

基于马赫-曾德尔干涉仪的超短光脉冲合成系统

董小伟¹, 许梦真^{1*}, 刘文楷²

¹北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144;

²北方工业大学计算机学院, 北京 100144

摘要 基于传输矩阵法对马赫-曾德尔干涉仪的输出特性进行分析, 结果表明, 当干涉臂臂长差为中心波长与有效折射率比值的整数倍时, 马赫-曾德尔干涉仪具有微分特性, 且微分阶数与级联的干涉仪数目成正比。根据信号系统理论知识, 利用马赫-曾德尔干涉仪的微分特性, 设计出基于马赫-曾德尔干涉仪的超短光脉冲合成系统, 并通过调节输入高斯脉冲及其各阶微分的加权系数, 将输入的高斯脉冲分别合成为平顶脉冲、三角脉冲以及抛物线型脉冲。改变高斯脉冲各阶微分加权系数与输入脉冲宽度发现, 输出脉冲波形基本保持不变, 系统的稳定性良好。

关键词 光通信; 马赫-曾德尔干涉仪; 超短光脉冲; 微分器

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1206002

Ultrashort Optical Pulse Synthesis System Based on Mach-Zehnder Interferometer

Dong Xiaowei¹, Xu Mengzhen¹, Liu Wenkai²

¹College of Electronic and Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

²College of Computer Science, North China University of Technology, Beijing 100144, China

Abstract Based on transfer matrix method, the output characteristics of Mach-Zehnder interferometer are analyzed. Results show that Mach-Zehnder interferometer has differential characteristics when difference of two interference arms' length is an integer multiple of the ratio of the center wavelength to the effective refractive index, and the differential order is proportional to the number of cascaded interferometers. Based on signal system theory and the differential characteristic of Mach-Zehnder interferometer, the ultrashort optical pulse synthesis system based on Mach-Zehnder interferometer is designed. By adjustment of the weighting coefficients of input Gaussian pulse and its differential order, input Gaussian pulses are synthesized into flattened pulse, triangular pulse and parabolic pulse, respectively. When the weighting coefficients and input width of Gaussian pulse are changed, the output pulse waveform is basically invariable, which proves the system has good stability.

Key words optical communications; Mach-Zehnder interferometer; ultrashort optical pulse; differentiator

OCIS codes 060.233; 230.1150; 200.3050

1 引言

随着超短光脉冲技术的不断发展, 时域超短光脉冲的精确合成和控制技术变得越来越重要, 时域光脉冲合成技术广泛应用于如高速光通信^[1]、非线性光学^[2]、相干量子控制^[3]的许多领域。如在非线性光开关和波长转换应用需要皮秒级的平顶光脉冲, 在超连续谱生成实验中需要用皮秒级的抛物线形脉冲实现自相位调制 (SPM)。

目前已经提出多种不同的超短光脉冲任意波形合成方法, 常用的是基于 4f 系统的合成方法^[4], 该系统可实现飞秒级的超短光脉冲合成, 在此基础上又发展出基于平行相位调制算法搭建的 4f 飞秒激光脉冲整形

收稿日期: 2017-05-31; 收到修改稿日期: 2017-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61007007)、北方工业大学长城学者后备计划(CCXZ2013007)

作者简介: 董小伟(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信及光电子器件方面的研究。E-mail: way7803@163.com

* 通信联系人。E-mail: xthinking@126.com

系统^[5],但是 4f 系统制作复杂并且成本较高^[6]。近几年来,基于各类光纤光栅的超短光脉冲合成方法发展比较成熟,如 Radan、Park 等^[7-8]利用长周期光纤光栅实现皮秒、亚皮秒级别的平顶超短光脉冲,张爱玲等^[9]利用双阵列光纤布拉格光栅实现相位独立可调的超短光脉冲的波形合成,但是基于光纤光栅的方法一般会用到光学频率梳,不利于集成化。另外,还有基于波导的光脉冲合成系统,如利用阵列波导光栅路由器得到奈奎斯特脉冲^[10]。

马赫-曾德尔干涉仪(MZI)是重要的光学器件,制作工艺成熟,且制作精度达到纳米级^[11],便于向小型化和集成化方向发展,能更好地应用于光通信中。本文以马赫-曾德尔干涉仪为研究对象,基于传输矩阵法分析 MZI 的幅度相移特性,利用马赫-曾德尔干涉仪来合成不同形状的超短光脉冲。

