

基于脉冲对的交叉相位调制脉冲压缩中 离散效应的抑制^{*}

夏光琼^{1,2)†} 吴正茂^{1,2)} 陈海涛¹⁾

¹⁾ 西南师范大学物理学院, 重庆 400715)

²⁾ 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2004 年 5 月 20 日收到, 2004 年 7 月 23 日收到修改稿)

提出一种新的抑制离散效应的方法——非对称脉冲对法, 并对采用该方法和采用非同步耦合法在基于脉冲对交叉相位调制对脉冲进行压缩过程中, 对离散效应影响的抑制效果进行了研究. 数值模拟的结果显示, 对于峰值功率为 10mW、半极大全宽度为 5ps 的高斯入射脉冲, 采用非对称脉冲对法, 可以获得压缩比为 13.7、基座能量比为 0.122、峰值功率为 116mW 的压缩脉冲.

关键词: 交叉相位调制, 离散效应, 非同步耦合法, 非对称脉冲对法

PACC: 4230Q, 4280M, 4265S

1. 引 言

随着通信速率的不断提高, 要求信号脉冲的宽度越来越窄. 目前, 利用脉冲在光纤中传输时的非线性效应, 使脉冲得到压缩是产生超短脉冲的主要途径之一. 对于中心波长位于光纤负色散区的脉冲, 可采用孤子效应压缩方法^[1]; 对于中心波长位于光纤正常色散区的脉冲, 当输入脉冲具有足够高的峰值功率时, 常采用光纤-光栅对压缩方法^[2], 而对于峰值功率较低的脉冲, 可采用与脉冲对之间的交叉相位调制(XPM)效应对脉冲进行压缩^[3].

在基于脉冲对的 XPM 进行脉冲压缩的过程中, 为了能在光纤输出端提取出被压缩脉冲, 应使脉冲对与被压缩脉冲的中心波长不一致. 中心波长的一致将使两个脉冲在传输过程中产生离散效应, 而离散效应的存在会大大降低脉冲压缩的质量: 使脉冲压缩因子降低、峰值功率减小、基座能量比增大. 因而需要采用一些方法来抑制离散效应的影响. 本文对非同步耦合法^[4](在基于暗孤子的脉冲压缩过程中具有较好的抑制离散效应影响作用)在基于脉冲对的 XPM 进行脉冲压缩过程中离散效应影响的抑制作用进行了研究, 并提出了一种新的方法——

非对称脉冲对法. 研究表明: 在基于脉冲对的 XPM 对脉冲进行压缩的过程中, 这两种方法均可对离散效应的影响起到很好的抑制作用, 但相比之下采用非对称脉冲对法得到的压缩脉冲质量更高.

2. 理论模型

对于偏振方向相同、中心波长不同的脉冲对和被压缩脉冲在常规光纤中共同传输时, 其传输特性可由下列非线性薛定谔方程表述^[2]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} A \\ & = i\gamma \left[|A|^2 + 2|A_p|^2 - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] A \\ & + i\gamma \frac{2i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_{3p} \frac{\partial^3 A_p}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} A_p - \delta \frac{\partial A_p}{\partial T} \\ & = i\beta\gamma \left[|A_p|^2 + 2|A|^2 - T_R \frac{\partial |A_p|^2}{\partial T} \right] A_p \\ & + i\beta\gamma \frac{2i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A_p|^2 A_p), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 A, A_p 分别为被压缩脉冲和脉冲对的复振幅, z 为沿光纤的传输距离, T 为在与被压缩脉冲一起

^{*} 国家教育部科学技术重点项目(批准号 03140)及重庆市科学技术委员会基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: gqxia@swnu.edu.cn

