

文章编号: 1001-3806(2015)06-0761-04

激光器对光电振荡器相位噪声的影响

石英亮¹, 张羽², 孙力军^{2*}

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 为了改善光电振荡器相位噪声特性、提高光电振荡器性能, 采用理论分析和实验验证的方法, 研究了激光器线宽、光功率与光电振荡器相位噪声之间的关系。测试了激光器在功率相等、线宽不等情况下, 光电振荡器所产生的微波信号的频谱特性和相位噪声特性; 测试了给定线宽激光器在不等功率情况下, 所产生的微波信号的相位噪声特性。结果表明, 激光器线宽越窄、光功率越大, 光电振荡器产生微波信号的频谱特性和相位噪声特性就越好; 在频偏 1kHz 以外, 相位噪声受激光器线宽影响较小, 受光功率影响较大。这一结果对改善光电振荡器相位噪声有一定的帮助。

关键词: 光电子学; 光电振荡器; 相位噪声; 谱线宽度; 信噪比

中图分类号: TN752 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.006

Influence of lasers on phase noise of optoelectronic oscillators

SHI Yingliang¹, ZHANG Yu², SUN Lijun²

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to optimize the phase noise characteristics and improve the performance of an optoelectronic oscillator (OEO), the relation among the phase noise of an OEO, the spectra line-width and optical power was studied by theoretical analysis and experimental verification. The spectral performance and phase noise of microwave signals generated by the OEO were measured respectively, under the conditions of equal optical power and different spectra line-widths. And then, phase noise of microwave signals was measured under the conditions of fixed spectral line-width and different laser power. The results indicate that the narrower spectral line-width and the higher laser power, the better phase noise and spectral characteristics of microwave signals. Furthermore, compared with the spectral line-width, the laser power has greater effect on phase noise beyond 1kHz frequency offset. The result is helpful for improving phase noise of photoelectric oscillator.

Key words: optoelectronics; optoelectronic oscillator; phase noise; spectral line-width; signal-to-noise ratio

引言

光电振荡器(optoelectronic oscillator, OEO)作为新型的微波信号源^[1], 能够产生高稳定、低噪声的微波信号, 因而备受关注。光电振荡器产生的微波信号的频谱纯度、频率稳定度等特性直接决定了系统的性能。为了获得较好的相位噪声特性, 通常会采用长光纤作为储能介质, 以保证高 Q 值^[2]。但是光纤越长, 模式间隔就会越小, 这就加大了滤波和边模抑制的难度, 而且还会引起模式跳变等问题, 导致频率漂移^[3]。光学谐振腔的使用, 也是提高光电振荡器频率稳定性和相位噪声的常用方法^[4-7], 但是此方法对谐振腔工艺水平要求很高, 目前还处于实验研究阶段。已知激光器的

相对强度噪声(relative intensity noise, RIN)、放大器的热噪声以及光电探测器的散射噪声是光电振荡器系统中的主要噪声, 这些噪声最终都会影响微波信号的相位噪声。当激光器抽运光功率较大时, 相对强度噪声是系统中的主要噪声, 所以降低激光器的 RIN 能够有效地改善光电振荡器的相位噪声水平^[8-9]。有一种耦合双环路光电振荡器就是利用光纤激光器代替传统的半导体激光器作为光源使用, 可避免激光器自身相对强度噪声给系统带来的直接影响, 一定程度地降低振荡器系统的基底噪声, 可以改善振荡器的相位噪声^[10-11]。但是抽运激光器的使用, 依然会引入噪声, 所以不能作为解决振荡器相位噪声问题的最终方案。另外有双向注入双环路结构的光电振荡器^[12], 此种结构利用双向注入锁定来实现边模抑制, 进而降低相位噪声, 但缺点是使用器件较多、成本高、体积大。另外还有基于偏振分路器、合路器的双环路结构振荡器, 它可以避免振荡频率的随机跳变和拍频噪声, 有利于改

