

基于频域相位共轭技术的交叉相位调制所致失真的复原*

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)

(2004 年 9 月 24 日收到, 2005 年 3 月 11 日收到修改稿)

理论分析和讨论了基于频域相位共轭技术的交叉相位调制所致信号失真的复原和补偿机理, 数值模拟了在交叉相位调制作用下, 高斯脉冲在中距相位共轭光纤系统中的传输演化过程. 结果表明, 频域相位共轭技术能够抑制交叉相位调制对光纤系统中传输信号的损害, 复原其所导致的信号失真, 并能够同步补偿群速度色散和自相位调制非线性效应所导致的信号失真. 合适的初始脉冲时延和初始脉冲啁啾有利于频域相位共轭技术对交叉相位调制所致信号失真的抑制.

关键词: 频域相位共轭, 交叉相位调制, 色散, 自相位调制

PACC: 4265F, 4281, 4225B, 4230Q

1. 引 言

当两束或者多束光波信号同时在光纤介质中传输时, 光信号之间会通过各种非线性效应产生相互耦合, 其中主要的一种非线性效应为交叉相位调制 (cross-phase modulation, XPM)^[1]. XPM 主要是由于与光强有关的折射率的相互影响而造成的. 在信号传输过程中, XPM 影响每束信号光场的波形和频谱. 由于光纤色散的存在, 这种改变使得光信号脉冲波形失真, 并且失真随着系统传输距离的增加而线性增加, 这就严重限制了多光束信号在光纤中的稳定传输.

时域相位共轭技术 (time domain phase conjugation, TDPC) 由于能够同时且高效地补偿二阶色散 (group velocity dispersion, GVD) 及自相位调制 (self phase modulation, SPM), 使得其在进行色散补偿和非线性效应失真复原时, 具有很大的优越性^[2-7]. 但是由于 TDPC 只是脉冲信号时域包络的相位共轭, 它不能补偿 XPM 所致信号失真.

频域相位共轭 (frequency domain phase conjugation, FDPC) 是基于脉冲信号频谱包络的相位

共轭, 相当于脉冲信号时域包络的相位共轭和时间反转^[8-12]. 考虑一个具有慢变振幅包络 $A_{in}(z, t)$ 的光脉冲, 对于 TDPC 系统, 其输出为 $A_{out}(z, t) = A_{in}^*(z, t)$. 对于 FDPC 系统, 其输出则为 $A_{out}(z, t) = A_{in}^*(z, -t)$. FDPC 同时实现了初始信号的相位共轭和时间反转. 基于 FDPC 的这种特性, 本文提出利用 FDPC 来补偿和复原 XPM 所引入的信号失真和畸变的补偿模式. 本文理论分析高斯脉冲信号在时域与频域中的相位共轭变换, 研究脉冲信号在中距相位共轭光纤系统中的传输特性, 数值模拟在 XPM, SPM 和 GVD 作用下, 中距相位共轭光纤系统中高斯信号脉冲在不同初始条件下的传输演化过程, 并对此进行了分析和讨论.

2. 理论分析

为了突出 XPM 效应, 系统采用信号—抽运结构模型^[1]. 为了简化分析, 只考虑不同波长的信号光和抽运光, 并假设在同向传输过程中, 两者之间没有能量交换过程, 同时忽略偏振效应对光信号传输的影响.

信号光和抽运光脉冲在光纤中的传输场分布满

* 国家 863 计划 (批准号 2002AA404050) 和上海市纳米专项 (批准号 0214nm091, 0359nm004) 资助的课题.

[†] E-mail: buyang@siom.ac.cn

足广义非线性薛定谔方程^[1](忽略衰减):

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = i\gamma [|A_p|^2 + 2 |A_s|^2] A_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = i\gamma [|A_s|^2 + 2 |A_p|^2] A_s. \quad (2)$$

其中,下标 s 和 p 分别表示信号光和抽运光. A 表示脉冲的慢变振幅包络, v_g 是脉冲的群速度, β_2 为二阶色散系数, γ 为光纤非线性系数.

