

基于半导体光放大器的光电振荡器相位噪声抑制的研究

谢田元, 王菊*, 马闯, 于洋, 于晋龙

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 提出一种利用饱和增益半导体光放大器(SOA)自增益调制效应抑制光电振荡器(OEO)相位噪声的方案。此方案将 SOA 置于光电振荡环路中,通过调节光衰减器及 SOA 的驱动电流使 SOA 工作在饱和增益状态,利用自增益调制效应抑制调制光信号的部分幅度噪声,提高环路的噪信比,从而降低产生微波信号的相位噪声。对 OEO 相位噪声的组成及 SOA 抑制幅度噪声的原理进行理论分析和实验验证,实验结果表明:在腔长为 5 km 的单环结构 OEO 中加入饱和工作状态的 SOA,在 0.1 kHz 下产生的 10 GHz 微波信号近端相位噪声为 -84.5 dBc/Hz,在 1 kHz 下产生的相位噪声为 -113.9 dBc/Hz,与未加入 SOA 的结构相比,相位噪声优化了 3 dB,实验结果与理论分析基本一致。

关键词 光学器件; 光电振荡器; 半导体光放大器; 相位噪声; 饱和增益效应

中图分类号 TN752.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1223007

Research on Phase Noise Suppression of Optoelectronic Oscillator Using Semiconductor Optical Amplifier

Xie Tianyuan, Wang Ju*, Ma Chuang, Yu Yang, Yu Jinlong

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract This study proposes a method for suppressing phase noise of an optoelectronic oscillator (OEO) based on self-gain modulation effect of a gain-saturated semiconductor optical amplifier (SOA). The SOA is added into the OEO loop and operates in gain-saturated state by adjusting the optical attenuator and drive currents. Partial amplitude noise in modulated optical signal is suppressed due to the SOA's self-gain modulation effect, thereby improving the signal-to-noise ratio of the loop and reducing the phase noise of generated microwave signal. Furthermore, the composition of phase noise in the OEO and the noise-suppression principle of the SOA are analyzed and experimentally verified. The experimental results indicate that when we add a gain-saturated SOA in a 5-km-long single-loop OEO, the near-end phase noises of 10 GHz microwave signal are -84.5 dBc/Hz and -113.9 dBc/Hz under 0.1 kHz and 1 kHz, respectively, i. e., an improvement of 3 dB over that without the SOA. The experimental results are in agreement with the theoretical analysis.

Key words optical devices; optoelectronic oscillator; semiconductor optical amplifier; phase noise; gain-saturated effect

OCIS codes 230.4910; 250.5980; 110.4280

1 引 言

微波源是一切微波技术的基础,随着通信技术、雷达技术的发展,人们对微波源的相位噪声、带宽、变频等性能提出了越来越高的要求^[1-4]。传统微波源的相位噪声已经接近极限,且不能满足人们的需

求,这时迫切需要新的微波产生方法。随着微波光子技术的发展^[5-6],人们开始利用光电混合的方法获得高品质的微波信号。而光电振荡器(OEO)就是这样一种微波源,其通过千米量级的光纤搭建超长的振荡环路来实现超低相位噪声微波信号的产生^[7],成为人们的研究热点。

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-11; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61427817,61775162)

* E-mail: wangju@tju.edu.cn

目前, OEO 产生的微波信号的近端相位噪声(频偏在 1 kHz 以内)与传统方法相比优势不明显, 需要进一步优化相位噪声, 研究人员对此进行了大量研究。Devgan 等^[8]提出全光增益结构的光电振荡器, 该方法只通过掺铒光纤放大器(EDFA)提供增益, 结合低驱动电压的马赫-曾德尔调制器实现光电振荡, 消除了电放大器带来的闪烁相位噪声, 相位噪声改善了 10 dB。Volyanskiy 等^[9]通过长光纤色散分析激光器波长抖动对 OEO 相位噪声的影响, 并将普通单模光纤替换为非零色散光纤, 相位噪声降低了 10 dB。洪俊等^[10]提出并理论分析了光电振荡器在调制器低偏置点调制信号时可以优化相位噪声的方案, 与正交偏置点相比, 对应的相位噪声下降了 2.8 dB。Okusaga 等^[11]通过调制激光频率的方法抑制了瑞利散射引起的强度噪声, 相位噪声抑制了 20 dB。Docherty 等^[12]分析了瑞利散射引起的光强度噪声在光电探测器(PD)及电放大器上转换为相位噪声的特性, 提出在 PD 后加入特定增益电补偿器件的方法以抑制 OEO 的相位噪声, 理论上 6 km 光纤、10 GHz 频偏在 1 kHz 处的相位噪声可以抑制 8 dB。Peng 等^[13]通过在 PD 前加入光环形器, 提高了 PD 的光回波损耗性能, 减小了光路中的干涉噪声, 相位噪声改善了 18 dB。