作者简介: 石英亮(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子学。

* 通讯联系人。E-mail: Sun_lijun@21cn.com

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2015-03-10

善相位噪声^[13-14],但是偏振调制器、控制器的使用,使系统操作变得复杂而且受环境约束较大。除此之外,系统中微波放大器的使用会引入一定量热噪声,进而影响整个系统的噪声水平特性。所以在选用微波器件时,应尽量使用特性较好的微波器件,或者使用具有同等功能的光学器件代替微波器件,例如用光放大器代替微波放大器^[15]。

根据光电振荡器理论,多环路结构可以实现边模抑制,有利于改善相位噪声。不管采用何种结构,光源的性能直接决定了振荡器系统的整体相位噪声特性。作者通过实验研究不同线宽和功率的半导体激光器对振荡器相位噪声的影响,分别得到不同激光器特性条件下光电振荡器产生的微波信号频谱图和相位噪声图,实验表明,激光器线宽越窄、相对强度噪声越小、光功率越大,则振荡器产生的微波信号的频谱越纯、相位噪声越好。

1 理论分析

半导体激光器发射的光载波入射到调制器,调制器输出后经过光纤延迟线的传输,由探测器探测并转换成微波信号。探测器输出电信号,再经过放大、滤波和再放大后分成两路:一路反馈到调制器的射频(radio frequency, RF)调制端口,形成反馈回路不断循环振荡,而另外一路输出,其结构如图1所示。这种结构可以实现由调制器偏压、滤波器带宽等因素决定的特定频率微波信号的长久自激振荡,并且可以同时提供光输出和电输出,这种特性在光子应用系统中很有优势。

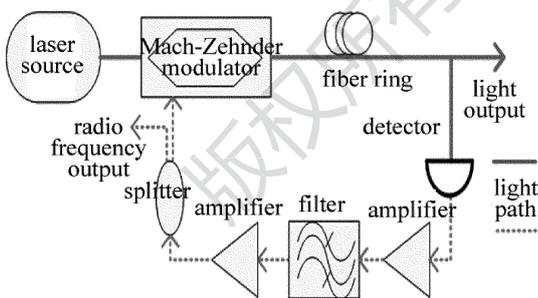


Fig. 1 Schematics of an optoelectronic oscillator

1.1 激光器谱线宽度对相位噪声的影响

激光器的光谱实际上包含了多个谱分量,因而而是有一定线宽的,其谱线宽度是表征光谱纯度或相干性的重要参量,一般用半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)来描述。在光电振荡器系统中,激光器作为光源提供光载波,光载波入射到调制器经微波信号调制后,其光谱如图2所示。图中, P 表示功率, f 表示频率, f_c 是激光器光载波的光谱频率, f_s 则是调制后

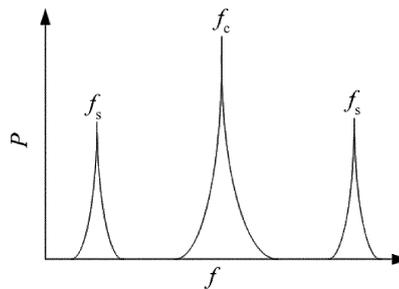


Fig. 2 Spectra of optical carrier modulated by microwave signal

微波信号的边带光谱频率。在频域,两个边带信号分别与光载波进行拍频,拍频之后的信号再叠加,得到最终的微波光信号,经探测转换成电信号。由此可知,激光器的谱线宽度决定了最终产生的微波信号的频谱纯度。所以在光电振荡器系统中,激光器线宽越窄,振荡器产生的信号频谱特性和相位噪声特性就会越好。

1.2 激光器功率对相位噪声的影响

光电振荡器的主要噪声包括激光器的相对强度噪声、放大器热噪声以及探测器散射噪声。通过噪声的功率谱密度来估算振荡信号的频谱。由参考文献[2]可知,光电振荡器的RF信号相位噪声近似为:

$$S_{RF}(f') = \frac{1}{\delta \left[\left(2 - \frac{1}{\delta\tau} \right) - 2 \sqrt{1 - \frac{1}{\delta\tau} \cos(2\pi f'\tau)} \right]} \quad (1)$$

