

基于光电振荡器和孤子压缩的双波长、高稳光窄脉冲

陈 斌^{1,2}, 贾 石¹, 王 菊¹, 王文睿¹, 王子雄¹, 于晋龙¹

¹天津大学电子信息工程学院, 天津 300072;

²浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种在波长双环路光电振荡器(OEO)中,利用啁啾压缩和孤子压缩效应产生光窄脉冲的有效方案。此方案能够同时产生双波长光窄脉冲。将双环路 OEO 产生的高质量微波信号调制到系统中的直调激光器和相位调制器上,产生光脉冲和光啁啾。调节直调激光器和相位调制器之间的延时量,从而获得最大的啁啾率。利用色散补偿光纤和高非线性光纤对光脉冲进行啁啾压缩和光孤子压缩,使得光脉冲最终压窄至 1.2 ps。采用锁相环技术对系统腔长进行有效控制,使光脉冲的长期稳定性得到改善。

关键词 非线性光学; 光窄脉冲; 啁啾压缩和孤子压缩; 波长双环路光电振荡器; 高稳定性

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0519002

Optical Short Pulse with Dual Wavelength and High Stability Based on Optoelectronic Oscillator and Soliton Compression

Chen Bin^{1,2}, Jia Shi¹, Wang Ju¹, Wang Wenrui¹, Wang Zixiong¹, Yu Jinlong¹

¹ School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² College of Biomedical Engineering & Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract One effective scheme to generate optical short pulses based on chirp compression and soliton compression effects in the dual-loop optoelectronic oscillator (OEO) with different wavelengths is proposed. Dual-wavelength optical short pulses can be generated simultaneously with the proposed scheme. By modulating the high-quality microwave signal generated by the dual-loop OEO into the directly modulated lasers and the phase modulator, optical pulses and chirps can be obtained. The maximum chirp rate of the optical pulses is achieved by adjusting the optical delay between the directly modulated laser and the phase modulator. The chirp compression and soliton compression of optical pulses are conducted by utilizing the dispersion compensation fiber and the highly nonlinear fiber, respectively and the final optical pulse width is as narrow as 1.2 ps. After the system cavity length is effectively controlled with the phase-locked-loop technology, the long-term stability of optical pulses is further improved.

Key words nonlinear optics; short optical pulse; chirp compression and soliton compression; dual-loop optoelectronic oscillator with different wavelengths; high stability

OCIS codes 190.5530; 230.4910; 060.4080

1 引 言

在下一代超高速全光网络中,双波长或者多波长的光窄脉冲源将成为决定整体网络性能的关键部分^[1-2]。具体来说,在未来包含光波分复用网络、光时分复用网络以及高速光信号处理系统的光网络,越来越迫切地需要具有高重复速率、窄脉宽、低时间抖动和良好的长期稳定性等特点的光窄脉冲源^[3-5]。目前,常用的产生光窄脉冲的方法有半导体锁模激光器、锁模光纤环激光器、对连续光进行相位调制以及利用光电振荡

收稿日期: 2016-11-17; **收到修改稿日期:** 2017-01-02

基金项目: 国家 973 计划(2012CB315704)、国家自然科学基金(61427817,61405142,61205061)

作者简介: 陈 斌(1982—),男,博士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: chenbin_tju@126.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,博士,教授,主要从事超高速光纤通信系统以及全光信息处理方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn(通信联系人)

器(OEO)产生光窄脉冲等^[6-7]。

基于 OEO 产生光窄脉冲的方法具有自启动和超低相位噪声的特点,近些年成为研究热点^[8]。Yao 等^[9]在提出 OEO 的概念和理论模型之后,于 1997 年提出了利用 OEO 产生光脉冲的思路。Dahan 等^[10]于 2005 年提出了一种基于互耦 OEO 的自启动光脉冲源。该方案将一个基于光电晶体管的微波振荡器耦合到 OEO 的含有光纤参量放大器的光纤腔内,获得了重复速率为 10 GHz、脉宽为 3 ps 的光窄脉冲,脉冲抖动为 40 fs。Huang 等^[11]于 2014 年提出了一种在 OEO 中加入半导体光放大器,利用其四波混频效应产生光窄脉冲的方案。该方案获得了重复速率为 10 GHz、脉宽为 19 ps 的光窄脉冲。目前,大部分基于 OEO 的光窄脉冲方案只能产生单一波长的光脉冲,且其重复速率的长期稳定性不佳。

