

# 相位独立可调的基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形光脉冲发生器的设计

杨孟超 张爱玲

(天津理工大学天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384)

**摘要** 提出了相位独立可调的基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形光脉冲发生器, 该发生器包括幅度控制器和相位控制器两部分。幅度控制器和相位控制器中的可调节元件是光纤布拉格光栅阵列。光纤布拉格光栅阵列由光纤布拉格光栅和光纤拉伸器间隔排列构成。只调节结构中的光纤拉伸器, 就可控制输出信号的各个谱线的幅度和相位, 从而产生任意波形的光脉冲。相位控制器中的光纤拉伸器的调节不会影响该结构对输出信号各个谱线幅度的控制, 幅度控制器中的光纤拉伸器的调节会影响输出信号的各个谱线的相位, 因此幅度控制器的调节要优先于相位控制器。

**关键词** 光纤光学; 任意波形光脉冲产生; 光学频率梳; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105003

## Design of Optical Arbitrary Waveform Generator Based on Two Fiber Bragg Grating Arrays with Independent Phase Control

Yang Mengchao Zhang Ailing

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** An optical arbitrary waveform generator based on two fiber Bragg grating (FBG) arrays with independent phase control is proposed. It is composed of an amplitude controller and a phase controller. In the amplitude controller and phase controller, the controllable components are the FBG arrays. The FBG arrays comprise radial arrangement of several FBGs and fiber stretchers. The amplitude and phase of each spectral line of the output signal are controlled by only adjusting the fiber stretchers, which results in optical arbitrary waveform pulse. The amplitudes of spectral lines of the output signal are insusceptible to adjusting the fiber stretchers in the amplitude controller. Adjusting the fiber stretchers in the amplitude controller can affect the phases of spectral lines of the output signal. So the amplitude controller should precede the phase controller to be adjusted.

**Key words** fiber optics; optical arbitrary waveform generator; optical frequency comb; fiber Bragg gratings

**OCIS codes** 060.2310; 320.5540; 060.3735; 320.5550

## 1 引 言

光学任意波形产生(OAWG)基于傅里叶合成原理,通过控制输入光脉冲谱线的幅度和相位得到用户指定的任意波形<sup>[1]</sup>。OAWG在大容量光传输、

光纤通信中的色散补偿有着潜在的应用前景,以及其产生的任意微波信号可用于高分辨率雷达等领域,故受到了广泛的关注<sup>[2-5]</sup>。

传统的 OAWG 结构利用衍射光栅、阵列波导

**收稿日期**: 2013-06-27; **收到修改稿日期**: 2013-08-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(61377075)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0611)、天津市中青年骨干创新人才培养计划

**作者简介**: 杨孟超(1985—),男,硕士研究生,主要从事光任意波形产生方面的研究。E-mail: mcyang11@126.com

**导师简介**: 张爱玲(1973—),女,教授,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: alzhang2012@163.com

光栅、光纤布拉格光栅 (FBG) 或色散光纤分离不同波长的谱线, 然后用空间光调制器或电光调制器独立地操纵每条谱线的幅度和相位。这类系统存在较高的耦合损耗, 其中利用空间光调制器的 OAWG 系统体型笨重, 需要复杂的准直控制<sup>[6-11]</sup>, 故使其应用范围受到了限制。近几年, Dong 等<sup>[12]</sup> 利用光脉冲整形器和马赫-曾德尔调制器调整输入光谱的形状, 再利用一段单模光纤实现波长-时间转换, 得到了方波、锯齿波和三角波形; Wang 等<sup>[13]</sup> 用相位调制组合的方法, 将一光脉冲分成两路后, 分别对其进行相位调制, 然后进行干涉, 产生了三角波及近平顶时域波形。基于光纤布拉格光栅的 OAWG 系统具有低损耗、体积小、易于集成、无需准直控制等优点<sup>[14-16]</sup>, 弥补了上述缺点。Petropoulos 等<sup>[17]</sup> 用特殊设计的线性啁啾布拉格光栅作为整形器件得到了三角形光波; Wang 等<sup>[18]</sup> 用超结构光纤布拉格光栅作为整形器件得到了矩形光波。为了得到所要求的反射系数, 非均匀光纤布拉格光栅的制作需要精确地控制, 且制作完成后, 光纤布拉格光栅的反射谱不能再改变。基于以上两点, Zhang 等<sup>[19]</sup> 提出了基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生结构, 得到了反射谱可调节的脉冲整形器, 但只能同时调节输出信号谱线的幅度和相位; 随后 Zhang 等<sup>[20]</sup> 又提出的基于三阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生结构, 实现了谱线相位的独立可调。

