

doi: 10.3788/gzxb20164502.0206003

# 基于相移光纤光栅微分器超短光脉冲整形

董小伟, 郭盼, 刘文楷

(北方工业大学 电子信息工程学院, 北京 100144)

**摘 要:** 基于耦合模理论和传输矩阵法, 对相移光纤光栅的反射谱、相移特性进行了分析. 结果表明, 相移光纤光栅随着相移点个数的增加, 反射谱透射窗口数目增多, 相移发生多次跳变, 从而形成对信号的微分效应, 并且相移的微分阶数与所增加的相移点个数成正比. 设计出基于相移光纤光栅微分特性的脉冲整形器, 通过优化高斯信号各阶微分的加权系数, 将高斯型输入脉冲整形成近似方形或三角形状的输出脉冲, 通过调整光纤光栅第一段与第二段的长度比, 使输出三角脉冲形状的失真现象得到改善. 分析输入的高斯脉冲的脉宽发生  $\pm 5\%$  的波动时, 输出波形依然可以获得很好的三角和平顶方形脉冲效果, 从而证明了所设计的脉冲整形器的稳定性和实用性.

**关键词:** 光纤光学; 相移光纤光栅; 脉冲整形; 平顶方形脉冲; 三角脉冲

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0206003-6

## Ultrashort Optical Pulse Shaping Based on Phase-shifted Fiber Gratings Differentiators

DONG Xiao-wei, GUO Pan, LIU Wen-kai

(College of Electronic and Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** Based on the transfer matrix method and the couple-mode theory, the characteristics of reflective spectrum and phase shift of the phase-shifted fiber Bragg gratings were analyzed. The result showed that the transmission windows in the reflection spectrum increased and the phase jumped frequently with the increasing of the phase points, thus the differential effects on signals were generated. Besides, the phase differential orders were proportional to phase-shift points. On this basis, a pulse shaper was designed based on the characteristics of the differential phase shift grating. By optimizing the weighting factors for each order derivative of the Gaussian input pulse, the output pulse can be formed the shapes of rectangular and triangular. By changing the length ratio of the first section optical fiber grating and the second section, the distorting phenomenon of the triangular output pulse was improved. Finally, changing the Gaussian input pulse width by  $\pm 5\%$ , the output waveform were synthesized as rectangular pulse and triangular pulse. Thus the stability and practicality of the pulse shaping system were verified.

**Key words:** Fiber optics; Phase-shifted fiber grating; Pulse shaping; Rectangular pulse; Triangular pulse

**OCIS Codes:** 060.3735; 050.5080; 320.5390; 320.5540

## 0 引言

超短光脉冲具有极短宽度、极高强度、极宽光谱带宽等特点, 在高速全光开关和非线性光纤光学等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>. 光通信系统中对光脉冲的宽

度、重复率以及形状有特定要求. 脉冲整形技术是获得超短脉冲的一个重要方法, 通过改变脉冲参量幅度、频率或相位来实现整形<sup>[3]</sup>. 从而产生所需的任意光波脉冲, 目前该技术已经被广泛应用于分子动力学、非线性光谱学、高速光通信、量子运算等领域<sup>[4-6]</sup>.

**基金项目:** 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划 (No. CIT&TCD201304001) 和北方工业大学科研人才提升计划项目 (No. CCXZ201307) 资助

