

利用单光源光电振荡器实现多波长光脉冲 与电时钟信号产生

江 阳^{1,2} 于晋龙² 张立台² 吴 波² 张 莉¹ 杨恩泽²

¹贵州大学理学院, 贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025
²天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 提出了一种利用单光源光电振荡器(OEO)结构实现多波长光脉冲输出的方案。通过一个直调光源和光谱切片技术在 OEO 腔内可以产生不同中心波长的光脉冲和电时钟信号。腔内多个波长通道自然形成的多环路结构可以有效地抑制信号边模。在 5 GHz 频率的实验演示中, 该系统产生了脉宽约 10 ps, 抖动 1 ps 的单波长脉冲、20 GHz(4×5 GHz)的时分复用脉冲与波/时分复用脉冲。所得到电时钟信号的相位噪声在频偏 10 kHz 处为 -113 dBc/Hz, 边模抑制比为 100 dBc/Hz。

关键词 光电振荡器; 光脉冲; 自相位调制; 边模抑制; 相位噪声

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2093

Generation of Multi-Wavelength Optical Pulses and Electrical Clock Signal Utilizing Optoelectronic Oscillator with Single Light Source

Jiang Yang^{1,2} Yu Jinlong² Zhang Litai² Wu Bo² Zhang Li¹ Yang Enze²

¹Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University,
Guiyang, Guizhou 550025, China

²School of Electronic Information Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and
Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A scheme of generating multi-wavelength optical pulses based single light source optoelectronic oscillator (OEO) is proposed. By utilizing a directly modulated laser and spectral slicing technique, multi-wavelength optical pulses and electrical clock signal are generated in an OEO cavity. Multi-wavelength channels form a multi-loop configuration naturally, which can effectively suppress sidemodes. In demonstration, 10-ps-wide optical pulses at 5 GHz repetition rate are generated with 1 ps timing jitter, which can be arranged in 20 GHz (4×5 GHz) OTDM and time-/wavelength-interleaved optical pulse stream at different nodes. Along with the optical outputs, 5 GHz electrical signal with low phase noise (-113 dBc/Hz at 10 kHz offset from the carrier) and -100 dBc/Hz spurious modes suppression is also obtained.

Key words optoelectronic oscillator; optical pulse; self-phase modulation; side-mode suppression; phase noise

1 引 言

高质量的多波长光窄脉冲源在现代光通信系统中具有广泛的应用, 例如光时分复用(OTDM)、波分复用(WDM)、全光解复用以及光学测量等方面。兼顾 OTDM 和 WDM 技术, 一个多波长光窄脉冲

源还可以形成不同波长在时间上的间插复用, 即波/时分复用光脉冲, 它在光时分复用、全光取样^[1]、串并转换^[2]、光码分多址(OCDMA)^[3]等方面都有很好的应用。对于多波长光脉冲的产生已经有很多报道的方案, 例如自注入的法布里-珀罗(F-P)激光

收稿日期: 2008-11-07; 收到修改稿日期: 2008-12-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)、贵州省科学技术基金(20082045)和贵州省国际科技合作重点项目计划(黔科合外 G 字(2007)400112 号)资助课题。

作者简介: 江 阳(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: jiangyang415@163.com

器^[4]、超连续谱切片^[5]以及主动锁模激光器^[6]等。然而,这些方案都需要一个额外的微波信号源,而微波信号源的相位噪声将决定或限制所生成脉冲的抖动。

光电振荡器(OEO)是能产生光、电两种输出的优质微波信号源,通过合理设计 OEO 结构或在 OEO 系统中采用恰当的器件,可以在产生高品质电微波信号的同时输出低抖动的光脉冲。例如将 OEO 与一个锁模光纤激光器耦合(COEO),可实现 2fs 超低抖动光脉冲与同步时钟信号的产生^[7,8]。利用直调激光器作为 OEO 的光源^[9]或利用电吸收调制器(EAM)的调制特性^[10],也可以实现光脉冲的产生。但是若要产生多波长脉冲则需要多个光源^[11]。此外,EAM 通常具有较大的插入损耗,所产生的脉冲宽度也较宽,这就在很大程度上限制了这种方案的实用性。