本文提出的相位独立可调的基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形光脉冲发生器结构是对基于双

阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生结构和基于三阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生结构的改进。提出的结构仅用两个光纤布拉格光栅阵列就实现了任意波形光脉冲的产生, 并且也实现了谱线相位的独立可调。

## 2 基本原理

本文提出的任意波形光脉冲发生器的结构如图 1 所示。它由幅度控制器和相位控制器组成, 幅度控制器由第一光纤布拉格光栅阵列、环形器 1、耦合器 1、耦合器 2 和光纤延迟线 G 构成, 相位控制器由环形器 2 和第二光纤布拉格光栅阵列构成。每个光纤布拉格光栅阵列由光纤布拉格光栅和光纤拉伸器 (FS) 间隔排列构成。两个光纤布拉格光栅阵列中对应的光纤布拉格光栅的中心反射波长相等, 且与输入光学频率梳的对应谱线的波长一致。光纤布拉格光栅用于反射光学频率梳中对应的谱线, 光纤拉伸器用于调节各个谱线的相移量。调节幅度控制器中的光纤拉伸器控制进入耦合器 2 的两路信号在各个谱线的相位差, 从而控制干涉信号在各个谱线的幅度; 调节相位控制器中的光纤拉伸器控制干涉信号在各个谱线的相位, 从而实现任意波形光脉冲的产生。为了保证进入耦合器 2 的两路光能够发生干涉, 调整第一光纤布拉格光栅阵列中光纤布拉格光栅之间的光纤长度, 同时调整光纤延迟线 G 的长度, 使得进入耦合器 2 的两路光中不同波长成分的光的光程差都在光源的相干长度之内。

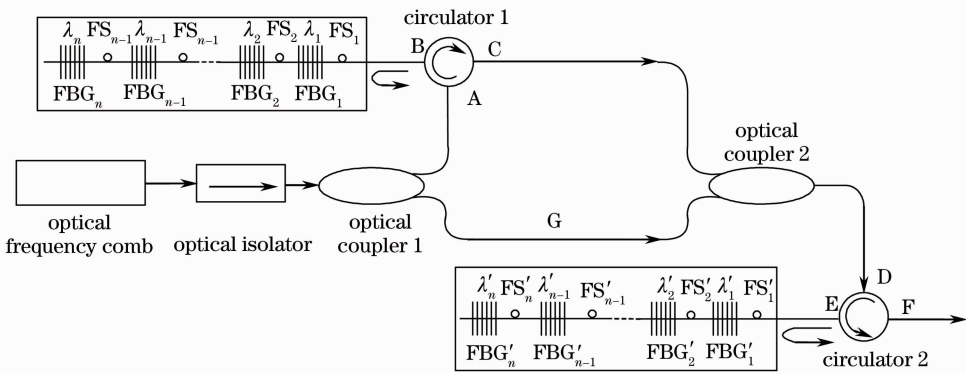


图 1 基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生器结构

Fig. 1 Structure of optical arbitrary waveform generator based on two FBG arrays

基于干涉原理<sup>[19-20]</sup>, 对本结构进行理论分析可得, 从环形器 2 的 F 端口输出的目标信号  $F(\omega)$  可表示为

$$F(\omega) = \sum_{n=-N}^N |\rho_{3,n}| |S_n| [\gamma |\rho_{1,n}| \sqrt{k_1 k_2} - \exp(j\Delta\theta_n) \sqrt{(1-k_1)(1-k_2)} \gamma] \times \exp[j(\varphi_n + \phi_{1,n} + \phi_{3,n})] \delta(\omega - m\Omega - \omega_0), \quad (1)$$