方程(1)和(2)归一化后,可表示为

$$\frac{\partial U_p}{\partial x} = -i \frac{\text{sgn}(\beta_{2p})}{2} \frac{\partial^2 U_p}{\partial \tau^2} + iN^2 |U_p|^2 U_p + 2iN^2 |U_s|^2 U_p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = -\epsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial U_s}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{|\beta_{2p}|} \frac{\partial^2 U_s}{\partial \tau^2} + iN^2 \frac{\omega_s}{\omega_p} |U_s|^2 U_s + 2iN^2 \frac{\omega_s}{\omega_p} |U_p|^2 U_s \quad (4)$$

其中, U , x , τ 分别表示归一化的振幅、传输距离和

时间标量, ω 是光学角频率. $N^2 = \frac{\gamma_p P_p T_{0p}^2}{|\beta_{2p}|} = \frac{L_{Dp}}{L_{Nlp}}$,

L_{Dp} 和 L_{Nlp} 分别表示抽运光脉冲的色散长度和非线

性长度. $\epsilon = \text{sgn}(v_{gp} - v_{gs})$, v_g 为群速度. $L_w = \frac{T_{0p}}{|d|} =$

$\frac{T_{0p} v_{gp} v_{gs}}{|v_{gp} - v_{gs}|}$ 是系统的走离长度.

方程(1—4)右侧的最后一项表示 XPM, 该项耦合信号和抽运脉冲, 这种相互耦合影响每一个脉冲的波形和频谱. 本文主要考虑 XPM 对信号光脉冲的作用, 方程(4)可以重新写为(对于抽运脉冲, 也可作相似处理)

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = \{ \hat{D}_s + \hat{N}_s \} U_s(x, \tau), \quad (5)$$

其中 \hat{D}_s 和 \hat{N}_s 分别表示线性算符和非线性算符.

$$\hat{D}_s = -\epsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{|\beta_{2p}|} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2}, \quad (6)$$

$$\hat{N}_s = iN^2 \frac{\omega_s}{\omega_p} (|U_s|^2 + 2 |U_p|^2). \quad (7)$$

由于脉冲振幅均为慢变振幅包络, 则根据文献[1], 当信号脉冲经过传输距离 L , 其输出, 即方程(5)的解可写为

$$U_s(L, \tau) = \exp\{L\hat{D}_s + \int_0^L \hat{N}_s dx\} U_s(0, \tau). \quad (8)$$

当信号光和抽运光经过频域相位共轭器之后,

它们变为各自的频域相位共轭光. 如上所述, 一个脉冲的频域相位共轭等于脉冲时域包络的相位共轭和时间反转^[8-12], 则信号光变为:

$$U_s^*(L, -\tau) = \exp\{L\hat{D}_s^*(-\tau) + \int_0^L \hat{N}_s^*(-\tau) dx\} U_s^*(0, -\tau). \quad (9)$$

式中,

$$\hat{D}_s^*(-\tau) = \epsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{|\beta_{2p}|} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2}, \quad (10)$$

$$\hat{N}_s^*(-\tau) = -iN^2 \frac{\omega_s}{\omega_p} [|U_s|^2 + 2 |U_p|^2] \quad (11)$$

当脉冲信号 $U_s^*(L, -\tau)$ 传输相同距离 L 时, 假设两段光纤的传输特性相同, 其输出为

$$U_s(2L, \tau) = \exp\{L\hat{D}_s + \int_0^L \hat{N}_s dx\} U_s^*(L, -\tau). \quad (12)$$

代入方程(9)–(11), 可得

$$U_s(2L, \tau) = U_s^*(0, -\tau). \quad (13)$$

从(13)式可知, 当入射信号 $U_s(0, \tau)$ 经过系统总长度为 $2L$ 的基于频域相位共轭技术的中距相位共轭光纤系统时, 在输出端可以得到 $U_s^*(0, -\tau)$, 是输入信号完整的复共轭和完全的时间反转, 不仅 GVD 和 SPM, 更主要的是, XPM 所导致的信号失真得到准确的补偿和复原.

