

# 基于光频梳的超短光脉冲的产生及其在光模数转换中的应用

窦玉杰 张洪明 姚敏玉

(清华大学电子工程系, 清华大学信息科学与技术国家实验室, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 提出并实验验证了一种基于光频梳的超短光脉冲的产生方法。使用强度调制器和相位调制器级联直接调制直流激光得到了 29 条顶部功率变化小于 1.5 dB 的光频梳。利用单模光纤色散将光频梳整形成重复频率为 10 GHz, 脉宽为 2.68 ps 的光脉冲。并成功用于对 1~4 GHz 信号采样, 系统的信噪比可达 33.83 dB, 等效于 5.33 bit 的有效比特数。

**关键词** 超快光学; 信号处理; 光脉冲; 光频梳; 相位调制; 光模数转换

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1205006

## Ultra-Short Optical Pulse Generation Based on Optical Frequency Comb and Application in Optical Analog-to-Digital Conversion

Dou Yujie Zhang Hongming Yao Minyu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A scheme for the generation of ultra-short optical pulse, based on optical frequency comb (OFC), is proposed and demonstrated experimentally. An OFC with 29 comb lines within 1.5 dB spectral power variation is obtained by cascading intensity and phase modulators modulating a continuous wave laser. The OFC is dispersed by a segment of single mode fiber (SMF). Ultra-short optical pulses with 10 GHz repetition rate and 2.68 ps pulse width are demonstrated. The pulses are used for sampling 1~4 GHz radio frequency signals. The signal-to-noise ratio of this scheme is 33.83 dB, equivalent to effective bit number of 5.33 bit.

**Key words** ultrafast optics; signal processing; optical pulse; optical frequency comb; phase modulation; optical analog-to-digital conversion

**OCIS codes** 320.5540; 320.5550; 060.5060; 060.5625

## 1 引言

高重复频率、低抖动、窄脉宽的光脉冲在光模数转换(OADC)<sup>[1~4]</sup>、光时分复用(OTDM)<sup>[5]</sup>、光码分多址复用(OCDMA)<sup>[6]</sup>及脉冲整形系统中有重要的应用。目前,超短光脉冲一般是由主动或者被动锁模激光器产生<sup>[7]</sup>。随着调制技术的发展,使用相位调制器或者强度调制器调制直流激光的方法受到了

越来越多的研究者的关注。Jiang 等<sup>[8]</sup>使用相位调制器调制直流激光并采用非线性压缩获得了飞秒量级的超短光脉冲。本文报道了使用强度和相位调制器调制直流激光,在谱功率变化 1.5 dB 的范围内获得了 29 条光谱线的光频梳,并利用单模光纤(SMF)的本征色散生成重复频率为 10 GHz,脉宽为 2.68 ps 的光脉冲。成功地将该方法用于对 1~

收稿日期: 2012-07-03; 收到修改稿日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(60977003,61032005)资助课题。

作者简介: 窦玉杰(1985—),女,博士研究生,主要从事全光信号处理和光模数转换等方面的研究。

E-mail: douyj08@mails.tsinghua.edu.cn

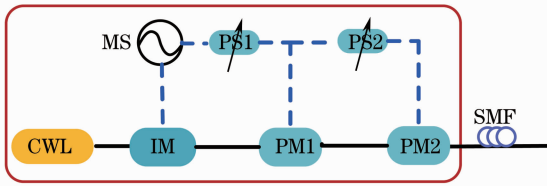
导师简介: 姚敏玉(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事高速光通信及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: yaomy@mail.tsinghua.edu.cn

4 GHz正弦信号采样的光采样系统。

## 2 方案和工作原理

利用光频梳技术产生短脉冲的原理框图如图 1 所示,核心部分是方框内所示结构,其作用是产生顶部平坦的光频梳。另接一段合适长度的单模光纤,并利用光纤色散生成光脉冲。光频梳的产生原理是利用时域到频域转换的方法。直流光通过强度调制器被调制为顶部平坦的时域脉冲,再经过两个相位调制器对时域信号进行二次方相位调制,将时域信号的波形映射到频域上,使得信号在频域具有与时



CWL: continuous wave laser; IM: intensity modulator; PM: phase modulator; MS: microwave source; PS: phase shifter; SMF: single mode fiber

