱也产生了变化。这表明 TPC 无法补偿 TOD 导致的脉冲失真。图 1(c)示出 SPC 的补偿效果,可见输出与输入脉冲的波形和频谱都很好重合在一起。这与前述分析结果一致,即 TPC 不能补偿 TOD 效应,而 SPC 既能补偿 GVD 和 SPM,也能完全补偿 TOD。因此,这种情况下,SPC 补偿效果肯定优于 TPC 的补偿效果。

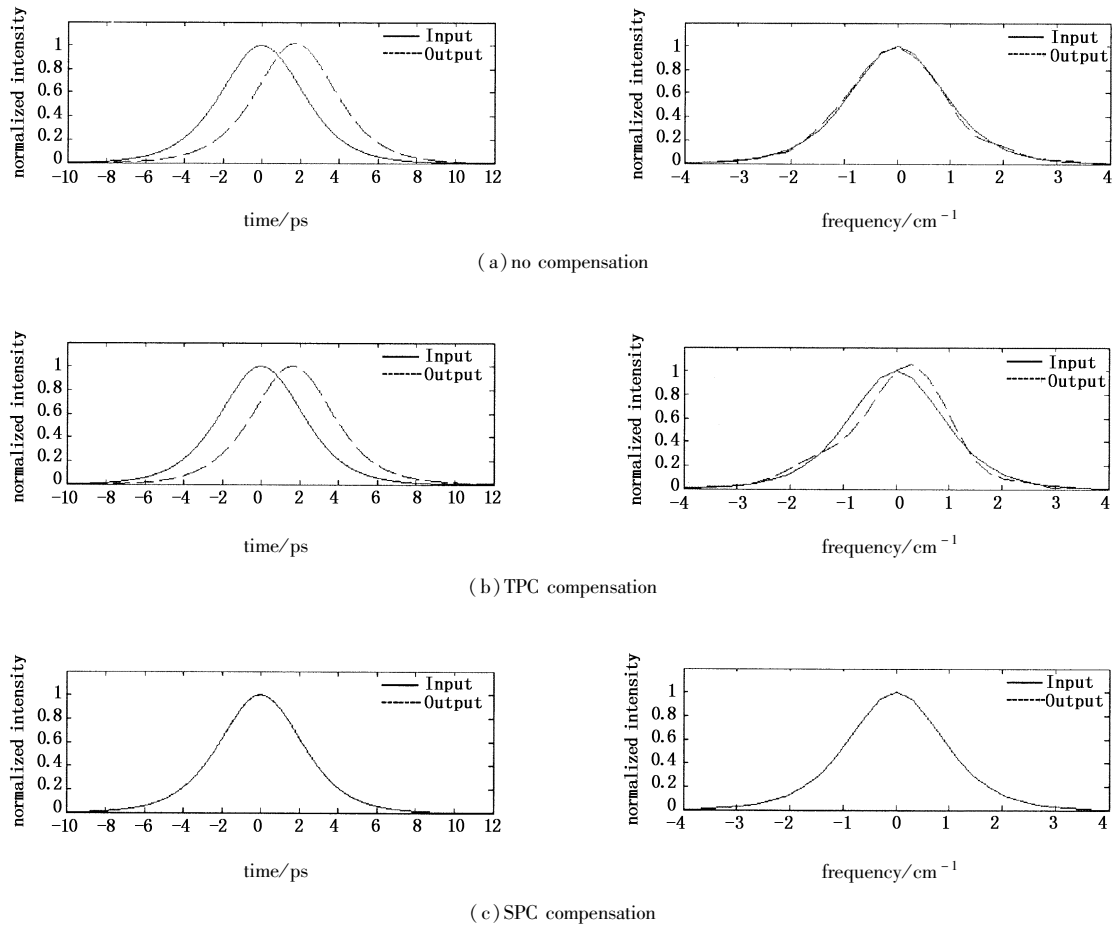


图1 同时考虑 GVD,SPM 和 TOD,传输 10 L_D 后输入与输出脉冲的波形和频谱的比较

Fig.1 with GVD,SPM and TOD,the comparison between waveform and spectrum of the input and output pulse after transmission of 10 L_D

3.3 同时考虑 GVD,SPM 以及 IRS 效应

对于脉冲宽度小于 5ps 的超短光脉冲传输,高阶色散和高阶非线性效应均不可忽略,一般情况下,应该对 GVD,SPM,TOD 以及 IRS 效应同时进行补偿。但如果采用色散平坦光纤(β_3 很小)传输^[13],则相对于 IRS 来说,TOD 的作用是次要的。