同频域相位共轭技术相比, 时域相位共轭技术只是信号脉冲包络的时域共轭^[2-6]. 在此条件下, 方程(10)和(11)中的算符变为

$$\hat{D}_s^*(\tau) = -\epsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{|\beta_{2p}|} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2}, \quad (14)$$

$$\hat{N}_s^*(\tau) = -iN^2 \frac{\omega_s}{\omega_p} [|U_s|^2 + 2 |U_p|^2]. \quad (15)$$

则在中距时域相位共轭光纤系统中, 信号光的最后输出为

$$U_s(2L, \tau) = \exp(-2L\epsilon \frac{L_D}{L_W} \frac{\partial}{\partial \tau}) U_s^*(0, \tau) \quad (16)$$

由于在(16)式中, L_W 和 XPM 的作用相关, 因此在基于时域相位共轭技术的中距相位共轭光纤系统中, XPM 所导致的信号失真得不到补偿和复原, 时域相位共轭技术不能抑制 XPM 对系统造成的损害.

3. 数值模拟和讨论

考虑到 XPM 是两束光波在传输过程中, 一束光

波对另一束光波的耦合作用,因此一束光波的不同特性都会影响对另一束光波的作用.在下文数值分析过程中,本文重点考虑在信号脉冲不同初始条件下,XPM对其脉冲演化过程的作用和影响.

相位共轭系统为采用中置相位共轭方式的光纤系统,相位共轭光产生器(optical phase conjugator, OPC)放于系统中点处.在实际过程中,时域相位共轭光可以在半导体光放大器、光纤中通过四波混频过程,或者在周期性极化铌酸锂通过准相位匹配过程产生^[3-7].频域相位共轭光可以通过短抽运四波混频、频谱全息、频谱四波混频或者时频转换光学参量过程产生^[8-12].

脉宽为均方根脉宽,展宽因子为输出端与输入端均方根脉宽之比^[1].不考虑衰减和偏振对系统的影响.

3.1. 信号脉冲无初始啁啾无初始时延

当两个具有相同脉宽、没有初始啁啾、没有初始时间延迟的高斯脉冲在光纤中同向传输时,其初始信号脉冲和抽运脉冲分别为

$$U_p(0, \tau) = \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right), \quad (17)$$

$$U_s(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_s}{P_p}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right]. \quad (18)$$

其中 P_s 和 P_p 分别为信号脉冲和抽运脉冲的入射峰值功率.

假设抽运脉冲的传输速度比信号脉冲快, $\epsilon = 1$.为了突出 SPM 和 XPM,功率选择为 $P_s/P_p = 0.1$.其他参数为 $L_D/L_w = 10$, $\omega_2/\omega_1 = 1.2$.光纤的传输长度为 $2L = L_D$.

图 1 显示了单个高斯脉冲在中距 FDPC 系统、中距 TDPC 系统和无相位共轭光纤系统中的波形演化.在中距 FDPC 系统中,系统的输出波形几乎和输入波形相同,不仅 GVD 和 SPM 所导致的失真,而且 XPM 所导致的失真都得到了几乎完全的补偿和复原.而在中距 TDPC 系统中,输出脉冲的峰值由于 XPM 的作用,发生了蓝移,并且输出脉冲出现了严重的振荡结构和旁瓣. TDPC 只能够复原 GVD 和 SPM 所导致的失真,而不能补偿和复原 XPM 所导致的失真.而在没有使用相位共轭技术的光纤系统中,脉冲由于 GVD、SPM、XPM 的共同作用,出现了严重的失真,脉冲完全变形.