式中, f' 为频率偏移量, τ 为环路延时量, δ 是振荡器的输入信噪比。定义为:

$$\delta \equiv \frac{P_{osc}}{\rho_n G_a^2} \quad (2)$$

式中, P_{osc}/G_a^2 是放大器之前总的振荡功率, P_{osc} 为信号功率, G_a 为放大器增益, ρ_n 是与放大器输入端口噪声相同的输入噪声密度,可表示为:

$$\rho_n = 4k_B T F_a + 2e I_{ph} R + N_{RIN} I_{ph}^2 R \quad (3)$$

式中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为环境温度, F_a 为放大器噪声系数, e 为电子电荷量, R 为负载阻抗, N_{RIN} 为激光器相对强度噪声, I_{ph} 为光电流,可表示为:

$$I_{ph} = P_1 L_o E \quad (4)$$

式中, P_1 为激光器光功率, L_o 为系统总的光损耗, E 为探测器响应度。由(2)式、(3)式、(4)式可得:

$$\delta = \frac{1 - 1/|G_s|}{|G_s|^2} \times \frac{4\eta^2 \cos^2(\pi V_b/V_\pi) (P_1 L_o E)^2 R}{4k_B T F_a + 2e(P_1 L_o E)R + N_{RIN} (P_1 L_o E)^2 R} \quad (5)$$

式中, G_s 是小信号增益, η 为消光比系数, V_b 为调制器偏置电压, V_π 为调制器半波电压。由(5)式可知,输入信噪比 δ 是振荡器小信号增益的非线性函数,而且在 $|G_s| = 1.5$ 时,有最大值。可以得到信噪比(signal-to-

noise ratio, SNR) 与光功率、相对强度噪声的关系曲线, 如图 3 所示。当光功率较小时, 信噪比主要受光功率的影响, 并且随光功率变大而增大; 当光功率较大时, 信噪比受激光器的 RIN 影响较大, 并且随 RIN 增大而减小。因此, 系统信噪比由激光器的光功率和 RIN 共同决定, 而相位噪声是信噪比的函数, 所以光电振荡器的相位噪声受激光器功率和相对强度噪声影响。

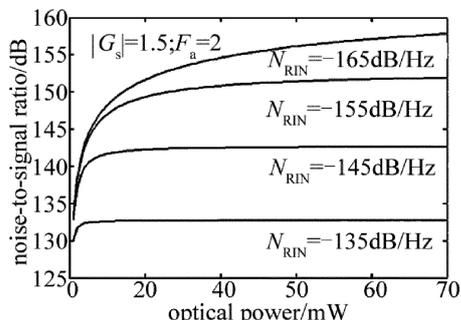


Fig. 3 Relationship between input noise-to-signal ratio and optical power with various RIN

2 实验研究

2.1 激光器线宽对相位噪声的影响

实验中使用了两个不同线宽的半导体激光器: 常规半导体激光器 (Emcore 公司的 1782 型, 以下简称 Emcore) 和窄线宽激光器 (RIO 公司的 Orion 系列, 以下简称 RIO)。首先利用单激光器的延时自外差法分别测量了两个激光器的线宽, 由测量结果可得, Emcore 激光器的线宽约为 1MHz, RIO 激光器线宽约为 1kHz, 如图 4 所示。激光器的线宽越窄, 其 RIN 就会越小, 所以谱线宽度可以定性描述激光器 RIN 的大小。由于实验室相位噪声测试仪器的测量精度和测量性能有限, 为了满足仪器限制, 需要提高振荡器系统的噪声, 故实验中使用两段短光纤的双环结构, 分别为 15m 和 300m。