设输入脉冲宽度为 1 ps ($T_0 = 0.567$ ps),采用色散平坦光纤,此时取参数值 $\beta_2 = -0.1$ ps²/km, $T_R = 3$ fs,算出 $L_D \approx 3.217$ km,由式(17)算得 $\tau_R = 0.0053$ 。如图 2(a)所示,由于 GVD 和 SPM 形成光孤子,双曲正割脉冲传输 30L_D 后,无补偿输出脉冲的波形和频谱没有展宽,但由于在光纤反常 GVD 区红移分量传输较慢,故时域中输出脉冲滞后于入射脉冲;在频

域中,IRS 的影响表现为孤子高频分量成为低频分量的泵浦源,从而导致孤子中心频率向低频方向移动,故频谱移向红光一侧,即 IRS 效应使它们都产生了平移。图 2(b)中 TPC 对 IRS 进行了补偿,输出脉冲的波形和频谱与输入脉冲很好地吻合在一起。图 2(c)SPC 在 15 L_D 处对脉冲的频域进行相位共轭(对 GVD 和 SPM 的符号取反),这相当于在后半段光纤中脉冲是在正常色散区传输(光纤正常 GVD 区红移分量传输较快),故经 SPC 补偿后输出波形超前于输入脉冲;由于 SPC 无法补偿 IRS,输出频谱与图 2(a)一样都是移向红端。这也与前述理论分析一致,即 SPC 不能补偿 IRS 效应,TPC 既能补偿 GVD 和 SPM,也能完全补偿 IRS。因此,这种情况下,TPC 补偿效果肯定优于 SPC。