本文提出了一种在波长双环路 OEO 结构中使用两个直调激光器(DML)和一个相位调制器(PM),同时利用啁啾压缩和孤子压缩效应产生光窄脉冲的新型方案。这种结构可以同时产生双波长的光窄脉冲源。波长双环路结构中两个环路之间的隔离度较高,可以有效避免光域耦合时的拍噪声,因此产生的微波信号的相位噪声得到极大改善。OEO 产生的微波信号直接调制到 DML 和 PM 上,产生光脉冲和啁啾。调节 DML 和 PM 之间的延时量,获得最大的啁啾率。之后光脉冲经过色散补偿光纤(DCF)进行啁啾压缩,再进入高非线性光纤(HNLF)进行孤子压缩,最终获得光窄脉冲。双波长光窄脉冲的重复速率为 20 GHz,脉宽为 1.2 ps。微波信号的相位噪声在 10 kHz 处为 -123.2 dB,由此算得脉冲的抖动为 6.75 fs(频率范围 $10^2 \sim 10^6$ Hz)。更重要的是,该方案采用了锁相环技术,实现了对 OEO 腔长的控制,从而光脉冲的长期稳定性得到了极大改善,微波信号在 1 h 内的频率漂移小于 ± 75.6 mHz。

2 孤子压缩效应理论

关于 DCF 啁啾压缩效应的相关分析已经在文献^[12-13]中有较为详细的阐述,下面主要分析孤子压缩效应。由于光脉冲在光纤中传输时会产生群速度色散(GVD)效应,脉冲将展宽。同时考虑到光纤的非线性效应,光脉冲在光纤中传输时,脉冲不同部位的光强不同,所对应的折射率也不同,因此传输过程中会产生不同的相移,从而产生自相位调制(SPM)效应。SPM 效应将产生新的频率分量,造成光谱展宽,对应的时域脉冲宽度变窄。当光纤中的 GVD 效应和 SPM 效应相平衡时,光脉冲在传输过程中将保持波形不变,形成一阶光孤子。如果光脉冲强度较大,SPM 效应超过 GVD 效应,就会形成形状周期变化的高阶光孤子。基于孤子效应的脉冲压缩技术与这种高阶光孤子的基本性质有关,主要是利用高阶孤子在光纤中周期性演化的初始窄化过程。在一个孤子周期内,高阶光孤子脉冲传输会经历脉冲压缩、分裂和恢复的过程。选择适当的光纤长度,使得高阶入射光脉冲在光纤中传输后刚好能达到脉冲的压缩点,此时就会得到最佳脉冲压缩效果。光孤子的阶数越高,在最佳压缩点得到的脉冲就越窄,所用的光纤长度越短。若定义孤子阶数为 N ,它与光脉冲的峰值功率存在如下关系^[14]

$$N = \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}}, \quad (1)$$

式中 L_D 为二阶色散长度(定义为 $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$), L_{NL} 为非线性长度(定义为 $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$), β_2 为二阶色散系数(即 GVD 系数), γ 为非线性系数, P_0 为入射光脉冲的峰值功率, T_0 为入射光脉冲在 $1/e$ 处的半宽度。高阶孤子在光纤中的初始窄化过程与孤子阶数 N 紧密相关,由(1)式可知,在给定的光纤中,对于具有相同脉冲宽度的光脉冲,脉冲的峰值功率 P_0 越大,孤子阶数 N 越大,对应的高阶孤子的初始窄化过程越明显。当孤子阶数 $N > 5$ 时,用来进行孤子压缩的光纤长度 L_{opt} 约为^[15]

$$L_{opt} \approx \sqrt{6L_D L_{NL}} = \sqrt{\frac{6T_0^2}{\gamma P_0 |\beta_2|}}. \quad (2)$$

