

基于电移相器的频率精细可调谐光电振荡器

任珂 王荣 蒲涛* 熊锦添 陈大雷 方涛 肖进良

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 光电振荡器(OEO)是当前热门的一个研究问题,频率可调谐是它的一个重要性能指标。目前,频率可调谐的步长比较大,较好的也只能达 125 MHz 左右,还处于粗调谐水平。通过实验验证了一种基于电移相器实现的精细调谐的 OEO。该方案通过调节电移相器的偏置电压,改变环腔中振荡频率的相位,等效于改变环腔时延,最终实现环腔振荡频率的改变。由于移相器的相移量可以通过偏置电压进行细微调整,所以可以实现环腔振荡频率的精细调谐。实验中使用最大相移量为 180° 的电移相器实现了 10.020~10.025 GHz 约 5.5 MHz 范围内步长约为 70 kHz 的精细可调谐。

关键词 光通信; 光电振荡器; 移相器; 精细可调谐

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1217001

Fine Frequency Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Electrical Phase Shifter

Ren Ke Wang Rong Pu Tao Xiong Jintian Chen Dalei Fang Tao Xiao Jinliang

(*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract Optoelectronic oscillator (OEO) is a hot topic recently and the tunability is one of its important performances. The step of the tunable performance at present is about 125 MHz and the step is long, which can be defined as coarse tuning. An experiment is made to prove the OEO based on phase shifter which can be finely tuned. By changing the voltage of the phase shifter, the phase shift of the oscillation frequency in the ring cavity can be tuning. The time delay in the loop will be changed which will change the oscillation frequency. Because the amount of phase shift of the phase shifter can be fine-tuned by the voltage, we can achieve a fine tunability. In the experiment we use an electrical phase shifter whose maximum phase shift is 180° realizing a fine-tuning OEO with the step of 70 KHz from about 10.02 GHz to 10.025 GHz, the range of 5.5 MHz.

Key words optical communications; optoelectronic oscillator; phase shifter; fine tunability

OCIS codes 060.2320; 230.0250; 230.4910; 250.3140

1 引言

微波光子学^[1]着眼于光子技术在微波领域的应用,致力于光电技术的融合,光电振荡器(OEO)是其杰出的代表。OEO 可以用光电子器件产生具有超低相位噪声的微波信号,且相位噪声特性与频率

无关,在雷达和通信领域有重要应用^[2-5]。此外,OEO 作为一种高 Q 值的微波信号发生器,Q 值可以高达 10^8 ,近来受到强烈的关注。

传统结构的 OEO 受电滤波器的限制,频率可调谐性能有限^[6-7]。近年来,研究人员提出了多种

收稿日期: 2014-04-24; 收到修改稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61177065,61032005)、国家 973 计划(2012CB315603)

作者简介: 任珂(1990—),男,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: renke999@163.com

导师简介: 王荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学、光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

* 通信联系人。E-mail: nj_putao@163.com

方案来实现 OEO 的宽带频率可调谐^[8-16]。如基于电可调滤波器实现的频率可调 OEO^[14], 该方案可以实现 8~10.675 GHz 范围内的可调谐, 但其可调范围及性能完全受限于电滤波器的性能。此外还可以基于相移光栅^[15] 和 非线性色散补偿光栅^[16] 实现可调谐 OEO。Gao 等^[15] 实现了 6~11.8 GHz 范围内的频率可调, 但其调谐步长较大, 在 500 MHz 左右。魏志虎等^[16] 实现了 6.5~13.5 GHz 范围内的频率可调谐。该方案虽然实现了 OEO 的输出频率可调谐, 但是它是通过调节激光器的输出波长实现, 因而调谐步长受限于激光器输出波长的最小调节步进, 一般在 1 pm 水平, 所以其理论最小值为 125 MHz。而且由于其系统中使用了光纤光栅, 对环境变化比较敏感, 具有一定的不稳定性。

此外, 对于某些特殊场合来说, 一个信号源的频率仅仅是大范围的可调是不够的, 还需要精细的频率可调谐。Fedderwitz 等^[17] 简述了基于电移相器的精细调谐的 OEO, 但分析简单并且边模抑制与相位噪声指标不足。

