

光路往返的双环路光电振荡器

梁建惠 江 阳 白光富 李红霞 单媛媛 马 闯 贾振蓉 訾月姣

(贵州大学理学院物理系, 贵州 贵阳 550025)

摘要 提出并分析验证了一种由光场往返调制实现的光域双环路光电振荡器(OEO)。系统中光信号往返两次通过马赫-曾德尔调制器(MZM)后再进行反馈调制,使得环路中的光纤延时利用率加倍,并构成两个不同环长的光学环路。理论上对该结构的起振条件和双环选模原理进行了分析,经过与传统单环光电振荡器实验对比,此结构能有效提高边模抑制比,所测得的边模抑制比为 48.33 dB,在频偏 10 kHz 时的单边带相位噪声为 -97.35 dBc/Hz。该结构无需增加有源器件,降低了系统中光纤的使用量,简化了实验的控制参数。信号在两个环路中循环时相向传输,进而消除了随机干涉和拍噪声引入。

关键词 光纤光学;光电振荡器;反馈调制;边模抑制

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0406002

Dual-Loop Optoelectronic Oscillator with Reciprocating Optical Path

Liang Jianhui Jiang Yang Bai Guangfu Li hongxia Shan Yuanyuan Ma Chuang
Jia Zhenrong Zi Yuejiao

(Department of Physics, College of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract A dual-loop optoelectronic oscillator (OEO) with reciprocating optical path is presented. The utilization ratio of delay for a fiber can be doubled due to feedback modulation after the optical signal passed through the Mach-Zehnder modulator (MZM) twice. And two optical loops with different lengths can be formed in the same way. This mechanism is based on the theoretical analysis of the oscillate condition and mode selection principle of the dual-loop configuration about this dual-loop configuration is analyzed. Furthermore, compared with the conventional optoelectronic oscillator, the experimental results show that such dual-loop configuration can effectively improve the side-mode suppression ratio and the side-mode suppression ratio is 48.33 dB, the single side band phase noise is -97.35 dBc/Hz at 10 kHz of frequency offset. In addition, the consumption of fibers can be reduced and the control parameters are sampled since no extra active devices in this dual-loop OEO are needed. The random interference and beat noise can be eliminated when the signal in the two loops transmits in opposite direction.

Key words fiber optics; optoelectronic oscillator; feedback modulation; side-mode suppressing

OCIS codes 060.2320; 060.2330; 060.4080

1 引 言

微波光子技术^[1-3]是利用光子技术的优势来实现微波技术领域的相关应用,近几十年来,得到了极大的发展。虽然微波光子技术研究内容广泛,但光子微波信号的产生始终是一个重要部分,它决定着

微波光子系统的总体性能。目前,利用光子技术产生微波信号的方法有很多,其中光电振荡器^[4-7](OEO)以其高品质的光、电微波信号产生特性获得了人们的广泛关注。

OEO 是一个由光源、电光调制器、长光纤(作为

收稿日期: 2013-10-10; **收到修改稿日期**: 2013-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61061004)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0099)、贵州省优秀青年科技人才专项基金[(2009)09]

作者简介: 梁建惠(1989—),女,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术方面的研究。

E-mail: jhliang1989@163.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

储能介质)、光电探测器、电放大器和滤波器等构成的正反馈振荡回路。已有的 OEO 研究结果表明, OEO 系统存在的一个主要问题是信号高 Q 值与边模抑制之间的矛盾。对于 OEO 系统, 振荡器的 $Q(Q = 2\pi ft_d)$ 值^[8] 由能量在环路中保持振荡的时间决定, 其中 f 为振荡频率, t_d 为信号在谐振腔中传输一圈的时间。因此要想 OEO 能输出高质量的微波信号, 需要在 OEO 中构建足够长的环路。与此同时, 谐振腔的长度还决定了腔内起振模式之间的频率间隔 $\Delta f(\Delta f = \frac{c}{nL})$, 其中 c 为光速, n 为折射率, L 为腔长, 可以看出谐振腔越长, 模式间隔就越小。因此, 在长腔情况下, 难以保证 OEO 的单纵模输出。为了克服以上问题已经提出了一些解决方案, 大体可以分为以下两类: 1) Yao 等^[9-10] 提出的回音廊滤波模式, 它是利用光场在微小介质小球(盘)中的振荡来完成频率选择, 这一结构具有很高的滤波器 Q 值, 在边模抑制上取得了良好的效果, 但此方案插入损耗过大, 可调谐性差, 一定程度上限制了 OEO 的应用范围; 2) 多环路结构, Yao 等^[11-12] 于 2000 年提出了光电混合的双环 OEO 结构, 它利用两个不同腔长的共同选模作用, 有效地提高了信号的边模抑制比, 但这一方案使用了两套光电转换装置, 使系统结构复杂, 噪声增大; Yang 等^[13] 于 2007 年提出了光域耦合双环路结构的光电振荡器, 这一方案不需增加任何有源器件即可实现双环 OEO 系统, 也达到了良好的边模抑制效果, 但这一方案需要仔细地控制腔内两路光场的偏振态, 使用不够灵活; Zhou 等^[14] 提出了双 OEO 注入锁定的(DIL-OEO)方案, 此方案能获得质量良好的微波信号, 但它需要两套完整的 OEO 相互注入, 这极大地增加了系统的成本。