图 2 显示了多个信号脉冲在中距 FDPC 系统、

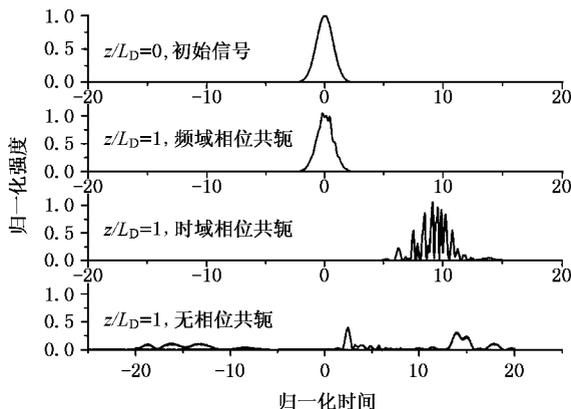


图 1 在具有不同相位共轭结构的光纤系统中,单束信号脉冲的波形演化

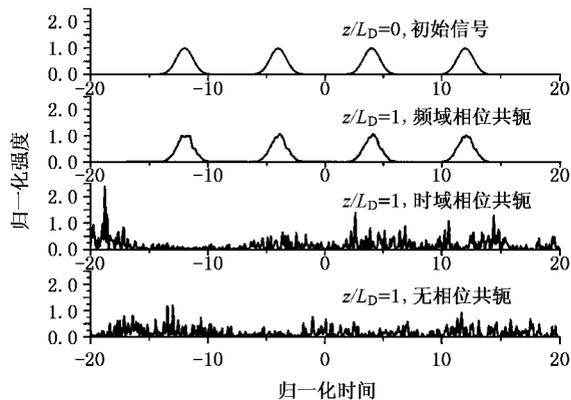


图 2 在具有不同相位共轭结构的光纤系统中,多束信号脉冲的波形演化

中距 TDPC 系统和无相位共轭光纤系统中的波形演化.该图再次表明了 FDPC 能够极大地抑制 XPM 对系统传输性能的伤害,而且脉冲之间的相互串扰也能够得到有效的抑制.与之相比,在中距 TDPC 系统中,由于两束光波之间的 XPM 作用不能得到抑制,脉冲出现了严重的失真,脉冲之间的串扰进一步加剧了信号失真.

3.2. 信号脉冲无初始啁啾有初始时延

当两个无啁啾、有相同脉宽、信号脉冲有初始时延的高斯脉冲在光纤中同向传输时,其初始抽运脉冲和信号脉冲分别为

$$U_p(0, \tau) = \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right), \quad (19)$$

$$U_s(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_s}{P_p}} \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_d)^2}{2}\right]. \quad (20)$$

其中 τ_d 为信号脉冲相对于抽运脉冲的初始时间延迟. 系统参数和 3.1 节所取参数相同.

图 3 表明对应于不同的初始时间延迟, FDPC 仍然能够补偿和复原 GVD, SPM 和 XPM 所导致的信号失真. 但是, 由于 FDPC 导致信号脉冲的时间反转, 输出信号脉冲和输入信号脉冲围绕着时间原点成镜像关系. 因此, 在输出端, 要再次进行时间反转以恢复初始脉冲信号.

对于具有不同初始时间延迟的信号脉冲, 虽然最终的输出波形几乎和输入波形相同, 但是在传输过程中, 脉冲却具有不同的演化过程(图 4).

当信号具有初始时延时, 脉冲的展宽因子极大值随着时延绝对值的增加而逐渐减小. 当 $\tau_d = 0$ 时, 其极大值为 7.5903. 当 $\tau_d = 4$ 时, 其极大值只有 1. 这表明在传输过程中, 信号脉冲一直处于窄化状态. 更值得注意的是, 当 $\tau_d = -4$ 时, 其极大值为 1.0921, 而其极小值为 1. 两者相差很小. 这表明在传输过程中, 脉冲一直处于类似光孤子的状态, 其脉冲能够基本保持自身的波形不发生变化. 这主要是由于抽运脉冲和信号脉冲之间的群速度失配, 导致 XPM, SPM 和 GVD 所致信号失真之间的相互影响而产生的. GVD 致啁啾为负, 而 SPM 在脉冲的前沿附近啁啾为负, 中间部分啁啾为零, 后沿附近啁啾为正. 根据初始时间延迟的不同, XPM 所致啁啾会发生变化, 或者为正值, 或者为负值. 因此, 在满足一定条件情况下, 脉冲的净啁啾会维持在一个较小的值上, 从而导致脉冲一直处于类似光孤子的状态, 基本保持自身的波形不发生变化.