在 OEO 系统中,需要特别指出的是环路长度与单模起振的矛盾。从 OEO 的工作原理上讲,在环路内使用长光纤有利于获得低相噪,高谱纯度的微波信号,进而提高输出光脉冲的抖动性能。但是由于长环会形成大量小间隔的边模且难以被滤波器滤除,这又极大的影响了输出信号的质量。为了抑制边模获得单模起振,多环路结构 OEO 是一种理想的方案。光、电混合与光域耦合双环路结构是两种成功的设计^[12~15],然而它们使得系统成本增加,结构复杂。

本文提出了一种单光源实现多波长光脉冲输出的多环路 OEO 结构,它利用一个工作在大信号直调条件下的直调激光器作为光源,在 OEO 环路内利用光纤中的非线性效应实现光谱展宽,通过光谱切片可产生多波长脉冲源。在系统光域的不同节点上可获得单波长窄脉冲、OTDM 脉冲以及波/时分

复用脉冲的输出并在电域产生同频微波信号。不同的波长通道自然构成了 OEO 中的多环路结构,在不引入噪声的情况下获得了良好的边模抑制效果。

2 实验原理

单光源的多波长脉冲 OEO 结构如图 1 所示。直调激光器输出的脉冲可表示为

$$E(t) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \exp\{j[\omega_0 t - \alpha(t/T)^2/2]\},$$

式中 T 为脉冲宽度, ω_0 为光频率而 α 为线宽增强因子。从上式可以看出,因子 $\alpha(t/T)^2/2$ 决定了输出的光脉冲具有一定的线性啁啾,且符号为负。因此该脉冲经过一定色散量的色散补偿光纤(DCF)后将会被压窄。当压窄的光脉冲被大功率掺铒光纤放大器(EDFA)放大后注入色散位移光纤(DSF),此时较强的自相位调制(SPM)会使得脉冲光谱极大的展宽。在 DSF 的输出端,光信号分为两路,一路由时分复用器产生 OTDM 光脉冲输出,一路被波分复用器(WDM)将光谱切片获得多波长脉冲。将各路光脉冲引出一部分并通过光延时线(ODL)调节延时和衰减器(ATT)调节各路功率后,可以形成波/时分脉冲输出。剩余的各路光信号由另一个波分复用器耦合为一路后被 PD 接收,并在电域进行滤波和放大后再进行反馈调制,完成多环路的 OEO 结构。由于切出的各路波长在 OEO 环路内经历不同的延时,而各自振荡环路长度决定的模式间形成增益竞争,最终只有满足每一个环路长度的共同模式得以强烈起振,实现边模的抑制。只要各路波长间隔大于 PD 的响应带宽,将不会在电信号上出现拍噪声。