比较而言, 光域的双环路结构是一种相对简单

易行的方法, 然而, 形成两个长腔, 就需要两盘长光纤, 这增大了光纤使用量, 也增大了系统体积。为了充分利用光域双环路 OEO 系统的边模抑制优势, 同时简化控制, 降低光纤使用量, 减小体积, 本文提出了一种光场往返调制的双环 OEO 结构, 该结构不增加有源器件的使用, 在减少使用光纤长度的同时, 构成两个长腔, 降低了系统的体积, 简化了控制参数, 提升了 OEO 的实用性。

2 实验原理

所提出的双环 OEO 结构如图 1 所示。光源发出的光经过环形器(CIR1)的 1 口和 2 口后进入马赫-曾德尔调制器(MZM)。MZM 对光场进行调制后进入长度为 L_1 的光纤并被反射器件反射再次返回 MZM 进行调制。两次调制后的光信号经过 CIR1 的 3 口后被长度为 L_2 的光纤再次延时, 最后经光电探测器(PD)转换为电信号, 并被滤波、放大后形成闭合的反馈回路。由此光路可以看出, 在 OEO 中进行振荡的信号经历了两次反馈, 两次反馈的延时来源于长度为 $2L_1$ 和 $2L_1 + L_2$ 的光路。换言之, OEO 振荡过程中的第二次调制可视为一个鉴相过程。参与鉴别的两路信号分别为延时 $2L_1$ 和 $2L_1 + L_2$ 的振荡信号。因此, 这一结构等效于一种光学双环路结构, 两个环路长度分别为 $2L_1$ 和 $2L_1 + L_2$ 。对此结构仍可利用再生反馈法为基础进行分析。利用环路反馈的递归关系^[12]:

$$\tilde{V}_i(\omega) = [g_1 \exp(j\omega\tau_1) + g_2 \exp(j\omega\tau_2)]\tilde{V}_{i-1}(\omega), \quad (1)$$

式中 $\tilde{V}_i(\omega)$ 为能量循环一圈后的复振幅。 g_1 、 g_2 分别为 1, 2 两个环路的复增益。 τ_1 、 τ_2 为两路的延时时。在形成稳定振荡后, 输出电压为

$$\tilde{V}_{\text{out}}(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} [g_1 \exp(j\omega\tau_1) + g_2 \exp(j\omega\tau_2)]\tilde{V}_i(\omega) = \frac{\tilde{V}_0}{1 - [g_1 \exp(j\omega\tau_1) + g_2 \exp(j\omega\tau_2)]}, \quad (2)$$

式中 \tilde{V}_0 为输入信号电压的复振幅。显然, 相应的输出功率为 $P(\omega) = |\tilde{V}_{\text{out}}|^2 / (2R)$, R 为光电探测器的阻抗。

$$P(\omega) = \frac{|V_0|^2 / (2R)}{1 + |g_1|^2 + |g_2|^2 - 2|g_1|^2|g_2|^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - 2(|g_1|^2 \cos \varphi_1 + |g_2|^2 \cos \varphi_2)}, \quad (3)$$

式中 φ_1 、 φ_2 为 1, 2 两个环路中的相位, 其值分别为: $\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(2L_1)n$, $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(2L_1 + L_2)n$ 。因为振荡是从噪声中选出来的, 所以

$$1 + |g_1|^2 + |g_2|^2 - 2|g_1|^2|g_2|^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - 2(|g_1|^2 \cos \varphi_1 + |g_2|^2 \cos \varphi_2) = 0, \quad (4)$$