**第一作者:** 董小伟 (1978-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信及光电子器件. Email: way7803@163.com

**通讯作者:** 郭盼 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信及光电子器件. Email: gydvictory@163.com

**收稿日期:** 2015-08-16; **录用日期:** 2015-12-14

<http://www.photon.ac.cn>

光脉冲整形技术常用的是 4f 系统<sup>[7]</sup>, 主要由一对衍射光栅、透镜和整形掩膜板组成, 这种结构可以实现上百甚至上千条谱线处理, 但掩膜板制作复杂且成本高. 研究发现, 波导器件稳定性好且易于集成, 能更好地实现脉冲整形, 因此基于马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉仪<sup>[8]</sup>、阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG)<sup>[9]</sup>、法布里-珀罗 (Fabry-Perot Interferometer, F-P) 干涉仪<sup>[10]</sup>等器件的脉冲整形技术被提出, 如基于 M-Z 干涉仪设计出脉冲整形系统, 通过改变输入脉冲幅度得到平顶方形脉冲和三角形脉冲<sup>[11]</sup>, 但这类光学器件与光纤耦合性差且损耗高. 光纤光栅能够克服上述缺点并且易于耦合, DAVID 等<sup>[12]</sup>利用长周期光纤光栅实现了输出脉冲达到飞秒级别, 将输入为双曲型信号整形成抛物型信号, 但不能实现其他输出类型信号的合成. 张爱玲等<sup>[13]</sup>利用双阵列光纤布喇格光栅, 对高斯脉冲序列实现了相位独立可调的任意光脉冲整形, 但每个光纤光栅器件的中心波长不相同, 设备相对比较复杂.

本文以相移光纤光栅为研究对象, 结合耦合模理论和传输矩阵法, 对加入相移点的光纤光栅的反射谱特性进行分析, 利用相移光纤光栅构造脉冲整形系统, 通过优化系统中加权系数, 能实现任意输出波形的信号, 并且大大降低了设备复杂性.

## 1 理论分析

根据信号处理理论, 任意信号可以由一系列正交信号加权合成, Hermite 信号具有相互正交性, 可以由高斯信号的各阶导数加权构成<sup>[14-15]</sup>, 表示为

$$a(t) = \sum_{i=1}^{\infty} p_i \Psi_i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} p_i (-1)^i \frac{\partial^i (e^{-t^2})}{\partial t^i} \approx \sum_{i=1}^n q_i \frac{\partial^i (e^{-t^2})}{\partial t^i} \quad (1)$$

式(1)中,  $\Psi_i(t)$  为 Hermite 多项式,  $e^{-t^2}$  为高斯信号,  $q_i$  ( $i=1 \cdots n$ ) 为加权系数,  $a(t)$  为合成后的信号. 输入高斯信号经微分器加权后的输出脉冲结构模型如图 1.

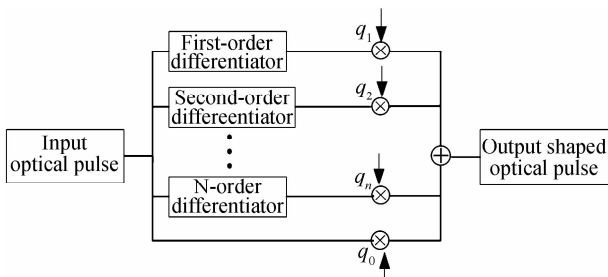


图 1 脉冲整形器结构模型

Fig. 1 Structure of the proposed pulse shaping technique

各阶微分器用相移光纤光栅来实现. 相移光纤光栅即在均匀的光纤光栅间插入  $n$  个相移点, 把光纤光栅分成  $n+1$  个子区, 结构如图 2. 其中光纤光栅有效折

射率为  $n_{\text{eff}}$ , 光纤光栅调制周期为  $\Lambda$ ,  $L$  为光纤光栅总长度,  $L_i$  为子区间的长度,  $\varphi_i$  ( $i=1, 2 \cdots n$ ) 为每段插入的相移.

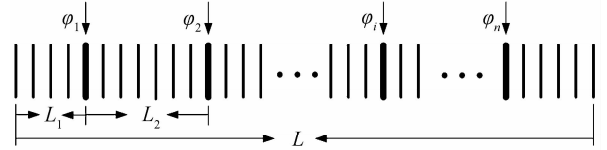


图 2 相移光纤光栅结构

Fig. 2 Structure of phase-shifted fiber Bragg grating

由传输矩阵法得到相移光纤光栅的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_1 \cdot \Phi_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \Phi_2 \cdots \mathbf{T}_i \cdot \Phi_i \begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中,  $\Phi_i = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_i/2} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_i/2} \end{bmatrix}$  为相位传输矩阵,  $\mathbf{T}_i =$

$$\begin{bmatrix} T_{11}(L_i) & T_{12}(L_i) \\ T_{21}(L_i) & T_{22}(L_i) \end{bmatrix}$$