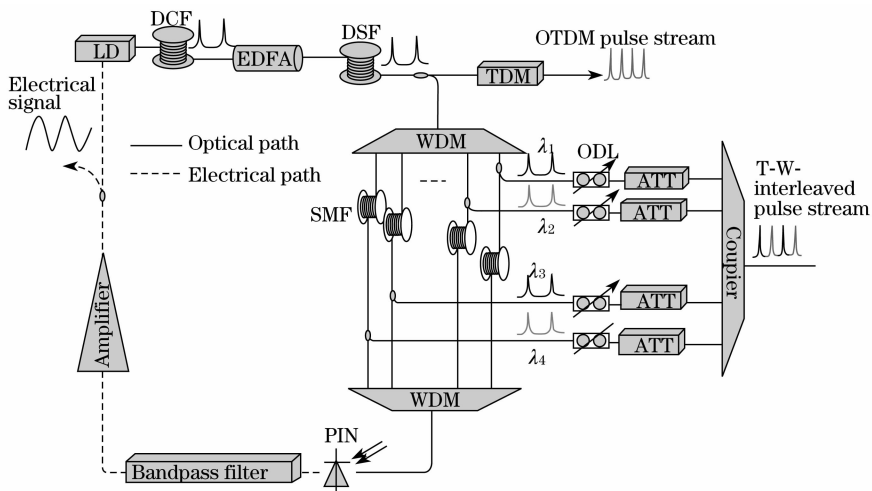


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果

在实验系统中使用了阈值电流为 18 mA 的分布反馈(DFB)直调激光器,其工作时偏置电流为 50 mA。波分复用器的通道带宽为 0.5 nm,通道间隔为 100 GHz。12 GHz 带宽的 PIN 光电探测器用于光电转换。中心频率 5 GHz 带宽 60 MHz 的电滤波器用于选频滤波,其输出信号由一个射频(RF)放大器放大后反馈到直调激光器。

当 OEO 稳定起振后,25 mA 的 5 GHz 正弦型电流信号将加在直调激光器上。在此条件下,激光器输出中心波长为 1553.3 nm 的光脉冲。经过一段 DCF [$D = -69 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$]后,脉冲被压窄到 9.5 ps,其对应的光谱宽为 0.512 nm。由于直调产生的脉冲具有部分不能被 DCF 补偿的非线性啁啾,此时光脉冲的时间带宽积为 0.6,没有达到变换极限。图 2 给出了此时脉冲的波形、光谱和自相关曲线。

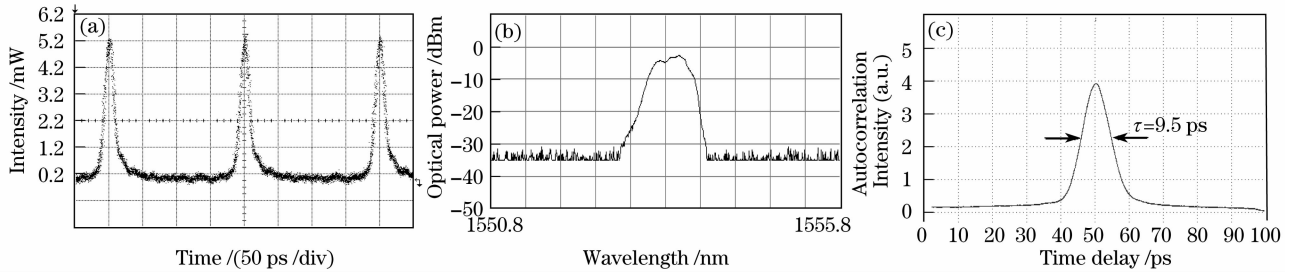


图 2 经过 DCF 后的光脉冲:(a) 5 GHz 光脉冲,(b) 光谱(分辨率 0.06 nm),(c) 自相关曲线
Fig.2 Optical pulse after DCF: (a) 5 GHz optical pulse, (b) optical spectrum with 0.06 nm resolution, (c) autocorrelation trace

为了获得光谱的展宽,窄脉冲随后被 EDFA 放大至 23 dBm(平均光功率)后注入的 10 km 长的 DSF[零色散波长点为 1555 nm,色散斜率为 $0.084 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$]。此时,光脉冲处于 DSF 的正常色散区,主要的非线性效应为 SPM,它可使光

脉冲光谱展宽至 2.8 nm,如图 3(a)所示。由于光纤色散的作用,光谱展宽后的脉冲基本保持原有脉宽[如图 3(b)所示],将其分出一部分后可复用得到重复频率 20 GHz($4 \times 5 \text{ GHz}$)的 OTDM 脉冲输出,其光谱和时域波形由图 3(c)、(d)给出。