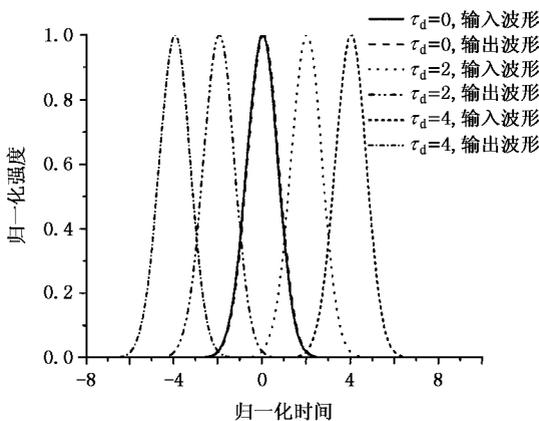


图 3 在不同初始时间延迟条件下, 单束信号脉冲波形的演化

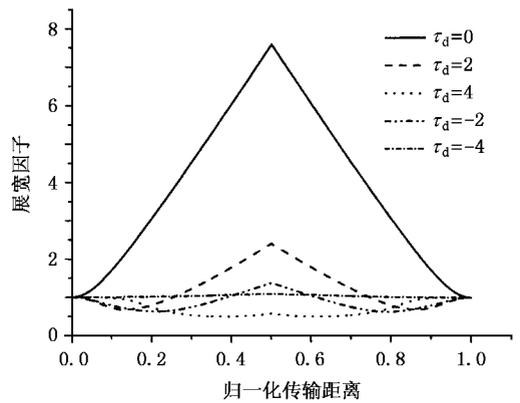


图 4 在不同初始时间延迟条件下, 单束信号脉冲展宽因子的演化

3.3. 信号脉冲有初始啁啾无初始时延

当两个有啁啾、有相同脉宽、无初始时间延迟的高斯脉冲在光纤中同向传输时, 其初始信号脉冲和抽运脉冲分别为

$$U_p(0, \tau) = \exp\left(-\frac{1 + iC_p}{2} \tau^2\right), \quad (21)$$

$$U_s(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_s}{P_p}} \exp\left[-\frac{1 + iC_s}{2} \tau^2\right]. \quad (22)$$

其中 P_p 和 P_s 分别为抽运脉冲和信号脉冲的入射峰值功率. C_p, C_s 为抽运脉冲和信号脉冲的初始啁啾. 系统的参数同上.

图 5—图 7 显示了在 XPM 作用下, 对应于不同的抽运脉冲和信号脉冲初始啁啾, 信号脉冲在中距 FDPC 系统中的演化.

图 5(a), 图 6(a), 图 7(a) 表明抽运脉冲和信号脉冲的初始啁啾不会影响 FDPC 对 XPM 所致信号失真的补偿和复原, 系统输出端的输出信号是输入信号完整的复共轭和完全的时间反转.

但是图 5(b), 图 6(b), 图 7(b) 显示抽运脉冲和信号脉冲的初始啁啾严重影响了信号脉冲的传输演化过程, 对应于不同的初始啁啾, 信号脉冲具有不同的传输和展宽过程. 当信号脉冲的初始啁啾较小时, 抽运脉冲的初始啁啾对系统的影响较大, 当信号脉冲的初始啁啾增大时, 抽运脉冲的初始啁啾对系统的影响却开始减弱. 其中抽运脉冲的初始正啁啾在一定程度上能够减弱信号脉冲的展宽, 而初始负啁啾却导致信号脉冲的进一步展宽.

