

文章编号: 0253-2239(2007)05-0919-4

一种新型双环路光电振荡器*

江 阳 于晋龙 王耀天 张立台 杨恩泽

(天津大学电子信息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: 利用偏振分束器(PBS)和合束器(PBC)在不增加有源器件的基础上设计了一种双环路光电振荡器。该振荡器可以同时产生光、电两种输出。由于没有增加有源器件,可以避免附加电噪声的引入。此外,光载波在光域中是正交耦合,消除了随机干涉和拍噪声对振荡频率的影响。通过理论分析,双环结构的光电振荡器可以有效抑制每一单环路中起振的边模。经过实验对比,采用双环结构可以把边模抑制比提高 30~70 dB。最后,利用该方案和普通商用器件得到了中心频率为 12 GHz 的振荡,测得边模抑制比为 50~70 dB,相位噪声为 -93 dBc/Hz at 10kHz, Q 值达到 10^{10} 。

关键词: 光波通信; 光电振荡; 微波振荡器; 边模抑制; 相位噪声

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

A Novel Scheme of Dual-Loop Optoelectronic Oscillator

Jiang Yang Yu Jinlong Wang Yaotian Zhang Litai Yang Enze

(School of Electronic Information, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072)

Abstract: Utilizing polarizing beam splitter (PBS) and polarizing beam combiner (PBC), a dual-loop optoelectronic oscillator (OEO) is designed without adding any active device. This oscillator can simultaneously produce optical and electrical output. No additional electronic noise can be introduced because of avoiding additional active devices. Furthermore, there is no signal frequency fluctuation and beat noise caused by interference and beating due to optical carrier orthogonally coupled in optical domain. According to the analysis of optoelectronic oscillator, dual-loop is able to effectively suppress the side modes in each single loop. Through experimental comparison, the side mode suppression ratio is improved by 30~70 dB. Finally, we demonstrate the free-running experimental result, which has high quality spectrum at 12 GHz with side mode suppression ratio 50~70 dB, phase noise of -93 dBc/Hz at 10 kHz from carrier and Q value of 10^{10} .

Key words: optical-wave communication; optoelectronic oscillation; microwave oscillator; side-mode suppressing; phase noise

1 引 言

高谱纯度,低相位噪声的振荡器可广泛应用于航宇、雷达、电子战、通信、仪器测量等领域。传统的电振荡器一般采用介质振荡器或石英晶体作为储能元件。介质振荡器在对要求低噪声,高谱纯度或可调谐的条件下,表现往往不尽如人意。石英虽然可以获得 Q 值很高的稳定晶振,但是不能直接得到高频振荡^[1]。光电振荡器(OEO)的出现改变了这种情况。光电振荡器一般是由光源、强度调制器、滤波

器和放大器构成的一个正反馈环路。只要有合适的调制器和滤波器,光电振荡器可以从连续光产生在几百 MHz 到 100 GHz 的范围内稳定高纯度的频率。它利用光纤作为储能元件并能同时产生光、电两种输出^[2~4]。这方便了与其它光器件的配合使用。环路中能量的衰减时间决定了振荡器的 Q 值,这里 $Q=2\pi f\tau_d$,其中 f 为振荡频率, τ_d 为能量衰减时间。所以为了获得高的 Q 值,环路中一般采用长光纤^[4]。然而,这样的设计又会带来另一个问题:振

* 国家自然科学基金(60572013)资助课题。

作者简介: 江 阳(1975-),男,广西贵阳人,博士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: jiangyang415@163.com

导师简介: 于晋龙(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事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

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-06-15

荡器环路的长度除了决定谱的纯度,同时还决定了起振模式之间的间隔,腔越长,模式间隔就越小^[5~8]。理论上,我们可以用一个足够窄的滤波器滤除不需要的模式,但在器件的获得上,这有一定的困难。近年来,人们提出了用多环结构来抑制边模的方法,并通过实验证明,多环路结构的确可以有效对边模进行抑制^[9,10]。在这些方案中,每一个环路都需要独立的光电探测器和放大器等有源器件,这会带来电噪声并提高成本,降低实用性。