为第  $i$  段光纤光栅的传输矩阵,

$\mathbf{T}_i$  可以利用耦合模理论得到<sup>[16-17]</sup>

$$\mathbf{T}_{11}(L_i) = \mathbf{T}_{22}(L_i)^* =$$

$$\left[ \cosh(\gamma L_i) + j \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \right] \exp \left[ -j \left( \frac{\pi}{\Lambda} \right) L_i \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{12}(L_i) = \mathbf{T}_{21}(L_i)^* = j \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \exp \left[ -j \left( \frac{\pi}{\Lambda} \right) L_i \right] \quad (4)$$

式中,  $\kappa = (\pi/\lambda) \Delta n_{\text{eff}}$  为光纤光栅耦合系数,  $\sigma = \beta - \pi/\Lambda \approx (n_{\text{eff}}/c)(\omega - \omega_0)$  是光纤光栅模式之间的失谐量,  $\gamma = (\kappa^2 - \sigma^2)^{1/2}$ . 利用光纤光栅输入输出端边界条件  $E_A(0) = 1, E_B(L) = 0$ , 结合式(2)~(4)可得相移光纤光栅反射率,  $|r|$  是相移光纤光栅反射谱的幅度,  $\varphi_r$  为相位, 如式(5).

$$r = -\frac{\mathbf{T}_{21}}{\mathbf{T}_{22}} = |r| \exp(j\varphi_r) \quad (5)$$

在均匀光纤光栅中间插入一个相移点, 当  $\sigma \rightarrow 0$ , 即  $\omega \rightarrow \omega_0$  时, 由耦合模理论和传输矩阵法可以得到一阶相移光纤光栅的反射谱  $r$ , 如式(6), 其中  $F_1$  是系数.

$$r = -\frac{\mathbf{T}_{21}}{\mathbf{T}_{22}} = \frac{2\kappa \sinh^2(\gamma L)}{\kappa^2 \sinh^2(\gamma L) - \gamma^2 \cosh^2(\gamma L)} \sigma + O(\sigma^2) \approx F_1 \cdot (\omega - \omega_0) \quad (6)$$

在均匀光纤光栅中间插入两个相移点, 当  $\sigma \rightarrow 0, \omega \rightarrow \omega_0$  并且  $L_2/L_1 = 2$  时, 可以得到二阶相移光纤光栅的反射谱  $r, F_2$  是系数, 如式(7).

$$r = 4j \frac{\sinh^2(\kappa L_1) \sinh(2\kappa L_1)}{\kappa^2 \cosh^2(2\kappa L_1)} \sigma^2 + O(\sigma^3) \approx F_2 \cdot (\omega - \omega_0)^2 \quad (7)$$

在信号处理理论中, 时域内  $\partial^N e(t)/\partial t^N$  对应频域内的  $[j(\omega - \omega_0)]^N E(\omega - \omega_0)$ , 其中  $\omega$  是光波频率,  $\omega_0$  是载波频率, 可知光纤光栅中心位置插入一个相移点时, 相移光纤光栅具有一阶微分特性, 在光纤光栅中对称插入两个相移点时, 相移光纤光栅具有二阶微分特

性.同理当在均匀光纤光栅中插入  $N$  个相移点时,当  $\sigma \rightarrow 0$  时,  $r = -\frac{T_{21}}{T_{22}} \approx F_n \cdot (\omega - \omega_0)^n$ ,  $F_n$  为系数<sup>[18]</sup>,可以看出  $N$  阶相移光纤光栅等价于线性滤波器  $H(\omega - \omega_0) = [j(\omega - \omega_0)]^N$ <sup>[19]</sup>,具有  $N$  阶微分特性.