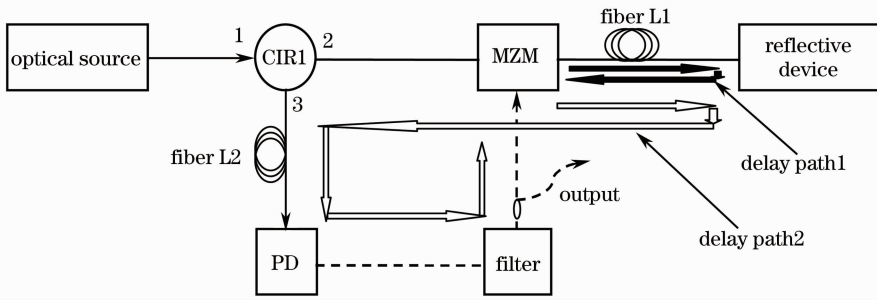


图 1 双环 OEO 结构框图

Fig. 1 Structure of the dual-loop OEO

则需要 $|g_1| = |g_2|$, $\varphi_1 = 2k\pi$, $\varphi_2 = 2m\pi$, $\varphi_2 - \varphi_1 = 2(m - k)\pi$, m, k 为整数。即信号应同时满足腔长分别为 $2L_1$ 和 $2L_1 + L_2$ 两个环路所决定的相位条件, 信号才能形成稳定的振荡并一直保持下去, 因此该结构等效于一个光域的双环路 OEO, 并且在使用 L_1 和 L_2 长度光纤条件下, 得到了长度为 $2L_1$ 和 $2L_1 + L_2$ 的两个长腔。

3 实验结果及讨论

为了验证理论分析结果, 对所提出的方案进行了实验验证, 并传统单环路的 OEO 系统进行了比较。图 2(a) 和 (b) 分别为单环路和所提出的双环

路 OEO 实验装置图。在图 2(a) 所示的实验中, 分别选择了长度约为 1.94 km 和 0.90 km 的光纤。实验中, 半导体激光器 (LD) 发出波长为 1550 nm 的激光, 通过偏振控制器 (PC) 控制光场偏振态使其在 MZM 中达到最佳调制效果。调制输出信号经过长光纤延时后被带宽为 40 GHz 的 PIN 光电探测器转换为电信号、再经过中心频率为 20 GHz, 带宽为 50 MHz 的电滤波器完成滤波, 滤波后的信号经电放大器 (EAM) 放大后反馈调制 MZM。利用频谱分析仪测得了环路长分别约为 1.94 km 和 0.90 km 时微波信号的频谱, 如图 3(a) 和 (b) 所示。

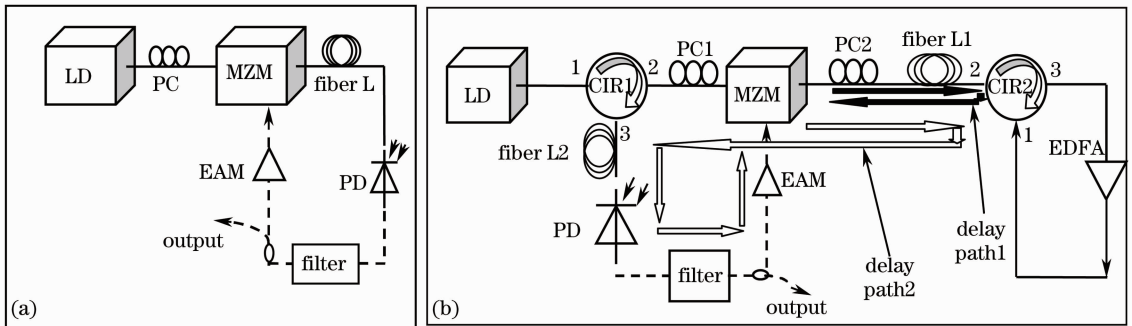


图 2 (a) 传统 OEO 实验装置图; (b) 双环 OEO 实验装置图

Fig. 2 (a) Experimental setup of the conventional OEO; (b) experimental setup of the dual-loop OEO