图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram

研究发现改变强度调制器的直流偏置点和调制深度也能改善光频梳的平坦特性。其原理论述如下。强度调制器的输出  $E_{\text{int}}$  可表示为

$$E_{\text{int}} = E_{\text{in}} \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{2V_{\pi}} [V_{\text{DC}} + V_{\text{A}} \cos(\omega_m t)] \right\} = E_{\text{in}} \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} (\Gamma_{\text{B}} + \Gamma_{\text{A}} \cos(\omega_m t)) \right\}, \quad (1)$$

式中  $E_{\text{in}}$  为输入直流光的光功率,  $V_{\pi}$  为强度调制器的半波电压,  $V_{\text{DC}}$  和  $V_{\text{A}}$  分别为加在强度调制器上的直流电压和正弦信号的峰峰值,  $\Gamma_{\text{B}} = \pi V_{\text{DC}} / V_{\pi}$  和  $\Gamma_{\text{A}} = \pi V_{\text{A}} / V_{\pi}$  分别为对半波电压归一化的直流偏置和正弦信号的峰峰值。

经相位调制器调制后的输出为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{int}} \exp \left[ i \frac{\pi V_{\text{P}_1}}{V_{\pi_1}} \cos(\omega_m t + \Delta\varphi_1) + i \frac{\pi V_{\text{P}_2}}{V_{\pi_2}} \cos(\omega_m t + \Delta\varphi_2) \right], \quad (2)$$

式中  $V_{\text{P}_1}$ ,  $V_{\text{P}_2}$  和  $V_{\pi_1}$ ,  $V_{\pi_2}$  分别为两相位调制器上正弦信号的幅值和半波电压,  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$  分别为加在两相位调制器与强度调制器上的正弦信号的相位差。

由(1)式可见,改变直流偏置点和正弦信号的幅度,强度调制器输出的脉冲会发生变化,经相位调制后的光频梳也会改变<sup>[11]</sup>。对(2)式进行傅里叶变换可得在  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 0$  时光频梳的顶部平坦度的变化曲线。图 2(a)和(b)分别为  $\Gamma_{\text{A}} = \pi/2$  时光频梳的

域一样的轮廓。从原理上说,对一个平顶脉冲进行二次方的相位调制便可得到顶部平坦的光频梳<sup>[9]</sup>。如何获得理想的二次方相位调制是本方案的关键,已知正弦信号的傅里叶级数展开中有二次方项,可近似为二次方相位调制,但展开级数中还含有高次方项,所以直接用正弦信号进行二次方调制产生的光频梳的边缘部分谱线强度要高于中间部分的谱线。文献[10]中采用微波变频技术减小高次项来改善光频梳的平坦度,得到了 38 条光谱线,功率变化小于 1 dB。

顶部平坦度与直流偏置和  $\Gamma_{\text{B}} = \pi/2$  时平坦度与调制深度(正弦信号幅度)的关系曲线。由图可见,当  $\Gamma_{\text{B}} = 0.35\pi$ ,  $\Gamma_{\text{A}} = \pi/2$  时得到的光频梳最平坦。

本方案中正弦信号直接加载在两相位调制器与强度调制器上,理论分析表明正弦信号的相位差  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$  也会影响光频梳的特性,如图 2(c)所示,图 2(c)为光频梳顶部功率变化随  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$  变化的等高线图。由图可见,当  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 0$  时,得到的光频梳最为平坦。此时(2)式可以化简为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{int}} \exp \left[ i \left( \frac{\pi V_{\text{P}_1}}{V_{\pi_1}} + \frac{\pi V_{\text{P}_2}}{V_{\pi_2}} \right) \cos(\omega_m t) \right] = E_{\text{int}} \exp(i\Delta\theta \cos \omega_m t) = E_{\text{int}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\theta) \exp(in\omega_m t), \quad (3)$$