式中  $\rho_{1,n}$ 、 $\rho_{3,n}$  分别是第一光纤布拉格光栅阵列和第二光纤布拉格光栅阵列中第  $n$  个光纤布拉格光栅的反射系数； $|S_n|$  和  $\varphi_n$  分别表示输入光学频率梳中第  $n$  条谱线的幅度和相位， $\omega$  表示输出目标信号的角频率， $\omega_0$  表示输入光学频率梳的中心谱线角频率， $\Omega$  表示光学频率梳的相邻谱线的角频率间隔； $k_1$ 、 $k_2$  分别是耦合器 1 和耦合器 2 的分光比， $\gamma$  是环形器 1 和环形器 2 的插入损耗； $\Delta\theta_n = \phi_{2,n} - \phi_{1,n}$ ， $\phi_{1,n}$  是第  $n$  条谱

线从耦合器 1 经过第一光纤布拉格光栅阵列到达耦合器 2 产生的相移量， $\phi_{2,n}$  是第  $n$  条谱线从耦合器 1 经过光纤延迟线 G 到达耦合器 2 产生的相移量， $\phi_{3,n}$  是第  $n$  条谱线经第二光纤布拉格光栅阵列反射产生的相移量。

根据(1)式，可得从环形器 2 的 F 端口输出的信号的第  $n$  条谱线的幅度和相位为

$$|F_n| = |\rho_{3,n}| |S_n| \sqrt{k_1 k_2 \gamma^2 |\rho_{1,n}|^2 + \gamma(1-k_1)(1-k_2) - 2|\rho_{1,n}| \gamma \sqrt{\gamma k_1 k_2 (1-k_1)(1-k_2)} \cos \Delta\theta_n}, \quad (2)$$

$$\Phi_n = \varphi_n + \phi_{1,n} + \phi_{3,n} + \arctan \frac{-\sqrt{\gamma(1-k_1)(1-k_2)} \sin \Delta\theta_n}{\sqrt{k_1 k_2} \gamma |\rho_{1,n}| - \sqrt{\gamma(1-k_1)(1-k_2)} \cos \Delta\theta_n}. \quad (3)$$

由(2)式可知，当  $k_1 k_2 \gamma |\rho_{1,n}|^2 = (1-k_1)(1-k_2)$  时， $|F_n|$  的取值范围最大，此时， $|F_n|$  的值与  $\rho_{3,n}$ 、 $|S_n|$  以及  $\Delta\theta_n$  有关。当光纤 G 的长度确定后，通过调节第一光纤布拉格光栅阵列中的光纤拉伸器控制  $\phi_{1,n}$ ，即调节  $\Delta\theta_n$ ，可以实现对  $|F_n|$  的控制；从(3)式可知，当  $|F_n|$  确定以后，输出信号的第  $n$  条谱线的相位  $\Phi_n$  仅由  $\phi_{3,n}$  决定，通过调节第二光纤布拉格光栅阵列中的光纤拉伸器控制  $\phi_{3,n}$ ，可以实现对  $\Phi_n$

的控制。从(2)、(3)式可知，调节幅度控制器中的光纤拉伸器来控制输出信号谱线的幅度的同时也会对输出信号谱线的相位产生影响；而调节相位控制器中的光纤拉伸器则不会对输出信号谱线的幅度产生影响，即可以实现谱线相位独立可调。因此，幅度控制器的调节要优先于相位控制器的调节。

当输入光学频率梳和目标波形都确定后，由(2)、(3)式可得  $\Delta\theta_n$  和  $\phi_{3,n}$  的表达式分别为

$$\Delta\theta_n = \arccos \frac{[k_1 k_2 \gamma^2 |\rho_{1,n}|^2 + \gamma(1+k_1)(1+k_2)] |\rho_{3,n}|^2 |S_n|^2 - |F_n|^2}{2 |\rho_{3,n}|^2 |S_n|^2 |\rho_{1,n}| \gamma \sqrt{\gamma k_1 k_2 (1+k_1)(1+k_2)}}, \quad (4)$$

$$\phi_{3,n} = \Phi_n - \phi_n - \phi_{1,n} - \arctan \frac{-\sqrt{\gamma(1-k_1)(1-k_2)} \sin \Delta\theta_n}{\sqrt{k_1 k_2} \gamma |\rho_{1,n}| - \sqrt{\gamma(1-k_1)(1-k_2)} \cos \Delta\theta_n}. \quad (5)$$