总体来讲, OEO 的相位噪声主要受激光器、长光纤及电放大器等器件的影响^[14], 具体表现为激光器的波长抖动和相对强度噪声(RIN)、长光纤的色散特性和瑞利散射、放大器闪烁噪声等。其中, 降低激光器的波长抖动和 RIN 及放大器的闪烁噪声的影响只能通过提高器件自身性能实现。文献[9]、[11-12]、[13]分别针对光纤的色散、瑞利散射、回波干涉等特性进行研究, 提出了抑制 OEO 相位噪声的方法。饱和增益状态下的半导体放大器(SOA)可以抑制激光器的 RIN^[15-16]及调制光信号上的幅度噪声^[17-18], 在光通信尤其是全光 3R 再生(再放大、再整形、再定时)领域有重要应用。因此, 本文提出一种基于饱和 SOA 自增益调制效应抑制 OEO 相位噪声的方法。饱和增益 SOA 置于光电振荡环路中, 能对激光器及长光纤等引起的调制光上的幅度噪声进行抑制, 改善 OEO 的相位噪声性能。文中对此方案进行了理论分析和实验验证, 结果表明, 在 5 km 单环结构 OEO 产生 10 GHz 微波信号条件下, 相位噪声改善了 3 dB。该方案为优化 OEO 的性能提供了一个思路。

2 基本原理

2.1 影响 OEO 相位噪声的噪声源

OEO 的理论模型最早由 Yao 等^[7]分析和建立, 并被其他学者不断完善^[19]。OEO 的相位噪声主要由输入振荡器的噪声与信号的比 δ 及环路总时延 τ 决定, 在振荡信号频率偏移量 f 远大于信号半峰全宽, 且 f 远远小于 $1/\tau$ 时, OEO 输出微波信号的功率谱密度 $S_{\text{RF}}(f)$ ^[7]可以表示为

$$S_{\text{RF}}(f) = \frac{\delta}{(2\pi)^2(\tau f)^2} \quad (1)$$

从(1)式中可以看出, 相位噪声满足 $1/f^2$ 关系, 且 δ 越小, OEO 产生信号的相位噪声越低。 δ 与输入振荡器的总相位噪声 ϕ_{in} 有关^[12], 表示为

$$\delta \propto \phi_{\text{in}}(\omega) = F(\omega) \{ \phi_{\text{t}}(\omega) + \phi_{\text{LFN}} + [\gamma_{\text{pm}}^{(\text{PD})} + \gamma_{\text{am}}^{(\text{PD})} \gamma_{\text{pm}}^{(\text{AMP})}] \alpha_{\text{am}}(\omega) \}, \quad (2)$$

式中: ω 为角频率; $F(\omega)$ 为滤波器的响应函数; ϕ_{t} 为系统的热噪声; ϕ_{LFN} 为激光器的频率噪声; $\gamma_{\text{pm}}^{(\text{PD})}$ 、 $\gamma_{\text{am}}^{(\text{PD})}$ 和 $\gamma_{\text{pm}}^{(\text{AMP})}$ 分别为 PD 的幅度-相位转换系数, PD 的幅度-幅度转换系数和电放大器的幅度-相位转换系数; α_{am} 为光上的幅度噪声, 包括激光器的 RIN、长光纤带来的瑞利散射噪声及干涉噪声等。光上的幅度噪声通过 PD 转换为光电流进而影响输出信号的相位噪声。由于系统的热噪声和激光器的频率噪声很低, 相位噪声主要由光幅度噪声决定, 降低光上的幅度噪声 α_{am} 可以改善 OEO 的相位噪声。