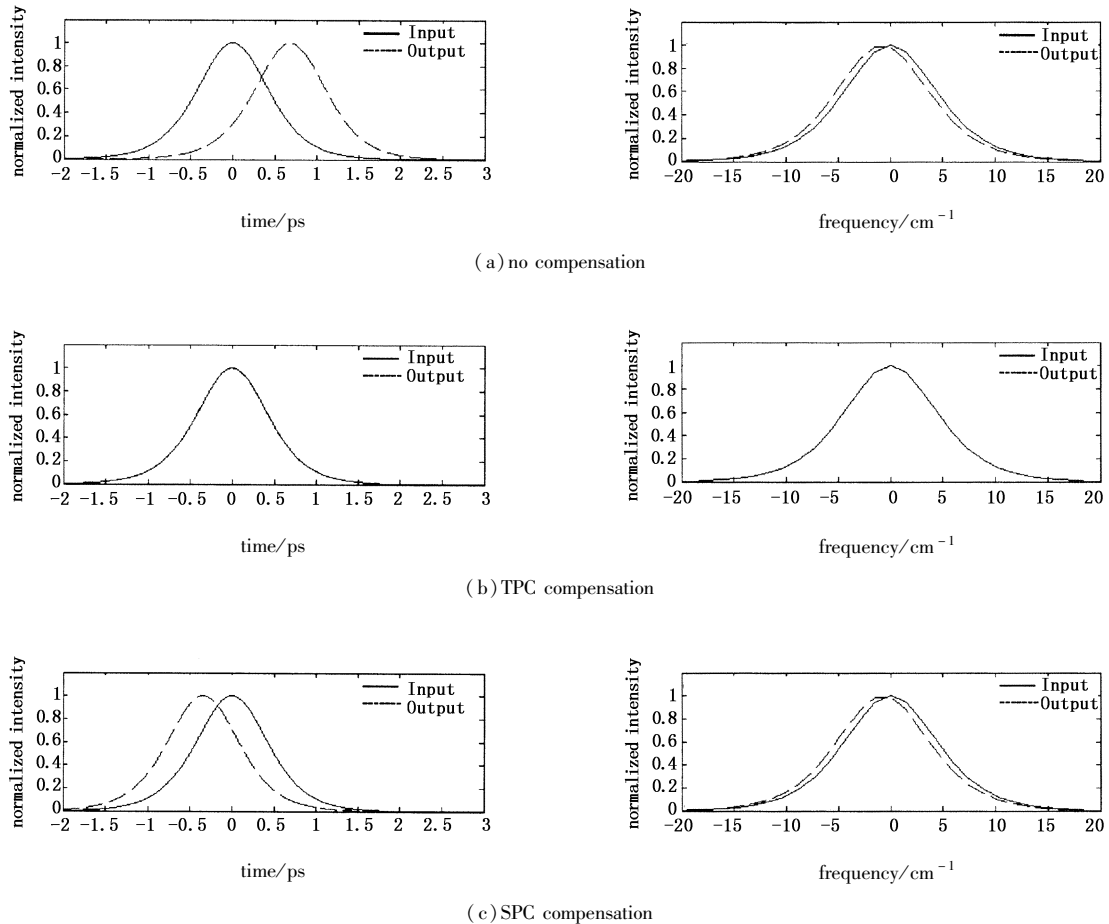


图2 同时考虑 GVD,SPM 和 IRS,传输 $30 L_D$ 后输入与输出脉冲的波形和频谱的比较

Fig.2 with GVD,SPM and IRS,the comparison between waveform and spectrum of the input and output pulse after transmission of $30 L_D$

3.4 同时考虑 GVD,SPM,TOD 以及 IRS 效应

对于脉冲宽度小于 5 ps 的超短光脉冲传输,如果不采用色散平坦光纤,而是一般的常规光纤^[14]或色散位移光纤^[15],那么 TOD 和 IRS 效应都不能忽略,前述理论分析表明,TPC 不能补偿 TOD 但能补偿 IRS,而 SPC 不能补偿 IRS 但能补偿 TOD,而且两种技术都能补偿 GVD 和 SPM。因此,当 GVD,SPM, TOD 以及 IRS 同时起作用时,就有必要对两种技术的补偿效果加以比较。

设脉冲宽度为 1 ps ($T_0 = 0.567$ ps),对于色散位移光纤,中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 处取 $\beta_2 = -0.1 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $T_R = 3 \text{ fs}$,算出 $L_D \approx 3.217 \text{ km}$,三阶色散长度 $L'_D = T_0^3/\beta_3 \approx 1.825 \text{ km}$,由

式(17)算得 $\delta = 0.294$, $\tau_R = 0.0053$ 。由于 $L_D > L'_D$, TOD 效应明显,脉冲传输 $3 L_D$ 后无补偿与经 TPC 补偿的输出脉冲的波形出现了振荡结构,如图 3(a)和图 3(b),其中输出频谱也发生了变化。图 3(c)中脉冲传输 $3 L_D$ 后经 SPC 补偿的输出波形和频谱图与输入脉冲基本重合。由于此处 τ_R 比 δ 大很多,传输距离太短 IRS 效应无法显示出来。为了检验 IRS 的作用,图 4 中脉冲在相同条件下传输了 $20 L_D$ 。图 4(a)中无补偿与图 4(b)中经 TPC 补偿的输出脉冲的波形和频谱已变得无法识别了,而经 SPC 补偿的输出脉冲的波形和频谱只有细微的移动。由图 3 和图 4 比较可知,一般情况下,当同时考虑 GVD,SPM, TOD 以及 IRS 效应时,SPC 技术优于 TPC 技术。