运动的延时系中测得的时间($T = t - z/v_g$, t 为时间, v_g 为被压缩脉冲在光纤中传输时的群速度), β_2, β_{2p} 分别为脉冲对和被压缩脉冲的群速度色散(GVD)系数, β_3, β_{3p} 分别为脉冲对和被压缩脉冲的三阶色散系数, γ 为被压缩脉冲在光纤中的非线性系数($\gamma = n_2 \omega_0 / c A_{\text{eff}}$), n_2 为非线性折射率系数, ω_0 为被压缩脉冲的中心角频率, A_{eff} 为光纤纤芯的有效面积, c 为真空中的光速, $b = \lambda / \lambda_p$, T_R 为拉曼增益斜率, α 为光纤的衰减系数, δ 为脉冲对相对于被压缩脉冲的离散系数. 方程(1)和(2)等号左边第二、三、四项分别为群速度色散效应、高阶色散效应和损耗项, 方程(2)等号左边第五项为离散效应, 方程(1)和(2)等号右边各项分别为自相位调制、交叉相位调制、拉曼效应和自陡峭效应. δ 的表达式为: $\delta = v_g^{-1} - v_{pg}^{-1}$. 群速度 v_g 可表示为 [2]

$$v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}, \quad (3)$$

其中 ω 为脉冲的中心频率, n 为脉冲在光纤中的折射率, 其与 ω 的关系可表示为 [2]

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (4)$$

式中 ω_j 为谐振频率, B_j 为 j 阶谐振强度, 这里将纤芯近似为纯石英材料, 其具体的计算数据见文献 [2].

假定采用的脉冲对和被压缩脉冲均具有高斯型分布, 其表达式为

$$A = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right), \quad (5)$$

$$A_p = \sqrt{k'p} \exp\left[-\frac{(T - q_0 T_{01} + kT_{01})^2}{2T_{01}^2}\right] + \sqrt{p} \exp\left[-\frac{(T + q_0 T_{01} + kT_{01})^2}{2T_{01}^2}\right] \exp(i\theta), \quad (6)$$

其中 P_0 为被压缩脉冲初始峰值功率, k' 为脉冲对的非对称参量, 它表征脉冲对的峰值功率的非对称性, P, k', P 分别为脉冲对的两个脉冲的初始峰值功率, T_0 为被压缩脉冲的初始脉冲宽度, T_{01} 为脉冲对中两个脉冲的初始宽度(这里假设脉冲对的两个脉冲初始宽度相同), θ 为脉冲对的两个脉冲之间的相移, $2q_0 T_{01}$ 为脉冲对的两个峰值之间的初始间距, k 为脉冲耦合时的非同步耦合参量, kT_{01} 为脉冲对中心相对于被压缩脉冲中心在时间上的超前量或滞

后量. 当采用非同步耦合时, $k' = 1$, 采用非对称脉冲对时, $k = 0$.

这里引入两个表征脉冲压缩效果的重要参量: 脉冲压缩因子和基座能量比, 其表达式分别为

$$F_c = \frac{T_{\text{FWHM}}}{T_{\text{压缩}}}, \quad R = \frac{E_{\text{基座}}}{E_{\text{脉冲}}}, \quad (7)$$

其中 T_{FWHM} 为脉冲压缩前的脉冲宽度(半极大全宽度), $T_{\text{压缩}}$ 为压缩后的脉冲宽度, $E_{\text{基座}}$ 为脉冲基座的能量, $E_{\text{脉冲}}$ 为脉冲的总能量. 脉冲基座定义为 [5]: 以脉冲强度极值点对应的横坐标为中心, 分别向横坐标的正负方向取相当于脉冲宽度的距离, 作两条与横坐标垂直的线段, 则两线段之外的部分为脉冲基座.

3. 结果与讨论

数值计算过程中所用的数据为: $P_0 = 10\text{mW}$, $P = 200\text{W}$, $T_0 = 3\text{ps}$ (对应的半极大全宽度 $T_{\text{FWHM}} = 5\text{ps}$), $T_{01} = 0.8T_0$, $\beta_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}$, $\beta_{2p} = 19\text{ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = \beta_{3p} = 0.1\text{ps}^3/\text{km}$, $A_{\text{eff}} = 40\mu\text{m}^2$, $c = 3 \times 10^8\text{m/s}$, $n_2 = 2.6 \times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$, $T_R = 3\text{fs}$, $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$ (中心波长为 $1.06\mu\text{m}$ 附近的脉冲, 处于常规光纤的正常色散区, 且有较大的群色散, 有利于利用 XPM 对脉冲进行压缩 [3]), $q_0 = 2.2$, $\lambda_p = 1.07\mu\text{m}$, $\alpha = 1.5\text{dB}$, $\theta = \alpha$ (计算表明 θ 值对结果无影响, 因此为了方便, 此处取 $\theta = 0$).

