

基于直调光信号注入半导体激光器构建宽调谐可集成光电振荡器

李元栋¹, 蒲涛², 顾因¹, 朱华涛^{3*}, 李玉东¹, 刘源¹, 张文莉¹

¹陆军军事交通学院镇江校区, 江苏 镇江 212003;

²陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007;

³国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430010

摘要 基于直调光信号注入半导体激光器构建了宽调谐潜在可集成的光电振荡器(OEO), 实现了 9.73~21.30 GHz 的调谐范围, 且调谐过程中相位噪声始终小于 -105 dBc/Hz@10 kHz。实验结构简单、紧凑。若将主、从激光器集成在同一芯片上, 系统还可进一步小型化。若采用调制带宽更大的主激光器, OEO 调谐范围还可进一步扩大。

关键词 光学器件; 光电振荡器; 宽调谐; 光注入; 半导体激光器

中图分类号 TN248.4; TN752.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1323003

Wide Tuning Integrated Optoelectronic Oscillator Based on Direct Modulation Optical Signal Injection Semiconductor Laser

Li Yuandong¹, Pu Tao², Gu Yin¹, Zhu Huatao^{3*}, Li Yudong¹, Liu Yuan¹, Zhang Wenli¹

¹PLA Army Military Transportation University, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China;

²Communications Engineering College, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

³College of Information and Communications, National University of Defense Technology, Wuhan 430010, Hubei, China

Abstract A widely tuned and potentially integrated optoelectronic oscillator (OEO) is constructed based on direct modulation optical signal injection semiconductor laser. The tuning range of 9.73–21.30 GHz and the phase noise lower than -105 dBc/Hz@10 kHz are realized. The structure of the experiment is simple and compact. If the master laser and the slave laser are integrated on the same chip, the system can be further miniaturized. If the master laser with larger modulation bandwidth is used, the tuning range of OEO can be further expanded.

Key words optical devices; optoelectronic oscillator; wide tuning; optical injection; semiconductor laser

1 引言

自 Yao 等^[1]实现光电振荡器(OEO)以来。OEO 以其无电子瓶颈限制、输出微波信号频率高(几百兆赫兹至几百吉赫兹)、相位噪声低(以单模光纤为谐振腔的 OEO 相位噪声最低至 -163 dBc/Hz@10 kHz, 以硅基圆盘为谐振腔的 OEO 相位噪声最低可至 -170 dBc/Hz@10 kHz^[2])、相位噪声不随频率升高而劣化和可同时输出光信号等优点受到了人们的广泛关注^[3-5]。

为扩大 OEO 调谐范围, 起初人们采用的是改变环腔时延的方式, 但该方法调谐范围很小。例如,

Poinsot 等^[6]利用可调谐激光器结合色散介质实现了 0.1~1.9 MHz 频率范围内的调谐。为扩大调谐范围: Huang 等^[7]通过开关选择多个射频滤波器实现了较大范围内的离散调谐; Eliyahu 等^[8]利用可调谐钇铁石榴石(YIG)射频滤波器实现了 6~12 GHz 频率范围内的连续调谐。然而, 受射频滤波器电子瓶颈的限制, 调谐范围有限。为解决该问题: Pan 等^[9]将法布里-珀罗激光器作为有源光滤波器替代射频滤波器, 实现了 6.41~10.85 GHz 的调谐范围; Li 等^[10]将相移光栅(PS-FBG)作为无源光滤波器替代射频滤波器, 实现了 3~28 GHz 的调谐范围; Xie 等^[11]利用可调谐光滤波

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61974165, 61901480, 62071487)