由于 HNLF 的非线性系数大而色散系数小,对于具有相同脉冲宽度和峰值功率的光脉冲,其在 HNLF 中的孤子阶数 N 一般会比在普通单模光纤(SMF)中的孤子阶数大,因此通常会采用 HNLF 对光脉冲进行孤子压缩。

3 实验与结果

基于波长双环路 OEO 结构,同时利用啁啾压缩和孤子压缩效应产生光窄脉冲的实验装置如图 1 所示。实验中,两个相对独立的 DML 分别发出不同波长的两束光,分别通过对应的可调光延时线(ODL)和光偏振控制器,经光波分复用器(WDM)1 合成一路进入 PM。从 PM 出来的光通过一段 DCF,被光耦合器分成两部分,一部分光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入 HNLF 进行光孤子压缩,输出光窄脉冲。另一部分光信号进入双环路结构,即光信号经 WDM 2 后被分成上述不同波长的两路,分别通过不同长度的两臂 SMF(3 km 和 90 m)和对应的光纤拉伸器,再经 WDM 3 合成一路,实验所用的 WDM 1~3 的隔离度可达 45 dB。从双环路结构出来的光信号被光电探测器(PD)转化为微波信号。微波信号经过中心频率为 20 GHz、带宽为 8 MHz 的滤波器选频后,被微波耦合器 2 分成两部分,一部分经过微波放大器放大之后分别调制到 DML 和 PM 上构成振荡回路,另一部分作为反馈信号进入锁相环模块。锁相环模块大体包括三部分:集成锁相环板、100 MHz 高稳晶振(作为低频参考源)和滤波器,通过集成锁相环板将 OEO 锁定到低频参考源上,输出的鉴频鉴相信号通过带宽为 1 kHz 的低通环路滤波器,被送到两个光纤拉伸器上完成对 OEO 腔长的控制。

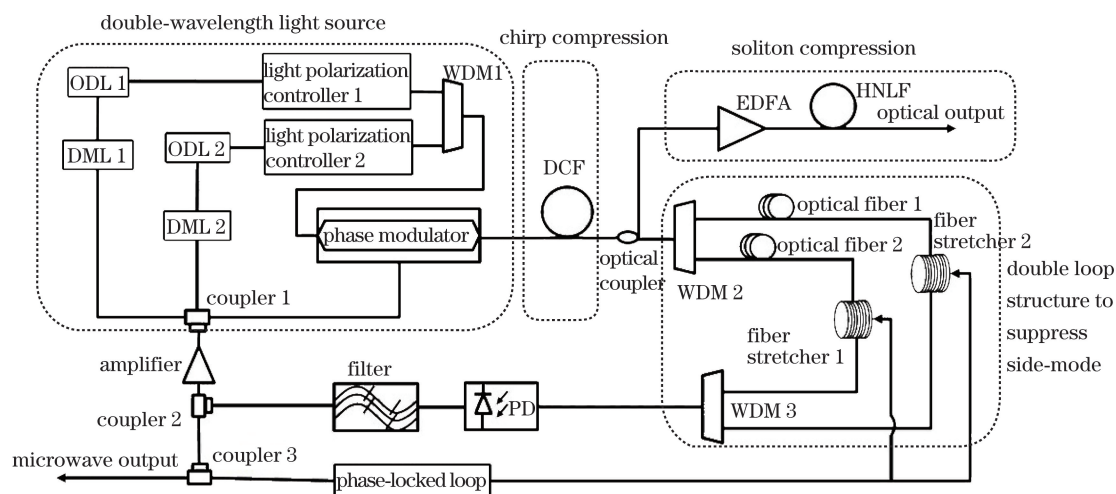


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

这种波长双环路 OEO 可以产生高质量的单一频率的微波信号。当断开一路激光器时,其结构与普通单环 OEO 相同。为了分析其边模抑制的效果,对比了双环路起振的频谱和单一环路起振的频谱。利用美国安捷伦科技公司的 Agilent 8564EC 电谱仪分别测量了双环路 OEO 和相对应的单环路 OEO 的频谱,以频谱中心频率为中心,在不同扫频宽度下的频谱图如图 2 所示。通过对比可以看出,波长双环 OEO 结构产生的微波信号边模抑制比为 65 dB,该结构有效改善了边模抑制比,可获得单一频率的振荡信号。