2 理论分析

根据信号系统理论,在时域上,任意波形的信号都可以通过一系列相互正交的信号和相应加权系数乘积的相互叠加得到,高斯信号及其各阶微分加权叠加可以得到具有正交性的 Hermite 信号,即

$$a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n H_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n b_n \frac{\partial^n [\exp(-t^2/\tau^2)]}{\partial t^n} = \sum_{n=1}^{\infty} k_n \frac{\partial^n [\exp(-t^2/\tau^2)]}{\partial t^n} \approx \sum_{n=1}^M k_n \frac{\partial^n [\exp(-t^2/\tau^2)]}{\partial t^n}, \quad (1)$$

式中 $a(t)$ 为合成后的脉冲, $H_n(t)$ 为 Hermite 信号, p_n 为 Hermite 信号的加权系数, $\exp(-t^2/\tau^2)$ 为高斯信号,其半峰全宽 $\omega_{1/2} = \sqrt{2 \ln 2} \cdot \tau$, b_n 为得到 Hermite 信号所需高斯信号各阶微分的系数, k_n 为合成任意波形信号所需高斯脉冲各阶微分的加权系数。故可以通过加权叠加给定的高斯脉冲本身及其各阶微分得到任意形状的超短光脉冲^[12-13]。

本文通过马赫-曾德尔干涉仪构造微分器,为降低系统复杂度,仅采用 1 阶、2 阶微分,超短光脉冲合成系统结构模型如图 1 所示。图中: VA_0 、 VA_1 、 VA_2 为可变衰减器,分别调节相应各阶微分系数; E_{1i} 、 E_{2i} 为第 i 个干涉仪的输入端, E_{3i} 、 E_{4i} 为第 i 个干涉仪的输出端; C_{1i} 、 C_{2i} 为第 i 个干涉仪的单模光纤耦合器; L_{1i} 、 L_{2i} 为第 i 个干涉仪的两干涉臂,其中 $i=1,2$ 。

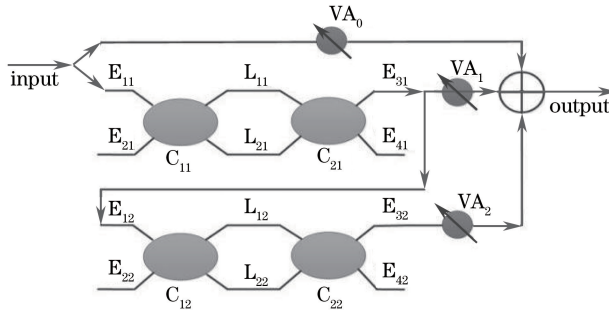


图 1 超短光脉冲合成系统结构模型

Fig. 1 Structure of ultrashort optical pulse synthesis system

由传输矩阵法可知,单级马赫-曾德尔干涉仪的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_{3i} \\ E_{4i} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{2i} \times \mathbf{M}_i \times \mathbf{T}_{1i} \times \begin{bmatrix} E_{1i} \\ E_{2i} \end{bmatrix}, \quad i=1,2, \quad (2)$$

式中 E_{1i} 、 E_{2i} 为第 i 个干涉仪的输入端光场, E_{3i} 、 E_{4i} 为第 i 个干涉仪的输出端光场; $\mathbf{T}_{ji} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_{ji}z_{ji}) & -j\sin(\kappa_{ji}z_{ji}) \\ -j\sin(\kappa_{ji}z_{ji}) & \cos(\kappa_{ji}z_{ji}) \end{bmatrix}$ 为光纤耦合器的散射矩阵,其中 κ_{ji} 是第 i 个干涉仪第 j 个耦合器的耦合系数, z_{ji} 为其有效耦合长度; $\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\varphi) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$ 为马赫-曾德尔干涉仪干涉臂的传输矩阵, $\Delta\varphi = 2\pi n_{\text{eff}} \Delta L / \lambda$ 为光信号传输过程中由干涉仪两臂产生的相位延迟,其中 λ 为光波波长, n_{eff} 为有效折射率, $\Delta L_i = |L_{1i} - L_{2i}|$ 为第 i 个干涉仪干涉臂臂长差, L_{ji} 为第 i 个干涉仪第 j 干涉臂臂长。采用 3 dB 耦合器,令 $E_{11} =$