## 2 分析与讨论

光纤光栅的有效折射  $n_{\text{eff}} = 1.46$ , 调制周期  $\Lambda = 532 \text{ nm}$ , 调制深度  $\Delta n_{\text{eff}} = 4.5 \times 10^{-4}$ , 长度  $L = 6 \text{ mm}$ . 在均匀光纤光栅中分别插入 1、2、3 个相移点, 得到的反

射谱以及相移特性如图 3, 图 3(a) 表示不插入相移点, 图 3(b) 是在  $L/2$  处插入一个  $\varphi = \pi$  的相移点, 图 3(c) 中, 在  $L/3$  和  $2L/3$  处插入两个  $\varphi = \pi$  的相移点, 图 3(d) 中在  $L/4$ 、 $L/2$  以及  $3L/4$  处插入三个  $\varphi = \pi$  的相移点. 从图 3 中可以看出, 光纤光栅中不插入相移点时, 光纤光栅反射谱幅度关于中心波长对称, 相位不发生跳变. 加入一个相移点, 改变光谱的分布, 能够在反射谱中打开线宽极窄的一个透射窗口. 随着加入相移点数的增加, 反射谱宽度逐渐增大并且透射窗口数目相

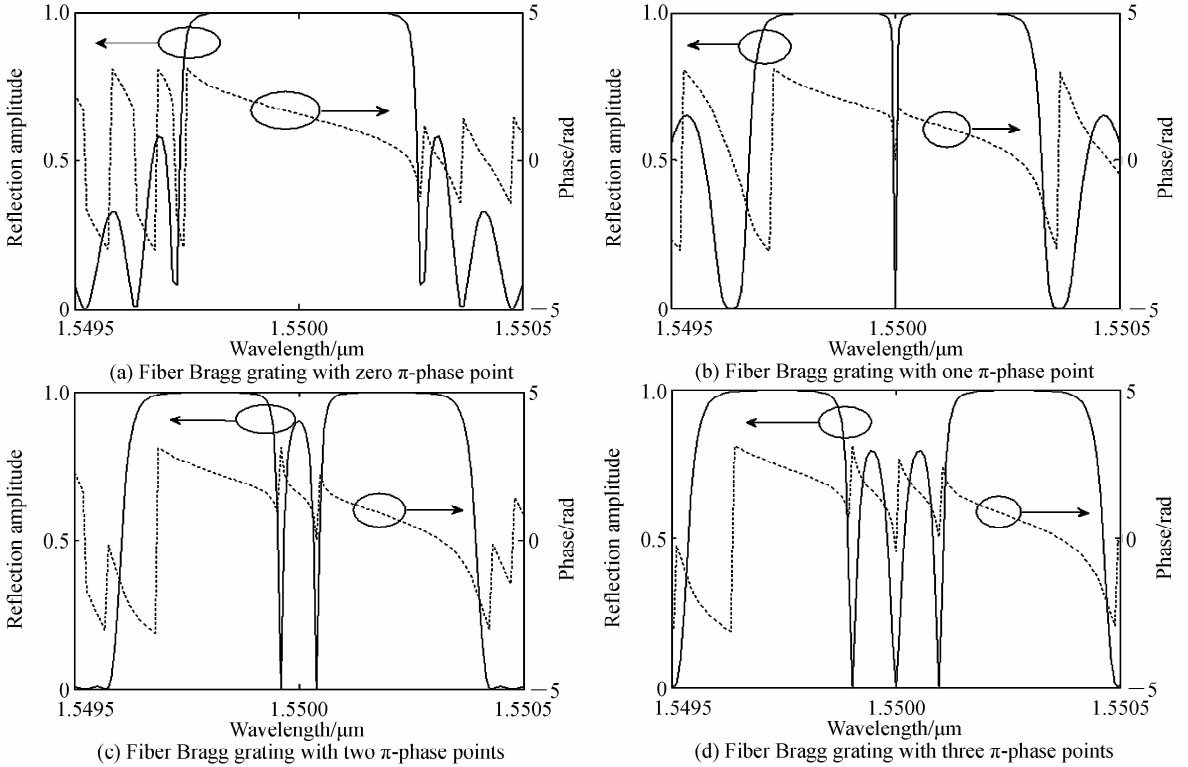


图 3 相移光纤光栅的反射特性(实线)和相移特性(虚线)

Fig. 3 Spectral responses of reflection amplitude (solid line) and phase angle (dotted line)

应增加. 另外相移点的插入引起光纤光栅相位的跳变, 相位跳变表明相移光纤光栅的微分特性, 并且相位跳变次数与光纤光栅插入相移点个数对应.

