

K 波段高稳光电振荡器

孙 斌 于晋龙 王 菊 苗 旺 孟天晖 王文睿 杨恩泽

(天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要 介绍了一种具有高稳定性、高谱纯度、低相位噪声的双环路光电振荡器(OEO)。理论上分析了光电振荡器的基本原理,采用光域双环路的方案有效地实现了边模抑制,通过检测输出信号频率的变化来控制光纤环路的长度,从而得到了高质量的 20 GHz 微波信号,其频谱纯度高,线宽小于 1 Hz,相位噪声在 10 kHz 时为 -112 dBc/Hz,而且在 4 h 观测时间内,频率的稳定性小于 10^{-10} 。

关键词 光通信;光电振荡器;双环路光电振荡器;边模抑制;频率稳定;腔长控制

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305010

K-Band and High Stability Optoelectronic Oscillator

Sun Bin Yu Jinlong Wang Ju Miao Wang Meng Tianhui Wang Wengrui Yang Enze

(Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic and Information Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A kind of dual-loop optoelectronic oscillator (OEO) with high stability, high spectral purity and low phase noise is introduced. The principle of OEO is analyzed theoretically. Side-mode suppression is achieved by using dual-loop in optical domain. The length of fiber loop is controlled by detecting the change of output signal's frequency. Experiment results of a 20 GHz radio frequency signal with high quality are obtained. It has high spectral purity. Its line width is less than 1 Hz and phase noise is -112 dBc/Hz at 10 kHz. And its frequency stability achieves 10^{-10} in 4 h.

Key words optical communications; optoelectronic oscillator; dual-loop optoelectronic oscillator; side-mode suppression; frequency stability; cavity length control

OCIS codes 060.2320; 230.0250; 230.4910; 250.3140

1 引 言

高性能的微波信号源是一切微波领域应用的基础,高谱纯度、高稳定、低相位噪声的微波振荡源广泛应用于雷达、通信、情报与电子战以及测试与测量等领域。微波振荡源的性能直接影响了微波系统中各种电子装备的系统性能。随着各种应用需求的不断增加,微波系统对振荡源的各项指标提出了更高的要求。

目前常用的高质量微波源采用半导体制作工艺制作而成,如石英晶体振荡器,只在低频时才具有少数几个高 Q 值共振模式,一般为几十到几百兆赫

兹,这使得它不能作为直接产生高频率信号的微波振荡源。通常采用倍频技术来获得更高的频率,但是倍频技术会导致系统的效率急剧下降。要解决这一问题必须增加滤波器和电放大器等有/无源器件的数目,这会严重影响倍频信号质量;同时随着倍频倍数的增加,相噪指标也会明显地恶化^[1]。Yao 等^[2,3]提出的光电振荡器(OEO)改变了这种情况。OEO 利用光电混合的方法,采用长的低损耗光纤作为储能元件,可以实现在微波频段内,相位噪声与频率无关。据报道,国外已经用 OEO 原理实现了 K 波段的微波振荡源,其相位噪声在 10 kHz 时为

收稿日期: 2011-11-01; 收到修改稿日期: 2011-12-18

作者简介: 孙 斌(1988—),男,硕士研究生,主要从事光子微波方面的研究。E-mail: sunbin@tju.edu.cn

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、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

-105 dBc/Hz^[4]。国内 OEO 相关技术研究也逐渐深入展开,天津大学光纤通信实验室实现了中心频率为 12 GHz,相位噪声在 10 kHz 时为-93 dBc/Hz 的 OEO 微波振荡源^[5]。

然而,尽管光电振荡器利用长光纤能够产生高质量的微波信号,但是过长的光纤结构也带来了一定的问题:1)过长的振荡环路导致系统基频很低(在几十千赫兹左右),现有的电滤波器很难在微波波段直接将基频边带滤除;2)由于环路主要由长光纤构成,其腔长容易受到环境温度、应力等因素影响而发生变化,造成起振基频的变化,使输出频率发生漂移甚至跳频。在现有的方案中,为了提高频率稳定性,通常采用对温度不敏感的光纤、系统与环境隔离、或者使用具有高 Q 值的电滤波器等,这些方法增加了系统的体积、成本和复杂度,严重限制了光电振荡器的实用性^[6~8]。