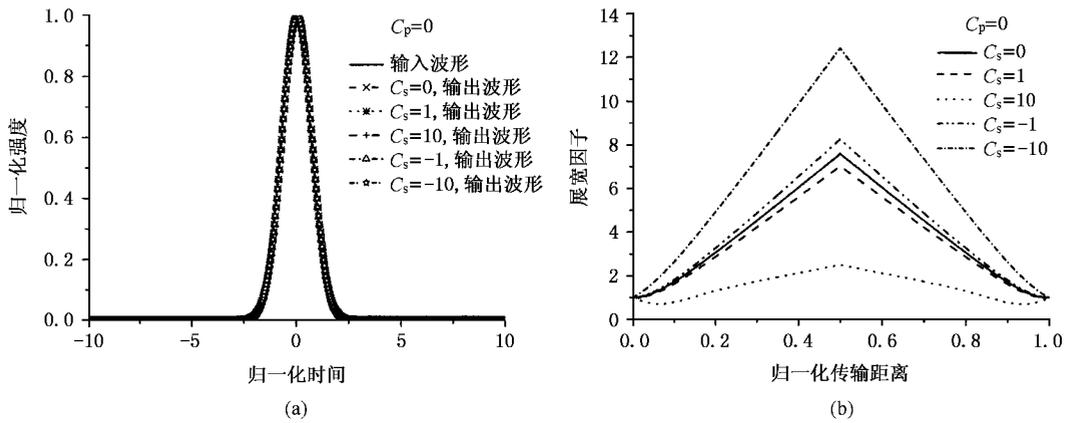


图 5 当 $C_p=0$, 信号脉冲有不同初始啁啾时, 信号脉冲 (a) 波形的演化 (b) 展宽因子的变化

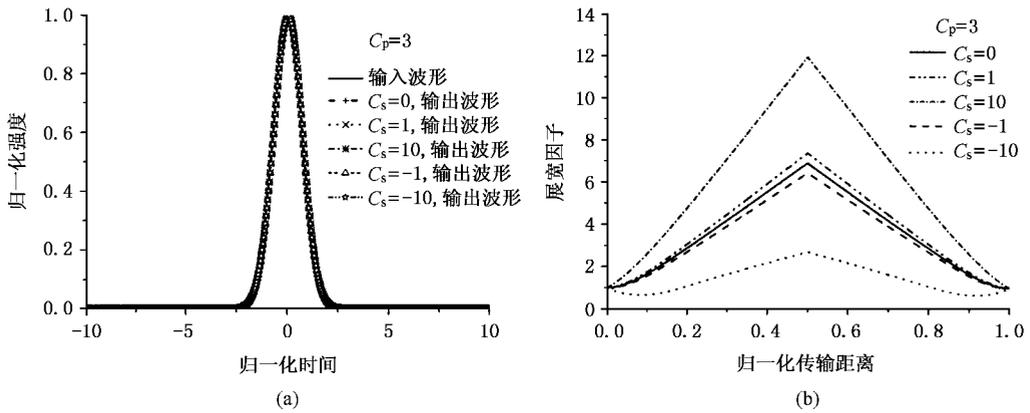


图 6 当 $C_p=3$, 信号脉冲有不同初始啁啾时, 信号脉冲 (a) 波形的演化 (b) 展宽因子的变化

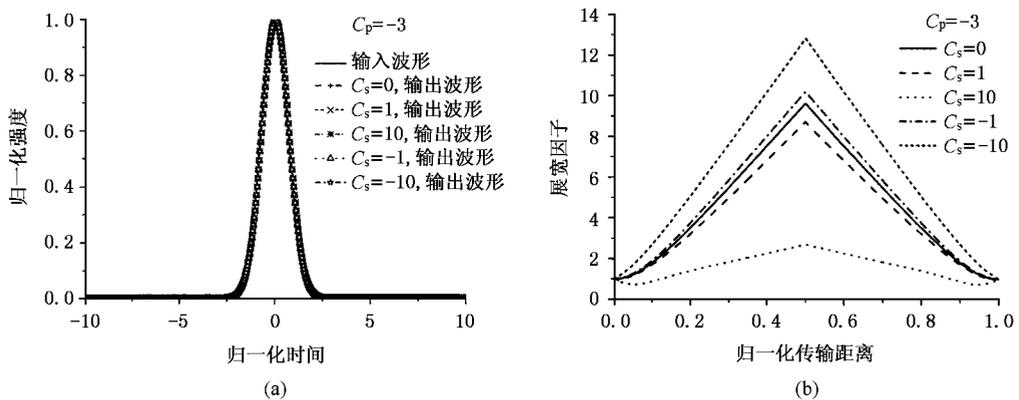


图 7 当 $C_p=-3$, 信号脉冲有不同初始啁啾时, 信号脉冲 (a) 波形的演化 (b) 展宽因子的变化

当抽运脉冲的初始啁啾不变时, 信号脉冲的初始啁啾对系统的作用却有所不同. 信号脉冲的初始正啁啾能够加速信号脉冲的展宽, 而负啁啾能够减缓信号脉冲的展宽, 甚至能够导致脉冲的窄化, 并且这种作用随着啁啾绝对值的增加而得到逐渐的

增强.

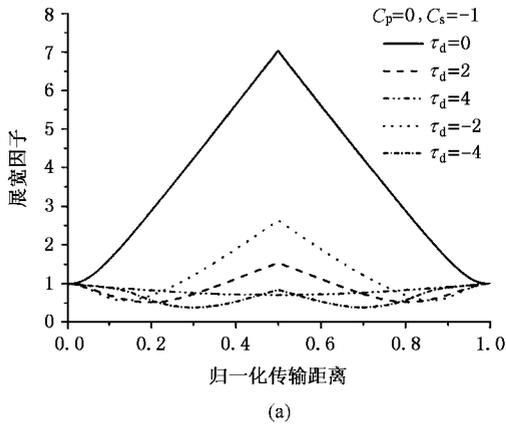
3.4. 信号脉冲有初始啁啾有初始时延

一般来说, 在实际过程中, 信号脉冲和抽运脉冲都含有初始线性啁啾, 并且有相对时延, 因此初始信

号脉冲和抽运脉冲分别为