2 分 析

本文设计了一种不需要增加有源器件的双环路光电振荡结构,如图1。我们利用偏振分束器(PBS)

把连续光能量分成偏振方向相互垂直的两部分并分别通过两段长度不同的光纤。在进入光电探测器前,再用偏振合束器(PBC)合为一股。采用偏振分束器和偏振合束器来形成双环结构的优点在于,首先:偏振分束器能把光功率无损的分为两份,各自通过不同长度的两臂,建立起与环路长度相应的两套起振模式。并且所分出两臂中的光偏振方向相互垂直,这就保证了在合束时两路光不会因为随机的干涉作用造成振荡频率的随机跳变和拍噪声的产生。其次:采用这种结构不需要在普通单环路光电振荡器的基础上增加有源器件,避免由此带来的电噪声,同时获得双环路结构对边模有效抑制的效果。

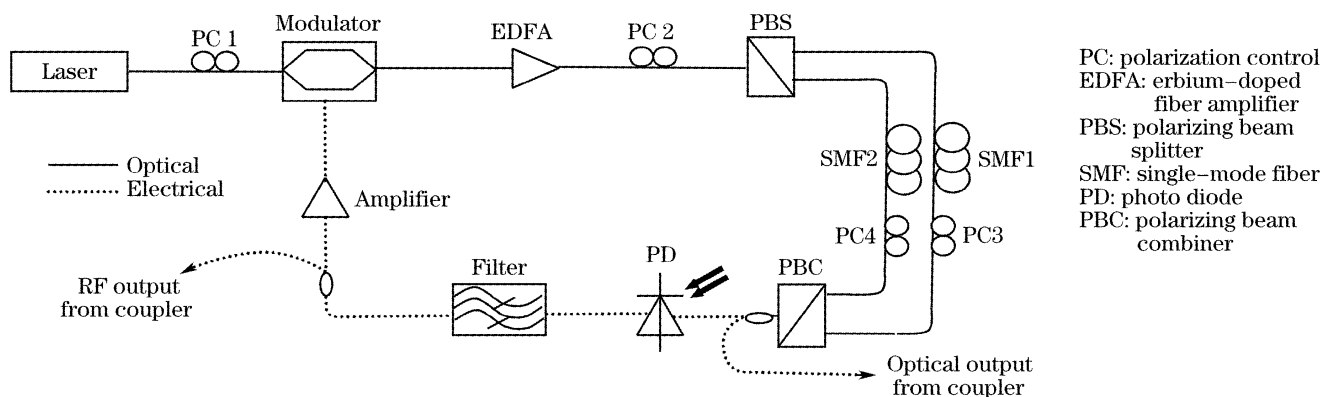


图1 双环路光电振荡器实验图

Fig. 1 Experimental setup of the dual-loop optoelectronic oscillator

从偏振分束器分出的两路可看作两个增益反馈环路。断开从偏振分束器出来的任意一臂都可以构成一个完整的振荡器。对这种结构的振荡器我们可以用单环振荡器的分析方法(再生反馈法)为基础进行分析。

利用环路反馈的递归关系我们有^[4,9~11]

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

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

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

这里 \tilde{V}_0 为输入信号电压的复振幅。显然,相应的输出功率为 $P(\omega) = |\tilde{V}_{out}|^2 / 2R$, R 为光电探测器的阻抗。把(2)式代入,并注意对频率 ω 起振时两环路引起的相位关系

$$\varphi_1(\omega) = 2k\pi, \quad \varphi_2(\omega) = 2m\pi, \quad \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega) = 2(k - m)\pi, \quad (3)$$

式中 k, m 为整数。得到

$$P(\omega) = \frac{|V_0|^2 / 2R}{1 + |g_1|^2 + |g_2|^2 - 2|g_1|^2 |g_2|^2 - 2|g_1|^2 - 2|g_2|^2}. \quad (4)$$

由于是从噪声起振,上式中分母应等于零,由此得到这种双环振荡器稳定振荡后两路增益关系为

$$|g_1| + |g_2| = 1, \quad (5)$$

这显然是合理的。考虑到当我们断开偏振分束器其中一路时,其结构与普通单环光电振荡器相同,只要

提供足够的光功率注入,该振荡器可以起振。由于难以获得足够窄的滤波器和放大器,稳定后除了期望的频率起振,附近的边模也同时稳定起振,并在环路中也有 1 的增益。当两环路同时作用时,只有两环路结构所决定能共同起振的频率能够获得足够的

