

一种基于两段光纤链路的抛物自相似脉冲压缩方法

刘艳丽 罗爱平 罗智超 徐文成

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006)

摘要 提出了一种由一段正色散光纤和一段负色散光纤构成的光纤链路的压缩脉冲的简易方法:采用正色散光纤将初始脉冲整形为抛物自相似脉冲,并以负色散光纤作为脉冲压缩器对整形脉冲进行压缩。采用对称分步傅里叶方法研究了不同初始啁啾对脉冲整形的影响,并用一个只与脉冲形状有关的无量纲因子衡量脉冲整形效果。发现初始负啁啾有利于加快脉冲的整形速度,而初始正啁啾时得到的最佳抛物自相似脉冲的啁啾线性范围较宽。并理论和数值分析了三阶色散对脉冲压缩的影响。结果表明,利用三阶色散部分补偿方法可以削弱三阶色散对脉冲演化的影响,得到高质量高压缩比的输出脉冲。

关键词 脉冲压缩;抛物自相似脉冲;色散管理;三阶色散部分补偿

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0519002

Method of Compression of Parabolic Self-Similar Pulses Based on Fiber Link Consisting of Two Segments of Fibers

Liu Yanli Luo Aiping Luo Zhichao Xu Wencheng

(School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Based on the fiber link consisting of a section of a positive-dispersion and a negative-dispersion optical fiber, a method of pulse compression is proposed. The parabolic self-similar pulses are generated through a normal-dispersion fiber, then compressed by an anomalous dispersion fiber. The effect of initial chirp on pulse shaping is numerically investigated with the symmetrical distribution Fourier method. By introducing a dimensionless factor to characterize the pulse shape, it is found that, the initial negative chirp accelerates pulse shaping and the initial positive chirp is apt to broaden the range of best linear chirp of the best parabolic pulse. And the effect of third-order dispersion on pulses compression is theoretically and numerically investigated. The results show that the third-order dispersion can be weakened by using third-order dispersion partial compensation fiber.

Key words pulse compression; parabolic self-similar pulse; dispersion management; third-order dispersion partial compensation

OCIS codes 190.4370; 190.5530; 190.7110

1 引 言

抛物线型光脉冲的产生^[1,2]和应用^[3~8]已成为近些年光纤光学领域的研究热点之一。任何形状的初始脉冲在正色散光纤放大器中传输时都可以被整

形为具有抛物线型包络并带有严格线性啁啾的光脉冲^[9]。类似于光孤子,现在也有人称这种脉冲为相似子(similariton),其在正色散光纤中传输时可有效地抵御光波分裂^[10,11]。因此它在高功率脉冲产

收稿日期: 2010-09-08; **收到修改稿日期**: 2010-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(11074078)、教育部博士点基金(20094407110002)和广东高校优秀青年创新人才培养项目(C10183)资助课题。

作者简介: 刘艳丽(1983—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器及光通信新技术等方面的研究。

E-mail: liuyanli19830721@163.com

导师简介: 徐文成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器及其在高码率光通信系统中的应用等方面的研究。E-mail: xuwch@scnu.edu.cn

生和全光信号处理方面^[3~9]有广泛的应用前景。高质量、高功率的抛物线型脉冲可以产生于光纤放大器^[12]、自相似脉冲激光器^[1],这需要高功率抽运因而增加了成本和系统的复杂性。此外,通过色散渐减光纤、类梳状光纤也可以将脉冲整形为抛物线型脉冲,但这些光纤其实就等效为增益光纤。

在理论方面,已有多种模型用于解释自相似脉冲产生原因:稀土掺杂光纤(掺镱^[13]、掺铒^[14,15])、拉曼放大器^[16]、类梳状光纤^[17]和色散渐减光纤^[18~20]等。但这些主要是研究振幅、相位、啁啾因子以及脉冲宽度等对在正色散光纤中传输的光脉冲的影响。直到2008年,Christophe Finot^[21]才首次描述了自相似脉冲在负色散光纤中的传输。

抛物自相似脉冲在其两翼部分能量逐渐减为零,在脉冲中心部分为严格线性正啁啾,因此采用啁啾补偿方法对其进行压缩可得到无旁瓣或旁瓣能量极小的超短脉冲。本文研究了由两段色散值符号不同的光纤构成的光纤链路中抛物自相似脉冲的整形及压缩特性。首先通过一段正色散光纤产生抛物线型脉冲,在其整形过程中采用一个无量纲因子衡量其脉冲形状,进而得到最佳的抛物线型脉冲。并研究了此过程中初始啁啾对脉冲整形的影响。其次通过一段负色散光纤作为脉冲压缩器对脉冲进行压缩,并在整个光纤链路中考虑三阶色散的影响,通过输出脉冲的对称性衡量三阶色散补偿效果,进而得到高质量压缩脉冲。