针对上述问题,本文采用了一种利用偏振分束器和偏振合束器的双环路光电振荡器结构,利用游标效应,成功地抑制了基频边带的干扰。同时设计

了反馈腔长控制模块,利用锁模激光器产生的 20 GHz 左右的电信号与 OEO 输出电信号进行混频,通过分析处理混频输出信号检测出频率的漂移,并对腔长进行反馈控制,在保证高谱纯度、低相位噪声的情况下,输出微波信号的频率稳定度也得到了极大的改善。

2 分 析

具有反馈控制腔长模块的光电振荡器结构如图 1 所示。图中 PC 为偏振控制器;MOD 为电光强度调制器;EDFA 为掺铒光纤放大器;PBS 为偏振分束器;PBC 为偏振合束器;PMF 为保偏光纤;PZT 为压电陶瓷;PD 为光电二极管。根据 OEO 的工作原理,激光器发出连续的光波,通过电光调制器、偏振分束器、偏振合束器和光电探测器转化为微波信号。微波信号经过滤波器、放大器,通过耦合器后一部分输出,另一部分反馈回电光调制器以调制光波^[2,7,8]。输出的微波信号频率由微波滤波器决定。

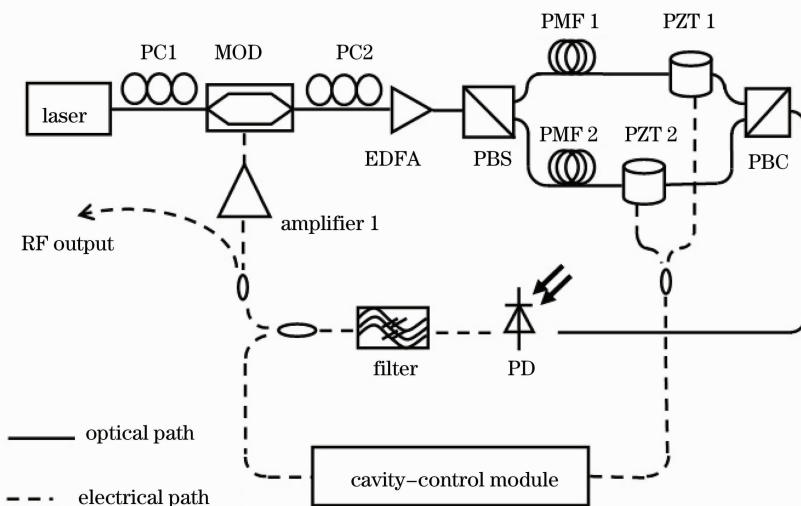


图 1 具有反馈腔长控制的双环路 OEO 实验图

Fig. 1 Experimental setup of dual-loop OEO with cavity length controlled

一般来说,分析单环 OEO 采用再生反馈法,在单环的基础上,对这种双环结构的 OEO 进行分析^[3,5,9,10]。

假设输入信号电压的复振幅为 V_0 ,两个环路的复增益为 g_1 和 g_2 ,光电探测器的阻抗为 R ,则相应的输出功率为

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

由于是噪声起振,(1)式中分母应为零,由此得到这种双环振荡器稳定振荡后两路增益关系为: $|g_1| + |g_2| = 1$,考虑双环中的任意一环,其结构与

普通单环振荡器相同,只要提供足够的光功率注入,振荡器就可以起振。

振荡环路起振模式的间隔也即基频由环路对光

信号的延时决定,环路光纤长度决定光的延时,所以不同长度腔长对应不同的基频。在增益竞争的作用下,其他频率由于不能获得足够的增益在环路中多次运转后衰减,只有同时满足两套模式的频率成分才能获得足够的增益而起振,因此最后得到的微波信号的频率为两个环路基频的公倍数,如果恰当地选择两个环路的光纤长度,起振模式的间隔远大于电滤波器的带宽,这样就只有落在电滤波器通带内的唯一模式才能够起振,从而有效地抑制了边模,而且利用偏振分/合束器的双环路光电振荡器,没有引入额外的噪声,提高了输出微波信号的质量。