式中  $\Delta\theta = (\pi V_{\text{P}_1} / V_{\pi_1}) + (\pi V_{\text{P}_2} / V_{\pi_2})$  为两相位调制器级联的相位调制系数,  $J_n(\cdot)$  为  $n$  阶贝塞尔函数。根据贝塞尔函数的性质,当  $\Delta\theta = 0$  时,没有谐波分量的产生;当  $\Delta\theta$  增大时,谐波分量也会随之增加,即意味着光谱线条数的增加。根据时域和频域的转换,要获得短脉冲,应尽可能获得更多的光谱线。对于上述实验系统,经 Matlab 软件计算可得光谱线条数随相位调制系数  $\Delta\theta$  的变化关系如图 2(d)所示。由图中曲线可见,为了得到更多的光谱线条数(如 30 条),  $\Delta\theta$  需大于 15,因此需采用两个相位调制器级联的方式。

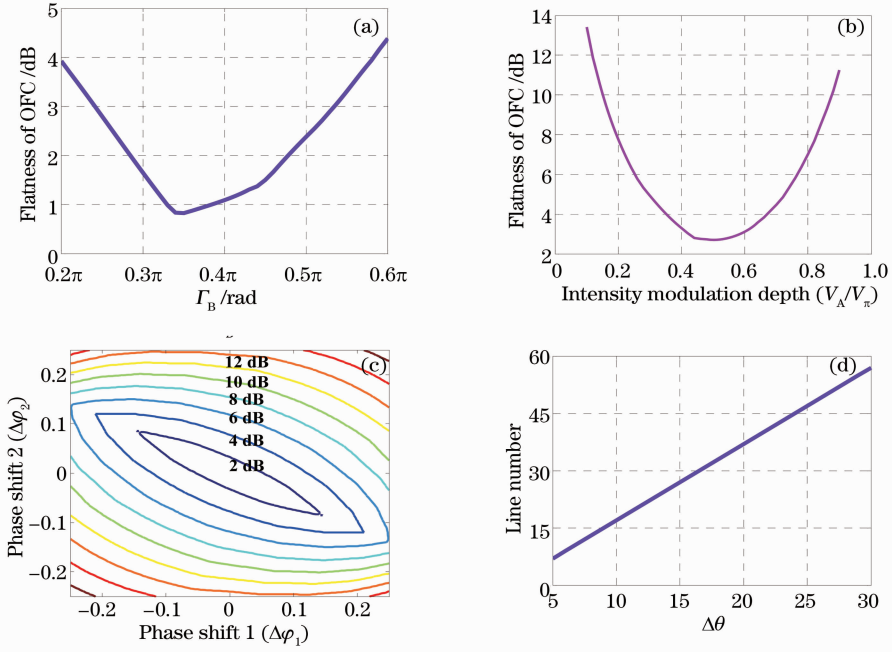


图2 光频梳的平坦度随(a)强度调制器直流偏置点( $\Gamma_B$ )和(b)强度调制器调制深度( $V_A/V_\pi$ )的变化曲线;(c)光频梳的平坦度随相位调制器与强度调制器相位差( $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ )变化的等高线图;(d)光谱线条数与相位调制系数( $\Delta\theta$ )的变化曲线  
Fig.2 Curves of the optical frequency comb flatness versus (a) DC bias of intensity modulator ( $\Gamma_B$ ) and (b) modulation depth of intensity modulator ( $V_A/V_\pi$ ); (c) counter plot showing the flatness as a function of phase shifts ( $\Delta\phi_1$  and  $\Delta\phi_2$ ); (d) comb line number versus phase modulation index ( $\Delta\theta$ )

于是,整个系统的相位调制为

$$\Delta\varphi = \Delta\theta \cos(\omega_m t) \approx -\Delta\theta \omega_m^2 t^2 / 2 = \frac{-Ct^2}{2T_0^2}, \quad (4)$$

式中  $T_0$  为强度调制器输出脉冲的脉宽,  $C = \Delta\theta \omega_m^2 T_0^2$  为脉冲的线性啁啾系数。啁啾脉冲经单模光纤传输时,脉冲宽度取决于群速度色散  $\beta_2$  和啁啾系数  $C$  的符合度,当  $\beta_2 C < 0$  时,脉冲有压缩的过程。因此具有正线性啁啾的光脉冲,经过一段合适长度的单模光纤( $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ )色散即可得到超短光脉冲。