本文通过实验验证了基于电移相器实现的可精细调谐的 OEO。该方案通过调节电移相器的电压, 以实现环腔中振荡频率相移量的调谐, 从而改变移相器所在环路的时延, 最终微调起振频率, 实现振荡频率的精细可调谐。实验中用相移量为 180° 的电移相器实现了振荡频率为 10.02 GHz 时 5.5 MHz 范围内步长约为 70 KHz 的精细可调谐, 弥补了当前可调谐 OEO 的调谐量不能小步长改变的不足。该方案可以作为实现可调 OEO 精细可调谐的一种方式, 与其他各种类型的宽带可调谐方案结合在一起, 实现宽带且精细可调谐的微波信号源。并且这种可精细调谐的 OEO 还可用于有一定多普勒频偏的卫星通信^[18] 等领域。

2 研究内容与结果

2.1 实验原理

原理框图如图 1 所示。由图可见, 该系统由激光器(LD)、马赫曾德尔调制器(MZM)、光电二极管(PIN)、移相器(PS)、低噪声放大器(LNA)、电滤波器、电功率放大器(PA)和单模光纤(SMF)等器件组成。其中 LD 提供光源, MZM 实现电光转换, 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, LNA 和 PA 用于补偿环路中的功率损耗, 电滤波器用于环腔频率选择。PBS、SMF 和 PIN 组成双环结构, 用于抑制边模^[19]。腔长较短的

环路加入 PS, 用于改变环腔振荡频率的相位, 继而改变环腔延时量, 从而实现环腔振荡频率的改变。

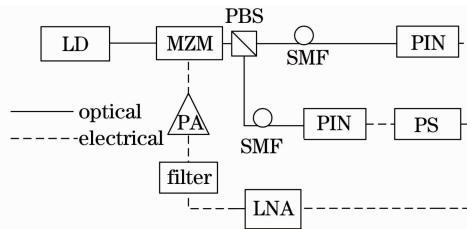


图 1 可调 OEO 系统

Fig.1 System of tunable OEO

PS 在工作频率范围内具有平坦的群延迟响应, 是波前平面随插入相位的变化而改变的控制器件, 它有两个特性: 具有线性的相对相移响应和具有波前平面不同、平坦的群时延频率响应。其中等效工作频率的相对时延与移相器的相对相移量的关系如下所示^[20]:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta S_{21}(\omega)}{\omega}, \quad (1)$$

式中 ω 为工作频率的角频率, $\Delta\tau$ 为 ω 的相对时延量, $\Delta S_{21}(\omega)$ 为 ω 的相对相移量, 其大小由移相器的偏置电压决定。

由 OEO 的振荡机理可知环腔的振荡频率 f_{osc} 与环腔时延量 τ_1 应该满足如下关系^[2]:

$$f_{osc} = k/\tau_1, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

式中 τ_1 由环腔长度决定。而由(1)式可知 PS 的引入等效于在环腔中增加一段时延, 使得环腔振荡频率变为

$$f'_{osc} = k/(\tau_1 + \Delta\tau), \quad k = 0, 1, 2, \dots. \quad (3)$$

由(3)式可知, 可以通过改变移相器的工作电压来改变移相器引入的相移量, 继而改变环腔延时量, 实现环腔振荡频率的改变。由于移相器的相移量可以通过偏置电压进行细微调整, 所以可以实现环腔振荡频率的精细调谐。

对于一个长 1 km 的单环结构 OEO, 引入移相器所导致的频率偏移可以由下式得到^[2]:

$$\Delta f = \frac{-f_{osc} \Delta L}{L}, \quad (4)$$

式中 ΔL 为环腔长度的改变量, L 为环腔长度。由移相器等效的 ΔL 为

$$\Delta L = \Delta\tau \cdot v, \quad (5)$$

式中 v 为光在光纤中的传播速度。通过将(1)、(5)式代入(4)式, 可以计算出 1 km 的环路中引入相移量为 360° 即 2π 时, 得到的 Δf 为 200 kHz, 引入相移量为 π 时, Δf 为 100 kHz。