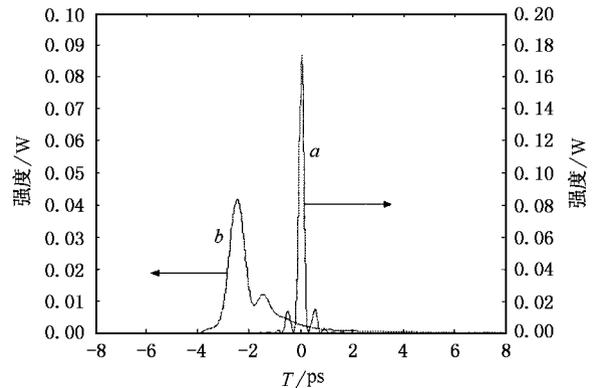


图 1 被压缩脉冲在无离散效应(曲线 a)和有离散效应(曲线 b)时被压缩后的形状

为了说明离散效应对脉冲压缩的影响, 分别模拟了无离散效应时(如图 1 曲线 a, 计算时取 $k = 0$, $k' = 1$, $\lambda_p = \lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$, $\beta_{2p} = \beta_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}$)和有

离散效应时(如图 1 曲线 b , 计算时取 $k = 0, k' = 1$, $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$, $\lambda_p = 1.07\mu\text{m}$, $\beta_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}$, $\beta_{2p} = 19\text{ps}^2/\text{km}$)脉冲压缩后的形状. 结果显示:离散效应不仅降低了脉冲的压缩因子(由 23.4 降为 6.89)而且大大降低了压缩后的峰值功率(由 0.173W 降为 0.039W),使压缩后的脉冲基座能量比大大增加(由 0.184 升至 0.382),同时使脉冲压缩所需要的光纤长度增加(由 26.9 m 增至 39.1m). 下面首先研究非同步耦合合法对离散效应影响的抑制方法.

3.1. 非同步耦合合法

对基于暗孤子的脉冲压缩过程中离散效应的影响,文献 [4] 提出了非同步耦合的抑制方法. 在基于脉冲对的 XPM 对脉冲进行压缩的过程中,由于离散效应,在传输过程中脉冲对逐渐向被压缩脉冲的一侧偏移,使被压缩脉冲不能很好地利用脉冲对展宽过程中的 XPM 效应,从而严重地影响了脉冲压缩的质量. 因此,采用非同步耦合方法,即在光纤的输入端,使脉冲对中心相对于被压缩脉冲中心有一定的超前或滞后,以达到最大限度地利用脉冲对展宽过程中的 XPM 效应,从而实现抑制离散效应的影响、改善脉冲压缩效果的目的.

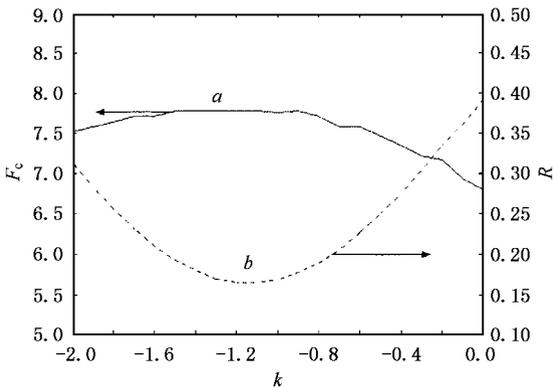


图 2 脉冲压缩因子(曲线 a)和基座能量比(曲线 b)与非同步耦合参量之间的关系

图 2 为 $k' = 1$ 时,脉冲压缩因子(曲线 a)与基座能量比(曲线 b)随非同步参量 k 的变化曲线. 从图 2 可以看出,合理选取非同步参量 k 值,压缩脉冲的基座能量比会明显地减小,压缩因子也会有所提高;当取 $k = -1.2$ 时,相当于在光纤输入端脉冲对在时间上超前于被压缩脉冲 $1.2T_0$ 时,脉冲压缩的离散效应得到最好的抑制,此时脉冲的基座能量比降低至 0.172,脉冲压缩比达到 7.85,脉冲峰值

功率升高至 0.064W.