1, $E_{2i} = 0$, 且当干涉臂臂长差 $\Delta L = N\lambda_0/n_{\text{eff}}$ (N 为整数) 时, 则

$$E_{31} = \frac{1}{2} [\exp(j\Delta\varphi) - 1] = \frac{1}{2} [\cos(\Delta\varphi) + j\sin(\Delta\varphi) - 1]. \quad (3)$$

当 λ 趋近于 λ_0 , ω 趋近于 ω_0 时, λ 为光波波长, λ_0 为载波波长, ω 为光波频率, ω_0 为载波频率, 根据泰勒公式可得

$$E_{31} = \frac{1}{2} [\cos(\Delta\varphi) + j\sin(\Delta\varphi) - 1] = \frac{j\pi n}{\omega_0} (\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] \approx F_1(\omega - \omega_0). \quad (4)$$

当将第 1 个马赫-曾德尔干涉仪 E_{31} 端口的输出作为第 2 个马赫-曾德尔干涉仪的输入时, 得到第 2 个马赫-曾德尔干涉仪 E_{32} 端口输出光场为

$$E_{32} = \frac{1}{4} [\exp(j\Delta\varphi) - 1]^2 = \frac{1}{4} [\cos(\Delta\varphi) + j\sin(\Delta\varphi) - 1]^2 = -\frac{\pi^2 n^2}{\omega_0^2} (\omega - \omega_0)^2 + O(\omega - \omega_0)^3 \approx F_2(\omega - \omega_0)^2. \quad (5)$$

由信号系统理论可知, 时域任意信号 $e(t)$ 的 n 阶微分 $\partial^n e(t)/\partial t^n$ 在频域具有 $[j(\omega - \omega_0)]^n E(\omega - \omega_0)$ 的形式, 其中 $E(\omega - \omega_0)$ 为 $e(t)$ 的傅里叶变换。当干涉臂臂长差 $\Delta L = N\lambda_0/n_{\text{eff}}$ (N 为整数) 时, 单级马赫-曾德尔干涉仪具有 1 阶微分特性, 串联 2 个马赫-曾德尔干涉仪具有 2 阶微分特性, 当串联 n 个马赫-曾德尔干涉仪时会有 n 阶微分特性, 故可以利用马赫-曾德尔干涉仪构成微分器。

3 分析与讨论

通过连接不同数量的马赫-曾德尔干涉仪可以构造相应各阶微分器, 实现对输入脉冲的微分。令马赫-曾德尔干涉仪的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.46$, $N = 1000$, 以高斯脉冲 $A_{\text{in}}(t) = \exp(-t^2/\tau^2)$ 为输入信号, 其中 $A_{\text{in}}(t)$ 为随时间变化的高斯脉冲幅度。不同半峰全宽 $\omega_{1/2}$ 的高斯脉冲经过基于马赫-曾德尔的 1、2、3 阶微分器后的输出脉冲(虚线)与经过 1、2、3 阶数学微分的理想输出脉冲(实线), 如图 2 所示。