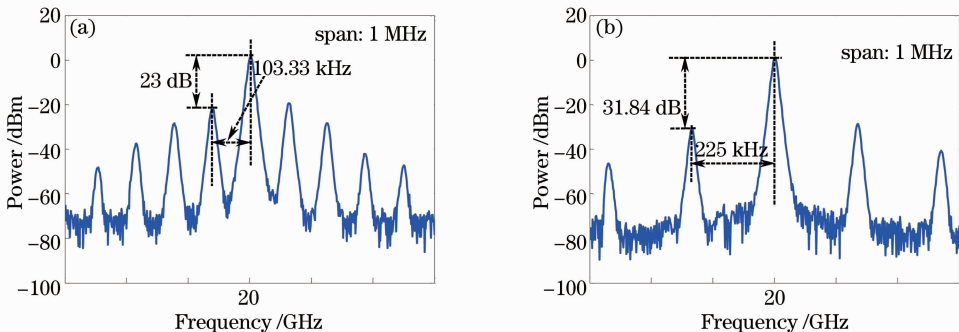
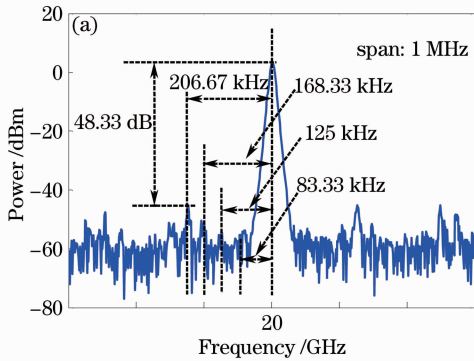


图 3 电谱图。(a) 环长为 1.94 km; (b) 环长为 0.90 km

Fig. 3 Electrical spectrum. (a) Loop length is 1.94 km; (b) loop length is 0.90 km

图 3(a)是腔长为 1.94 km 条件下所测得的电谱图(谱宽为 1 MHz)。可以看出其对应的模式间隔为 103.33 kHz,边模抑制比为 23 dB。图 3(b)是腔长为 0.90 km 时的电谱图,模式间隔为 225 kHz,边模抑制比为 31.84 dB。显然,在单环路情况下,OEO 输出信号具有很强的边模,且模式间隔由环路长度决定。

采用相同的光纤和器件,测试了如图 2(b)所示的双环结构。半导体激光器发出的光首先经过 CIR1 的 1 口和 2 口,进入 PC1。调节 PC1 使光场偏振态达到最佳进入 MZM。经过长度 $L_1=1.94$ km 的光纤延



时后通过 CIR2 的 2 口,从 3 口出射的光信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后到达 CIR2 的 1 口,再次经过长 L_1 的光纤返回并被 MZM 再次调制。这里,EDFA 用于补偿光路中的功率损耗并使得两次调制时光功率均衡,PC2 用于保证逆向调制光场的偏振态满足最佳调制条件。此后,光场通过长 $L_2=0.90$ km 的光纤延时并被 PD 转换为电信号。电信号通过滤波器、电放大器放大后反馈到 MZM。此双环 OEO 输出的信号电谱和单边带相位噪声如图 4(a)和(b)所示。

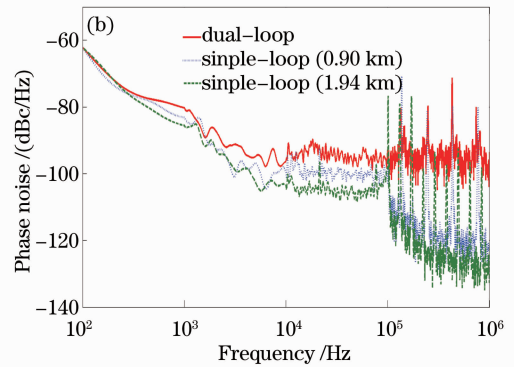


图 4 (a) 双环路电谱图; (b) 相位噪声比较图

Fig. 4 (a) Electrical spectrum of dual-loop; (b) comparison of phase noise

由图 4(a)可以看出,在此双环结构中,边模得到了良好抑制,被抑制的边模仅表现为微弱的噪声起伏。由于该双环 OEO 的两个腔长分别为 $2L_1+L_2$ 和 $2L_1$,因此它们所决定的模式间隔分别为 41.84 kHz 和 51.55 kHz。由图 4 也可以看出,这些微弱起伏的边模噪声与载波之间的间隔分别为 83.33, 125, 168.33 kHz,正好为 $2L_1+L_2$ 腔长所决定的 2,3,4 阶边模。而 $2L_1$ 腔长所决定的环路 Q 值相对较低,因此其对应的边模没有明显的单独表现。在偏离载波 206.67 kHz 处,有一个较强的边模,其同时对应 $2L_1+L_2$ 腔长所决定的 5 阶边模和 $2L_1$ 腔长所决定的 4 阶边模。由于该边模同时满足两个环路所决定的模式起振条件,因此其强度较大。即便如此,此边模的模式抑制比仍达到 48.33 dB。图 4(b)给出了单环与双环 OEO 的相位噪声比较,可以看出在频偏为 10 kHz 时双环 OEO 的单边带相位噪声为 -97.35 dBc/Hz。