此外,考虑到双环结构的 OEO 相当于两个独立单环结构的 OEO 同时起振,最终只有两个环路都存在的共同模式能稳定振荡。设 f_1 为长环路的起振频率, f_s 为短环的起振频率。当 $f_1 = f_s$ 时,可以得到稳定的频率起振,通过调谐移相器的偏置电压,其所在环路也即短环的起振频率 f_s 发生漂移,当漂移至另一环路的下一个起振模式,即 $f_1 = f_s'$ 时,起振频率将稳定在此频率起振。所以移相器的引入虽然只改变一个环路的振荡频率,但其最终效果仍可以改变整个双环结构的振荡频率,如图 2 所示。同时,所用的电滤波器带宽较宽,边模较多,会降低边模抑制比。由于双环光纤长度的不同,模式间隔不同,在双环的作用下,相当于有多个滤波器对模式进行选择,两个环路频率相等的模式得到起振,而不同频率的模式功率由于模式竞争功率分散而减弱,从而得到较优的边模抑制。

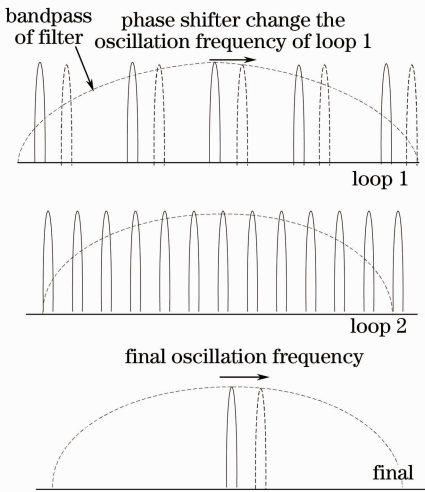


图 2 基于移相器的双环起振频率改变原理

Fig. 2 Theory of dual loop frequency change based on phase shifter

2.2 实验结果

实验中先断开 3 km 环路,用一个单环结构验证与推导结果是否相符,实验框图如图 3 所示。LD 输出的光经过 MZM 调制后经过 1 km 光纤传输再进入 PIN 中实现光电转换。随后,电信号经 PS 移相后送入 LNA,再通过 90:10 的电功分器分为两路,10% 的一路接电气频谱分析仪(ESA),用于测量环路输出电信号的频谱及其相位噪声特性,90% 的一路经过滤波器选择起振频率,再经过 DA 补偿功率损耗,输出的信号回馈至 MZM 使环路闭合。其中,LD 输出的功率为 10 dBm, MZM 的带宽为 10 GHz 并且工作在线性点。PIN 是一个带内部跨

阻放的光电二极管,其 3 dB 带宽为 10 GHz,响应率为 0.9 A/W,跨阻放的增益为 16 dB。PS 的工作电压可在 0~6 V 之间改变,其对应的相位调谐范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。LNA 的工作范围是 0.8~18 GHz,最大增益为 35 dB。微波频谱仪为罗德施瓦茨频谱仪(R&S FSUP50)。PA 是一个 10 GHz 的点频功率放大器。总的环腔增益约为 60 dB。

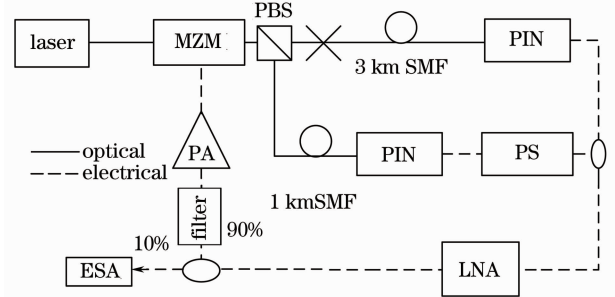


图 3 可调 OEO 实验图

Fig. 3 Experiment of tunable OEO

实验得到的微波信号频谱图如图 4 所示。由图可见,通过调节加载在 PS 上的电压值,改变信号相移量在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 调谐,可实现 OEO 输出频率在中心频率为 10.02 GHz 处附近 ± 50 kHz 频率范围内的连续可调谐,与理论推导得出的结果一致。本方案初步验证了通过改变移相器电压控制的输出振荡频率的可调谐,但由于是单环结构,边模抑制量不够,只有 33 dB,且可调范围偏小。

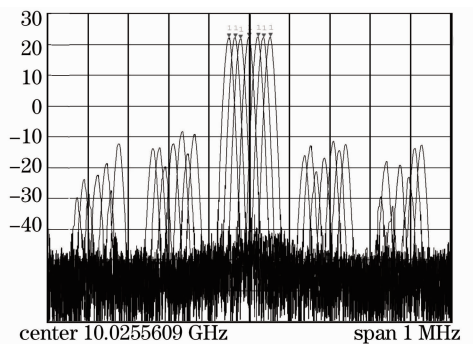


图 4 移相器在不同偏置电压下测量的信号频谱

Fig. 4 Measured frequency spectra of the signals at different voltages of the phase shifter