2.2 利用 SOA 自增益调制效应的噪声抑制原理

在 SOA 中, 受激辐射引起载流子消耗而导致饱和。当 SOA 放大强度调制的光信号时, 受 SOA 中载流子消耗与动态特性恢复的影响, 会出现自增益调制现象, 即 SOA 的增益随注入光功率的增大而减小。当注入 SOA 的强度调制光信号功率 P_{in} 较小时, SOA 增益近似线性, 光信号被放大; 当注入 SOA 光功率 P_{in} 增大时, SOA 达到饱和, 由于 SOA 增益减小, 强度调制光信号上叠加的幅度噪声得到了抑制。利用 SOA 的非线性效应可以抑制部分幅度噪声, 提高调制光信号的信噪比, 其过程如图 1 所示。

激光器输出的直流光上叠加幅度噪声, 如图 1(a)所示。光功率表示为 $P_{\text{cw}}(1+n_{\text{A}})$, 其中 P_{cw} 为直流光平均功率, n_{A} 为激光器幅度噪声。马赫-曾德尔强度调制器(MZM)的调制曲线如图 1(b)所示, 外部正弦信号 $V_{\text{in}}(t)$ 经过 MZM 调制后的输出功率如图 1(c)所示, 其中 P_{opt} 为 MZM 的输出光功率。

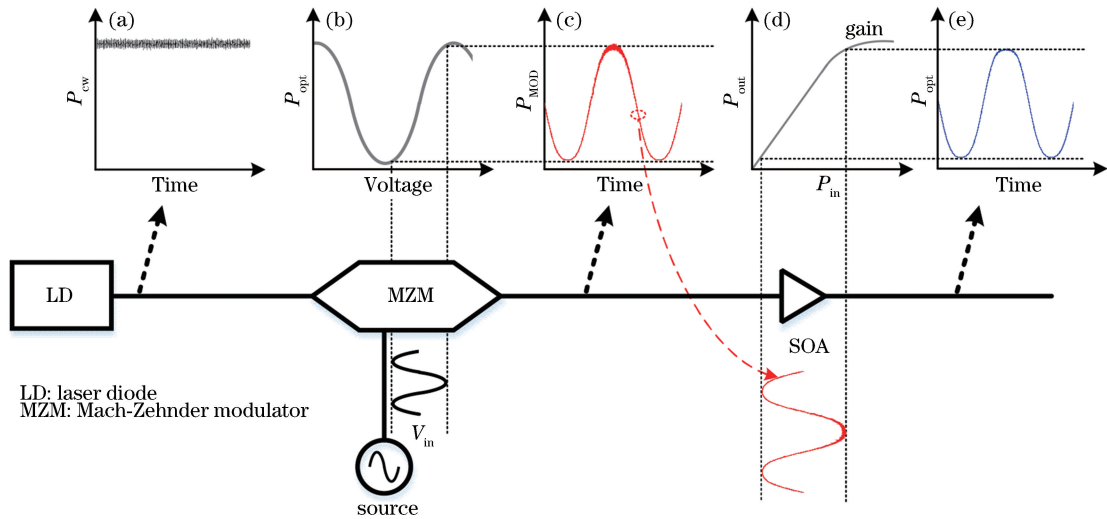


图 1 基于饱和增益 SOA 的噪声抑制过程

Fig. 1 Process of noise suppression based on gain-saturated SOA

调制后的光功率 $P_{MOD} = [\alpha P_{cw} (1 + n_A) / 2] \{1 - \eta \sin \pi [V_{in}(t) / V_{\pi} + V_B / V_{\pi}]\}$, 其中 α 、 η 、 V_B 和 V_{π} 分别为 MZM 的插入损耗、消光比、直流偏置电压和半波电压, 可以看出, 调制后的信号功率越大, 噪声幅度越大。此时, 在调制器后加入一个工作在饱和增益状态的 SOA, 增益曲线如图 1(d) 所示, 其增益 G 与输入功率 P_{in} 的关系^[20]为

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{G} = P_{sat} \frac{\ln(G/G_s)}{1 - G}, \quad (3)$$