2 传输方程和结构原理图

输入脉冲在光纤中的演化遵循以下的非线性薛定谔方程(NLSE)^[21]:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \Psi}{\partial T^3} - i \gamma |\Psi|^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

式中 $\Psi(z, T)$ 为脉冲的慢变包络振幅函数, z 为传输距离, T 为随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度($T = t - z/v_g$), v_g 为群速度, β_2 为二阶色散系数, β_3 为三阶色散系数, γ 为非线性系数。

图1为基于两段光纤构成的光纤链路的脉冲压

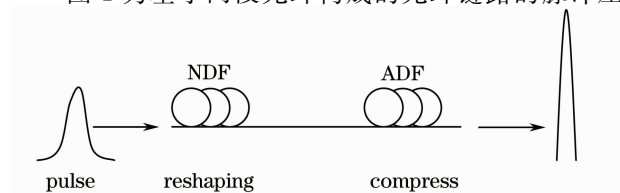


图1 脉冲压缩原理图

Fig. 1 Scheme of the pulse compression

缩原理图,初始脉冲首先通过一段正色散光纤(NDF),这是脉冲整形过程,也是脉冲预啁啾过程,通过优化光纤参数、合理的选择光纤长度,从这段正色散光纤中可得到拥有严格线性啁啾的抛物线型脉冲,然后通过一段等长且色散值的绝对值相等的负色散光纤(ADF)对脉冲进行压缩,最终得到高质量旁瓣能量极小的压缩脉冲。

3 数值分析结果与讨论

设初始脉冲为高斯型啁啾脉冲 $\Psi(0, T) = \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1+iC)(T/T_0)^2]$, P_0 为峰值功率, C 为啁啾系数,脉冲强度的 $1/e$ 宽度为 $T_0 = 2.5$ ps,则半峰全宽(FWHM)可以表示为 $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 \approx 1.665 T_0 = 4.2$ ps,采用对称分步傅里叶方法研究影响脉冲整形及压缩的参数。正色散光纤参数为:二阶色散为 $\beta_2 = 20 \times 10^{-3}$ ps²/m,非线性系数为 $\gamma = 1.5 \times 10^{-3}$ /(W·m),负色散光纤参数:二阶色散值为 $\beta_2 = -20 \times 10^{-3}$ ps²/m,非线性系数取 $\gamma = 1.5 \times 10^{-3}$ /(W·m)。

3.1 抛物自相似脉冲的产生

任何形状的初始脉冲在正色散光纤中均可演化成优质的抛物线型脉冲^[10]。本文以高斯型脉冲($C=0$)为例,研究了其在一段长度为150 m的正色散光纤里的演化情况。为了刻画脉冲在光纤中演化时的形状,引入一个只与脉冲形状有关的无量纲参数 K ,其定义式为

$$K = \int T^2 |\Psi| dT \cdot \left(\int |\Psi|^4 dT \right)^2 / \left(\int |\Psi|^2 dT \right)^5, \quad (2)$$

对于高斯型脉冲, $K=0.0796$,而对于抛物线型脉冲, $K=0.0720$ ^[22]。图2(a)为 K 在光纤中的演化情况,可以看出当 $z=66$ m时脉冲形状最接近于抛物线型。对比初始脉冲(点线)和传输长度分别为66 m(实线)和150 m(划线)时的脉冲,如图2(b)所示,可以看出初始高斯型脉冲在传输一段距离(66 m)后演化为包络极为类似于抛物线型的脉冲($K=0.0726$),只是在脉冲的两翼部分有一个小小的差别。超过这个距离之后,脉冲形状又逐渐背离抛物线型,在脉冲的顶部出现一个平平的秃顶,可见正色散存在一个最佳整形长度(66 m)。