上面通过单环结构验证了通过改变 PS 的电压可以实现输出频率的精细可调谐,但是其边模抑制量和调谐范围均不理想。闭合 3 km 的一路,采用双环结构对其进行进一步的改善。其中双环由一个 PBS,两盘不同长度的光纤,两个 PIN,一个 PS 和一个电耦合器组成,其他器件与单环结构所用一致。实验中有移相器的一路其光纤长度小于另一路,两环路的光纤长度分别为 1 km 和 3 km。

实验结果如图 5 所示。由图 5(a)可见,双环结构的边模抑制得到明显改善,在扫宽为 100 kHz 时,抑制比可以达到 78 dB 左右。由图 5(b)可见,可调范围在载波左侧 5.5 MHz 左右。由于实验所使用的 PS 移相范围受限,只可以从 0° 调谐到 180° ,如果改用 $0^\circ \sim 360^\circ$ 移相范围的 PS,应该可以获得更大的调谐范围,预计可达 11 MHz。而可调步长取决于无 PS 支路光纤的长度,在本实验中,此支路光

纤长度为 3 km,理论对应的模式间隔约为 66 kHz。但由于电导线及其他因素的影响,实验得到步长稍大于理论数字。当此支路光纤的长度增加时,其模式间隔的缩小将导致可调步长的缩小,可实现更加精细的可调谐。实验还测量了振荡频率的相位噪声特性曲线,如图 6 所示。由图可见,在偏离载波 10 kHz 处的相位噪声可达 -120 dBc/Hz。

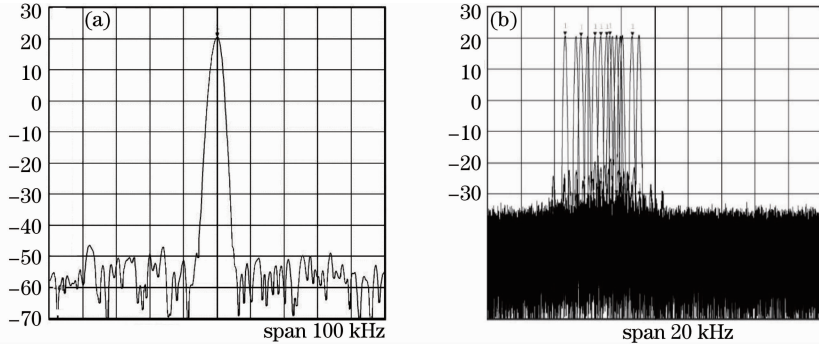


图 5 频谱仪测量结果。(a) 频率为 10.022 GHz 时信号频谱; (b) 不同移相器电压的频谱

Fig. 5 Measured results of the ESA. (a) Frequency spectrum of the signal at 10.22 GHz; (b) frequency spectrum at different voltages of the phase shifter

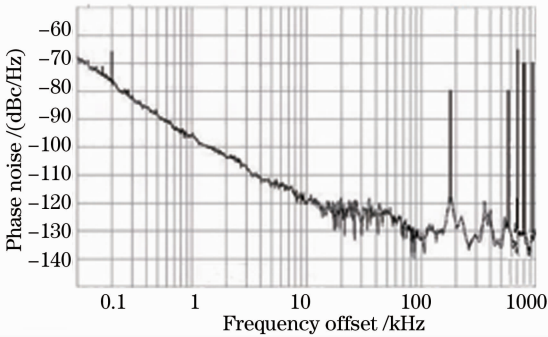


图 6 测量信号的相位噪声

Fig. 6 Measured phase noise of the signal

所提出的结构在不同时间的实验,调谐范围是具有可重复性的,但由于环境温度和器件状态的变化,OEO 环腔的起振频率会有细微的改变,频率变化在千赫兹量级。此外,这种结构的 OEO,测量经过 10 min 的频率漂移仅为 20.91 kHz。在同等实验条件下使用光分路器(OC)代替 PBS,10 min 的频率漂移为 61.75 kHz。而使用 PBS 与 PBC 的双环结构来进行测量的话,10 min 的频率漂移在 193.43 kHz。可见,由于结构的改变,OEO 的稳定性也得到了很好的改善。