增益,其他频率由于不能获得足够增益,在环路中多次运转后衰减。从谱上观察即这些边模受到抑制。

由于该双环结构没有引入额外的噪声,我们可以从单环光电振荡器的噪声特性出发类似的得到该双环结构下输出信号的相位噪声特性。在单环路情况下,输出信号在一定频偏处的功率谱密度为^[4]

$$S_{\text{RF}}(f') = 4\tau^2\delta, \quad |f'| \ll \Delta f_{\text{FWHM}}/2,$$

$$S_{\text{RF}}(f') = \frac{1}{(2\pi)^2(\tau f')^2\delta}, \quad |f'| \gg \Delta f_{\text{FWHM}}/2, \quad (6)$$

式中 f' 为频偏量, τ 为光纤引起的延时量, δ 为振荡器的信噪比, 定义为 $\delta = P_{\text{osc}}/(\rho_{\text{N}}G_{\text{A}}^2)$ 。定义中, $\rho_{\text{N}}(\omega)$ 是放大器输入端注入振荡器的噪声, 而 $P_{\text{osc}}/G_{\text{A}}^2$ 为放大器前端振荡器的功率。这里 P_{osc} 是谐振功率, G_{A} 为放大器电压增益。从上式可以看出对于固定的 f' , 相位噪声随环路延时呈二次方下降, τ 越大, 相位噪声越小。需要注意的是, 相位噪声不会随光纤长度的增加而无限减小。当 τ 很大时, (6) 式将不再准确^[4,9~11]。

3 实 验

实验中采用了马赫-曾德尔结构的铌酸锂调制器, 中心频率 12 GHz、带宽约 90 MHz 的电滤波器用来获得中心频率 12 GHz 的振荡。激光器发出的连续光经偏振控制器 PC1 控制进入调制器以对准最佳调制轴。掺铒光纤放大器(EDFA)提供环路中的光增益。通过调整偏振控制器 PC2 可以控制偏振分束器两臂光功率比。分列于两臂的偏振控制器 PC3, PC4 调节臂 1 和臂 2 进入合束器的光的偏振态, 克服由于单模光纤(SMF)带来的偏振的随机变化。试验中, 臂 1 长度约为 5.5 km, 臂 2 长度约为 900 m。合束后的光通过光电探测器后, 由于噪声的存在会转变为包含各种频率噪声成分的微弱电信号并在电域中被滤波器滤除非 12 GHz 的频率成分, 放大后通过调制器再次调制到光域。通过这样的多次反馈, 12 GHz 的振荡被放大, 最终达到稳定振荡。而噪声中的其他振荡成分由于不能获得足够的增益, 无法形成振荡。为了检验该方案能够实现预期的效果, 我们分别断开两臂并对它们的电谱进行了比较(图 2)。