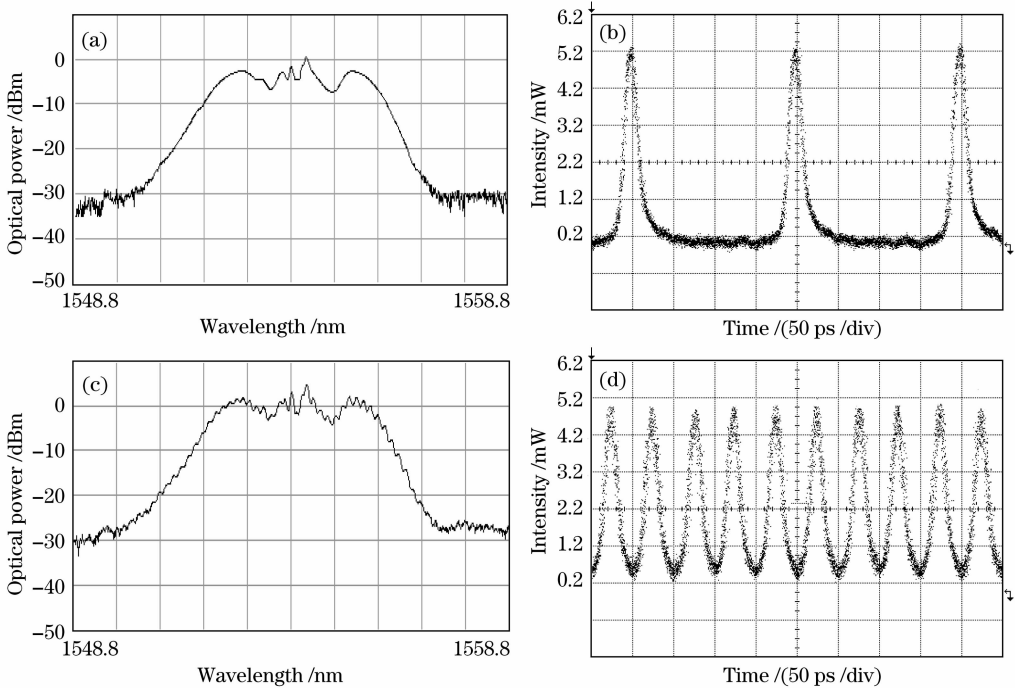


图 3 谱展宽后的光脉冲:(a) 经 DSF 展宽后光谱,(b) 对应的脉冲,(c) 时分复用后的光谱,(d) OTDM 光脉冲 [(a)和(c)的光谱分辨率为:0.06 nm]

Fig.3 Experimental results showing the optical pulse after broadening; (a) broadened optical spectrum only after DSF; (b) corresponding pulse of (a); (c) optical spectrum after TDM; (d) OTDM pulse stream. [(a) and (c) with the resolution of 0.06 nm]

根据光谱展宽的情况,利用波分复用器可以切出中心波长分别为 1551.7, 1552.5, 1553.3, 1554.1 和 1554.9 nm 的 5 路脉宽约为 10 ps 的光脉冲。这一过程在 OEO 环路内实现了多波长光脉冲产生。考虑到光谱的平坦性对脉冲形状的影响,弃用了中心波长为 1553.3 nm 一路,剩余 4 路的脉冲波形、光谱和自相关曲线由图 4(a)~(d) 给出。从保留的 4 路

中各自取出一部分光信号可复用得到 20 GHz (4×5 GHz) 的波/时分复用脉冲,其波形和对应的光谱见图 4(e)~(f)。环路中的这 4 路光脉冲分别经过 1.4 km, 5.4 km, 600 m 和 1 m 的普通单模光纤产生不同的延时后由另一个波分复用器耦合为一路(若不考虑损耗,也可用 4×1 路耦合器代替)并注入 PD 接收,形成多环路结构。由于此时通道