全光信号处理对于未来实现高速全光网络具有十分重要的作用, 利用相移光纤光栅的微分特性, 在时域上对光脉冲进行微分, 在此基础上设计出基于相移光纤光栅微分器的脉冲整形系统. 整形系统中, 其中一阶微分器是由相移点在光纤光栅中心、长度  $L = 2 \text{ mm}$  的光纤光栅构成; 二阶微分器是由相移点在  $L/4$  和  $3L/4$  处, 长度  $L = 4 \text{ mm}$  的光纤光栅构成; 三阶微分器是由相移点在  $L/6$ 、 $L/2$  以及  $5L/6$  处, 长度  $L = 6 \text{ mm}$  的光纤光栅构成; 四阶微分器是由相移点在  $L/8$ 、 $3L/8$ 、 $5L/8$ 、 $7L/8$  处, 长度  $L = 8 \text{ mm}$  的光纤光栅构成. 输出脉冲的形状由输入脉冲宽度、各阶微分器加权系数以及微分器阶数决定. 由于高斯脉冲是激光器输出脉冲的主

要波形, 因此输入信号  $a_0(t)$  采用半高全宽(Full-width-half-maximum, FWHM)为  $100 \text{ ps}$  的高斯信号  $\exp(-t^2/\tau^2)$ , 其中  $\tau = \sqrt{2} \times 10^{-10} \text{ s}$ ,  $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 、 $a_3(t)$ 、 $a_4(t)$  分别为经过 1、2、3、4 阶微分器后的输出脉冲. 从图 4 可以看出, 经过一阶微分器的输出脉冲与经过三阶微分器后的输出脉冲波形相似, 并且都表现出倍频特性. 经过二阶微分器的输出脉冲与经过四阶微分器的输出脉冲产生两个旁瓣, 并且二阶微分器反射谱零点向两侧延伸, 经过四阶微分器后输出脉冲的旁瓣幅度比经过二阶微分器输出脉冲的旁瓣幅度要高. 根据信号加权理论, 通过优化加权系数可以合成特定形状的输出脉冲. 如式(8),  $k_0$  为输入脉冲的加权系数,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  分别为对应微分器输出脉冲的加权系数,  $a(t)$  是脉冲整形系统输出脉冲.

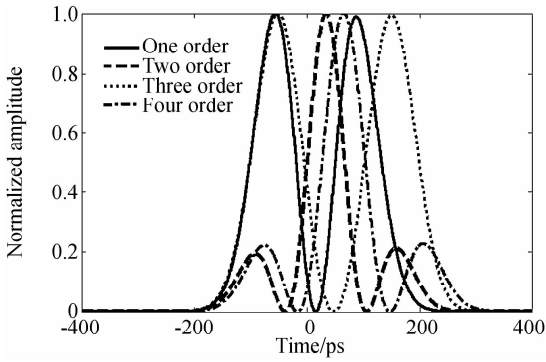


图4 输入半高全宽为 100 ps 的高斯脉冲经过 1、2、3、4 阶微分器后的输出脉冲

Fig. 4 SAmpitude temporal profiles of the output waveform from the FBG based first to fourth-order differentiator assuming an input full-width-half-maximum 100-ps Gaussian optical pulse

$$a(t) = k_0 \cdot a_0(t) + k_1 \cdot a_1(t) + k_2 \cdot a_2(t) + k_3 \cdot a_3(t) + k_4 \cdot a_4(t) \quad (8)$$

实际应用中不仅要求产生超短光学脉冲,而且对超短脉冲的形状也有特定要求. 方形脉冲与未整形的高斯脉冲相比具有更好的开关特性,因此被广泛应用于光纤非线性耦合器的光开关实验中<sup>[20-21]</sup>. 图5(a)为高斯脉冲经过设计的脉冲整形器后合成的近似平顶方形脉冲,输出脉冲对称,但是脉宽较输入信号光谱展宽. 优化后的具体参数,如表 1 中 Rectangular(a). 虽然利用 1、2、3、4 阶微分器可以得到平顶幅度较宽的方形脉冲,但微分器阶数越高,制作工艺越复杂,不利于实