在系统的光域部分,两个 DML 均被 OEO 产生的微波信号调制,产生了光脉冲和光频率啁啾,在频域上体现为光谱的展宽。两路光载波分别通过相对应的 ODL 之后,合成一路进入 PM,用光谱分析仪测得的进入 PM 之前的光脉冲图像如图 3(a)所示。PM 同样由 OEO 产生的微波信号进行调制,并产生光频率啁啾。调节两个 ODL,使得两个 DML 产生的啁啾与 PM 产生的啁啾变化同步,从而获得最大的啁啾率。在频域上体现为光谱展至最宽。用光谱分析仪测得的经过 PM 之后的光脉冲图像如图 3(b)所示,用示波器采样得到的时域图像如图 3(c)所示。之后进入一段长约 200 m、色散系数为 $-87.8 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 的 DCF,进行啁啾压缩,脉冲宽度被压缩至 7.3 ps。然后经过 EDFA 放大至 30 dBm,再进入一段长为 2.5 km、GVD 系数 β_2 为 $-4.5 \times 10^3 \text{ fs}^2/\text{m}$ 、非线性系数 γ 为 $11.5 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的 HNLF,进行光孤子压缩,由(1)式计算得孤子阶数为 30,脉冲宽度被进一步压窄至 1.2 ps,对应的光谱宽度为 2.85 nm。在光输出端用示波器测得的时域图如

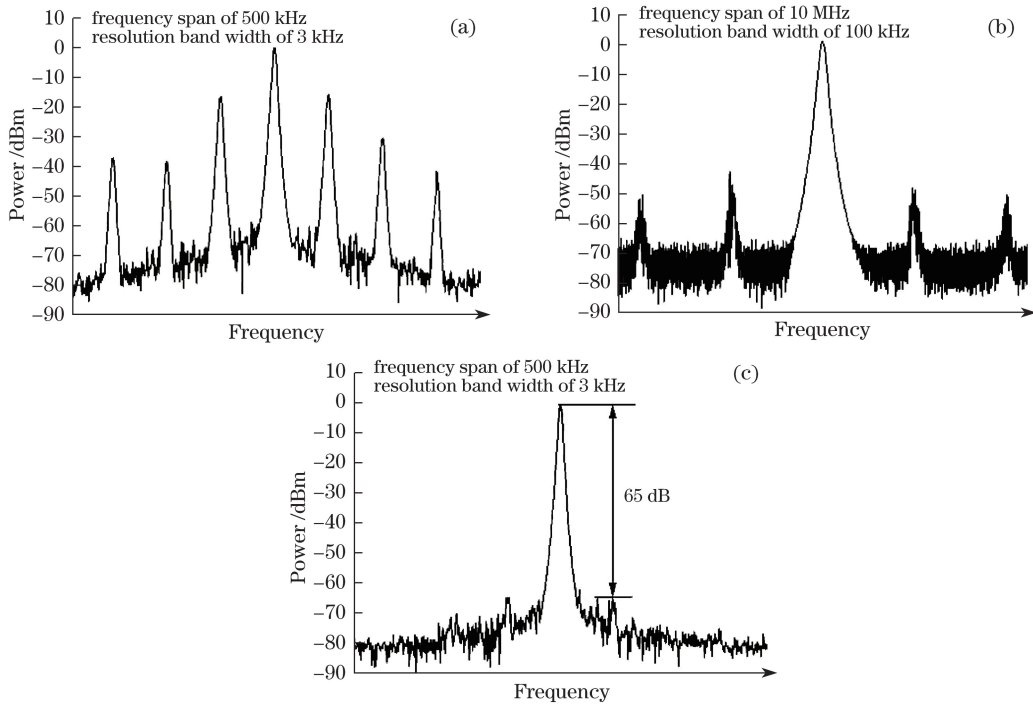


图 2 OEO 在各个条件下的频谱图。(a) 长度为 3 km 的单环 OEO;(b) 长度为 90 m 的单环 OEO;(c) 双环 OEO

Fig. 2 Spectra of OEO under different conditions. (a) Single-loop OEO with length of 3 km;