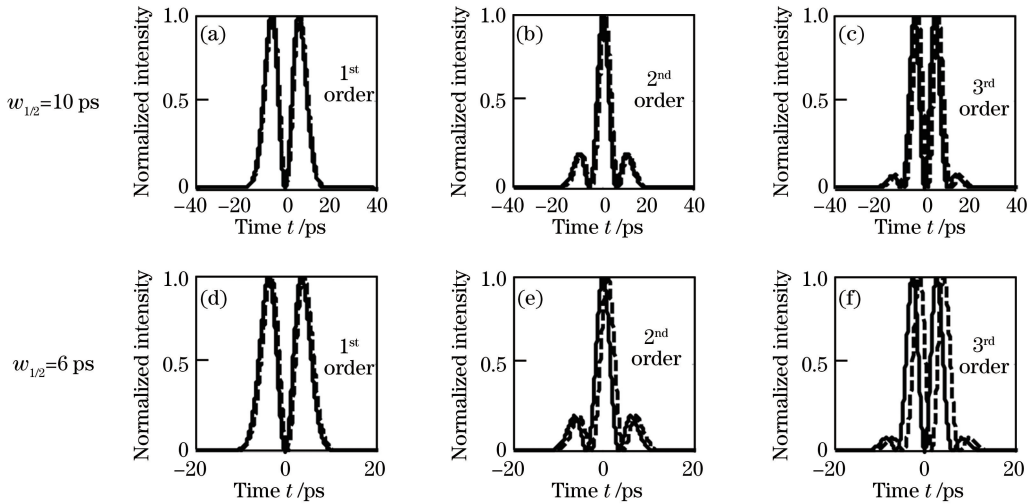


图 2 高斯脉冲经过基于马赫-曾德尔干涉仪的 1、2、3 阶微分器后的输出脉冲(虚线)与高斯脉冲经过 1、2、3 阶数学微分的理想输出脉冲(实线)

Fig. 2 Output pulse of a Gaussian pulse through the first to third order differentiator based on Mach-Zehnder (dotted line) and ideal output pulse of a Gaussian pulse through first to third order mathematical differentiation (solid line)

由图 2 可见, 随着输入脉冲宽度减小, 基于马赫-曾德尔干涉仪的微分器的误差增大, 且微分阶数越高, 误差越大, 这是因为利用 MZI 实现微分时, MZI 的输入输出关系舍弃了泰勒展开高阶项得到的近似微分关系。当输入高斯脉冲半峰全宽大于 10 ps 时, 虽然 3 阶以上微分误差仍然存在, 但 1、2 阶微分误差几乎可以忽略。因此本文以半峰全宽不低于 10 ps 的高斯脉冲, 且只利用 1、2 阶微分的输出脉冲进行加权合成。

通过加权叠加各阶微分器的输出脉冲, 调整加权系数以合成不同波形的脉冲:

$$A_{\text{out}} = k_0 \cdot A_{\text{in}}(t) + k_1 \cdot A_1(t) + k_2 \cdot A_2(t), \quad (6)$$

式中 $A_{\text{in}}(t)$ 、 $A_1(t)$ 、 $A_2(t)$ 分别为输入脉冲以及通过马赫-曾德尔干涉仪后得到的各阶微分脉冲； k_0 、 k_1 、 k_2 分别对应 VA_0 、 VA_1 、 VA_2 的调节加权系数； A_{out} 是超短光脉冲合成系统的输出脉冲。

超短平顶光脉冲在非线性光开关^[14]和波长转换应用中具有重要作用，三角脉冲在改善各种信号处理器件中有重要应用^[15]，抛物线型脉冲在高功率脉冲放大、高相干连续光源的产生、频谱压缩等方面具有重要应用^[16]。利用输入高斯脉冲与其 1 阶、2 阶微分，通过优化各个加权系数，即可得到平顶脉冲、三角脉冲以及抛物线型脉冲。

图 3~图 5 均采用半峰全宽为 15 ps 的高斯脉冲，通过调整加权系数得到的平顶脉冲、三角脉冲以及抛物线型脉冲。由图 3~5 可以看到，合成的每种脉冲中图(a)与图(b)中均保持 k_0 的值不变，适当改变 k_1 与 k_2 的值，所得输出脉冲波形与脉宽基本保持不变，表明本文提出的超短光脉冲合成系统可以在一定范围内调整参数，系统稳定性较好。

只改变输入脉冲宽度，保持其余参数不变，即输入高斯脉冲的半峰全宽分别为 10, 20, 30 ps，各项加权系

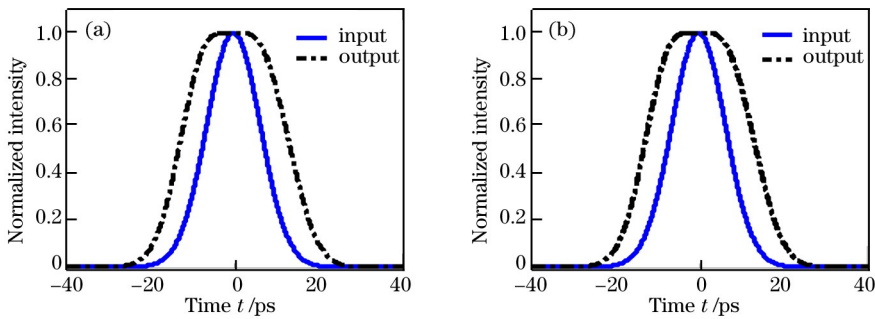


图 3 平顶脉冲。(a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.78, 0.38)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.81, 0.40)$