3.2 初始啁啾对抛物自相似脉冲产生的影响

上面的研究是针对初始无啁啾脉冲的情况,但是一般情况下激光器产生的脉冲都是带啁啾的^[23],所以有必要研究初始啁啾对脉冲压缩的影响。数值

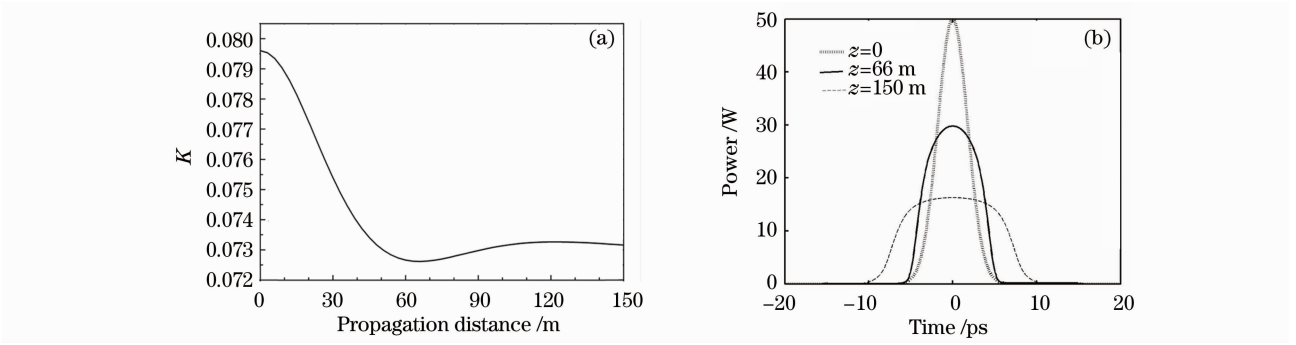


图 2 K 在正色散光纤中的演化及不同传输距离时的脉冲

Fig. 2 Evolution of K in positive-dispersion fiber and temporal intensity profiles at different transmission distances

分析了初始啾啾分别为 $C=1, 0$ 和 -1 时脉冲的演化情况。图 3 给出了不同初始啾啾时 K 值随传输距离变化情况以及相应的最佳抛物线脉冲所对应的啾啾。从图 3(a) 可以看出最佳抛物线型脉冲出现的位置和初始啾啾有关, 负啾啾时, 只需要较短的正色散光纤就能得到最佳抛物线脉冲, 而对于具有初始正啾啾的脉冲则需要较长光纤。图 3(b) 一方面说明最佳抛物线脉冲的啾啾线性部分的斜率和初始

啾啾无关, 三种情况下的相应的斜率是相同的, 另一方面初始正啾啾有利于得到较宽范围内的线性啾啾, 而初始负啾啾却缩短了最佳抛物线型脉冲的线性部分。表 1 列出了三种不同初始啾啾时最佳抛物线型脉冲出现的位置, 如表 1 所示三种情况下得到的抛物线型脉冲误差均低于 1%, 即得到了预期的脉冲。且因为初始正啾啾展宽了抛物线型脉冲啾啾的线性部分, 有利于提高压缩脉冲质量。

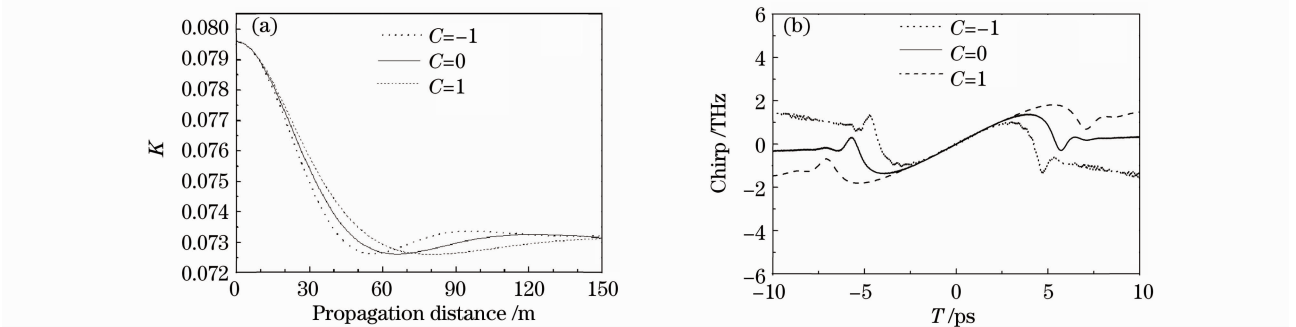


图 3 K 的演化和啾啾曲线

Fig. 3 Evolution of K and chirp profiles

表 1 不同啾啾值时最佳抛物线型脉冲出现的位置, K 值及误差

Table 1 Position of optimal parabolic pulse, K value and error for different initial chirps