由(2)、(4)式可知，若光纤布拉格光栅的反射系数  $\rho_{1,n}$  或  $\rho_{3,n}$  的值与其理论值存在误差，这将导致输出信号的谱线幅度分布与目标信号的谱线幅度分布不一致，此时，可以通过调节  $\Delta\theta_n$  对输出信号的谱线幅度分布进行校正。从(3)、(5)式可知，调节  $\Delta\theta_n$  将导致输出信号的谱线相位与目标信号的谱线相位不同，此时可通过调节  $\phi_{3,n}$  对输出信号的谱线相位进行校正。

### 3 仿真及分析

在输入为光学频率梳的条件下，只需调节本结构中的光纤拉伸器，就可控制输出信号的各个谱线的幅度和相位，从而产生任意波形光脉冲。以下例子分别展示了本结构控制输出谱线幅度和相位的能力以及独立控制输出谱线相位的能力。

#### 3.1 两种不同波形光脉冲的产生

仿真中设输入的光学频率梳为理想零线宽且带宽有限，中心谱线的波长为 1550 nm，谱线间隔为 0.32 nm，有 37 条谱线，各个谱线的幅度为 1，初始相位为 0。光纤光栅阵列中的布拉格光栅的反射率都为 1；光纤 G 的长度设为 40 m，使进入耦合器 2 的两路光中不同波长成分的光的光程差都在光源的相干长度之内，耦合器 1 的分光比为 0.55，耦合器 2 的分光比为 0.5；环形器的插入损耗为 0.8 dB。

为了得到半峰全宽为 2 ps、周期为 25 ps 的高斯波形光脉冲输出，根据此目标波形光脉冲的各个谱线的幅度和相位以及输入光学频率梳的各个谱线的幅度和相位，由(4)、(5)式可得各个谱线在幅度控制器的两条光路中产生的相位差  $\Delta\theta_n$ ，及其经过相位控制器产生的相移量  $\phi_{3,n}$ 。长度为 40 m 的光纤

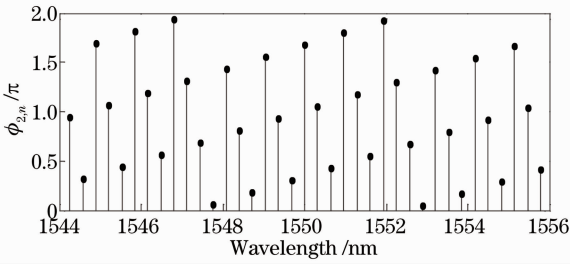


图 2 每条谱线经过光纤 G 产生的相移

Fig. 2 Phase shift of each spectral line propagated through the fiber G

G 对各个谱线产生的相移量  $\phi_{2,n}$  是定值, 如图 2 所示。因此, 仅调节幅度控制器中的光纤拉伸器控制  $\phi_{1,n}$ , 即调节  $\Delta\theta_n$ , 使输出信号的谱线幅度分布与目标高斯波形光脉冲的谱线幅度分布一致。仅通过调节相位控制器中的光纤拉伸器控制  $\phi_{3,n}$ , 使输出信号的谱线相位与目标高斯波形光脉冲的谱线相位相

同。幅度控制器和相位控制器中光纤拉伸器调节完成后,  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值如图 3 所示, 输出信号各个谱线的幅度和相位如图 4(a) 所示, 输出的时域高斯波形光脉冲如图 4(b) 所示。

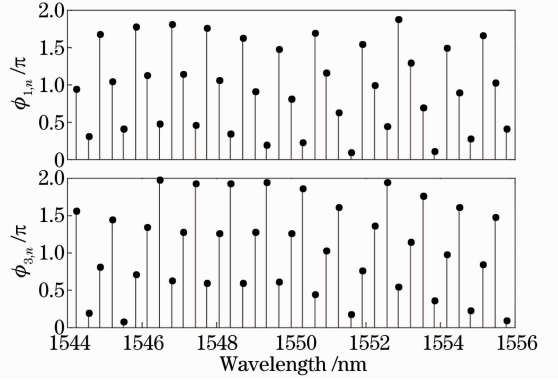


图 3 产生高斯波形光脉冲时  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值

Fig. 3 Values of  $\phi_{1,n}$  and  $\phi_{3,n}$  when the output is Gaussian pulses