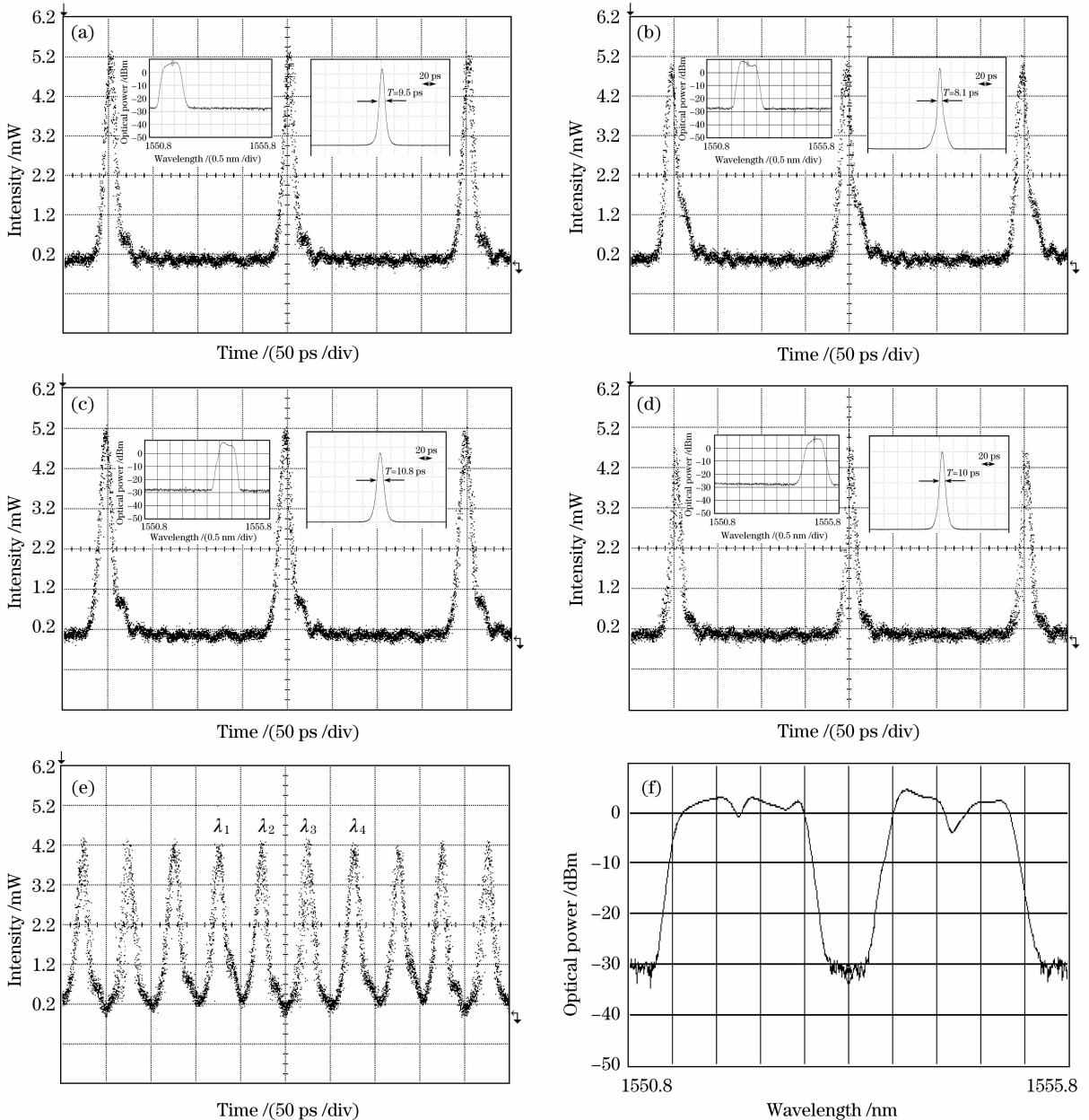


图 4 每个通道的光脉冲以及波/时分复用脉冲:(a)~(d) 1551.7, 1552.5, 1554.1 和 1554.9 nm 通道上的脉冲波形,图中插入的分别为各自的光谱和自相关曲线。(e) 波/时分复用脉冲波形 (f) 波/时分复用脉冲的光谱,分辨率 0.06 nm)

Fig. 4 Output pulses on each channel and T-W-interleaved optical pulse source. (a)~(d) Time domain traces for wavelength at 1551.7, 1552.5, 1554.1 and 1554.9 nm. The inset of graphs shows the corresponding optical spectra and autocorrelation traces. (e) Waveform of T-W-interleaved optical pulse source, and (f) the optical spectrum of T-W-interleaved optical pulse source with resolution of 0.06 nm