Chirp /THz	L_{opt} /m	K	Deviation /%
$C=-1$	56	0.07257	0.79
$C=0$	66	0.07256	0.75
$C=1$	80	0.07260	0.83

3.3 抛物自相似脉冲的压缩

将 3.1 节中得到的最佳抛物线型脉冲(初始脉冲啾啾 $C=0$)注入一段同正色散光纤色散绝对值相等的负色散光纤中(100 m), 观察了脉冲在其中的演化情况, 当脉冲在负色散光纤中的传输距离为 66 m 时, 即同用于脉冲整形的正色散光纤等长时, 整个光纤链路的总色散值为零, 得到的压缩脉冲较

佳, 此压缩脉冲峰值功率 $P=747$ W, 半极大全宽度 $t=234$ fs, 压缩因子 $F_c=17.8$ (压缩因子是初始脉冲宽度与压缩脉冲的脉冲宽度的比值)。此外, 由于光纤中自相位调制(SPM)作用, 导致脉冲中心部分有一个近似线性正啾啾^[24~26], 所以为了同时补偿正色散光纤和 SPM 导致的脉冲展宽的影响, 应适当加大负色散光纤的长度, 研究发现当负色散光纤的长度为 72 m 时, 峰值功率最大, $P=766$ W, 压缩因子 $F_c=18.6$, 但只比前面等长时略大(不超过 1%), 因此, 采用和正色散光纤等长的负色散光纤既使得操作更加简便, 也保证了拥有较大的压缩因子。图 4(a), (b) 分别是线性坐标和对数坐标下的初始脉冲(点线), 抛物线型脉冲(划线)、压缩脉冲(实线), 该压缩脉冲质量高、峰值功率高、压缩因子大, 只是在前后沿尾部出现了少量能量分布, 这一方面

是由于在正色散光纤段中产生的脉冲有一个小误差,在其前后沿尾部的存在少量能量,另一方面因为并非在整个脉冲包络范围内都为线性啁啾,但通过

前面分析可知,采用具有初始正啁啾的脉冲可以展宽抛物线型脉冲啁啾的线性部分,因而便于提高压缩脉冲的质量。

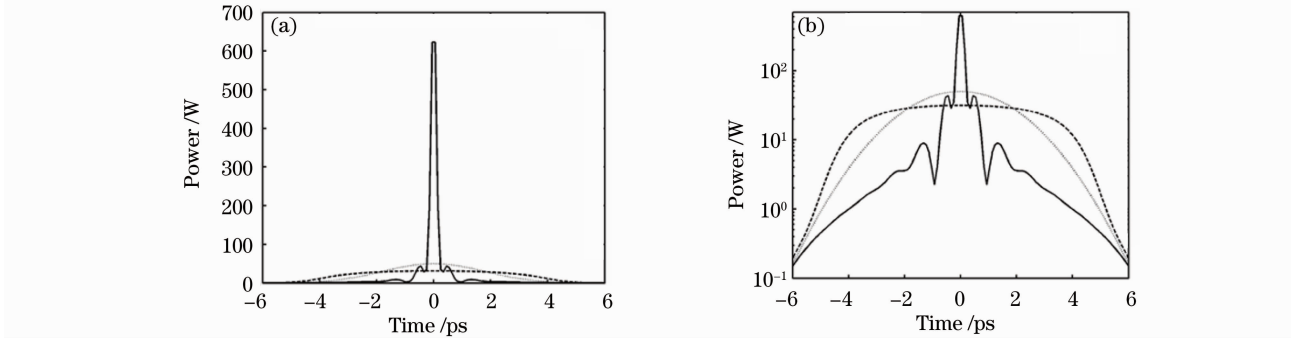


图 4 初始脉冲、抛物线脉冲和压缩脉冲的比较

Fig. 4 Comparison of the initial pulse, parabolic pulse and compressed pulse

3.4 三阶色散对抛物线脉冲压缩的影响

3.3 节中的讨论是在没有考虑三阶色散时得到的压缩脉冲,对于脉冲整形阶段脉冲宽度较宽,三阶色散的影响很弱,而当脉冲进入负色散光纤进行压缩时,脉冲变窄,三阶色散长度 $L_D' = T_0^3 / |\beta_3|$ 变短,三阶色散作用加强,脉冲发生畸形,形状变得不对称。当 $\beta_3 > 0$ 时,脉冲前沿变抖,后沿倾斜,脉冲中心逐渐偏向后沿,而 $\beta_3 < 0$ 时情况正好相反。为了理论分析三阶色散对脉冲形状的影响,引入了一个表示时间量度的均参量 $\langle T \rangle$,从物理意义上讲, $\langle T \rangle$ 决定了脉冲形状的不对称性。由于自相位调制项不影响脉冲形状,我们暂且忽略不计,将(1)式以算符形式记为