式中: P_{out} 为 SOA 的输出功率; P_{sat} 为饱和输出功率; G_s 为小信号增益。当输入饱和增益 SOA 的信号功率较小时, 增益固定; 当输入饱和增益 SOA 的

信号功率较大, 接近 SOA 饱和输出功率时, 增益逐渐减小。经饱和增益 SOA 放大后的信号波形如图 1(e) 所示。用 Matlab 对该过程进行仿真, 当 n_A 为功率 0.1 mW 的加性高斯白噪声、 $P_{cw} = 100$ mW、 $\alpha = 0.2$ 、 $\eta = 1$ 、 $V_{\pi} = 4$ V、 $V_B = 3$ V、 $V_{in}(t) = 0.8 \cdot \sin(2\pi \cdot 10^{10} \cdot t + \pi)$ 时, 得到调制后的波形。经过 $P_{sat} = 2$ mW、 $G_s = 30$ dB 的 SOA 放大后, 得到 SOA 放大后的波形。饱和增益 SOA 放大前后信号的归一化波形对比如图 2(a) 所示, 噪声对比如图 2(b) 所示。可以看出, 经过 SOA 后, 调制信号在功率较大处的幅度噪声得到了抑制, 光上的方均根噪声由 0.062 mW 减小到了 0.045 mW, 信噪比提高了 1.4 dB。

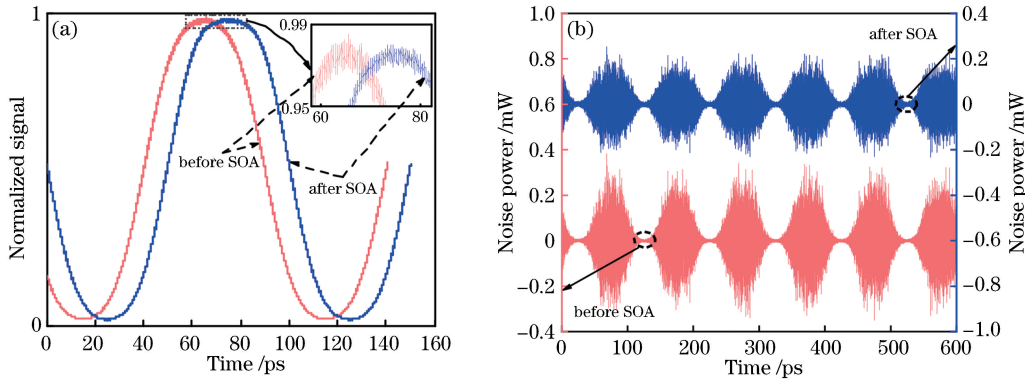


图 2 SOA 前后仿真信号对比。(a) 归一化信号; (b) 噪声

Fig. 2 Comparison of simulation signals before and after SOA. (a) Normalized signal; (b) noise

当激光器、调制器、长光纤、PD、微波放大器等构成光电振荡环路时, 光上的幅度噪声除了激光器的 RIN, 还包括光在长光纤中传输引入的噪声, 因此应将 SOA 置于长光纤后, 并通过调节进入 SOA 的功率及驱动电流使 SOA 工作在饱和增益状态, 抑制进

入 PD 光上的幅度噪声 $\alpha_{am}(\omega)$, 从而降低输入 OEO 的噪声比 δ , 改善 OEO 输出信号的相位噪声。

3 实验与结果

为检验方案的正确性, 对所提出的方案进行

实验验证,实验装置如图 3 所示。1550 nm 分布反馈式激光器产生 100 mW 直流光,利用 MZM (调制带宽 20 GHz) 调制微波信号。调制光信号通过 5 km 的普通单模光纤 (SMF) 和光衰减器 1 (ATT1) 进入饱和增益状态的 SOA 和光衰减器 2 (ATT2),对调制光信号的幅度噪声进行抑制。抑制幅度噪声后的光信号经过光耦合器 80% 端口进入 PD 转换为光电流,并通过电滤波器

(EBPF)、电放大器 (EA) 和电耦合器 (EC) 进入强度调制器构成正反馈结构形成振荡。这里,ATT1 的作用是调整进入 SOA 的光功率,保证 SOA 工作在饱和增益状态,且不会引入额外的光幅度噪声;ATT2 的作用是控制进入 PD 的光功率。光耦合器的 20% 输出端口的光进入光功率计/光采样示波器以监测进入 PD 的光功率并观察调制信号波形。