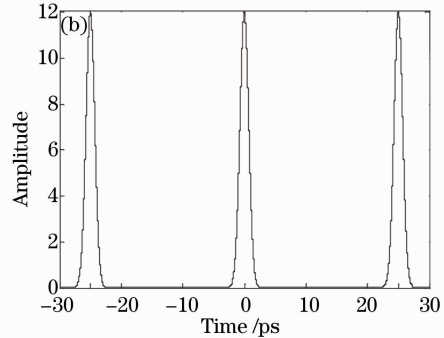
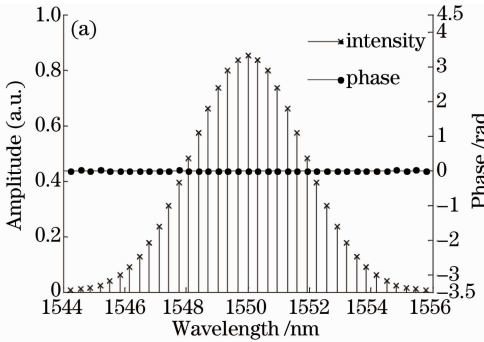


图 4 (a) 高斯波形光脉冲各个谱线的幅度和相位; (b) 高斯波形光脉冲时域波形

Fig. 4 (a) Amplitude and phase of each spectral line of the Gaussian pulses; (b) Gaussian pulses in time domain

为了得到半峰全宽为 0.78 ps, 周期为 8 ps 的升余弦波形光脉冲, 根据 (4)、(5) 式调节  $\Delta\theta_n$  和  $\phi_{3,n}$ , 使得输出信号的谱线幅度分布与目标波形光脉冲的谱线幅度分布一致, 输出信号的谱线相位与目标波形光脉冲的谱线相位相同。此时,  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值如图 5 中用“·”代表的数据所示, 输出信号各个谱线的幅度和相位如图 6(a) 所示, 时域升余弦波形光脉冲如图 6(b) 所示。当光纤布拉格光栅的反射系数值存在误差时, 调节光纤拉伸器可以对输出信号的谱线幅度和相位进行校正, 使得输出升余弦波形光脉冲不变。反射率存在不大于 0.1 的随机误差时,  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值如图 5 中用“x”代表的数据所示, 可见, 此时对幅度和相位进行校正,  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的调整量较小。

就可实现对输出信号的各个谱线幅度和相位的控制, 从而产生不同波形的光脉冲。

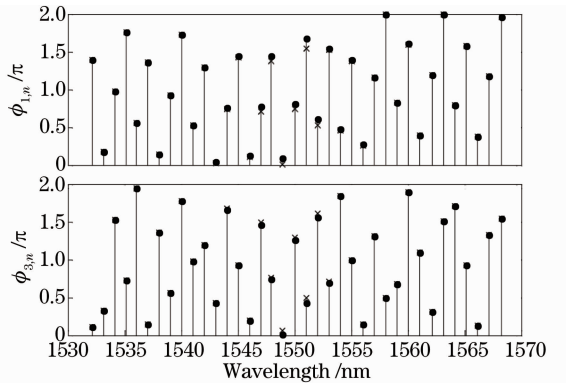


图 5 产生升余弦波形光脉冲时  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值

Fig. 5 Values of  $\phi_{1,n}$  and  $\phi_{3,n}$  when the output is raised-cosine pulses

通过以上两种不同波形光脉冲的产生可知, 只需调节幅度控制器和相位控制器中的光纤拉伸器,

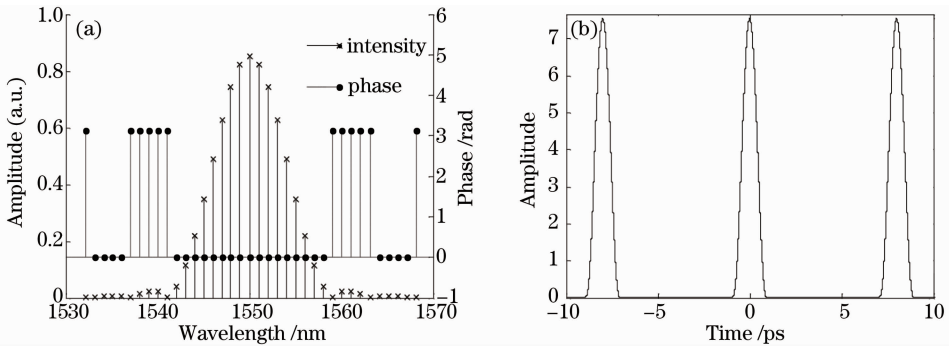


图 6 (a) 升余弦波光脉冲各个谱线的幅度和相位; (b) 升余弦波光脉冲时域波形

Fig. 6 (a) Amplitude and phase of each spectral line of the raised-cosine pulses; (b) raised-cosine pulses in time domain