通信作者: *zhuhuatao2008@163.com

器代替射频滤波器,实现了 4.74~38.38 GHz 的调谐范围;Zhang 等^[12]利用宽谱光源构建单通带微波光子滤波器,并将该单通带微波光子滤波器嵌入光电振荡器内部环路中,实现了 1~12 GHz 的调谐范围。为简化系统,避免使用电光调制器。熊锦添等^[13]基于直调半导体激光器构建 OEO,将半导体激光器张弛振荡峰作为有源光滤波器,通过改变半导体激光器直流偏置电流实现了 3.77~8.75 GHz 的调谐范围。相比其他 OEO,基于直调激光器构建的 OEO 具有调制效率高、结构紧凑和阈值低等优点,但受张弛振荡峰调谐范围限制,其调谐范围较小。为扩大调谐范围,Wang 等^[14]基于外部自由振荡的光信号注入并锁定半导体激光器的方式构建 OEO,通过调节主激光器,改变注入比和失谐频率等参数来扩大从激光器张弛振荡峰的调谐范围,从而实现了更大的调谐范围(5.98~15.22 GHz)。然而,该方案仍受张弛振荡峰限制,调谐范围难以进一步扩大。为保留光注入半导体激光器构建的 OEO 的优势(调制效率高、结构紧凑、阈值低、链路损耗小和有望实现集成化)且消除张弛振荡峰的限制,进一步扩大

OEO 的调谐范围。本文改进了文献[14]中的实验方案,将直接调制的光信号注入半导体激光器中,以半导体激光器的增益谱为有源光滤波器构成单通带微波光子滤波器,并将该单通带微波光子滤波器嵌入光电振荡环路中构建 OEO,实现了 9.73~21.30 GHz 的调谐范围且调谐过程中微波信号的相位噪声始终低于 -105 dBc/Hz@10 kHz。

2 实验方案和工作原理

基于直调光信号注入半导体激光器构建宽调谐 OEO 的系统结构如图 1 所示。系统由主激光器(master)、光环形器(OC1)、从激光器(slave)、偏振分束器(PBS)、两段长度分别为 1.1 km 和 2.9 km 的单模光纤(SMF1 和 SMF2)、偏振合束器(PBC)、4 个偏振控制器(PC1、PC2、PC3、PC4)、功率分配比为 10:90 的光耦合器(OC2)、光谱分析仪(OSA)、光电探测器(PD)、功率放大器(PA)、功率分配比为 10:90 的射频功率分配器(DIV)和频谱分析仪(ESA)构成。

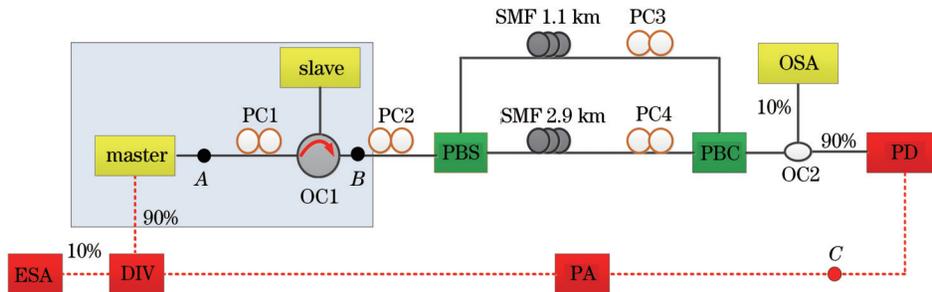


图 1 基于直调光信号注入半导体激光器构建宽调谐 OEO 的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for wide tuning OEO based on direct modulation optical signal injected into semiconductor laser

主、从激光器都采用市售商用半导体激光器,区别是主激光器内置隔离器,从激光器中无隔离器。PC1 的作用是保证主激光器的偏振态和从激光器的偏振态相同,进而达到最佳注入效果。PC2 的作用是保证从激光器输出光信号的偏振态和 PBS 主轴成 45° 角,确保 PBS 输出的两个支路上光信号的功率相等。两段长度不同的光纤、偏振分束器、偏振合束器、PC3 和 PC4 共同构成了经典的偏振光复用双环结构,以此来提高 OEO 的边模抑制比和输出频率稳定度,其中 PC3 和 PC4 的作用是消除外界微小震动等因素对两路偏振光信号偏振态的干扰,进而保持两路光信号偏振态的垂直,实现比较理想的偏振光复用结构。功率放大器由两个市售射频功率放大器级联而成,其作用是放大光电探测器输出的微波信号并将其反馈到主激光器中,进而实现对主激光器的直接调制。在 A、B 点处用光谱仪来测试主、从激光器输出的光谱。在 C 点处测试光电探测器输出微波信号的频谱。该方案的工作原理如图 2 所示。