(b) single-loop OEO with length of 90 m; (c) dual-loop OEO

图 3(d)所示,用光谱分析仪测得的光谱图如图 3(e)所示,两路光的中心波长分别约为1549 nm和 1554 nm,双脉冲中心波长间隔为 5 nm。用自相关仪对 DCF 啁啾压缩和 HNLF 孤子压缩之后光脉冲的宽度分别进行测量,对比结果如图 3(f)所示。

光窄脉冲源的稳定性是影响其应用的至关重要的指标。这种稳定性包括两个方面,即重复频率的瞬时稳定性和长期稳定性。对于光脉冲的瞬时稳定性而言,可以用瞬时抖动这一指标进行评价,而瞬时抖动可以通过系统中微波信号的相位噪声曲线得到。利用美国安捷伦科技公司的 Agilent N9030A 频谱分析仪测量得到的微波信号单边带(SSB)相噪曲线如图 4 所示,其中锁定带宽 1 kHz 以内的部分来自于低频参考源的倍频,1 kHz 以外的部分来自于 OEO。对相位噪声谱按下面公式进行计算可以得到对应的瞬时抖动 τ_j ^[16]:

$$\tau_j = \frac{1}{2\pi f_R} \sqrt{2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\Phi}(f) df}, \quad (3)$$

式中 $S_{\Phi}(f)$ 为系统微波信号的相位噪声谱, f_R 为起振频率, f_{\min} 和 f_{\max} 分别取 100 Hz 和 1 MHz,通过计算得到光脉冲的瞬时抖动为 6.75 fs。

光脉冲的长期稳定性可以用系统微波信号的长期频率漂移进行评价。系统中使用了锁相环技术,对腔长进行了有效补偿,很好地解决了系统中长光纤随温度漂移的问题。在实际测试中,为了测得更精确的频率变化量(一般频谱分析仪的最小分辨率为 1 Hz),采用了下变频的方法^[17],即用另一个美国安捷伦科技公司的 Agilent E8257D 高稳微波源(频率稳定度为 3×10^{-8})同系统的微波信号进行混频,将系统的微波信号变到几十千赫兹,然后使用具有更高频率分辨率的美国惠普公司的 HP 3562A 动态信号分析仪对其进行测量。让整个系统连续工作 1 h,每隔 1 min 记录一次测试数据。当 HP3562A 的频带宽度为 640 mHz,分辨率带宽为 800 μ Hz 时,被测信号的频率漂移随时间变化的曲线如图 5 所示,由此得到频率漂移量小于 ± 75.6 mHz,说明本实验系统产生的光窄脉冲源具有较好的长期稳定性。