由于 OEO 系统采用的是长光纤储能,光纤长度随着温度的相对变化为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,所以腔长容易受到环境温度、应力的影响而发生改变,由此引起的基频的变化会导致光电振荡器的高频输出发生严重漂移甚至跳模。在实验中对没有任何稳定措施的光电振荡器进行了测试,频率的漂移达到 30 Hz/s ,这

样的信号很难应用到实际当中。

针对这一问题,设计了腔长控制模块,结构可参见图 2 所示,图中 MLFL 为锁模激光器, MIX 为混频器, MCU 为微控制器。该模块的控制原理是:通过晶振产生 50 MHz 信号调制锁模激光器,使锁模激光器输出抖动低达皮秒级、重复频率为 50 MHz 的光脉冲^[11~13],此光信号经过光电探测器后进入 20 GHz 窄带滤波器进行滤波,由于窄带滤波器带宽在 30 MHz 左右,因此在通带内最多只能滤出一个高阶谐波,得到频率相对稳定的电信号与 OEO 输出微波信号混频,混频器输出二者误差信号,该误差信号经过环路滤波器后进入微处理器系统进行处理,微处理器计算出频率的漂移量并产生相应的控制信号,高压电源对其放大后去控制压电陶瓷,利用压电陶瓷的膨胀与收缩改变缠在上面的光纤的长度,从而实现环路腔长的控制。

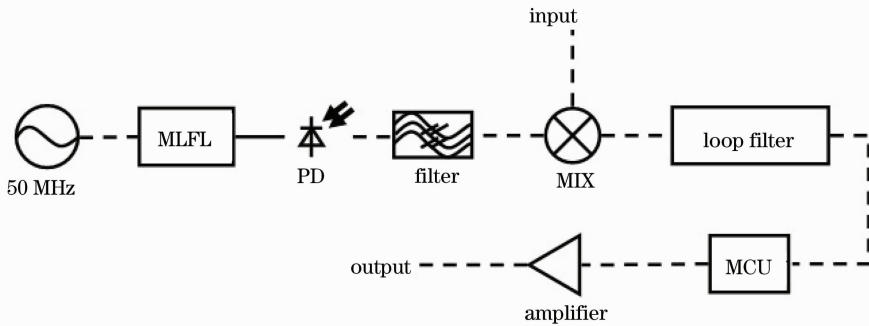


图 2 腔长控制模块结构

Fig. 2 Cavity-control module

3 实 验

实验中,激光器采用分布反馈式激光器;电光调制器采用了马赫-曾德尔铌酸锂调制器;电滤波器的中心频率为 20 GHz ,带宽约为 30 MHz ;光电探测器采用 40 Gb/s 宽带接收机;腔长控制模块中锁模激光器采用 Calmar Laser 公司的皮秒级高速光纤锁模激光器,滤波器、混频器工作的中心频率均为 20 GHz ,高压电源输入 $0\sim 5\text{ V}$,输出范围 $-750\sim 750\text{ V}$ 。激光器发出波长为 1553.42 nm 的连续光经偏振控制器 PC1 控制进入电光调制器来对准最佳调制轴,掺铒光纤放大器提供环路中的光增益,偏振控制器 PC2 用来控制偏振分束器的两臂光功率比,保偏光纤能有效克服偏振态的随机变化,实验中两环路的保偏光纤长度分别为 1.7 km 和 6 km ,缠在压电陶瓷上面的光纤长度分别大约为 75 m 和

250 m (由于调节信号控制两个压电陶瓷的伸缩量是一致的,环长的改变要成比例),经过偏振合束器的两个环路的光合束后进入光电探测器得到微波信号,微波信号经过窄带滤波器后只剩下 20 GHz 左