Fig. 3 Flat-topped pulse. (a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.78, 0.38)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.81, 0.40)$

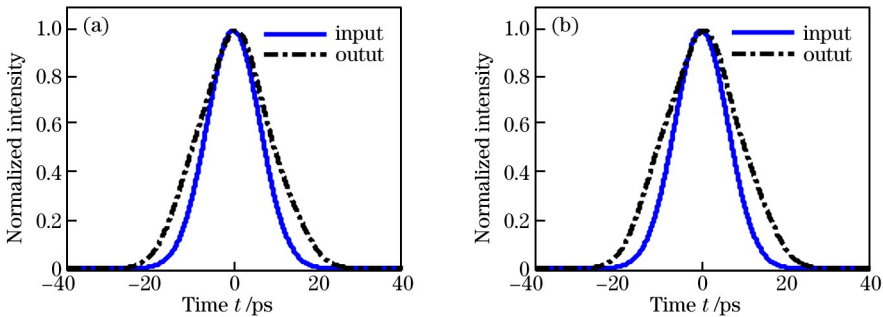


图 4 三角脉冲。(a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.40, 0.40)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.50, 0.50)$

Fig. 4 Triangular pulse. (a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.40, 0.40)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.50, 0.50)$

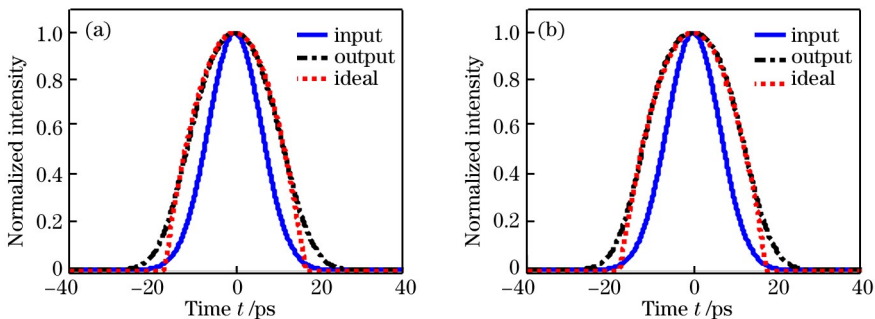


图 5 抛物线型脉冲。(a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.50, 0.25)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.60, 0.30)$

Fig. 5 Parabolic pulse. (a) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.50, 0.25)$ ；(b) $(k_0, k_1, k_2) = (1.00, 0.60, 0.30)$

数分别采用图 3(a)~5(a)中的参数。超短光脉冲合成系统合成的平顶脉冲、三角脉冲以及抛物线型脉冲分别如图 6、图 7 与图 8 所示,分别与图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)相比,表明当各项加权系数不变,仅改变输入脉冲宽度,输出脉冲仅脉冲宽度变化,波形不变,即当输入脉冲宽度发生一定程度的变化时,无须调整各个加权系数便可得到相应的脉冲波形,故本文提出的超短光脉冲合成系统具有一定的稳定性。