由于环腔内有很多有源器件(主激光器、从激光器和射频功率放大器),故图 1 所示的光电环路中有各种频率的噪声。当这些噪声直调主激光器时,主激光器

光载波(f_m)的两侧产生很多光学边带($f_1 \sim f_7$)。在光载波和这些光学边带同时注入从激光器的情况下,根据文献[14],当多频光注入从激光器时:一方面从激光器中会产生波长红移现象,即从激光器的输出中心频率由自由运转时的 f_s 下降到 f_{cav} ,此时增益谱从虚曲线移至实曲线处,如图 2 中左上角图所示;另一方面从激光器会对注入的多频光信号进行选择 and 放大,即落入从激光器增益谱范围内的光学边带(f_4)将会被放大($f_4 = f_{cav}$),而其他没有落入增益区的光学边带将不受影响。从激光器输出的光信号经过双环结构后进入光电探测器中产生光学差拍现象,经过光电转换,光电探测器输出一个频率为 $f_{RF} = f_m - f_{cav}$ 的射频信号。该射频信号经功率放大器放大后(功率比其他频率信号的功率大)又被加载到主激光器上,完成对主激光器的直接调制。直接调制的结果是主激光器光载波的两侧产生 ± 1 阶光学边带($f_m \pm f_{RF}$)。当主激光器光载波和 ± 1 阶光学边带再次注入从激光器时,由于 $+1$ 阶光学边带($f_m + f_{RF}$)正好落入从激光器增益谱中,故 $+1$ 阶光学边带被从激光器放大。经过多次循环后,主、从激光器相关性越来越强。当环路满足自激振荡条件时,OEO 输出微

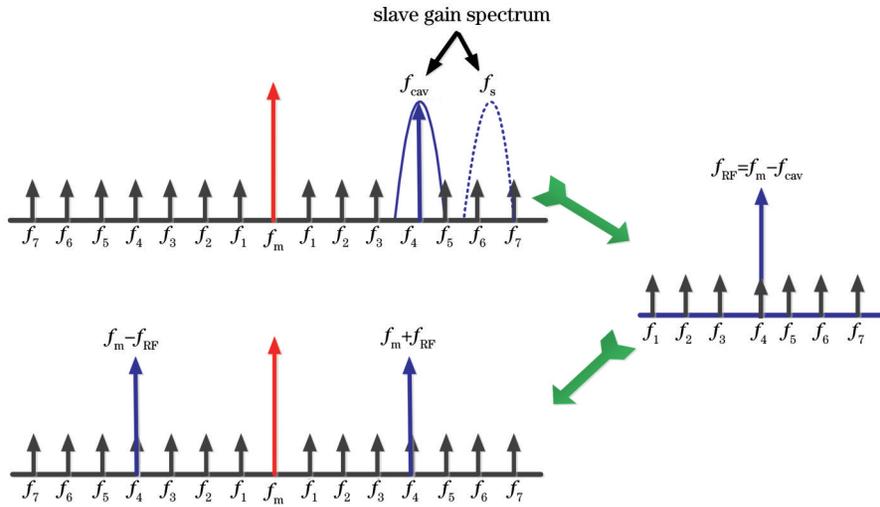


图 2 直调光信号注入半导体激光器构建宽调谐 OEO 工作原理图

Fig. 2 Working principle of wide tuning OEO based on direct modulation optical signal injected into semiconductor laser

波信号 (f_{RF})。改变主激光器或者从激光器的输出中心频率都可改变 OEO 输出微波信号的频率,进而实现 OEO 的调谐。

3 实验结果

按照图 1 搭建实验系统。PD 选用 FINISAR u2t XPDV2120RA, 3 dB 通带宽度为 0~50 GHz。PA 的第一个功放选用 Mini-Circle, 3 dB 通带宽度为 0~18 GHz, 噪声系数为 7 dB, 增益系数为 20 dB。PA 的第二个功放选用 SHF806A, 3 dB 通带宽度为 0~40 GHz, 噪声系数为 6 dB, 增益系数为 29 dB。高精度光谱仪选用 FINISAR Wave-Analyzer 1500s, 最小分辨率为 125 MHz。频谱仪选用 ROHDE SCHWARZ, 最大测量带宽为 26.5 GHz。主激光器输出中心波长为 1549.4 nm、输出功率为 3 dBm。从激光器工作温度为 32.6 °C, 工作电流为 30 mA, 自由运转输出波长为 1549.41 nm, 功率为 -10 dBm。主、从激光器自由运转时波长差为 0.01 nm。调节偏振控制器(PC1)使主、从激光器偏振态相同, 进而获得最大注入效率。单频光注入半导体激光器的光谱图如图 3 所示。