### 3.2 独立控制相位改变输出光脉冲

在输出脉宽为 1 ps、周期为 25 ps 的高斯波形光脉冲的基础上,只调节相位控制器中的光纤拉伸器改变输出信号各个谱线的相位,从而使输出脉冲发生改变。当各个谱线经第二光纤布拉格光栅阵列反射产生的相移量  $\phi_{3,n}$  的值如图 7 所示时,输出信号的各个谱线的幅度保持不变,相位从全为零变为图 8(a)所示的值,此时输出信号从脉宽为 1 ps、周期为 25 ps 的高斯波形光脉冲变为脉宽为 1 ps、周期为 6.25 ps 的高斯波形光脉冲,周期变为原来的 1/4,如图 8(b)所示。

图 3 和图 7 中对应的  $\phi_{1,n}$  值相同而  $\phi_{3,n}$  值不同,图 4 和图 8 中的对应的谱线幅度都相同而对应的谱线相位不完全相同。从以上 4 个图可知,只调节相位控制器中的光纤拉伸器,就能使输出信号各个谱

线的相位发生变化而幅度不变,即实现了对输出谱线相位的独立调节,使得输出波形发生了相应的变化。

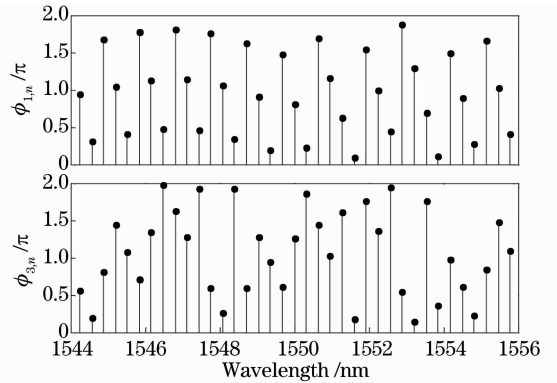


图 7 输出周期为 6.25 ps 的高斯波形光脉冲时  $\phi_{1,n}$  和  $\phi_{3,n}$  的值

Fig. 7 Values of  $\phi_{1,n}$  and  $\phi_{3,n}$  when the output Gaussian pulses' period is 6.25 ps

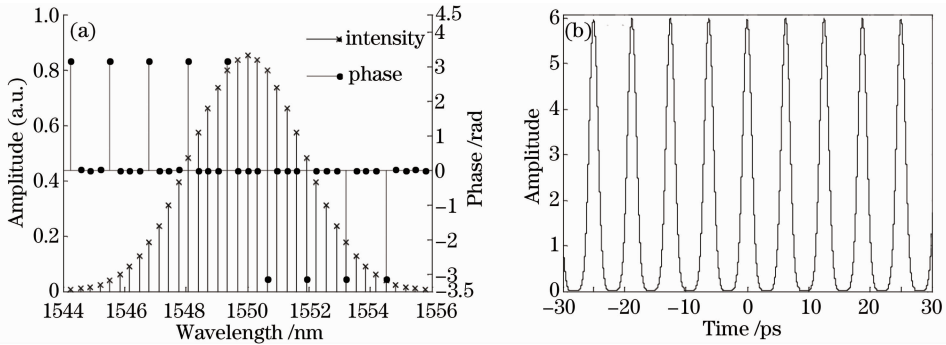


图 8 (a) 周期为 6.25 ps 的高斯波形光脉冲的各个谱线的幅度和相位; (b) 周期为 6.25 ps 的高斯波形光脉冲的时域波形

Fig. 8 (a) Amplitude and phase of each spectral line when the output is Gaussian pulses with a period of 6.25 ps;

(b) Gaussian pulses with a period of 6.25 ps in time domain

## 4 结 论

提出了相位独立可调的基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形光脉冲发生器,与已有的基于双阵列光纤布拉格光栅的任意波形产生器相比,实现了对各个谱线相位的独立可调;与已有的基于三阵列