采用该方法产生超短脉冲具有以下优点:1)不必利用四波混频或者自相位调制等非线性光学效应,无需输入大光功率,系统稳定性好;2)脉冲性能好,抖动小;3)系统具有可调性,脉冲的中心波长和重复频率可以方便调节。

### 3 实验结果

实验中使用的直流激光器的波长为  $1548.79 \text{ nm}$ , 正弦信号重复频率为  $10 \text{ GHz}$ , 加在两个相位调制器上的微波功率为  $28 \text{ dBm}$ , 通过调节强度调制器的直流工作点得到了 29 条功率变化小于  $1.5 \text{ dB}$  的光频梳,如

图3所示。该光频梳经过单模光纤的压缩,即可得到超短光脉冲。

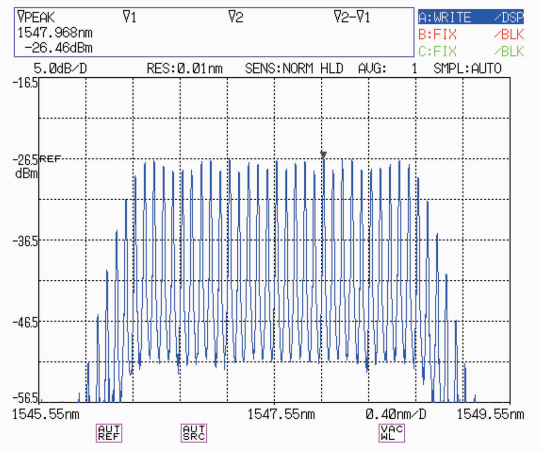


图3 顶部平坦的光频梳

Fig.3 Flattop optical frequency comb

图4(a)为使用自相关仪(Femtochrome Research Inc., FR-103XL)测得的光脉冲,经计算脉宽为  $2.68 \text{ ps}$ 。图4(b)为使用电谱仪测量得到的光脉冲的电谱图。从图4中可以看出,光脉冲的无杂散动态范围(SFDR)可达到  $69 \text{ dB}$ , 脉冲特性较好。

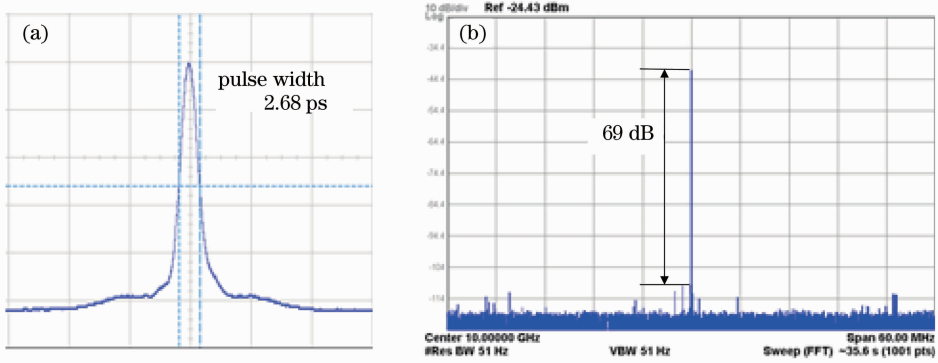


图 4 (a) 重复频率为 10 GHz, 脉宽为 2.68 ps 的自相关曲线; (b) 光脉冲的电谱图

Fig. 4 (a) Autocorrelation trace of optical pulse with 10 GHz repetition rate and 2.68 ps pulse width; (b) radio frequency spectrum of optical pulse

为了验证光脉冲的可用性,使用该光脉冲对 1~4 GHz 的正弦信号进行了采样,采样后的信号经过光电转换后使用实时示波器 (TEK 公司, DSA 71254C 型) 进行观察并记录数据。图 5(a) 为 1 GHz 信号的时域波形,其中黑色的点为实时示波器记录的采样数据点,绿色的实线(彩图请见网络电子版)是根据采样数据点拟合的时域信号,图 5(b) 为根据采样点计算得到的 1 GHz 信号的频谱图。对于 1~

4 GHz 的信号系统, SFDR 均大于 40 dB, 根据光模数转换系统的信噪比 (SNR) 和有效比特数 (ENOB) 的计算公式<sup>[12,13]</sup> 可得,在用光频梳产生的 2.68 ps 的光脉冲作为脉冲源进行模数转换的实验中,系统的信噪比  $R_{SN} = 33.83$  dB, 对应的有效比特数  $N_{eff} = 5.33$  bit。实验结果表明上述产生超短光脉冲的方案简单、易行,且脉冲质量好,有广阔的应用前景。