由图 3 可知, 在主激光器输出的光信号注入到从

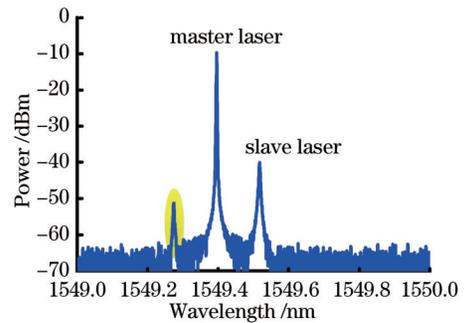


图 3 单频光注入半导体激光器的光谱图

Fig. 3 Optical spectrum of single frequency optical signal injected into semiconductor laser

激光器腔内后, 主、从激光器相互作用产生非线性效应, 表现为主激光器侧边产生光学边带(图 3 中阴影部分所示)。此外, 在主激光器输出的光信号注入到从激光器腔内后, 从激光器输出光信号的中心波长将发生波长红移现象, 从激光器输出光信号的中心波长由自由运转时的 1549.41 nm 红移至 1549.51 nm, 红移量为 0.10 nm。OEO 输出微波信号的频谱和相位噪声如图 4 所示。

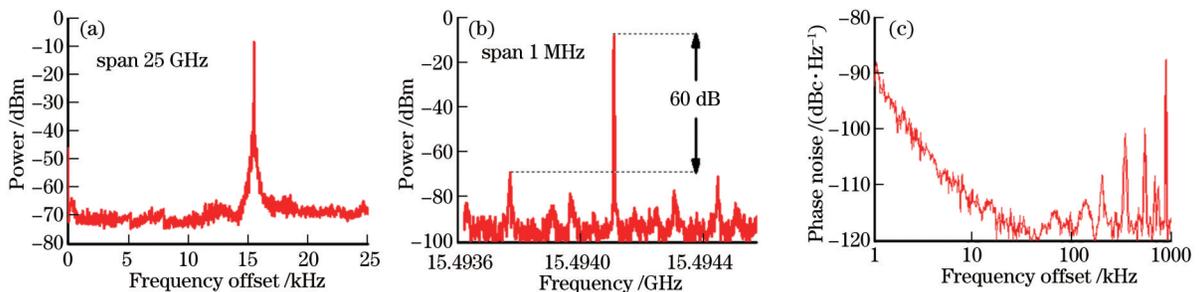


图 4 OEO 输出微波信号频率为 15.49 GHz 时的频谱图和相位噪声。(a) 中心频率; (b) 边模抑制比; (c) 相位噪声

Fig. 4 Frequency spectra and phase noise when frequency of OEO output microwave signal is 15.49 GHz. (a) Center frequency; (b) side mode suppression ratio; (c) phase noise

由图 4(a)可知, OEO 输出微波信号的中心频率为 15.49 GHz。由图 4(b)可知, 中心频率为 15.49 GHz 的微波信号的边模抑制比为 60 dB。由图 4(c)可知, 频偏 10 kHz 处的相位噪声为 $-112 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ 。