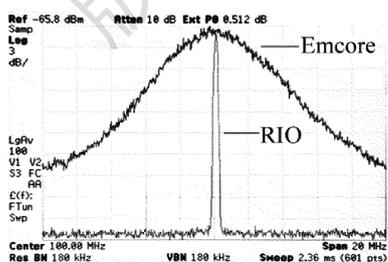


Fig. 4 Spectral line-widths of Emcore and RIO lasers

将线宽为 1MHz 的 Emcore 激光器和线宽为 1kHz 的 RIO 激光器的输出光功率调整到 20mW, 分别进行实验, 由不同线宽、等功率输出的激光器在振荡器系统中得到微波信号的频谱和相位噪声谱, 如图 5 和图 6 所示。由图 5 中频谱可以看出, 中心频率为 9.996GHz,

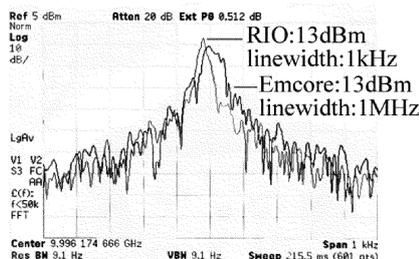


Fig. 5 Spectra of microwave signal at power of 13dBm and line-width of 1MHz or 1kHz

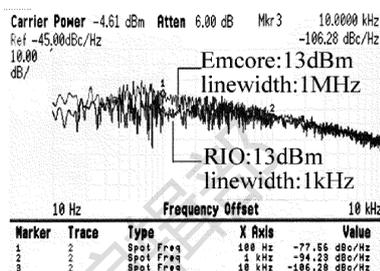


Fig. 6 Phase noise of microwave signal at power of 13dBm and line-width of 1MHz or 1kHz

使用 RIO 激光器时, 频谱尖锐且狭窄; 使用 Emcore 激光器时, 频谱顶端平坦且频带展宽, 所以激光器线宽越窄, 频谱特性相对较好。由图 6 中噪声谱可以看出, Emcore 激光器功率为 13dBm 时, 相位噪声分别为: $-77.56\text{dBc/Hz}@100\text{Hz}$, $-94.23\text{dBc/Hz}@1\text{kHz}$, $-106.28\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$ 。激光器线宽越窄, 在频偏 100Hz 以内, 产生的微波信号的相位噪声特性相对较好, 相位噪声差值最大可达到 10dB; 在 100Hz ~ 1kHz 范围内, 相位噪声曲线逐渐靠近, 在频偏 1kHz 到更远处, 两条曲线基本重合。实验结果说明, 在短光纤环的情况下, 频偏 1kHz 内, 相位噪声受激光器线宽影响较明显, 1kHz 以外相位噪声受线宽影响很小。

2.2 激光器功率对相位噪声的影响

此处实验在分别使用 Emcore 激光器和 RIO 激光器情况下, 改变光功率测量振荡器微波信号的相位噪声。分别调整光功率为 17dBm, 11dBm 和 13dBm, 测量其相位噪声, 如图 7 和图 8 所示。光功率为 17dBm 时, 相位噪声分别为 $-82.08\text{dBc/Hz}@100\text{Hz}$, $-93.12\text{dBc/Hz}@1\text{kHz}$, $-109.29\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$; 光功率为 13dBm 时, 相位噪声分别为 $-78.92\text{dBc/Hz}@100\text{Hz}$,

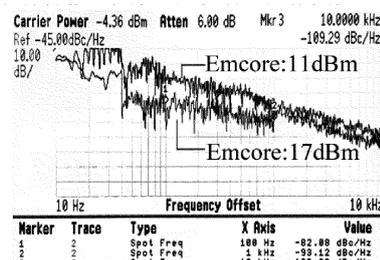


Fig. 7 Phase noise of microwave signal at power of 17dBm and 11dBm

-89.08dBc/Hz@1kHz, -107.80dBc/Hz@10kHz。振荡器输入端光功率较大时,相位噪声特性会有一些改善。由此可知,振荡器输入光功率越大,振荡器的相位噪声会整体改善。