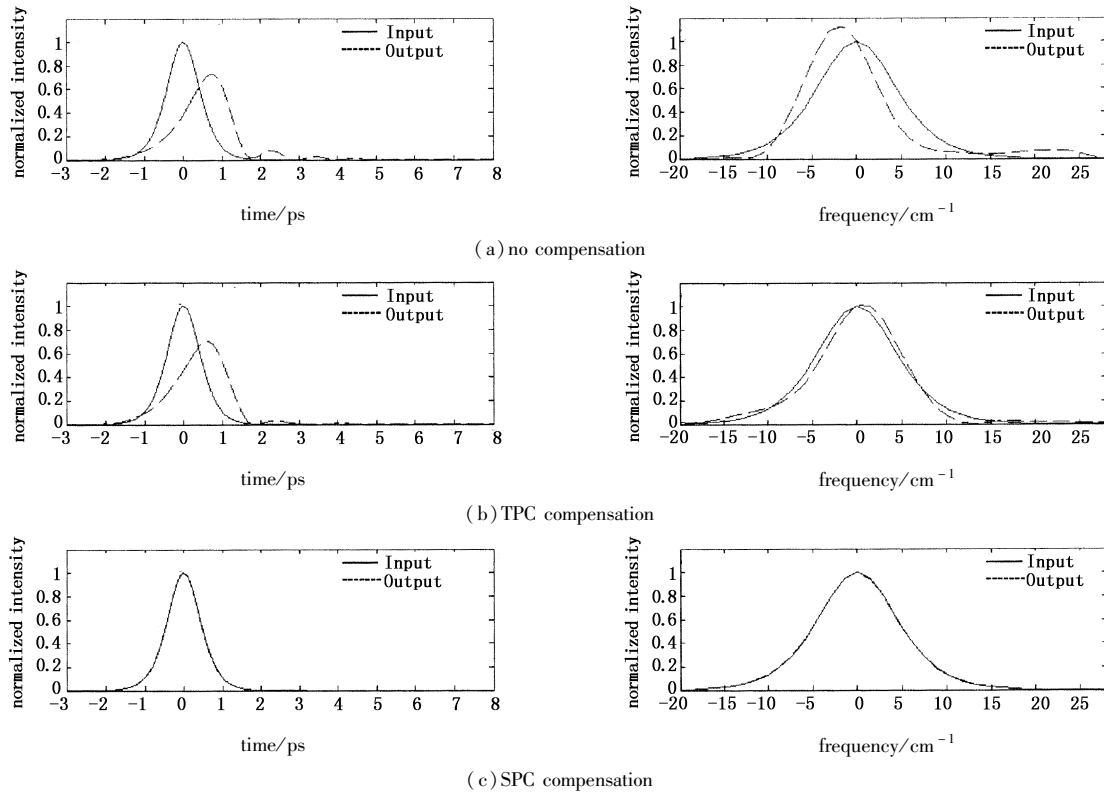


图3 同时考虑 GVD,SPM,TOD 和 IRS,传输 $3 L_D$ 后输入与输出脉冲的波形和频谱的比较

Fig.3 with GVD,SPM,IRS and IRS,the comparison between waveform and spectrum of the input and output pulse after transmission of $3 L_D$

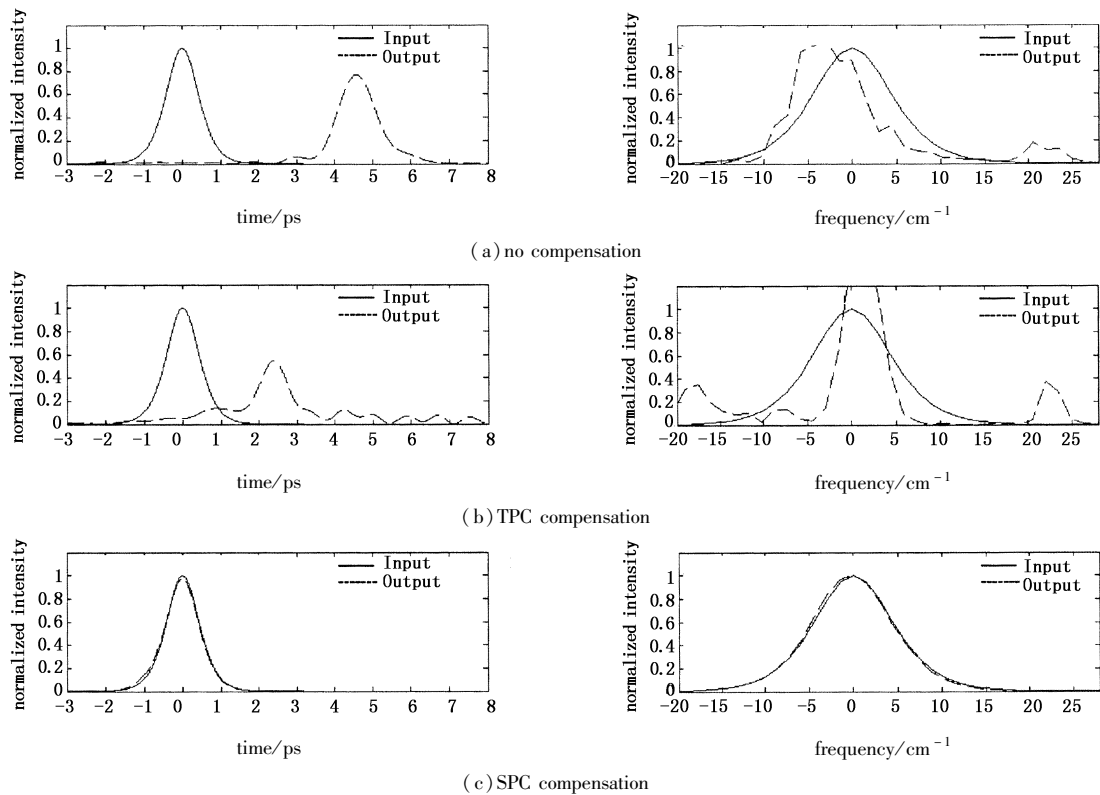


图4 同时考虑 GVD,SPM,TOD 和 IRS,传输 $20 L_D$ 后输入与输出脉冲的波形和频谱的比较

Fig.4 with GVD,SPM,IRS and IRS,the comparison between waveform and spectrum of the input and output pulse after transmission of $20 L_D$