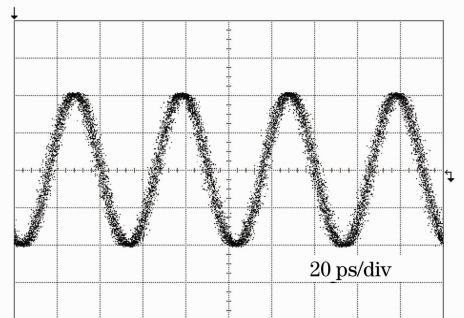


图 3 信号时域波形

Fig. 3 Time domain waveform of signal

右的信号,一部分放大后通过调制器再次调制到光域,另一部分用于控制模块来稳定微波信号。通过这样多次的电、光反馈,频率在 20 GHz 左右的信号振荡被放大,同时,腔长随外界温度等的影响得到实时控制,最终输出高稳定度的微波信号。

图 3 是本系统输出时域波形图,可以看出得到的是非常理想的正弦波。图 4 是用 Agilent 8564EC 频谱仪在测试范围 (SPAN) 带宽分辨率力 (100 Hz),带宽分辨率 (RBW) 1 Hz 条件下输出微波信号的频谱图,信号有很高的谱纯度,中心频率的

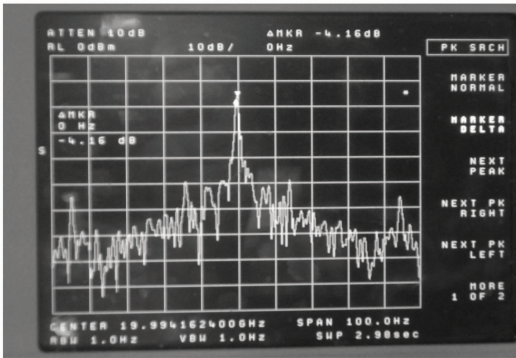


图 4 测试范围 100 Hz、带宽分辨率 1 Hz 的频谱图
Fig. 4 Spectrum of SPAN 100 Hz, RBW 1 Hz

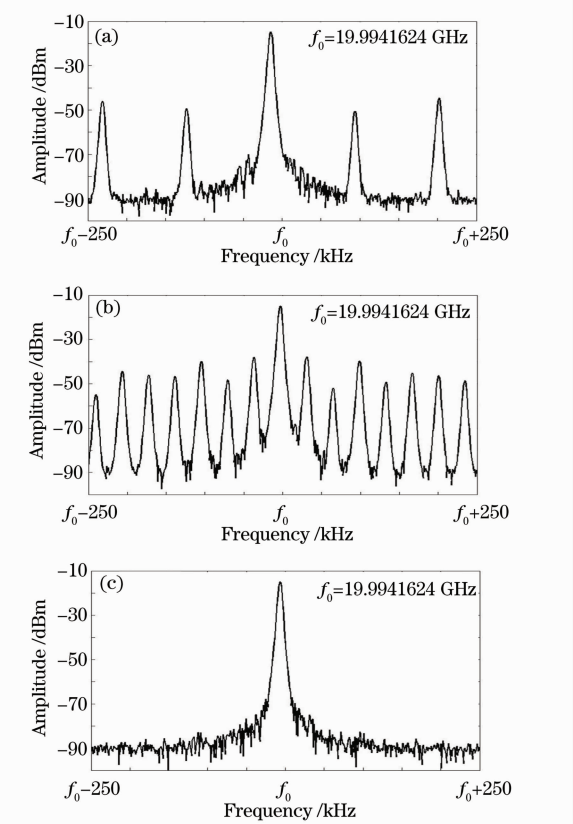


图 5 测试范围 500 kHz、带宽分辨率 3 kHz 的频谱图
Fig. 5 Spectrum of SPAN 500 kHz, RBW 3 kHz

线宽小于 1 Hz, Agilent 该型号的频谱仪已经无法测出。图 5 是在 SPAN 500 kHz, RBW 3 kHz 条件下测得各种情况下的频谱图,图 5(a), (b) 分别为两个单环分别起振时的输出信号频谱,图 5(c) 是双环同时起振的信号频谱。可以看出边模得到了很好的抑制,测得信号的边模抑制比约为 70 dB,符合理论分析。图 6 是实验测得本系统输出 20 GHz 左右的微波信号的相位噪声图,相位噪声在 10 kHz 时达到 -112 dBc/Hz,而实际测得 Agilent E8257D 微波源 20 GHz 信号的相位噪声在 10 kHz 时为 -105 dBc/Hz。更重要的是,对系统进行了长时间的测试,系统连续工作 4 h,用 Agilent 8564EC 频谱仪测输出微波信号的频率,隔 10 min 记录一次,处理所有频率值,得到频率的漂移低于 1 Hz,由于中心频率为 20 GHz 左右,所以频率稳定度在 10^{-10} 左右。