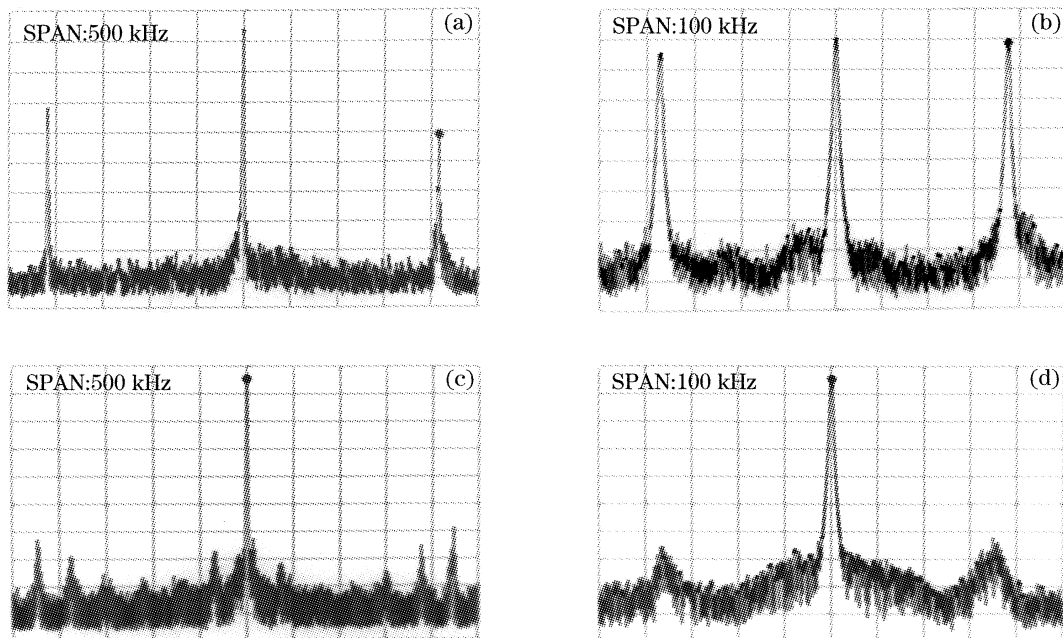


图 2 单环及双环路结构频谱比较。(a),(b)为各断开一臂时所得频谱,(c),(d)为双环路结构所得频谱

Fig. 2 The spectrum comparison between single loop and dual-loop configuration. (a) and (b) are the spectrum with one path broken, (c) and (d) are the spectrum with the dual-loop configuration

从图 2 可以看出断开任意一臂后, 振荡器可以起振。但由于两臂长度不同, 起振后模式的间隔不同。图 2(a)为断开臂 1 后所得频谱。其模式间隔约为 208 kHz, 边模抑制比(均值)为 30 dB; 图 2(b)为断开臂 2 后所得频谱。其模式间隔约为 37 kHz, 边模抑制比(均值)为 4 dB。图 2(c)、图 2(d)为双环结构

下所得到的频谱。从图 2(c)可以看出在单环情况下可以起振的边模已被有效抑制。测量模间隔并与图 2(a), 图 2(b)所得数据相比较可以知道, 在图中离中心频率最远处的边模为臂 2 引起, 其余为臂 1 产生。这与前面的理论分析符合得很好。其边模抑制比为 50~70 dB 之间。图 2(d)与图 2(b)相对应,

显示了结构改为双环后的效果。边模抑制比为 60 dB。在频宽(SPAN)为 20 kHz,带宽分辨率(RBW)为 30 Hz 条件下测量并求得相位噪声 -93 dBc/Hz @10 kHz。最后,在频宽为 500 Hz,带宽分辨率为 3 Hz 情况下,见图 3,测出所得振荡频谱的半极大全宽 $\Delta f_{FWHM} = 4$ Hz。考虑到所设带宽分辨率为 3 Hz,可以认为 $\Delta f_{FWHM} < 4$ Hz。根据 $Q = f / \Delta f_{FWHM}$ 可求出 Q 值大于 10^{10} 。另外,在改变环路结构的时候,起振的中心频率会有几百 kHz 的变化,这主要是由于我们使用的滤波器带宽过宽造成的。