4 结 论

理论分析了时域和频域相位共轭技术如何补偿光纤色散和非线性效应,数值计算了在四种不同情况下两种相位共轭技术对双曲正割脉冲的补偿效果。理论推导和四组数值计算均表明:TPC可以同时补偿GVD,SPM和IRS导致的脉冲失真,但不能补偿TOD;SPC能同时补偿GVD,TOD和SPM,但不能补偿IRS导致的脉冲失真。数值计算比较可知,一般情况下SPC技术补偿效果更好。

两种补偿技术均是对相位进行共轭变换,相位共轭变换是一个线性变换过程,与信号的调制方式无关,因此在各个方面都得到了广泛的应用。特别是在现代光通信系统中,由于其能够自然矫正脉冲包络波形,使得其不仅对于单信道系统,而且对于波分复用系统,都能够同时且有效地进行光纤色散和非线性的补偿。

参考文献:

- [1] Yariv A, Fekete D, Pepper D M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation [J]. *Opt. Lett.*, 1979, 4(2): 52 - 54.
- [2] Kazuro Kikuchi, Chaloomphon Lorattanasane. Compensation for pulse waveform distortion in ultra-long distance optical communication systems by using midway optical phase conjugator [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, 6(1): 104 - 105.
- [3] Shigeki Watanabe, Masataka Shirasaki. 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.
- [4] Jopson R M, Gnauck A H, Derosier R M. Compensation of fibre chromatic dispersion by spectral inversion [J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(7): 576 - 578.
- [5] Minzioni P, Schiffrini A. Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(21): 8460 - 8468.
- [6] M Tsang, D Psaltis. Dispersion and nonlinearity compensation by spectral phase conjugation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(17): 1558 - 1560.
- [7] Kumar S. Compensation of third-order dispersion using time reversal in optical transmission systems [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(4): 346 - 348.
- [8] Kuzucu O, Okawachi Y, Salem R, et al. Spectral phase conjugation via temporal imaging [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20605 - 20614.
- [9] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Third Edition. Jia Dongfang, et al. tranl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 32 - 33. (in Chinese)
Agrawal G P 著. 非线性光纤光学原理 [M]. 3 版. 贾东方, 余震虹, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 32 - 33.
- [10] Kodama Y, Hasegawa A. Nonlinear pulse propagation in monomode dielectric guide [J]. *Quantum Electron.*, 1987, 23(5): 510 - 524.
- [11] Yang Bo-jun, Zhang Tao, Yu Li. Theoretical and experimental study on optical soliton transmission in dispersion compensation system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, 21(6): 389 - 391. (in Chinese)
杨伯君, 张涛, 于丽. 色散补偿光孤子传输的理论及实验研究 [J]. *半导体光电*, 2000, 21(6): 389 - 391.
- [12] Wang Jing, Miao Hong-li, Li Shang-de, et al. The chirp induced by third-order dispersion in a single-mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, 25(8): 739 - 742. (in Chinese)
王晶, 苗洪利, 李尚德, 等. 单模光纤中三阶色散所致啁啾 [J]. *中国激光*, 1998, 25(8): 739 - 742.
- [13] Jia Dong-fang, Tan Bin, Wang Zhao-ying, et al. Theoretical and experimental studies on second-order soliton compression based on dispersion flattened fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(6): 756 - 759. (in Chinese)
贾东方, 谈斌, 王肇颖, 等. 基于色散平坦光纤的二阶孤子压缩 [J]. *中国激光*, 2006, 33(6): 756 - 759.
- [14] Wang Zhong-qing, Wan Peng, Lai Chang. Investigation on the communications feasibility of picosecond soliton transmitted in dispersion management fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (SUP): 127 - 131. (in Chinese)
汪仲清, 万鹏, 赖昌. 孤子色散管理传输及其在常规光纤通信中的可行性研究 [J]. *光子学报*, 2007, 36 (增刊): 127 - 131.
- [15] Wang Zhao-ying, Wang Yong-qiang, Li Zhi-yong, et al. Supercontinuum generation from dispersion shifted fiber with picosecond pulse [J]. *Optoelectronics Laser*, 2004, 15(5): 528 - 533. (in Chinese)
王肇颖, 王永强, 李智勇, 等. 皮秒脉冲在色散位移光纤中产生的超连续谱 [J]. *光电子·激光*, 2004, 15(5): 528 - 533.