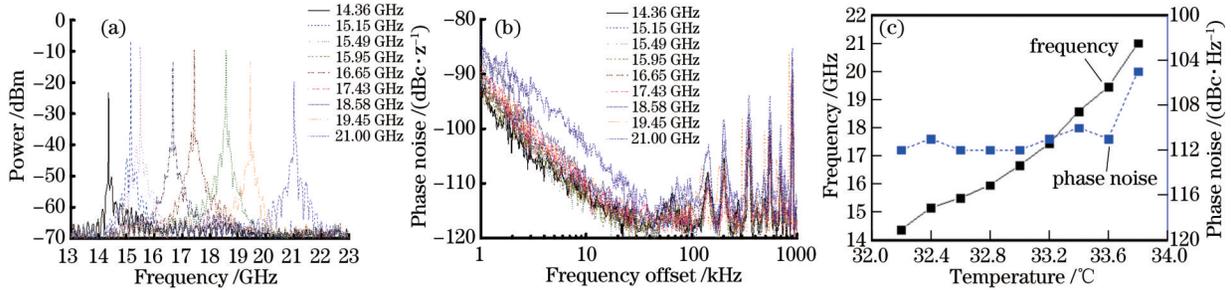


图 5 OEO 调谐时输出微波信号的频谱和相位噪声的变化。(a)中心频率的变化;(b)相位噪声的变化;(c)图 5(a)和图 5(b)中数据的汇总

Fig. 5 Variation of frequency spectra and phase noise of output microwave signal when OEO is tuned. (a) Variation of center frequency; (b) variation of phase noise; (c) summary of data in Figs. 5 (a) and 5 (b)

由图 5(a)可知, 当从激光器工作温度从 $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐升高至 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, OEO 输出微波信号的频率从 14.36 GHz 逐渐升高至 21.00 GHz。由图 5(b)可知, 当从激光器工作温度从 $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐升高至 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, OEO 输出微波信号的相位噪声介于 $-105 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ 和 $-112 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ 之间, 其中大部分频点的相位噪声低于 $-110 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$, 只有 21.00 GHz 处相位噪声劣化。出现该现象的原因是根据文献 [1], OEO 输出相位噪声和信噪比成正比, 当 OEO 输出微波信号的频率大于主激光器的调制带宽 ($<10 \text{ GHz}$) 和功放的响应带宽 (第一个功放的响应带宽是 18 GHz) 时, 直调效率变低, 主、从激光器相关性减弱, 光电探测器输出信号的信噪比劣化, 引起 OEO 输出相位噪声劣化。图 5(c) 将图 5(a) 和图 5(b) 中的数据进行了汇总。由图 5 可知, OEO 调谐范围的上限受制于主激光器调制带宽、功率放大器的响应带宽和微波光子链路中其他器件的响应带宽 (功率分配器、射频传输线和光电探测器等), 其中受主激光器调制带宽限制最明显, 这是因为本实验中所用的其他器件的频率响应带宽都远大于主激光器的调制带宽。图 6 为主激光器频率响应图, 其中近频处的凹陷是由封装工艺缺陷导致的。

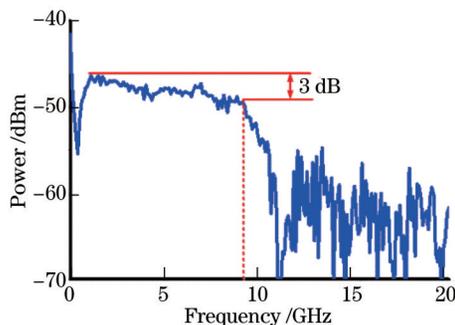


图 6 主激光器频率响应图

Fig. 6 Frequency response of master laser

保持其他参数不变, 仅改变从激光器的工作温度, 使其每次步进 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 实验测得的 OEO 输出微波信号频率和相位噪声的变化如图 5 所示。