光纤布拉格光栅的任意波形产生器相比,在能够实现相同功能的条件下减少了一个光纤布拉格阵列,使结构更加简单。基于此结构,调节幅度控制器和相位控制器中的光纤拉伸器可以控制输入光学频率梳中各个谱线的幅度和相位,产生任意波形光脉冲。

调节相位控制器中的光纤拉伸器可以实现对输出信号的谱线相位的独立调节,从而使输出波形发生变化。输出信号谱线相位的独立调节还可以用于对调节幅度控制器或环境影响产生的相位误差进行补偿。

## 参 考 文 献

- 1 A M Weiner, S Enguehard, B Hatfield. Femtosecond optical pulse shaping and processing [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1995, 19(3): 161–238.
- 2 A M Weiner. Fourier information optics for the ultrafast time domain[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(4): A88–A96.
- 3 S Tahvili, S Latkowski, B Smalbrugge, *et al.*. An InP-based integrated optical pulse shaper; demonstration of chirp compensation[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(5): 450–453.
- 4 D J Geisler, N K Fontaine, T He, *et al.*. Modulation-format agile, reconfigurable Tb/s transmitter based on optical arbitrary waveform generation[J]. *Opt Express*, 2009, 17(18): 15911–15925.
- 5 C Wang, J Yao. Microwave arbitrary waveform generation based on optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping using a chirped fiber Bragg grating[C]. 2008 IEEE Microsystems and Nanoelectronics Research Conference, 2008. 57–60.
- 6 A J Metcalf, V R Supradeepa, D Leaird, *et al.*. Fully programmable ultra-complex 2-D pulse shaping [C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2012. CW3D\_1.
- 7 Z Jiang, D E Leaird, A M Weiner. Line-by-line pulse shaping control for optical arbitrary waveform generation [J]. *Opt Express*, 2005, 13(25): 10431–10439.
- 8 A J Metcalf, D E Leaird, A M Weiner. Multichannel radio-frequency arbitrary waveform generation based on multiwavelength comb switching and 2-D line-by-line pulse shaping [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(11): 891–893.
- 9 Z Jiang, D E Leaird, A M Weiner. Optical arbitrary waveform generation and characterization using spectral line-by-line control [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(7): 2487.
- 10 C B Huang, Z Jiang, D E Leaird, *et al.*. Quantitative study of optical frequency noise to intensity noise conversion in line-by-line pulse shaping[J]. *IEEE J Quant Electron*, 2009, 45(6): 661–673.
- 11 Shanhang You, Weidong Shao, Wenfeng Cai, *et al.*. Analysis of ultra-short pulse shaping with programmable amplitude and phase masks[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(3): 033201.
- 12 Jianji Dong, Bowen Lue, Yuan Yu, *et al.*. Photonic generation of arbitrary waveforms based on incoherent wavelength-to-time mapping[J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(6): 068401.
- 13 Shiwei Wang, Jun Zheng, Jianqiu Xu. Phase-modulation-combination system for the generation of arbitrarily shaped repetition rate pulses[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(3): 030603.
- 14 C Wang, J Yao. Advanced fiber Bragg gratings for photonic generation and processing of arbitrary microwave waveforms[C]. 2010 IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics, 2010. 414–417.
- 15 R A Minasian. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(2): 832–846.
- 16 Dai Yitang, Chen Xianfei, Ji Heng, *et al.*. Optical arbitrary waveform generation based on sampled fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(23): 1916–1918.
- 17 P Petropoulos, M Ibsen, D J Richardson. Rectangular pulse generation based on pulse reshaping using a superstructured fiber Bragg grating[J]. *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, 2001, 19(1): 746–752.
- 18 Wang Chao, Yao Jianping. Fourier transform ultrashort optical pulse shaping using a single chirped fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(19): 1375–1377.
- 19 Ailing Zhang, Changxiu Li. Dynamic optical arbitrary waveform generation with amplitude controlled by interference of two FBG arrays[J]. *Opt Express*, 2012, 20(21): 23074–23081.
- 20 Ailing Zhang, Changxiu Li. Analysis of dynamic optical arbitrary waveform generation based on three FBG arrays[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 52: 81–86.

栏目编辑:王晓琰