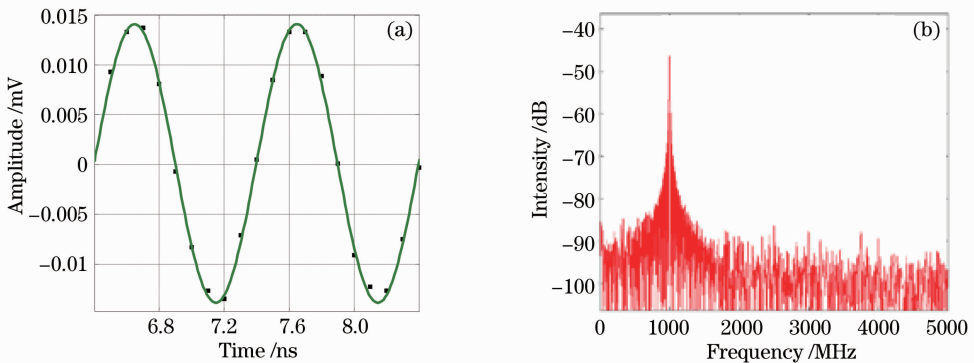


图 5 使用 10 GHz 光脉冲的采样结果。(a) 1 GHz 信号的采样数据和拟合曲线; (b) 1 GHz 信号的频谱图

Fig. 5 Sampling results using optical pulses with 10 GHz repetition rate. (a) Sampled data and sinusoidal fitting of 1 GHz signal; (b) spectrum of 1 GHz signal

## 4 结 论

提出并实验验证了一种基于光频梳的超短光脉冲的产生方法。使用级联的强度调制器和相位调制器由正弦信号做驱动可以直接得到 29 条顶部功率变化小于 1.5 dB 的光频梳,光频梳经过单模光纤的色散即可得到重复频率为 10 GHz,脉宽为 2.68 ps 的超短光脉冲。此系统结构简单,没有经过自相位调制或者四波混频等非线性效应的压缩。为了验证该脉冲的可用性,使用该脉冲对正弦信号开展了采样实验并进行了分析,信噪比可达 33.83 dB,相应

的有效比特数为 5.33 bit。

## 参 考 文 献

- 1 R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999, **17**(4): 539~550
- 2 Qingwei Wu, Hongming Zhang, Yue Peng *et al.*. 40 GS/s optical analog-to-digital conversion system and its improvement [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 9252~9257
- 3 M. P. Fok, K. L. Lee, C. Shu *et al.*.  $4 \times 2.5$  GHz repetitive photonic sampler for high-speed analog-to-digital signal conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 876~878
- 4 Dou Yujie, Zhang Hongming, Yao Minyu. Optical analog-to-digital conversion by time-interweaved sampling based on mode-

- locked pulse and high-speed optical switch [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105006
- 窦玉杰, 张洪明, 姚敏玉. 基于锁模脉冲源和高速光开光的时分抽样模数转换系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105006
- 5 M. Nakazawa, T. Yamamoto, K. R. Tamura. 1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24): 2027~2029
- 6 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 221~224
- 燕 萌, 姚敏玉, 张洪明 等. 基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 221~224
- 7 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 163~165
- 王 旌, 张洪明, 张 颀 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 163~165
- 8 Zhi Jiang, Chenbin Huang, Daniel E. Leaird *et al.*. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(8): 463~467
- 9 M. T. Kauffman, W. C. Banyai, A. A. Godil *et al.*. Time-to-frequency converter for measuring picosecond optical pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(3): 270~272
- 10 R. Wu, V. R. Supradeepa, C. M. Long *et al.*. Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(19): 3234~3236
- 11 Y. Dou, H. Zhang, M. Yao. Improvement of flatness of optical frequency comb based on nonlinear effect of intensity modulator [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2749~2751
- 12 Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 1057-1994 (R2001), IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders [S]. New York: IEEE, 2001
- 13 G. C. Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 1955~1982

栏目编辑: 王晓球