OEO 的调谐范围由注入比和环腔自激振荡条件共同决定, 原因是所提方案中主、从激光器频率差值必须大于锁定范围, 否则从激光器将被主激光器锁定, 光注入就会失去意义, 此时方案就会与文献 [14] 中用直调激光器构建的 OEO 雷同。在所提方案中, 主激光器必须远离从激光器的注入锁定区域, 防止从激光器被主激光器注入的光信号锁定, OEO 输出的微波信号频率等于主、从激光器之间的频率差值, OEO 调谐是通过改变主、从激光器之间的频率差实现的。在文献 [14] 中, 主激光器必须注入光信号以锁定从激光器, 通过控制主激光器的注入比等参数来改变从激光器的张弛振荡峰, OEO 输出微波信号的频率等于从激光器的张弛振荡峰处的频率, OEO 的调谐是通过改变张弛振荡峰的频率实现的。根据光注入半导体激光器的输出特性, 注入比减小, 注入锁定范围减小, 即主激光器输出光信号可以以较小的波长差值注入到从激光器腔内。换句话说, 在弱注入条件下, 主、从激光器输出光信号中心频率间差值可以变得更小, 此时 OEO 输出电信号的中心频率会降低, 因为 OEO 输出电信号中心频率等于主、从激光器波长差值, 即 OEO 向低频方向调谐的范围更大, 有助于 OEO 调谐范围下探。然而, 当注入比弱到一定程度时, 主、从激光器差拍产生的电信号将满足不了自激振荡条件, OEO 失效。因此, OEO 的调谐范围的下限由注入比和环腔自激振荡条件共同决定。

在实验中, 先研究只降低注入比的情况, 并观察 OEO 输出的微波信号频率, 发现当从激光器工作温度和工作电流保持不变, 仅降低主激光器注入功率时, OEO 输出微波信号频率确实会下探但变化量的绝对值很小。出现该现象的原因是注入比减小, 从激光器的红移现象减弱, 引起主、从激光器差拍的微波信号频率降低, 抵消了注入比降低带来的频率下探。因此, 为探索 OEO 调谐范围的下限, 同时降低主激光器的注入比和从激光器的工作温度, 即减小主、从激光器频率的

差值,此时 OEO 输出的微波信号频率和相位噪声如图 7 所示。

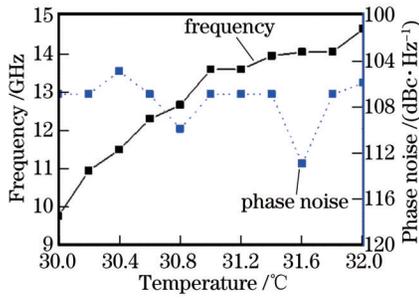


图 7 OEO 调谐时输出微波信号频率和相位噪声变化
Fig. 7 Variation of frequency and phase noise of output microwave signal when OEO is tuned

由图 7 可知,随主激光器注入比的降低和从激光器温度从 32 °C 降低到 30 °C, OEO 输出微波信号的频率由 14.6 GHz 降低至 9.73 GHz、相位噪声在 -105 dBc/Hz@10 kHz 和 -112 dBc/Hz@10 kHz 间波动。总体来看,所构建的 OEO 可以实现 9.73~21.30 GHz 的调谐范围,相位噪声大部分在 -110 dBc/Hz@10 kHz 左右。

根据文献[1],光电振荡器的振荡频率 f 和噪声功率谱 $P_{RF}(f')$ 的表达式为

$$f = N\Delta f = N \frac{1}{\tau}, \quad N = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

$$P_{RF}(f') = \frac{\delta}{(\delta/2\tau)^2 + (2\pi)^2(\tau f')^2}, \quad (2)$$

式中: f 为起振频率; N 为起振模式数; Δf 为纵模模式间隔; f' 为起振频率与中心频率的偏移量; δ 为输入信号与噪声的比值; τ 为谐振环路时延。由式(1)、(2)可知:增加光电振荡器环路中的光纤长度(即 τ 增大),会导致 OEO 输出的噪声功率谱 $P_{RF}(f')$ 减小,即 OEO 输出的相位噪声减小,这对 OEO 有利;纵模模式间隔 Δf 会随光纤长度的增加而减小,导致 OEO 难以单纵模输出,这对 OEO 不利。为保留长光纤结构 OEO 输出相位噪声低的优点,同时让 OEO 单模运转,研究人员提

出了 OEO 多环路结构(两个或两个以上的振荡环路,每个环路中所用光纤的长度不同)。

多环路结构 OEO 输出的微波信号必须同时满足多个环路振荡条件:整个光电振荡器的 Q 值由最长的反馈回路确定;根据游标卡尺效应,纵模模式间隔由最短的反馈回路确定。此时,多环路光电振荡器既可以保证 OEO 输出微波信号具有较低的相位噪声,又可以保障 OEO 单纵模运转(抑制其他边带信号的产生)^[15]。基于上述理论,本文利用长度为 1.1 km 的单环光纤、长度为 2.9 km 的单环光纤、长度为 1.1 km 的光纤和长度为 2.9 km 的光纤构成的双环光纤构建了不同结构的 OEO 并比较了它们之间相位噪声、边模抑制比和纵模间隔的差别,实验结果如图 8 和图 9 所示。