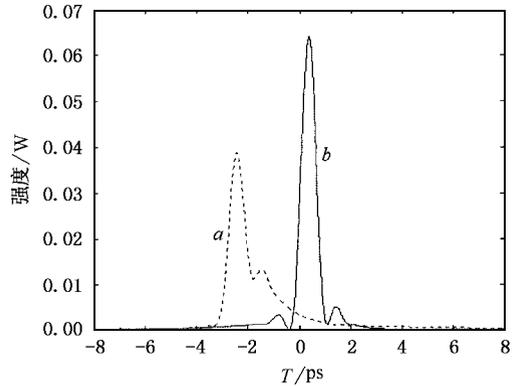


图 3 考虑离散效应时,不采用(曲线 a)和采用(曲线 $b, k = -1.2$)非同步耦合合法的压缩脉冲的形状

图 3 为不采用(曲线 a)和采用(曲线 $b, k = -1.2$)非同步耦合合法后所得到的脉冲形状. 从图 3 可以看出,采用非同步耦合合法在很大程度上消除了由于离散效应导致的压缩脉冲的不对称性,并使得脉冲基座明显减小. 这是因为采用非同步耦合合法后,更最大限度地利用了脉冲对展宽过程中的 XPM 效应. 此外通过模拟还发现,非同步耦合对脉冲压缩所需要的常规光纤的长度影响不大.

以上模拟结果表明:非同步耦合合法不仅适用于抑制基于暗孤子的脉冲压缩过程中的离散效应的影响,而且也能抑制基于脉冲对的脉冲压缩过程中的离散效应的影响. 下面将提出一种更为有效的方法,即非对称脉冲对法.

3.2. 非对称脉冲对法

非对称脉冲对法是利用脉冲对峰值强度的不一致性,弥补由于脉冲对与被压缩脉冲间的离散效应带来的被压缩脉冲的一侧受到 XPM 的作用较弱,得不到充分压缩的事实,通过恰当地调节脉冲对中两个脉冲的峰值功率比,使被压缩脉冲两侧得到同等程度压缩的效果,从而实现了离散效应影响的有效抑制.

图 4 为 $k = 0$ 时,脉冲压缩因子(曲线 a)与脉冲基座能量比(曲线 b)随脉冲对的非对称参量 k' 的变化关系. 从图 4 可以发现,合理选取 k' 值,压缩脉冲的基座能量比会显著地减小,压缩因子也会有较大提高;当取优化值 4.2 时,离散效应的影响得到了最佳抑制,此时脉冲压缩比达到 13.7,脉冲的基座能量比降低至 0.122,脉冲峰值功率升高至 0.116W.

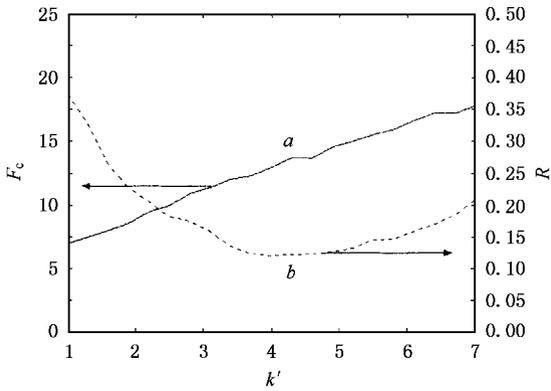


图4 脉冲压缩因子(曲线 a)和基座能量比(曲线 b)与非对称参量之间的关系

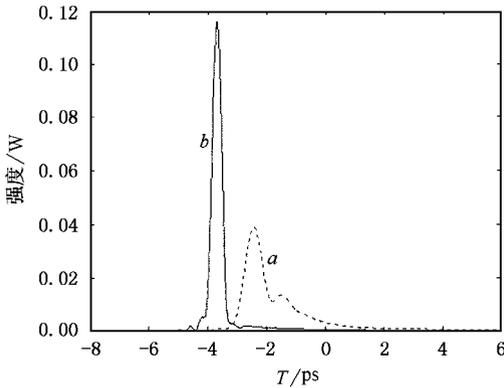


图5 考虑离散效应时,不采用(曲线 a)和采用(曲线 b , $k' = 4.2$)非对称脉冲法得到的压缩脉冲的形状

图5为不采用(曲线 a)和采用(曲线 b , 取 $k' = 4.2$)非对称脉冲法所能得到的最佳脉冲形状,从图5可以发现采用非对称脉冲法基本上消除了脉冲基座,而且形状变得更加对称.但是当 k' 值过大时,又会产生压缩的不对称性,使压缩后的脉冲在相反的一侧产生了脉冲基座拖尾,且拖尾随非对称参