间隔远大于 PD 带宽,将不会在电域出现拍噪声。应该指出,该方案可以产生路数更多、脉宽更窄的脉冲^[16]。其中的关键在于注入 DSF 光脉冲的脉宽应更小(或功率更高)以便通过 SPM 产生足够的啁啾并由孤子压缩效应获得更小的脉宽。此外在进行光谱切片时,也需要适当放大窗口宽度,以避免带宽限制引起脉宽增加。

从系统原理上看,若断开 1-3 个波长通道,OEO 仍然可以起振。图 5(a)~(d)分别给出了振荡环路数从 4 降到 1 时所测的 RF 信号谱。从图中可以明显的看出,对于单环路情况,由于滤波器带宽过大,不能得到稳定占有优势的起振模式;而 4 个环路时,

边模得到了有效抑制。图 6 给出了 4 环路时所测得的单边带(SSB)相位噪声,可以读出此时相位噪声在频偏 10 kHz 为 -113 dBc/Hz,边模抑制比约为 100 dBc/Hz。此时相位噪声的主要来源于激光器的相对强度噪声(RIN)、EDFA 的自发辐射噪声(ASE)-ASE 拍噪声、信号和 ASE 的拍噪声^[15]。为了得到光脉冲的抖动 σ ,对图 6 的噪声功率谱从 100 Hz~10 MHz 的范围内进行积分,并根据关系式

$$\sigma = \sqrt{2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} L(f) df / 2\pi f_{\text{osc}}},$$

求出抖动为 1 ps,式中 f_{osc} 为起振频率。

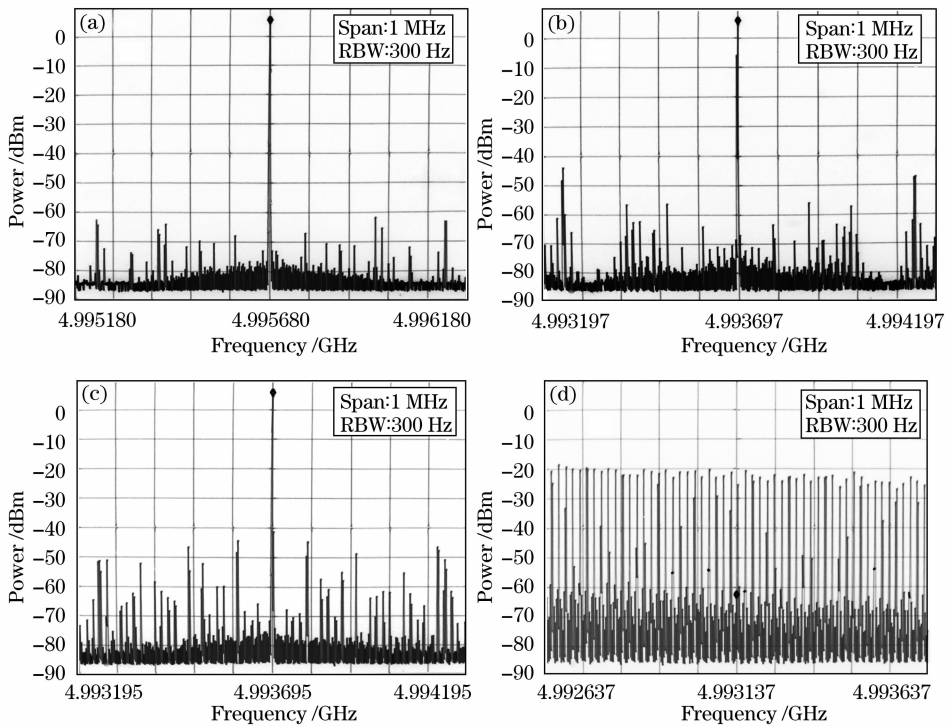


图 5 不同环路数的 RF 信号谱: (a) 四环, (b) 三环, (c) 双环, (d) 单环

Fig. 5 RF spectra with different loop number. (a) Four loops, (b) three loops, (c) two loops and (d) single loop