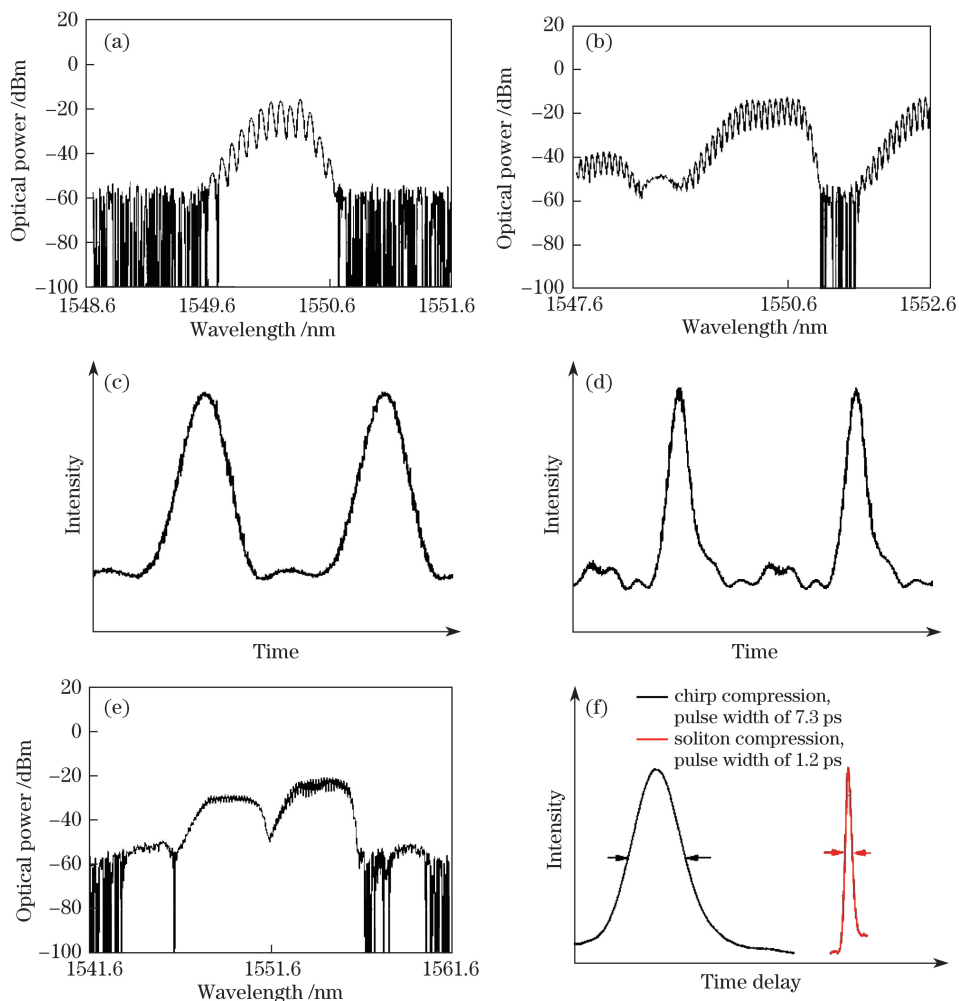


图 3 (a) 进入 PM 之前的光谱图; (b) 经 PM 输出的光谱图; (c) 经 PM 输出的光脉冲时域图; (d) 光输出端的光脉冲时域图; (e) 光输出端的双波长光谱图; (f) 啁啾压缩和孤子压缩的光脉冲自相关曲线对比图

Fig. 3 (a) Spectrum of pulse before entering PM; (b) spectrum of pulse outputting from PM; (c) time domain diagram of pulse outputting from PM; (d) time domain diagram of pulse at output end; (e) dual-wavelength spectrum of pulse at output end; (f) comparison of autocorrelation traces of pulses after chirp compression and soliton compression

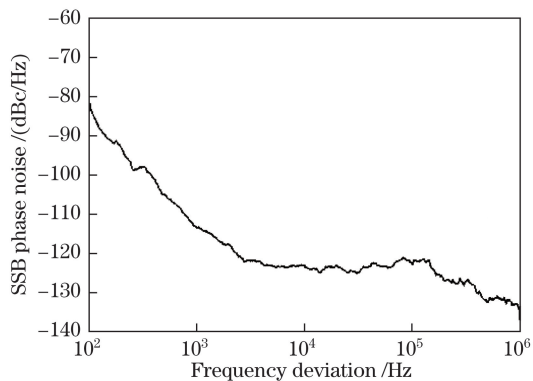


图 4 微波信号相位噪声的拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve of phase noise of microwave signal