3 结 论

实验验证了一种基于电移相器实现的可精细调谐的 OEO。用单环结构验证了该方案原理的可行

性,并用双环结构对其进行了性能改善。双环实现了振荡频率为 10.02 GHz 时 5.5 MHz 范围内步长约为 70 kHz 的精细可调谐 OEO。实验所用移相器的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,如果改用移相范围更宽的移相器,调谐范围可以进一步扩大。环腔振荡频率的最小调谐步长由不带移相器的支路的腔长决定,所以可以通过增大该支路光纤的长度进一步提高调谐精度。此外,这种结构的 OEO 稳定性也得到了一定的改善。该方案可与其他各种类型的宽带可调谐方案结合在一起,实现宽带且精细可调谐的微波信号源。

参 考 文 献

- 1 Alwyn J Seeds. Microwave photonics[J]. IEEE Trans on Microw Theory and Tech, 2002, 50(3): 877-887.
- 2 X S Yao, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. J Opt Soc Am B, 1996, 13(8): 1725-1735.
- 3 X S Yao, Maleki L, Eliyahu D. Progress in the opto-electronic oscillator-A ten year anniversary review[C]. Proc IEEE Microw Thery Tech Soc Int Microw Symp, 2004, (1): 287-290.
- 4 D Eliyahu, L Maleki. Tunable, ultra-low phase noise YIG based opto-electronic oscillator[C]. IEEE MTT-S International, 2003, 3: 2185-2187.
- 5 Ozdur I, Akbulut M. Optoelectronic loop design with 1000 finesse Fabry-Perot etalon[J]. Opt Lett, 2010, 35(6): 799-801.
- 6 S Poinsot, H Porte, J Goedgebuer, et al.. Continuous radio-frequency tuning of an optoelectronic oscillator with dispersive feedback[J]. Opt Lett, 2002, 27(15): 1300-1302.
- 7 E Shumakher, S Ó Dúill, G Eisenstein. Optoelectronic oscillator

- tunable by an SOA based slow light element [J]. *J Lightw Technol*, 2009, 27(18): 4063–4068.
- 8 Pan S, Yao J P. Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporation a Fabry-Perot laser diode with external optical injection[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1911–1913.
- 9 Li W, Yao J P. An optically tunable frequency multiplying optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 24(10): 812–814.
- 10 Sun Bin, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*. K-band and 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.
- 11 Wei Zhihu, Wang Rong, Fang Tao, *et al.*. A tunable optoelectronic oscillator based on tunable true phase shift[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(3): 429–433.
魏志虎, 王荣, 方涛, 等. 基于可调真相移的可调谐光电振荡器[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(3): 429–433.
- 12 Ibrahim Ozdur, Dimitrios Mandridis, Hoghooghi N, *et al.*. Low noise optically tunable opto-electronic oscillator with Fabry-Perot etalon[J]. *J Lightw Technol*, 2010, 28(21): 3100–3106.
- 13 X S Yao, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Quantum Electron*, 2000, 36(1): 79–84.
- 14 Dan Zhu, Shilong Pan, De Ben. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(3): 194–196.
- 15 Liang Gao, Jianping Yao, X Chen, *et al.*. Frequency- and phase-tunable optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon Technol Letters*, 2013, 25(11): 1011–1013.
- 16 Wei Zhihu, Wang Rong, Fang Tao, *et al.*. A tunable optoelectronic oscillator based on the non-linear dispersion compensation fiber Bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(9): 1649–1653.
魏志虎, 王荣, 方涛, 等. 基于非线性色散补偿光栅的可调谐光电振荡器[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(9): 1649–1653.
- 17 Sascha Fedderwitz, Andreas Stohr. Optoelectronic K-band oscillator with gigahertz tuning range and low phase noise[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(20): 1497–1499.
- 18 Xie Yanhua. Doppler Shift Calculation and Compensation Study in Mobile Satellite Communication System[D]. Dalian: Dalian University, 2013. 20–27
谢延华. 基于卫星移动通信系统的多普勒频移估算与补偿研究[D]. 大连: 大连大学, 2013. 20–27.
- 19 Jiang Yang, Yu Jinlong. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(11): 807–809.
- 20 Yang Jie. Study on X Band Digital Five-Bit Phase Shifter[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 19–21.
杨洁. X波段五位数字式移相器的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 19–21.

栏目编辑: 史敏