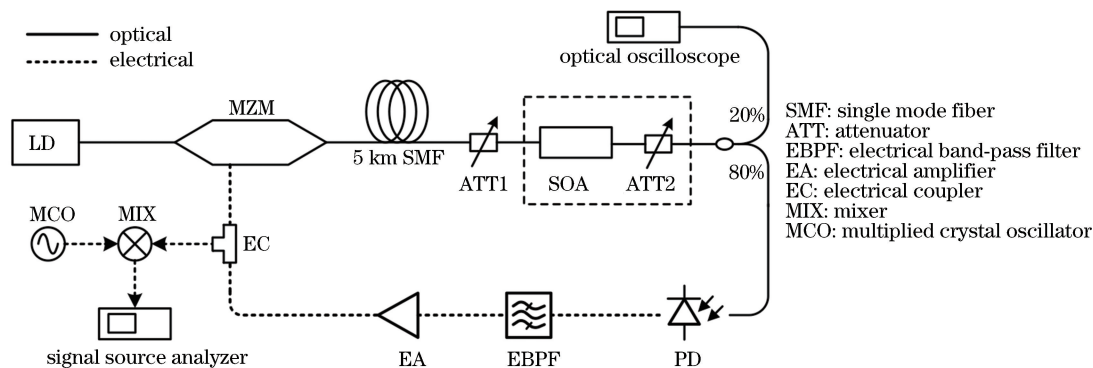


图 3 实验装置框图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

实验中,选用的 SOA 小信号增益为 30 dB,驱动电流 I_{SOA} 为 200 mA 时,饱和输出功率为 6 dBm。SOA 的增益曲线与驱动电流的关系如图 4 所示。随着输入 SOA 光功率的增加,SOA 的增益逐渐达到饱和状态,且 SOA 的输出功率随 I_{SOA} 的增加而增加。需要注意的是, I_{SOA} 增大时,SOA 自身的噪声也将增大,这会导致 OEO 相位噪声的恶化,因此,SOA 的驱动电流不能过大,需要对该参数进行优化。实验中,SOA 的驱动电流设置为 120 mA。

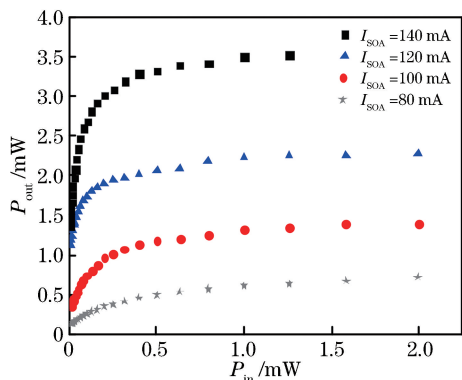


图 4 SOA 输入/输出光功率、驱动电流的关系

Fig. 4 Relationship between input/output optical power and drive current of SOA

调节 ATT1 使进入 SOA 的光功率为 0 dBm,这时 SOA 工作在饱和增益状态。此时,OEO 产生的 10 GHz 信号经过频谱宽度 (SPAN) 为 500 kHz,

分辨率带宽 (RBW) 为 3 kHz 的电谱仪后的频谱如图 5(a) 虚线所示。经过 SOA 和 ATT2 后,进入 PD 的光功率约为 0.9 dBm,光耦合器 20% 端口观察到的调制光波形如图 5(b) 所示。

为了与加入饱和增益 SOA 结构的 OEO 作对比,将图 3 实验结构中的 SOA 和 ATT2 去掉,即构成传统单环 OEO 结构。考虑到 OEO 中影响相位噪声的因素较多,如 PD 的光电流等,为控制变量,降低其他因素的影响,需要调整 ATT1,保证进入 PD 的光功率及光波形与加入 SOA 时一致。ATT1 调整后,频谱宽度设置为 500 kHz 时,OEO 产生信号的频谱如图 5(a) 实线所示。此时,进入 PD 的光功率也为 0.9 dBm,光示波器观察到的光波形如图 5(b) 所示。