量的增加而增大.图6为非对称参量取6.5时的输出脉冲.此外,通过模拟还发现,非对称脉冲对法缩短了脉冲压缩所需要的常规光纤长度(当 $k' = 4.2$ 时仅需25.0m).

比较采用非同步耦合法(图3中曲线 b)与采用非对称脉冲对法(图5中曲线 b)得到的最佳的输出脉冲,可以得出:采用非对称脉冲对法可以获得更高的压缩因子、更高的峰值功率,以及更小的脉冲基座能量比.因此,在基于脉冲对的XPM对脉冲进行压缩的过程中,采用非对称脉冲对法效果更佳.

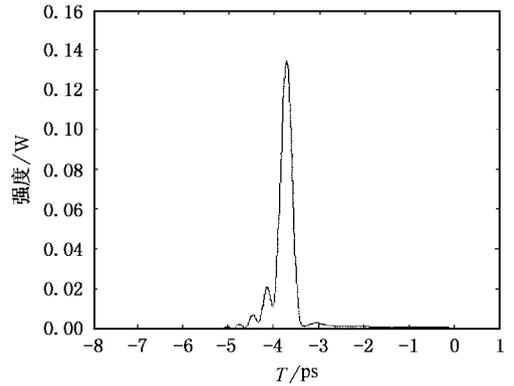


图6 非对称系数为6.5时压缩脉冲的形状

4. 结 论

本文分析了非同步耦合法对基于光脉冲对XPM对脉冲进行压缩过程中离散效应影响的抑制作用,并提出了效果更佳的非对称脉冲对法.数值模拟显示:两种方法均可对离散效应的影响起到有效的抑制作用,能降低脉冲基座能量比,提高了脉冲峰值功率和压缩因子.但相比之下采用非对称脉冲对法得到的压缩脉冲质量更高.

- [1] Akhmediev N N and Mitzkevich N V 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 849
 [2] Agrawal G P 1995 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic)
 [3] Cao W H et al 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 919 (in Chinese) [曹文华

等 1997 物理学报 **46** 919]

- [4] Cao W H and Zhang Y 1996 *Opt. Commun.* **128** 23
 [5] Li Z H et al 2002 *Acta Photon. Sin.* **31** 285 (in Chinese) [李智红等 2002 光子学报 **31** 285]

Suppression of pulse walk-off effect during the process of pulse compression by cross-phase modulation of pulse pair^{*}

Xia Guang-Qiong^{1,2)†} Wu Zheng-Mao^{1,2)} Chen Hai-Tao¹⁾

¹⁾(School of Physics , Southwest Normal University , Chongqing 400715 , China)

²⁾(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System , Ministry of Education , Chongqing University , Chongqing 400044 , China)

(Received 20 May 2004 ; revised manuscript received 23 July 2004)

Abstract

A new asymmetrical pulse pair method is proposed which can be used to suppress the pulse walk-off effect during the process of pulse compression by the cross phase modulation of pulse pair. By using asymmetrical pulse pair method and asynchronous coupling method , the suppressions of the walk-off effect have been investigated numerically. Results show that for an incident Gaussian pulse with peak power 10mW and full-width-at-half-maximum (FWHM) 5ps , we can obtain a compressed pulse with the compression factor 13.7 , pedestal energy ratio 0.122 and the peak power 116mW by adopting the asymmetrical pulse pair method.

Keywords : cross phase modulation , walk-off effect , asynchronous coupling , asymmetrical pulse pair method

PACC : 4230Q , 4280M , 4265S

^{*} Project supported by the Key Program from the Ministry of Education of China (Grant No. 03140) , and the Foundation from the Commission of Science and Technology of Chongqing , China.

[†] Corresponding author. E-mail : gqxia@swnu.edu.cn