$$U_p(0, \tau) = \exp\left(-\frac{1 + iC_p}{2}\tau^2\right), \quad (23)$$

$$U_s(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_s}{P_p}} \exp\left[-\frac{1 + iC_s}{2}(\tau - \tau_d)^2\right] \quad (24)$$



其中各参数的定义同上.

根据上文描述,正的抽运脉冲初始啁啾和负的信号脉冲初始啁啾有利于提高系统的补偿性能.因此,在计算中,取 $C_p = 0.3$; $C_s = -1$.其他参数取值同上.

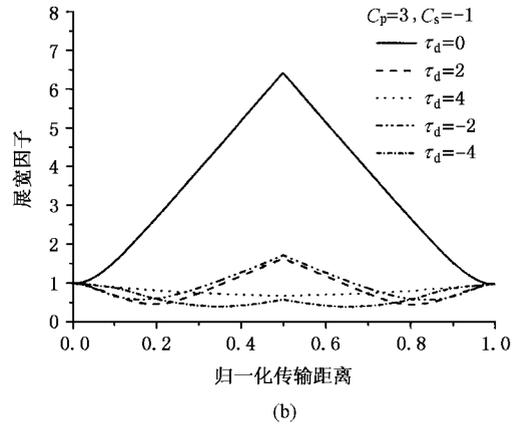


图 8 信号脉冲对不同的初始时延,其脉冲展宽因子的变化.(a) $C_p = 0, C_s = -1$ (b) $C_p = 3, C_s = -1$

FDPC 能够补偿和复原 GVD,SPM 和 XPM 所导致的信号失真,系统的输出波形几乎和输入波形相同(图 8(a)).初始啁啾不会影响系统的输出结果,它只会影响信号的传输过程(图 8(b)).正如前文分析,合适的时延,合适的初始啁啾在一定程度上能够减缓信号脉冲的展宽,甚至能够导致脉冲的窄化,并且这种作用随着啁啾绝对值的增加而得到逐渐的增强.