由图 5 可以看出,光纤长度为 5 km 的 OEO,加入与未加入饱和增益 SOA 时产生的微波信号边模频率均约为 40 kHz,边模抑制能力相同,边模抑制比约为 40 dB。加入 SOA 时的调制光信号峰值、谷值功率分别为 548 μ W 和 69 μ W,未加入 SOA 时的调制信号的峰值、谷值功率分别为 550 μ W 和 66 μ W,加入与未加入饱和增益 SOA 时的光幅度基本一致。

OEO 产生信号的相位噪声用信号源分析仪测量得到。由于信号源分析仪的最大分析带宽为

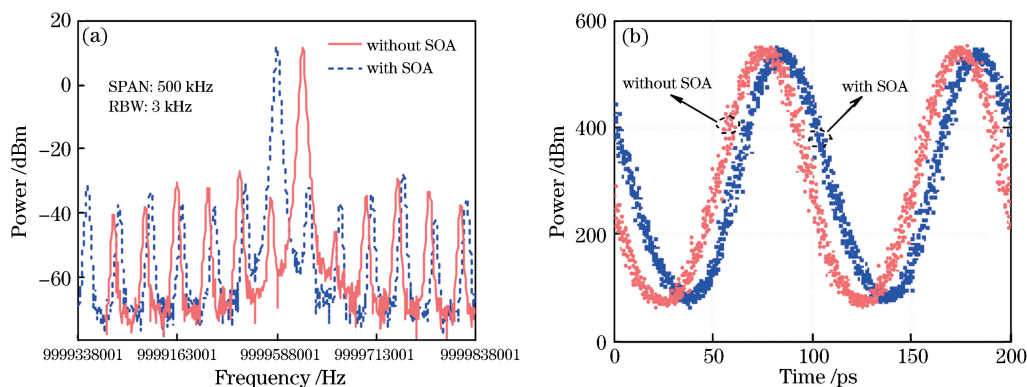


图 5 加入/未加入饱和增益 SOA 的 OEO 的测试结果。(a) SPAN 为 500 kHz 时的频谱;(b)调制光信号时域波形

Fig. 5 Measurement results of OEO with/without gain-saturated SOA. (a) Spectra when SPAN is 500 kHz; (b) waveforms of modulated optical signals in time domain

7 GHz,不能用来直接测量 OEO 产生的 10 GHz 信号。因此,如图 3 所示,需要将 OEO 产生的信号与倍频晶振产生的 9.9 GHz 信号混频至 100 MHz 中频信号来间接测量相位噪声。信号源分析仪在 100 MHz 时的底噪极低(频偏 100 Hz 为 -136 dBc/Hz; 频偏 1 kHz 为 -154 dBc/Hz),因此这种测试方法的底噪受限于倍频晶振的相位噪声和混频器附加噪声。混频器的附加噪声极低,因此可以忽略,此时测试系统测得的相位噪声为倍频源(MCO)与 OEO 的相位噪声之和。倍频晶振的近端相位噪声低于 OEO 的相位噪声,而在远端趋于白噪声,如图 6 阴影部分所示。OEO 的相位噪声,由(1)式的分析可知服从 $1/f^2$ 规律,远端相位噪声将低于倍频晶振,如图 6 虚线所示。混频后得到待测中频信号的相位噪声,如图 6 实线所示。在倍频晶振的相位噪声远低于 OEO 相位噪声的频偏范围内,混频后的中频信号的相位噪声近似为 OEO 的相位噪声;当倍频晶振与 OEO 的相位噪声接近时,测得的相位噪声比实际 OEO 的相位噪声要高,且 OEO 与倍频晶振

的相位噪声越接近,混频后的相位噪声抬高得越多,这会导致两个相位噪声不同的 OEO 与倍频晶振混频后的相位噪声差值 Δd_{PN} 减小;当倍频晶振相位噪声远高于 OEO 的相位噪声时,测得的相位噪声被限制在倍频晶振的底噪。