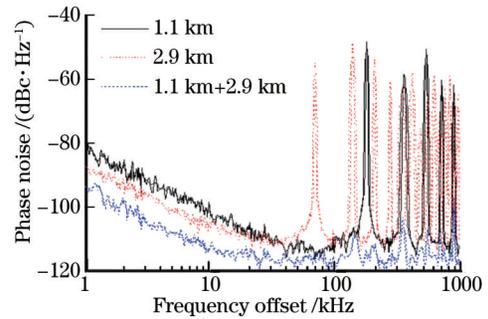


图 8 不同结构下 OEO 输出信号的相位噪声
Fig. 8 Phase noise of microwave signal from OEO under different structures

由图 8 可知,双环光纤结构下 OEO 的相位噪声最小,长度为 1.1 km 的单环光纤结构下 OEO 的相位噪声最大,表明双环结构能有效降低 OEO 环路输出的相位噪声,即噪声功率谱 $P_{RF}(f')$ 。由图 9 可知:长度为 2.9 km 的单环光纤结构下 OEO 的边模抑制比最小,双环光纤结构下 OEO 的边模抑制比最大;长度为 2.9 km 的单环光纤结构下 OEO 的纵模间隔最小,双环光纤结构下 OEO 的纵模间隔最大。实验结果表明,游标卡尺效应有效,双环结构能有效增加纵模间隔,提高边模抑制比。实验结果符合文献[1]和文献[15]的理论预期,表明多环路、长光纤结构的 OEO 能有效增加 OEO 的纵模模式间隔(增加输出模式的选择性),提高边模抑制比和降低 OEO 的输出噪声。

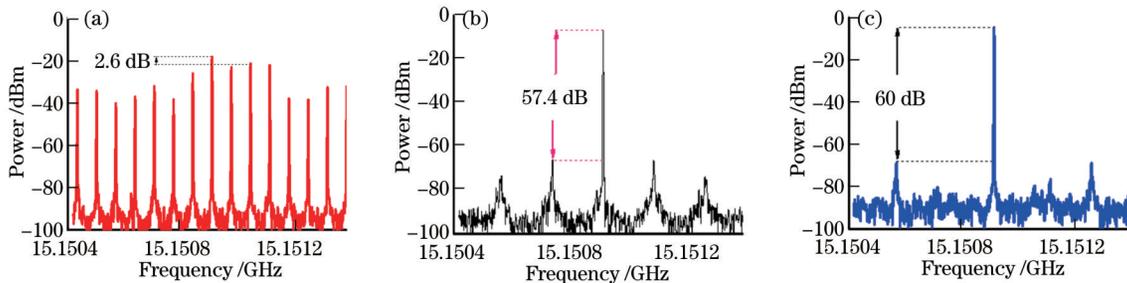


图 9 不同结构下 OEO 输出信号的边模抑制比。(a)长度为 2.9 km 的单环光纤;(b)长度为 1.1 km 的单环光纤;(c)长度为 1.1 km 的光纤和长度为 2.9 km 的光纤构成的双环光纤
Fig. 9 Side mode suppression ratios of output signals from OEO under different structures. (a) Single-ring fiber with length of 2.9 km; (b) single-ring fiber with length of 1.1 km; (c) double-ring fiber consisted of fiber with length of 1.1 km and fiber with length of 2.9 km

4 结 论

改进了文献[14]中的实验方案,将直接调制的光信号注入半导体激光器中构建 OEO。所提方案保留了光注入半导体激光器的优点且克服了张弛振荡频率对 OEO 调谐范围的限制,扩大了 OEO 的调谐范围,实现了相位噪声低于 -105 dBc/Hz@10 kHz,调谐范围覆盖 9.73~21.30 GHz。此外,比较了单环和双环结构 OEO 输出信号的相位噪声、边模抑制比和纵模间隔,实验结果表明双环结构确实有利于降低系统的相位噪声、提高边模抑制比和增大纵模间隔。