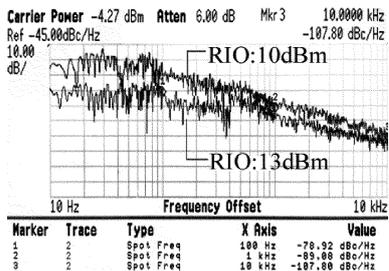


Fig. 8 Phase noise of microwave signal at power of 13dBm and 10dBm

3 结论

光电振荡器是一种能够产生高频率、高稳定、低相位噪声的新型振荡器。半导体激光器在振荡器系统中作为光源,其各种特性决定了系统的整体性能。作者通过实验研究了激光器的线宽和功率对振荡器相位噪声的影响,实验结果表明,激光器线宽越窄、系统输入光功率越大时,振荡器产生微波信号的相位噪声越好,并且在频偏 1kHz 以内,激光器线宽对相位噪声有明显的影 响,频偏 1kHz 以外,激光器线宽对相位噪声的影响很小,光功率对相位噪声影响较大,实验结果对以后振荡器相位噪声的优化有一定的指导意义。除此之外,在环境温度改变的情况下,光纤的有效折射率改变,延时量和有效 Q 值跟着产生变化,最终导致微波信号频率漂移,相位噪声恶化,所以实验过程中要保证光纤环处于恒温状态,以提高实验结果的准确性。

参 考 文 献

[1] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic oscillator for photonic system [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(7): 1141-1149.
 [2] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. Jour-

nal of the Optical Society of America, 1996, B13(8): 1725-1735.
 [3] YAO X S, MALEKI L, YU J, *et al.* Dual-loop optoelectronic oscillator [C]//Frequency Controls Symposium and Exposition. New York, USA:IEEE,1998: 545-549.
 [4] SAVCHENKOV A A, ILCHENKO V S, LIANG W, *et al.* Voltage-controlled photonic oscillator [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1572-1574.
 [5] KIRILL V, PATRICE S, HERVE T, *et al.* Compact optoelectronic microwave oscillators using ultra-high Q whispering gallery mode disk-resonators and phase modulation [J]. Optics Express, 2010, 18(21): 358-363.
 [6] ILCHENKO V S, BENNETT A M, SANTINI P, *et al.* Whispering gallery mode diamond resonator [J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4320-4323.
 [7] YIXI K Zh, CHEN F Sh, JIANG Ch L, *et al.* A high side modes suppression dual-loop optoelectronic oscillator with fabry-perot etalon [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(1):53-57.
 [8] ELIYAHU D, SEIDEL D, MALEKI L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456.
 [9] ZHANG Y, GAO Y, SUN L J. Influence of additive noise on phase noise of optoelectronic oscillator [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(3): 490-493(in Chinese).
 [10] YAO X S, MALEKI L. Dual microwave and optical oscillator [J]. Optics Letters, 1997, 22(24): 1867-1869.
 [11] XU W, JIN T, CHI H. Theoretical and experimental research of coupled optoelectronic oscillators [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 579-585(in Chinese).
 [12] MENYUK C R, LEVY E C, OKUSAGE O, *et al.* An analytical model of the dual-injection-locked optoelectronic oscillator (DIL-OEO) [C]//Frequency Control Symposium and Exposition. New York, USA:IEEE,2009: 870-874.
 [13] JIANG Y, YU J L. A novel scheme dual-loop optoelectronic oscillator [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 919-922(in Chinese).
 [14] LI J, LIANG L, GUO R H. Experimental study about microwave photonic frequency multiplication system based on polarization modulator [J]. Laser Technology, 2014, 38(5):660-664(in Chinese).
 [15] NGUYEN L D, BERNARD J. A new approach for tuning the frequency of an optoelectronic oscillator by using a SOA[C]//International Conference on Advanced Technologies for Communication. New York, USA:IEEE,2008: 367-370.