图 4(a)中的边模不能得到完全抑制且表现出一定起伏,其主要原因是光信号在环路中循环时要经过调制器两次,由于其正向、反向调制度不同导致此时两个环路的 Q 值有一定差异。此外两次调制

时光功率的不完全均衡也会在一定程度上影响边模抑制比。从相位噪声的角度来看,任何双环路结构都存在一定不利因素。由于此结构对于频率的选择来源于两套模式间的公共部分,因此当两个环路中任何一个存在扰动时,会使得所选择的模式出现相位上的波动,而表现为相位噪声恶化。相关的文献分析也指出,双环结构的相位噪声在低频率处不优于单环结构,而在高频率处有一定的恶化^[15]。尽管如此,所提出的双环路方案在边模抑制方面可以得到较为理想的效果,在长腔构成方面也有效地提高了光纤的利用率,在性能、体积方面均表现出一定的优势,是一种更具实用性的结构。

4 结 论

提出了一种光域双环路的 OEO 结构,并对系统进行了理论分析。实验中,该系统产生了 20 GHz 的光、电微波信号,且效果良好;同时通过比较传统单环路与所提出双环路 OEO 的输出信号,进一步验证了所提结构的优越性,验证了理论分析的正确性。此方案的优势在于:光在环路中循环时两路光相向而行,避免了两路光的随机干涉作用,也不会产

生拍噪声；系统在减少光纤用量的同时实现了两个较长的反馈回路，保证了输出信号的质量，减小了体积，提升了 OEO 的实用性。

参 考 文 献

- 1 Xu Jing, Jiang Yang, Zhou Zhuya, *et al.*. Return-to-zero/nonreturn-to-zero signal data format conversion based on microwave photonic filter [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905008.
徐 静, 江 阳, 周竹雅, 等. 基于微波光子滤波器的归零到非归零码型转换研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905008.
- 2 Zhu Hailing, Pan Wei, Chen Jixin, *et al.*. Frequency multiplied microwave signal generation based on single passband microwave photonic filtering [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0105003.
朱海玲, 潘 炜, 陈吉欣, 等. 基于单通带微波光子滤波的多倍频微波信号产生[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0105003.
- 3 Li Hengwen, Jiang Yang, Xu Jing, *et al.*. Optical millimeter-wave sub-carrier generation based on optical parametric loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006005.
李恒文, 江 阳, 徐 静, 等. 基于光纤参量环形镜的光毫米波副载波产生[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006005.
- 4 Sun Bin, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*. K band high stability optoelectronic oscillator [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0305010.
孙 斌, 于晋龙, 王 菊, 等. K 波段高稳光电振荡器[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0305010.
- 5 X S Yao, L Maleki. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 13(8): 1725–1735.
- 6 X S Yao, L Maleki. High frequency optical subcarrier generator [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(18): 1525–1526.
- 7 X S Yao, L Maleki. Converting light into spectrally pure microwave oscillation [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 483–485.
- 8 Jiang Yang, Yu Jinlong, Hu Lin, *et al.*. Properties and application of optical oscillator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(10): 39–44.
江 阳, 于晋龙, 胡 林, 等. 光电振荡器的性能及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(10): 39–44.
- 9 X Steve Yao, L Maleki, V Ilchenko. Opto-Electronic Oscillators Having Optical Resonators [P]. US Patent 6,567,436 2003-5-20.
- 10 X Steve Yao, Lute Maleki. Optoelectronic oscillator for photonic systems [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, 32(7): 1141–1149.
- 11 X Steve Yao, Lute Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36(1): 79–84.
- 12 X Steve Yao, Lute Maleki, Yu Ji, *et al.*. Dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE International Frequency Control Symposium*, 1998, 545–549.
- 13 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.
- 14 W Zhou, G Blasche. Injection-locked dual opto-electronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level [J]. *IEEE Microwave Trans Theory Tech*, 2005, 53(3): 929–933.
- 15 O Okusaga, E J Adles, E C Levy, *et al.*. Spurious mode reduction in dual injection-locked optoelectronic oscillators [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 5839–5854.

栏目编辑：王晓球