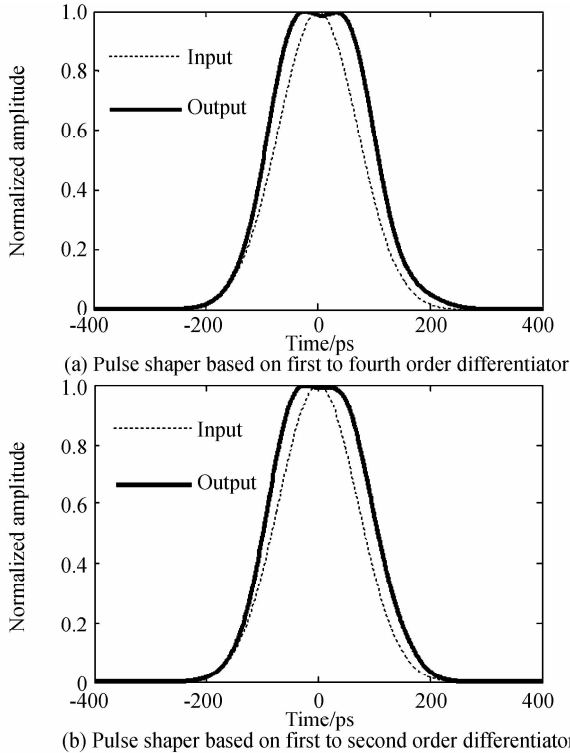


图5 整形后的平顶脉冲

Fig. 5 Rectangular pulse waveform from the pulse shaper

表 1 输出脉冲对应的各阶微分器的加权系数  
The weight coefficient corresponds to each order differentiator

Output	Weighting coefficient $k_i (i=0,1,2,3,4)$
Rectangular(a)	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 = [5, 1.2, 0.5, 0, 0.5]$
Rectangular (b)	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 = [2.8, 0.8, 0.5, 0, 0]$
Triangular(a)	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 = [0.1, 0, 0.5, 0.1, 0]$
Triangular(b)	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 = [0.1, 0.4, 0.8, 0.4, 0]$

际应用. 仅用 1 和 2 阶微分器,保证其他参数不变,通过优化加权系数,也可以得到平顶方形脉冲,如图 5 (b),脉冲宽度较图 5(a)变窄,但设备的复杂度大大降低,优化的加权系数如表 1 中 Rectangular(b).

另外,三角光脉冲在时域范围内具有前后沿恒定变化,以及基于自适应相位调制的波长转换器增强的特性,使其在全光信息处理领域获得了广泛应用<sup>[22]</sup>. 由于三角脉冲在时域范围内具有上升沿与下降沿强度线性变化的特性,较其它脉冲,更难制作. 光纤光栅第一段与第二段的长度比  $d$  以及各阶微分器的加权系数是保证得到理想输出信号的关键参量,因此通过调整长度比  $d$  以及优化各阶微分器的加权系数设计脉冲整形器,从而实现三角脉冲输出. 当调整  $d$  的值为 2.3,整形器合成的输出脉冲近似为三角脉冲,虽然脉冲宽度与输入高斯脉冲相比变窄,边沿更陡峭,但右侧有边