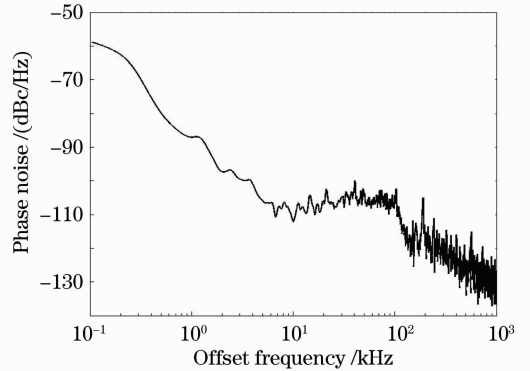


图 6 输出信号相位噪声图

Fig. 6 Phase noise of output signal

4 结 论

设计了一种带有腔长稳定措施的光电振荡器,利用偏振分束器、偏振合束器构成 OEO 双环结构,在此基础上,加入腔长控制模块,通过检测输出微波信号的频率漂移来反馈控制光纤环路的腔长,得到频率稳定度极高的微波信号。由于控制腔长的精度主要取决于锁模激光器和混频器,所以采用更高性能的器件在理论上可以获得更稳定的微波信号。并且,还可以通过更换环路中滤波器、优化光纤长度等方法,获得频率更高、相位噪声更低的微波信号。

参 考 文 献

1 Xu Ruimin, Yao Hongfei, Cai Jingye. Research on mm-wave frequency synthesizer with low phase noise and full-phase-coherence [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2007, **26**(3): 222~224
徐锐敏, 姚鸿飞, 蔡竟业. 低相噪全相毫米波频率合成源研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(3): 222~224

- 2 X. S. Yao, L. Maleki. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(8): 1725~1735
- 3 P. S. Devgan, V. J. Urick, J. F. Diehl *et al.*. Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photon gain [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3189~3193
- 4 S. Fedderwitz, A. Stohr, S. Babel *et al.*. Optoelectronic K-band oscillator with gigahertz tuning range and low phase noise [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(20): 1497~1499
- 5 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. 一种新型双环路光电振荡器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922
- 6 X. S. Yao, L. Maleki. Progress in the opto-electronic oscillator—a ten year anniversary review[J]. *Microwave Symposium Digest*, 2004 *IEEE MTT-S International*, 2004, **1**: 287~290
- 7 Chen Jixin, Zhou Tao. Characteristic of phase noise of optoelectronic oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 863~865
陈吉欣, 周 涛. 光电振荡器的相位噪声特性 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 863~865
- 8 Zhou Tao, Liao Fengzhou. Principle and experimental analysis of the optoelectronic microwave oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **z5**: 80~83
周 涛, 廖丰卓. 光电振荡器的原理及其实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **z5**: 80~83
- 9 X. S. Yao, L. Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(1): 79~84
- 10 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Optoelectronic oscillator for generating optical pulse and microwave signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 667~670
江 阳, 于晋龙, 王耀天 等. 基于光电振荡器的光脉冲和电微波信号发生器 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 667~670
- 11 Su Hongxin, Wang Kun, Yang Lechen *et al.*. The progress of mode-lock fiber lasers [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(2): 4~5
苏红新, 王 坤, 杨乐臣 等. 锁模光纤激光器的研究进展 [J]. *激光杂志*, 2008, **29**(2): 4~5
- 12 Shen Shikui, Zuo Lin, Yang Aiying *et al.*. Experiment of 29.69 MHz all-fiber passively mode-locked laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100307
沈世奎, 左 林, 杨爱英 等. 29.69 MHz 全光纤被动锁模激光器实验 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100307
- 13 Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiang'ai *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 655~659
谷庆元, 侯 静, 程湘爱 等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 655~659

栏目编辑: 韩 峰