所构建的 OEO 的调谐范围上限受主激光器调制带宽限制,下限由注入锁定范围和环腔自激振荡条件共同决定。目前所构建的 OEO 频率调谐下限还没有很好的办法去优化,但是有望突破上限,原因是本课题组已经制造出了调制带宽达 30 GHz 的半导体激光器^[16-17],其他课题组也有类似进展^[18]。此外,所提实验系统还可进一步小型化,现本课题组已经将主、从激光器集成在同一个芯片上,在主激光器上预留射频频口后有望实现^[19]。可以预见,未来将会报道具有更大调谐范围、更小体积且基于单片集成直调光信号注入半导体激光器所构建的 OEO。

参 考 文 献

- [1] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(7): 1141-1149.
- [2] Liang W, Eliyahu D, Ilchenko V S, et al. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7957.
- [3] Kong F Q, Li W Z, Yao J P. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2611-2613.
- [4] Zhang T, Zhu J G, Guo T H, et al. Improving accuracy of distance measurements based on an optoelectronic oscillator by measuring variation of fiber delay[J]. Applied Optics, 2013, 52(15): 3495-3499.
- [5] 邢云路, 李尚远, 薛晓晓, 等. 高频宽带分布相参微波光子成像雷达研究[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1517003.
Xing Y L, Li S Y, Xue X X, et al. High-frequency broadband-distributed coherent-aperture microwave photonic imaging radar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1517003.
- [6] Poinsot S, Porte H, Goedgebuer J P, et al. Continuous radio-frequency tuning of an optoelectronic oscillator with dispersive feedback[J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1300-1302.
- [7] Huang S H, Maleki L, Le T. A 10 GHz optoelectronic oscillator with continuous frequency tunability and low phase noise[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, June 8, 2001, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2001: 720-727.
- [8] Eliyahu D, Maleki L. Tunable, ultra-low phase noise YIG based opto-electronic oscillator[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, June 8-13, 2003, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 2185-2187.
- [9] Pan S L, Yao J P. Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-Perot laser diode with external optical injection[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1911-1913.
- [10] Li W Z, Yao J P. A wideband frequency tunable optoelectronic oscillator incorporating a tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(6): 1735-1742.
- [11] Xie X P, Zhang C, Sun T, et al. Wideband tunable optoelectronic oscillator based on a phase modulator and a tunable optical filter[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 655-657.
- [12] Zhang J J, Gao L, Yao J P. Tunable optoelectronic oscillator incorporating a single passband microwave photonic filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(4): 326-329.
- [13] Xiong J T, Wang R, Fang T, et al. Low-cost and wideband frequency tunable optoelectronic oscillator based on a directly modulated distributed feedback semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4128-4130.
- [14] Wang P, Xiong J T, Zhang T T, et al. Frequency tunable optoelectronic oscillator based on a directly modulated DFB semiconductor laser under optical injection[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20450-20458.
- [15] 张铮, 滕义超, 张品, 等. 宇称-时间对称光振荡器技术研究进展[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 451-457, 468.
Zhang Z, Teng Y C, Zhang P, et al. Research progress of parity-time-symmetric optoelectronic oscillator[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(4): 451-457, 468.
- [16] 熊锦添. 光注入 DFB 半导体激光器的特性研究及其在微波光子学中的应用[D]. 南京: 解放军理工大学, 2014: 10-46.
Xiong J T. Research on the properties of DFB semiconductor lasers under optical injection and their applications in microwave photonics[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2014: 10-46.
- [17] Zheng J L, Zhao G W, Zhou Y T, et al. Experimental demonstration of amplified feedback DFB laser with modulation bandwidth enhancement based on the reconstruction equivalent chirp technique[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1506808.
- [18] Pan B W, Lu D, Zhang L M, et al. A widely tunable optoelectronic oscillator based on directly modulated dual-mode laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1400707.
- [19] Zhang X, Zheng J L, Pu T, et al. Simple frequency-tunable optoelectronic oscillator using integrated multi-section distributed feedback semiconductor laser[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7036-7046.