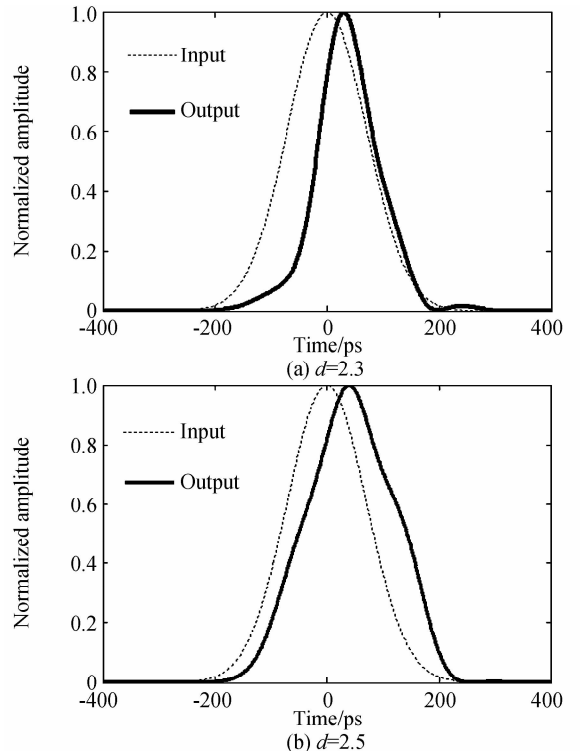


图6 脉冲整形器合成的三角脉冲

Fig. 6 Triangle pulse waveform from the pulse shaper

瓣,如图6(a).调节 $d$ 的值为2.5时,优化加权系数,输出脉冲如图6(b),输出脉冲效果得到改善,输出的脉冲宽度都近似和输入脉冲的宽度一致,具体参数如表1中Triangular(a)和Triangular(b).

另外输入信号的脉宽也是影响所整形后脉冲信号质量的一个关键因素,在保持各阶微分器加权系数不变的情况下(其中各阶微分器加权系数见表1中Rectangular(b)和Triangular(b)),如果光源输出的高斯脉冲的脉宽发生波动且为 $\pm 5\%$ 时,即输入高斯信号的半高全宽为105 ps和95 ps时,整形系统所合成的波形如图7,其中图7(a)是整形后为平顶方形脉冲,图7(b)是整形后为三角形脉冲.结果表明,即使输入的高斯脉冲的脉宽发生 $\pm 5\%$ 的波动,输出波形依然可以获得很好的三角和平顶方形脉冲效果,整形出的脉冲形状与输入信号半高全宽为100 ps的高斯脉冲所整形出的信号形状基本一致,表明了所设计的脉冲整形系统对输入脉冲的抖动也具有很好的稳定性.

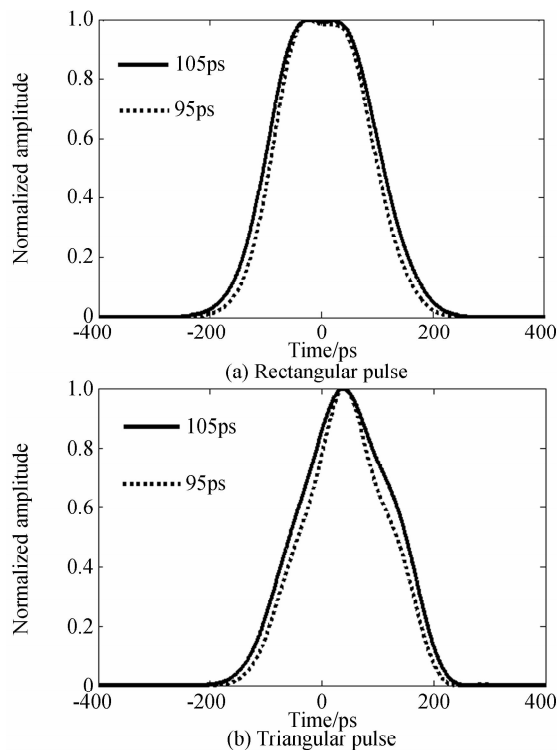


图7 输入信号脉宽对脉冲整形系统效果影响  
Fig. 7 Influence of input pulse width on the pulse shaping system

### 3 结论

基于耦合模理论和传输矩阵法,在光纤光栅中插入相移,结合反射谱特性,证明了相移光栅具有微分特性,在此基础上设计出1、2、3、4阶微分器,从而构造出脉冲整形系统.结果表明,通过优化各阶微分器的加权系数,降低设备复杂度,用1、2阶微分器可以实现合成平顶方形脉冲.调节相移光纤光栅第一段和第二段的

长度比 $d$ 值为2.5时,可以改善合成三角脉冲的边瓣现象.最后改变系统中输入高斯信号脉宽为95 ps和105 ps时,验证了该脉冲整形系统的稳定性和实用性.所设计的基于相移光纤光栅脉冲整形系统与光纤耦合性强,能更好地适用于光通信系统中;另外,通过增加高阶微分器,可以合成所需要的任何脉冲,优化所对应的微分器加权系数,可以将合成脉冲的性能改善.