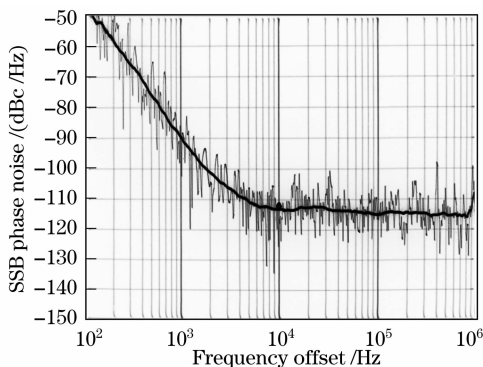


图 6 四环路时所测得的单边带相位噪声曲线

Fig. 6 SSB phase noise measurement in case of four loops

4 结 论

分析设计了一种单光源 OEO 产生多波长光脉冲的系统。该方案利用 OEO 环内的非线性效应实现了光谱展宽,并通过光谱切片产生了多波长光脉冲并通过产生的不同波长通道自然形成一个多环路结构以抑制信号边模。在 5 GHz 工作频率的实验演示中,该 OEO 系统在光域同时输出了脉宽约 10 ps 的光脉冲和复用得到的 20 GHz OTDM 与波/时分复用脉冲;在电域获得了低相位噪声的同频电时钟信号,信号边模也得到了理想抑制。该方案具有结构简单,信号质量比较理想的特点,并且应该特

别指出的是,通过升级相应的光、电器件,该系统完全可以在更高频率条件下工作。

参 考 文 献

- 1 Yariv, A., Koumans, R. G. M. P. Time interleaved optical sampling for ultra-high speed A/D conversion[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21): 2012~2013
- 2 K. L. Lee, A. Nirmalathas. Parallel processing of optical labels using switching-wavelength pulsesource constructed from novel chirped fiber grating based SOA ring laser[C]. *CLEO*, 2005, 1783~1784
- 3 Wang X., Lee K. L., Shu C. *et al.*. Multiwavelength self-seeded Fabry-Perot laser with subharmonic pulse-gating for two-dimensional fiber optic-CDMA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(12): 1361~1363
- 4 Ka-Lun Lee, Chester Shu, Hai-Feng Liu. Subharmonic pulse-gating in self-seeded laser diodes for time- and wavelength-interleaved picosecond pulse generation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(3): 205~213
- 5 Hirokazu Takenouchi, Ryo Takahashi, Kiyoto Takahata *et al.*. 40-Gb/s 32-bit optical packet compressor-Decompressor based on an optoelectronic memory[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7): 1751~1753
- 6 K. L. Lee, C. Shu. Switching-wavelength pulse source constructed from a dispersion-managed SOA fiber ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 513~515
- 7 X. Steve Yao, Larry Davis, Lute Maleki. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(1): 73~78
- 8 Ertan Salik, Nan Yu, Lute Maleki. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 444~446
- 9 Yang Jiang, Jin-long Yu, Hao Hu *et al.*. Phase-modulator-based optoelectronic oscillator for generating short optical pulse and microwave signal[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(9), 050902
- 10 Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Renyong Tang *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
- 11 P. Devgan, J. Lasri, R. Tang *et al.*. Ultra-low-jitter multiwavelength synchronised optical pulse source for C-, L- and U-bands[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 473~474
- 12 X. S. Yao, L. Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(1): 79~84
- 13 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922
江 阳,于晋龙,王耀天 等. 一种新型双环光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922
- 14 Jiang Yang, Yu Jinlong, Hu Hao *et al.*. Self-starting nonreturn-to-zero/return-to-zero signal, optical, electrical clock signal generator and data format conversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1397~1400
江 阳,于晋龙,胡 浩 等. 自启动的非归零/归零码和光电时钟信号发生器及码型转换[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1397~1400
- 15 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(11): 807~809
- 16 Hu Hao, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. 10 GHz short optical pulses source with ultra-low jitter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1241~1244
胡 浩,于晋龙,张立台 等. 10 GHz 超低抖动光短脉冲源[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1241~1244