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \hat{H}U, \quad (3)$$

式中 \hat{H} 由下式给出

$$\hat{H} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{i\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial T^3}, \quad (4)$$

(3)式中的 $U(z, T)$ 是归一化的,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 dT = 1$,

$\langle T \rangle$ 随 z 的演化为

$$\frac{d\langle T \rangle}{dz} = i\langle [\hat{H}, T] \rangle, \quad (5)$$

式中 $[\hat{H}, T] = \hat{H}T - T\hat{H}$ 表示对易子,将(5)式积分后,可以得到下面一般性的表达式:

$$\langle T \rangle = a_0 + a_1 z, \quad (6)$$

式中系数 a_0, a_1 只与入射光场 $U_0(T) = U(0, T)$ 有关,并定义为

$$a_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} U_0^*(T) T U_0(T) dT, \quad (7)$$

$$a_1 = i \int_{-\infty}^{+\infty} U_0^*(T) [\hat{H}, T] U_0(T) dT, \quad (8)$$

为了考察三阶色散对脉冲形状的改变,考虑归一化情况,假设初始脉冲 $U_0(T) = (T_0 \sqrt{\pi})^{-1/2} \exp(-\frac{T^2}{2T_0^2})$, 因为初始脉冲为对称的脉冲, $a_0 = 0$, 将其代入(8)式整理得

$$a_1 = \frac{i}{T_0 \sqrt{\pi}} \left[\frac{\beta_2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(-\frac{2T}{T_0^2}\right) \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) dT + \frac{i\beta_3}{6} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{3T^2}{T_0^4} - \frac{3}{T_0^2}\right) \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) dT \right], \quad (9)$$

式中含 β_2 的项积分为零,含 β_3 项积分为 $-\frac{3\sqrt{\pi}}{2T_0^2}$, 所以

$$a_1 = \frac{i}{T_0 \sqrt{\pi}} \frac{i\beta_3 - 3\sqrt{\pi}}{6} \frac{1}{2T_0^2} = \frac{\beta_3}{4T_0^2}, \quad (10)$$

$$\langle T \rangle = \frac{\beta_3}{4T_0^2} z, \quad (11)$$

由上式可知,对于初始对称的脉冲,二阶色散不影响脉冲的对称性,而脉冲的不对称性主要由三阶色散、传输距离和初始脉冲宽度决定,当 $\beta_3 > 0$ 时, $\langle T \rangle > 0$, 脉冲能量向脉冲后沿漂移,当 $\beta_3 < 0$ 时情况相反。如果脉冲宽度不变,为了削弱三阶色散的影响,可以采用三阶色散全补偿的方法,即 $\beta_{31} l_1 + \beta_{32} l_2 = 0$ 。但是,脉冲在正色散光纤中整形时脉冲较宽,由(11)式知,三阶色散对脉冲不对称性的作用较小,当脉冲进入负色散光纤时脉冲开始被压缩,脉冲宽度变窄,绝对值相同的三阶色散引起的脉冲的不对称性也会加剧,也就是说,如果光纤长度相等,此时只需要较小的三阶色散值就可以了,即采用三阶色散部分补偿的办法,当取值合适时可以有效地补偿三阶色散。

当考虑三阶色散时,且固定正色散光纤的三阶色散值为 $\beta_{31} = 5 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{m}$,数值分析了负色散光纤三阶色散为不同值时输出脉冲的 $\langle T \rangle$ 值,如图 5(a)所示,二者关系接近线性。当 $\beta_{32} = -2.3 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{m}$ 时, $\langle T \rangle = 0$,三阶色散补偿效果最好。图 5(b)描述了四种不同 β_{32} 取值时 $\langle T \rangle$ 在整个色散管理光纤链路的演化,由于正色散光纤参数不变,四种不同 β_{32} 时,在正色散区的四条曲线是重合的。当不补偿三阶色散时,即 $\beta_{32} = \beta_{31}$ 时,脉冲能量会一直向脉冲后沿漂移,使脉冲的不对称性加剧,如曲线 1 所示。当不考虑负色散光纤的三阶色散值时(曲线 2),即 $\beta_{32} = 0$,脉冲在负色散区传输时 $\langle T \rangle$ 会继续略微增大,这是由于脉冲在正色散光纤中的三阶色散导致脉冲不对称使得(9)式中的含 β_2 项的积分不