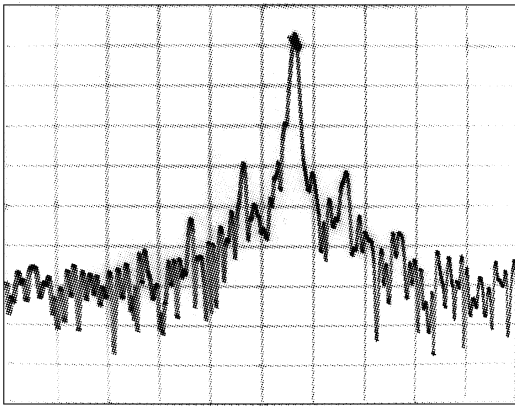


图 3 频宽 500 Hz,带宽分辨率为 3 Hz 条件下的频谱图

Fig. 3 The spectrum at SPAN 500 Hz, RBW 3 Hz

最后从图 4 我们可以看到在双环结构下示波器上看到的光,电振荡波形。从波形上看,我们得到的是比较理想的正弦波。

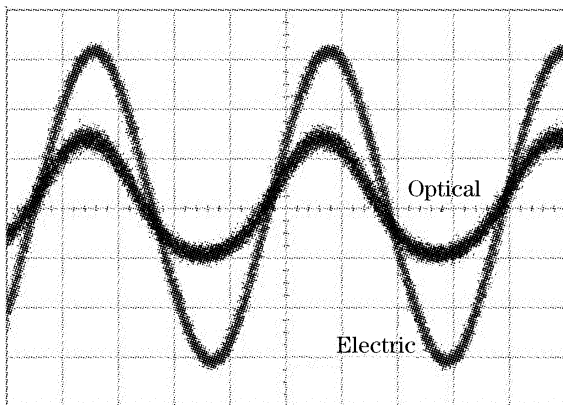


图 4 电振荡波形

Fig. 4 The waveforms of optical and electrical signal

4 结 论

通过理论分析和实验,可以看出,利用偏振分束器和偏振合束器把普通单环光电振荡器改成一个双环路结构可以在不增加任何有源器件的情况下实现对边模的有效抑制。采用普通商用器件获得了 Q

值为 10^{10} ,中心频率为 12 GHz 的振荡频率。若采用可调谐滤波器,可以实现振荡频率的调谐。在理论上,还可以考虑多环结构和性能更高的器件以获得更佳的边模抑制效果和纯度更高的频谱。所以,光电混合振荡器是一种可适应不同要求的高品质理想振荡源。

参 考 文 献

- 1 X. Steve Yao, Lute Maleki. Progress in the opto-electronic oscillator—A ten year anniversary review[J]. *IEEE MIT-S International Symposium Digest*, 2004. 287~290
- 2 Huo Li, Dong Yi, Lou Caiyun *et al.*. Clock extraction from 10 Gbit/s NRZ data and data format conversion using an opto-electronic oscillator[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(9): 1305~1307 (in Chinese)
霍力,董毅,娄采云等. 利用光电振荡器实现 10 Gbit/s NRZ 码时钟的直接提取和码型转换[J]. *电子学报*, 2002, **30**(9): 1305~1307
- 3 Gao Yizhi, Lou Caiyun, Yao Minyu *et al.*. 4×10 G/s OTDM signal transmission in 165 km SMF using the optronic oscillator as the clock extractor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 30~32 (in Chinese)
高以智,娄采云,姚敏玉等. 用光电振荡器提取帧时钟实现 4×10 Gb/s OTDM 信号 165 km 传输[J]. *光子学报*, 2002, **31**(1): 30~32
- 4 X. Yao, L. Maleki. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**: 1725~1735
- 5 Li Yanan, Yu Jinlong, Wang Jia *et al.*. A novel scheme for the cavity length stability of actively mode-locked fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 897~900 (in Chinese)
李亚男,于晋龙,王剑等. 一种新型主动锁模光纤激光器腔长稳定技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 897~900
- 6 Zhu Likai, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Wavelength stabilization of mode-locked fiber laser via continuous-wave injection[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 149~152 (in Chinese)
朱利凯,于晋龙,王耀天等. 注入连续光实现锁模光纤激光器的波长稳定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 149~152
- 7 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Yanan *et al.*. 40 Gb/s all-optical clock extraction based on the injection mode-locked laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1307~1312 (in Chinese)
吕捷,于晋龙,李亚男等. 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1307~1312
- 8 Lou Caiyun, Yang Yanfu, Huo Li *et al.*. 40 Gb/s all-optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1467~1471 (in Chinese)
娄采云,杨彦甫,霍力等. 40 Gb/s 信号的全光 3R 再生[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1467~1471
- 9 X. Steve Yao, Lute Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(1): 79~84
- 10 E. Shumakher, G. Eisenstein. Noise properties of mutually sustained microwave-optoelectronic oscillator pair[J]. *J. Electron. Lett.*, 2005, **41**(13): 768~769
- 11 Stefania Romisch, John Kitching, Eva Ferrh-Pikal *et al.*. Performance evaluation of an optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, **47**(5): 1159~1165