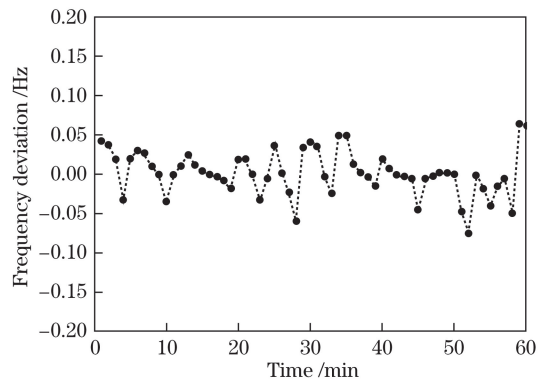


图 5 微波信号 1 h 内的频率漂移

Fig. 5 Frequency drift of microwave signal within 1 h

4 结 论

提出了一种在波长双环路 OEO 中,利用啁啾压缩和孤子压缩效应产生光窄脉冲的新型方案。此方案能够同时产生双波长光窄脉冲。将双环路 OEO 产生的高质量微波信号直接调制到 DML 和 PM 上,产生光脉冲和光啁啾。利用 DCF 和 HNLF 对光脉冲进行啁啾压缩和孤子压缩,获得光窄脉冲。采用锁相环技术对系统腔长进行有效控制,使得光脉冲的长期稳定性得到极大改善。

参 考 文 献

- [1] Devgan P, Lasri J, Tang R, *et al.* Ultra-low-jitter multiwavelength synchronised optical pulse source for C-, L- and U-bands[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(18): 1337-1339.
- [2] Huang Yan, Fu Songnian, Liu Bin, *et al.* Optimization of linear optical sampling analog front-end and test for 128 Gb/s signals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0206002.
黄 炎, 付松年, 刘 彬, 等. 线性光采样模拟前端研制与 128 Gb/s 信号测试[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0206002.
- [3] Guo X H, Olle V, Quarterman A, *et al.* Monolithically integrated selectable repetition-rate laser diode source of picosecond optical pulses[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4144-4147.
- [4] Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.* Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302002.
田小程, 张 崑, 朱 娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302002.
- [5] Zhang Shumin, Fan Hong, Lü Fuyun, *et al.* Soliton pulses in an erbium-doped fiber ring laser and its use in supercontinuum generation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2191-2195.
张书敏, 范 虹, 吕福云, 等. 孤子光脉冲的产生及其应用研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2191-2195.
- [6] Lasri J, Bilencia A, Dahan D, *et al.* A self-starting hybrid optoelectronic oscillator generating ultra low jitter 10-GHz optical pulses and low phase noise electrical signals[J]. *IEEE Photon Technology Letters*, 2002, 14(7): 1004-1006.
- [7] Zhong X Q, Xiang A P. Generation of time-dependent ultra-short optical pulse trains in the presence of self-steepening effect[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(2): 624-629.
- [8] Chembo Y K, Hmima A, Lacourt P A, *et al.* Generation of ultralow jitter optical pulses using optoelectronic oscillators with time-lens soliton-assisted compression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(22): 5160-5167.
- [9] Yao X S, Maleki L, Dual microwave and optical oscillator[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(24): 1867-1869.
- [10] Dahan D, Shumakher E, Elsenstein G. Self-starting ultralow-jitter pulse source based on coupled optoelectronic oscillators with an intracavity fiber parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1623-1625.
- [11] Huang N B, Li M, Deng Y, *et al.* Optical pulse generation based on an optoelectronic oscillator with cascaded nonlinear semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(1): 5500208.
- [12] Hu H, Yu J L, Zhang L T, *et al.* Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator[J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8931-8937.
- [13] Osinski M, Buus J. Linewidth broadening factor in semiconductor lasers - An overview[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 9-29.
- [14] Litchinitser N M, Agrawal G P, Eggleton B J, *et al.* High-repetition-rate soliton-train generation using fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 1998, 3(11): 411-417.
- [15] Taira K, Kikuchi K. Subpicosecond pulse generation using an electroabsorption modulator and a double-stage pulse compressor[J]. *IEEE Photon Technology Letters*, 2003, 15(9): 1288-1290.
- [16] Lasri J, Devgan P, Tang R, *et al.* Self-starting optoelectronic oscillator for generating ultra-low-jitter high-rate (10 GHz or higher) optical pulses[J]. *Optics Express*, 2003, 11(12): 1430-1435.
- [17] Jia S, Yu J L, Wang J, *et al.* A novel optoelectronic oscillator based on wavelength multiplexing[J]. *IEEE Photon Technology Letters*, 2015, 27(2): 213-216.