为零。曲线 4 是全补偿时的情况,即 $\beta_{32} = -\beta_{31}$,输出脉冲的 $\langle T \rangle$ 不为零,可见这种情况下的补偿效果并不能使脉冲恢复到对称脉冲,而是使脉冲中心又偏向前沿,这主要由于脉冲在两段光纤中传输时脉冲宽度不同所致。而曲线 3 是三阶色散部分补偿时的情况,即 $\beta_{32} = -2.3 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{m}$,最后输出脉冲的 $\langle T \rangle = 0$,很好地补偿了三阶色散的影响。图 6 是上述四种情况下相应的输出脉冲。可见,不补偿三阶色散时,脉冲后沿出现了一个很大的拖尾,且峰值向脉冲后沿漂移。当不考虑负色散光纤中的三阶色散时,脉冲前后沿均有一个小拖尾,但脉冲后沿的拖尾较明显。三阶色散部分补偿时,补偿效果最好。三阶色散全补偿时使脉冲的前沿的拖尾能量较大。

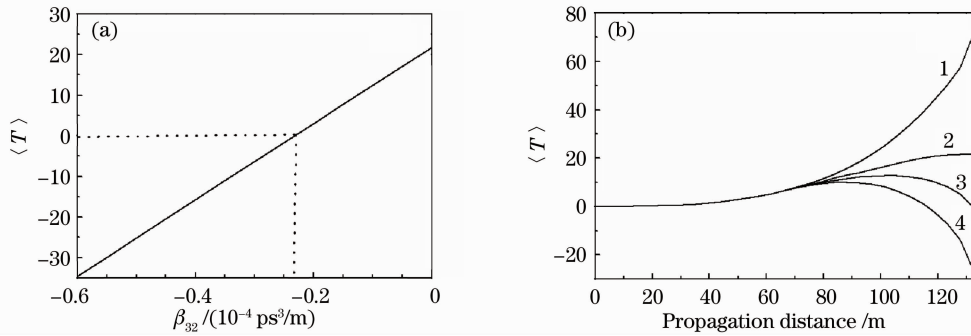


图 5 输出脉冲的 $\langle T \rangle$ 随不同 β_{32} 的变化及不同 β_{32} 时 $\langle T \rangle$ 在光纤链路中的演化

Fig. 5 Changes of $\langle T \rangle$ of output pulse with β_{32} and evolution of $\langle T \rangle$ in the fiber links with different β_{32}

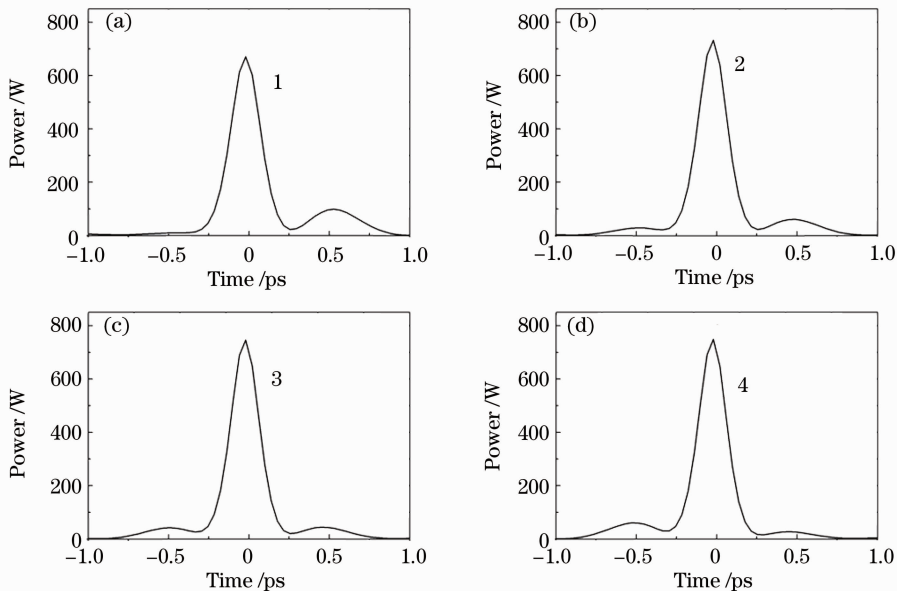


图 6 β_{32} 的四种不同取值时的输出的压缩脉冲

Fig. 6 Compressed pulses for four different values of β_{32}

3.5 脉冲序列压缩

从物理上讲,只有两个相邻脉冲足够靠近以致尾

部重叠时,才开始相互影响,所以对于参数和前面提及的高斯脉冲相同的一串脉冲序列,形式如下所示:

$$\Psi_r(0, T) = \dots + \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1+iC)(T-3q)^2/T_0^2] + \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1+iC)(T-q)^2/T_0^2] + \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1+iC)(T+q)^2/T_0^2] + \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1+iC)(T+3q)^2/T_0^2] + \dots, (12)$$

式中 $2q$ 为相邻两个脉冲之间的间隔, 只要 $2q \geq 4T_0$, 即保证相邻脉冲的尾部不重叠, 上述用于单脉冲压缩的光纤链路同样也适用脉冲序列的压缩。为此, 我们数值分析了此脉冲序列在上述二阶色散全补偿三阶色散部分补偿光纤链路中的整形及压缩过程, 其中脉冲间距为 10 ps ($2q=4T_0$), 即重复频率为 10 GHz 。图 7 从上到下依次是初始脉冲序列 (a), 在正色散光纤中整形得到的抛物线型脉冲序列 (b), 最后压缩得到的脉冲序列 (c)。整形后脉冲的 $K=0.0728$, 此值略高于前面单脉冲整形时的 K 值, 是因为考虑了三阶色散的影响。压缩脉冲的平均宽度为 216 ps , 平均压缩因子为 18.3 , 可见此光纤链路依然适用于多脉冲压缩, 不过最后得到的脉冲峰值功率略有起伏, 这是由于脉冲在正色散光纤中整形时, 脉冲略微展宽, 导致了脉冲之间的轻微相互作用。

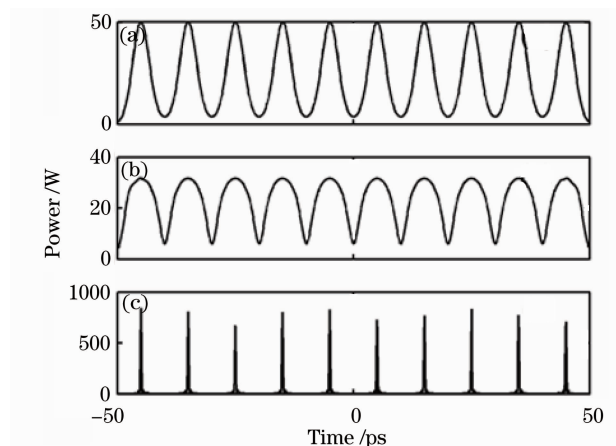


图 7 脉冲序列压缩

Fig. 7 Compression of pulse train

4 结 论

研究了一种基于两段光纤构成的光纤链路的脉冲压缩方法, 应用此方法可以得到高压缩比、高质量的脉冲, 且简单易行。因为抛物自相似脉冲较其他形状的脉冲有线性啁啾、抵御光波分裂, 两翼能量少等优点, 对其压缩易于得到高功率无旁瓣脉冲。首先采用一段正色散光纤将初始脉冲整形为抛物自相似脉冲, 此过程用一个只与脉冲形状有关的无量纲因子衡量整形效果, 然后该利用整形得到的抛物线型脉冲中心部分的线性啁啾在负色散光纤中对其压

缩得到了飞秒量级的脉冲, 并研究了初始啁啾对脉冲整形的影响以及三阶色散对脉冲压缩的影响。研究表明, 初始负啁啾会加快脉冲整形速度, 但初始正啁啾有利于展宽抛物线型脉冲啁啾的线性部分进而提高压缩脉冲的质量。另外, 采用三阶色散部分补偿方法可以有效削弱三阶色散作用的影响, 从而得到高质量脉冲。这种简单的光纤链路不仅适用于单脉冲压缩, 也适用于脉冲序列的压缩。