4. 结 论

本文理论分析了高斯脉冲信号在时域和频域中的相位共轭变换,研究了脉冲信号在中距相位共轭光纤系统中的传输特性,提出了利用频域相位共轭技术来补偿和复原 XPM 所引入的信号失真和畸变的补偿模式.数值模拟了在 XPM,SPM 和 GVD 作用

下,高斯信号脉冲在不同中距相位共轭光纤系统中的传输演化过程,并对此进行了讨论.结果表明当入射信号经过基于中距 FDPC 的光纤系统时,输出信号是输入信号的复共轭和完全的时间反转,XPM 所导致的信号失真可以得到准确的补偿和复原,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.

脉冲的初始啁啾和初始时延不会影响系统信号传输的最终结果,它们只会影响信号脉冲的传输过程.合适的初始时延,合适的脉冲初始啁啾,都有利于 FDPC 对 XPM 所致信号失真的复原,减缓信号传输过程中的脉冲展宽.

由于 FDPC 导致信号脉冲的时间反转,输出信号脉冲和输入信号脉冲成镜像关系.因此,在输出端,必须将信号脉冲重新反转,以恢复初始信号时间系列.

- [1] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* 3rd Edition (San Diego: Academic Press)
- [2] Yariv A, Fekete D and Pepper D M 1979 *Opt. Lett.* **4** 52
- [3] Fisher R A, Suydam B R and Yevick D 1983 *Opt. Lett.* **8** 611
- [4] Watanabe S and Shirasaki M 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 243
- [5] Fewings M R and Gaeta A L 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1522
- [6] He G S 2002 *Progress in Quantum Electronics* **26** 131

- [7] Shi S X, Chen G F, Zhao W and Liu J F ed. 2003 *Nonlinear Optics* (Xi'an: Xiidian University Press) [in Chinese] 石顺祥、陈国夫、赵卫、刘继芳编著 2003 非线性光学(西安:西安电子科技大学出版社)
- [8] Miller D A B 1980 *Opt. Lett.* **5** 300
- [9] Weiner A M, Leaird D E, Reitze D H et al 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2251
- [10] Marom D, Panasenko D, Rokitski R et al 2000 *Opt. Lett.* **25** 132

[11] Weiner A M 2000 *Opti . Lett .* **25** 1207[12] Nishioka H , Ichihashi S and Ueda K 2002 *Optics Express* **10** 920

Suppression of pulse impairments due to cross-phase modulation by frequency domain phase conjugation ^{*}

Bu Yang[†] Wang Xiang-Zhao(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

(Received 24 September 2004 ; revised manuscript received 11 March 2005)

Abstract

The use of optical frequency domain phase conjugation (FDPC) to suppress pulse impairments due to cross-phase modulation (XPM) in optical fiber systems is proposed . Evolution of Gaussian pulses in the system using midway FDPC is analyzed theoretically and simulated numerically . It is found that pulse waveform impairments induced by XPM can be suppressed effectively by FDPC . The impairments due to group-velocity dispersion and self-phase modulation can be suppressed simultaneously . Suitable initial time delay and pulse chirp of pulses can improve the suppression and compensation for the distortion .

Keywords : frequency domain phase conjugation , cross-phase modulation , group-velocity dispersion , self-phase modulation

PACC : 4265F , 4281 , 4225B , 4230Q

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA404050) and the Foundation for Development of Science of Shanghai , China (Grant Nos. 0214nm091 and 0359nm 004) .

[†]E-mail : buyang@siom.ac.cn