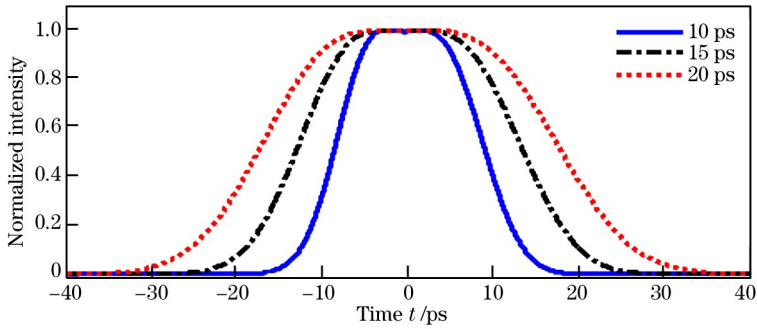


图 6 平顶脉冲

Fig. 6 Flat-top pulse

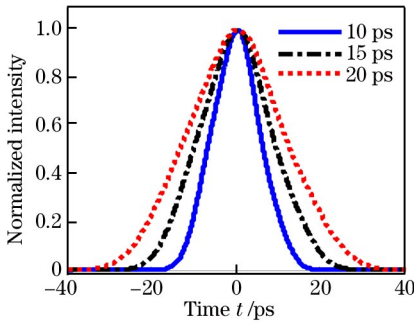


图 7 三角脉冲

Fig. 7 Triangular pulse

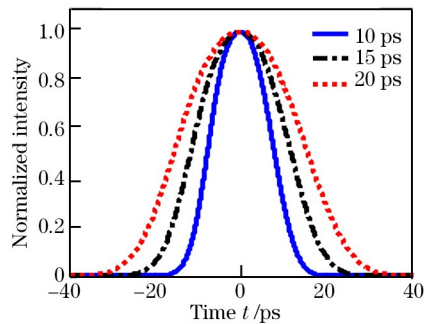


图 8 抛物线型脉冲

Fig. 8 Parabolic pulse

4 结 论

通过对马赫-曾德尔干涉仪传输特性分析可知,该干涉仪具有微分特性,进而构造出一个各阶微分器。在此基础上设计出超短光脉冲合成系统,通过加权叠加 1 阶、2 阶微分器的输出脉冲得到平顶脉冲、三角脉冲以及抛物线型脉冲。输入脉冲的半峰全宽在 10~20 ps 区间内所得脉冲波形保持基本不变,验证了该系统具有良好的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Parmigiani F, Petropoulos P, Ibsen M, *et al.* All-optical pulse reshaping and retiming systems incorporating pulse shaping fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 357-364.
- [2] Parmigiani F, Finot C, Mukasa K, *et al.* Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7617-7622.
- [3] Chu Saisai, Li Hongyun, Wang Shufeng, *et al.* Development of ultrashort laser pulse shaping technique and its applications in micro- and nano-optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10):1026007.
褚赛赛, 李洪云, 王树峰, 等. 激光脉冲整形在微纳光学系统中的应用研究进展[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026007.
- [4] Weiner A M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(15): 3669-3692.
- [5] Pei Zhuoran, Liu Jun. Parallel phase modulation algorithm based spectral phase measurement and compensation[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0901001.

- 裴卓然, 刘军. 基于平行相位调制算法的频谱相位测量和补偿[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901001.
- [6] Park Y, Asghari M H, Ahn T J, *et al.* Transform-limited picosecond pulse shaping based on temporal coherence synthesization[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9584-9599.
- [7] Slavik R, Kulishov M, Park Y, *et al.* Long-period-fiber-grating-based filter configuration enabling arbitrary linear filtering characteristics[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 1045-1047.
- [8] Park Y, Kulishov M, Slavik R, *et al.* Picosecond and sub-picosecond flat-top pulse generation using uniform long-period fiber gratings[J]. Optics Express, 2006, 14(26): 12670-12678.
- [9] Zhang A, Li C. Dynamic optical arbitrary waveform generation with amplitude controlled by interference of two FBG arrays[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23074-23081.
- [10] Xie Y, Zhuang L, Zhu C, *et al.* Nyquist pulse shaping using arrayed waveguide grating routers[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22357-22365.
- [11] Liao S, Ding Y, Dong J, *et al.* Arbitrary waveform generator and differentiator employing an integrated optical pulse shaper[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12161-12173.
- [12] Asghari M H, Azaña J. Proposal and analysis of a reconfigurable pulse shaping technique based on multi-arm optical differentiators[J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4581-4588.
- [13] Dong J, Zheng A, Gao D, *et al.* High-order photonic differentiator employing on-chip cascaded microring resonators [J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 628-630.
- [14] Oxenlowe L K, Slavik R, Galili M, *et al.* 640 Gb/s timing jitter-tolerant data processing using a long-period fiber-grating-based flat-top pulse shaper[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(3): 566-572.
- [15] Zhang Yan, Pei Li, Wang Yiqun, *et al.* Optimization of optical triangular pulses generator based on chirped fiber Bragg grating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1306-1310.
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, 44(4): 1306-1310.
- [16] Huh J, Azaña J. Generation of high-quality parabolic pulses with optimized duration and energy by use of dispersive frequency-to-time mapping[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27751-27762.