参 考 文 献

- 1 F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **21**(92): 213902~213904
- 2 P. A. Bélanger. On the profile of pulses generated by fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 8089~8096
- 3 Feng Jie, Xu Wencheng, Zhang Qiaofen *et al.*. Self-similar pulse evolution in optical fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(10): 26~36
冯 杰, 徐文成, 张巧芬 等. 光纤中自相似脉冲研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(10): 26~36
- 4 C. Finot, J. M. Dudley, B. Kibler *et al.*. Optical parabolic pulse generation and applications [J]. *J. Quant. Electron.*, 2009, **45**(11): 1482~1489
- 5 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. M. Dudley *et al.*. Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(24): 1753~1755
- 6 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Lin Honghua *et al.*. Self-similar propagation and amplification of high-power pulses in large mode area ytterbium doped fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2994~2999
许党朋, 王建军, 林宏矣 等. 高功率脉冲在大模场掺 Yb³⁺ 光纤中的自相似传输放大特性 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2994~2999
- 7 S. Boscolo, S. K. Turitsyn. All-optical nonlinear pulse processing based on normal dispersion fiber-enhanced nonlinear optical loop mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1912~1914
- 8 Xu Chenghou, Lei Ting, Zhu Hui *et al.*. The theoretical study and numerical simulation of self-similar transmission of high energy wave-breaking free ultra-short pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2769~2775
涂成厚, 雷霆, 朱 辉 等. 高能量无波分裂超短脉冲自相似传输的理论研究和数值模拟 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2769~2775
- 9 C. Fiont, L. Provost, P. Petropoulos *et al.*. Parabolic pulse generation through passive nonlinear pulse reshaping in a normally dispersive two segment fiber device [J]. *Opt. Express*, 2007, **17**(3): 852~864
- 10 M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26): 6010~6013
- 11 Feng Jie, Xun Wencheng, Liu Weici *et al.*. High order dispersion effect of Ginzburg-Landau equation and its self-similar analytical solutions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4978~4983
冯 杰, 徐文成, 刘伟慈 等. 高阶色散效应常系数 Ginzburg-

- Landau 方程自相似脉冲演化的解析分析[J]. 物理学报, 2008, **57**(8): 4978~4983
- 12 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(3): 461~469
- 13 P. Dupriez, C. Finot, A. Malinowski *et al.*. High-power, high repetition rate picosecond and femtosecond sources based on Yb-doped fiber amplification of VECSELS [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9611~9616
- 14 C. Billet, J. M. Dudley, N. Joly *et al.*. Intermediate asymptotic evolution and photonic bandgap fiber compression of optical similaritons around 1550 nm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3236~3241
- 15 J. W. Nicholson, A. D. Yablon, P. S. Westbrook *et al.*. High power, single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 3025~3034
- 16 C. Finot, G. Millot, S. Pitois *et al.*. Numerical and experimental study of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2004, **10**(5): 1211~1218
- 17 B. Kibler, C. Billet, P. Alacourt *et al.*. Parabolic pulse generation in comb-like profiled dispersion decreasing fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(17): 965~966
- 18 S. Zhang, G. Zhao, A. Luo *et al.*. Third-order dispersion role on parabolic pulse propagation in dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(2): 227~232
- 19 Feng Jie, Xu Wencheng, Li Shuxian *et al.*. Analytical self-similar solutions of Ginzburg-Landau equation for the dispersion decreasing fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5835~5842
- 冯杰, 徐文成, 李书贤等. 色散渐减光纤中 Ginzburg-Landau 方程的自相似脉冲演化的解析解[J]. 物理学报, 2007, **56**(10): 5835~5842
- 20 C. Finot, B. Barviau, G. Millot *et al.*. Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24): 15824~15835
- 21 C. Fiont. Dispersion managed self-similar parabolic pulses [J]. *Opt. A*, 2008, **10**(8): 1464~1471
- 22 Tu Chenhou, Li Zhen, Lei Ting *et al.*. Pulse evolution characteristics in self-similar mode-locked fibre laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(11): 3175~3178
- 23 Guo Ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 郭爱林, 杨庆伟, 张福领等. 啁啾脉冲的光谱整形[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 24 Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453
- 屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 449~453
- 25 Li Dongxue, Wang Ding, Chen Xiaowei *et al.*. Generation of high-energy few-cycle pulses compression through a hollow-core fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1939~1942
- 李冬雪, 王丁, 陈晓伟等. 基于空心光纤技术产生高能量周期量级脉冲压缩[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 1939~1942
- 26 Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin *et al.*. Preliminary laser-pulse-shaping experiment on technical integration line [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1051~1054
- 王文义, 赵润昌, 粟敬钦等. 神光-III原型装置初步的激光脉冲整形实验[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1051~1054