#### 参考文献

- [1] 李淳飞. 非线性光学[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [2] FRANCESCA P, PERIKLIS P, MORTEN I, *et al.* All-optical pulse reshaping and retiming systems incorporating pulse shaping fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(1): 357.
- [3] LIU Qiong, YE Qing, CAI Hai-wen, *et al.* Progress of pulse shaping technology using optical fiber devices [J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120603. 刘琼, 叶青, 蔡海文, 等. 基于光纤器件的脉冲整形技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120603.
- [4] IGOR A S, SERGII O I, OLEKSIY V S, *et al.* Femtosecond parabolic pulse shaping in normally dispersive optical fibers [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 17769-17785.
- [5] YAO Yun-hua, LU Chen-hui, XUE Shu-wu, *et al.* Femtosecond pulse shaping technology and its applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(18): 184201. 姚云华, 卢晨晖, 徐淑武, 等. 飞秒激光脉冲整形技术及其应用[J]. *物理学报*, 2014, **63**(18): 184201.
- [6] LI Hong-pu, CHEN Xu-xing. Energy-efficient optical pulse multiplication and shaping based on a triply sampled filter utilizing a fiber bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(10): 2167-2176.
- [7] WEINER A M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(15): 3669-3692.
- [8] LOU Ai-ping, LUO Zhi-chao, XU Wen-cheng, *et al.* Wavelength switchable flat-top all-fiber comb filter based on a double-loop Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 6056-6063.
- [9] DOU Yu-jie, ZHANG Hong-ming, YAO Min-yu. Multi-wavelength pulse generation using flattop optical frequency comb and arrayed waveguide grating [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(12): 123201-123201.
- [10] YE Qing, QU Rong-hui, FANG Zu-jie. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(1): 8-10.
- [11] ASGHARI M H, AZANA J. Proposal and analysis of a reconfigurable pulse shaping technique based on multi-arm optical differentiators[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(18): 4581 - 4588.
- [12] DAVID K, RADAN S, YONGWOO P, *et al.* Nonlinear pulse compression of picosecond parabolic-like pulses synthesized with a long period fiber grating filter[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7074-7087.
- [13] ZHANG Ai-ling, LI Chang-xiu. Dynamic optical arbitrary waveform generation with amplitude controlled by interference of two FBG arrays[J]. *Optical Express*, 2012, **20**(21): 23074-23081.
- [14] MADSEN C K, ZHAO J H. Optical filter design and analysis: a signal processing approach[M]. John Wiley & Sons, New York, 1999.

- [15] SILVA H J D, O'REILLY J J. Optical pulse modeling with Hermite - Gaussian functions[J]. *Optics Letters*, 1989, **14**(10): 526-528.
- [16] XIE Hai-he, LIN Zhen-heng, YAN Huang-ping, *et al.* Fiber bragg grating analyzed by transfer matrix theory of membrane layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1106003.  
谢海鹤, 林振衡, 颜黄苹, 等. 膜层传输矩阵理论在布拉格光纤光栅分析中的应用[J]. 光子学报, 2015, **44**(11): 1106003.
- [17] TURAN E. Fiber Grating Spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277-1294.
- [18] MYKOLA K, JOSE A. Design of high-order all-optical temporal differentiators based on multiple-phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(10): 6156-6166.
- [19] AZAA J. Ultrafast analog all-optical signal processors based on fiber-grating devices[J]. *Photonics Journal IEEE*. 2010, **2**(3): 359-386.
- [20] PARK Y, KULISHOV M, SLAVYK R. Picosecond and sub-picosecond flat-top pulse generation using uniform long-period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26): 12670-12678.
- [21] CHEN Jin-hua, FANG Xiao-hui, DING Zhi-qun, *et al.* Flat-top pulse generation with pulse width tunable based on polarization controller in fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0506006.  
陈金华, 方晓惠, 丁志群, 等. 光纤激光器中基于偏振控制器的脉宽可调平顶光脉冲生成技术[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0506006.
- [22] ZHANG Yan, PEI Li, WANG Yi-qun, *et al.* Optimization of optical triangular pulses generator based on chirped fiber Bragg grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **4**(44): 1307-1309.  
张岩, 裴丽, 王一群, 等. 基于啁啾 FBG 的三角形光脉冲发生器的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, **4**(44): 1307-1309.