信号源分析仪对加入饱和增益 SOA 与倍频晶振混频后的中频信号进行互相关 100 次测量,测得的相位噪声如图 7 中虚线所示。图中阴影表示测试系统的底噪,即倍频晶振的相位噪声。可以看出,倍频晶振的相位噪声与 OEO 的相位噪声的交点在 5 kHz 附近。频偏 5 kHz 内,中频信号的相位噪声即为 OEO 的相位噪声。中频信号的中心频率为 99.587822 MHz,频偏在 0.1 kHz 时的相位噪声为 -84.5 dBc/Hz; 频偏在 1 kHz 时的相位噪声为 -113.9 dBc/Hz; 频偏范围在 5 kHz 外,相位噪声的底噪逐渐限制在 -130 dBc/Hz。传统单环结构 OEO 的相位噪声测试结果如图 7 中实线所示。在频偏 100 Hz 时,相位噪声为 -81.5 dBc/Hz; 频偏 1 kHz 时,相位噪声为 -111.4 dBc/Hz。可以看出,加入 SOA 时 OEO 的相位噪声比未加入 SOA 要低,相位噪声有所改善。

其中频偏 0.1~1 kHz 范围的相位噪声改善了 3 dB;在 1~5 kHz 频偏范围内,由于倍频晶振与 OEO 的相位噪声接近,混频后的相位噪声会被倍频晶振的相位噪声抬高,因此测量到的相位噪声改善了 2.5 dB;频偏范围在 5 kHz 外,OEO 相位噪声的测量受限于倍频晶振的底噪,加入与未加入 SOA 时测得的相噪曲线重合。不过,通过 0.1~5 kHz 的相位噪声曲线仍然可以判断出,在单环 OEO 结构中,加入饱和增益状态的 SOA 可以改善 OEO 产生信号的相位噪声,实验结果与理论分析基本一致。

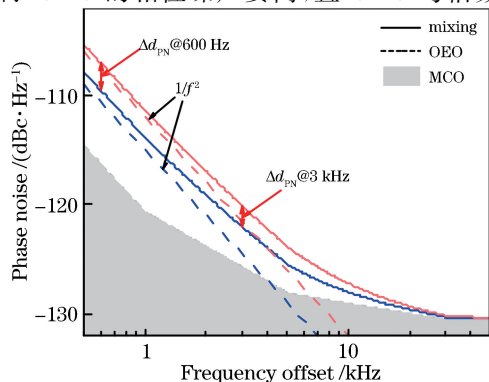


图 6 OEO 与 MCO 混频的相位噪声特性

Fig. 6 Phase noise characteristics of OEO mixing with MCO

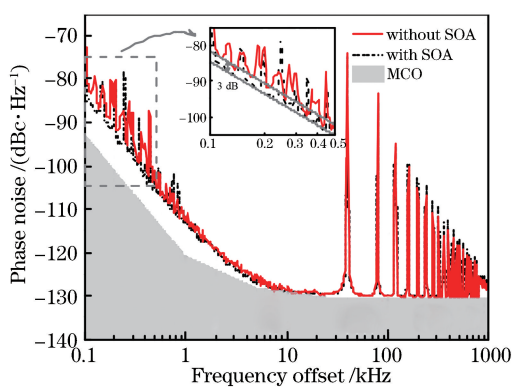


图7 加入与未加入 SOA 时 OEO 的相位噪声对比
Fig. 7 Comparison of phase noises of OEO with SOA and without SOA

4 结 论

提出了一种 SOA 抑制光电振荡器相位噪声的方法并进行了实验验证。该方案在传统单环 OEO 结构中增加一个饱和增益的 SOA, 利用其自增益调制效应, 抑制了 OEO 环路中调制光上的幅度噪声, 进而改善 OEO 输出信号的相位噪声。实验中, 加入增益饱和 SOA 的单环光电振荡器产生的 10 GHz 信号与未加入 SOA 时相比, 相位噪声抑制了约 3 dB, 与理论分析基本一致。该方案为优化 OEO 相位噪声性能提供了一个思路。

参 考 文 献

- [1] Liu P, Bar-Ness Y, Zhu J M. Effects of phase noise at both transmitter and receiver on the performance of OFDM systems [C]//2006 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, March 22-24, 2006, Princeton, NJ, USA. New York: IEEE, 2006: 312-316.
- [2] Fang X, Zhang F. Phase noise estimation and suppression for PDM CO-OFDM/OQAM systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35 (10): 1837-1846.
- [3] Beasley P D L. The influence of transmitter phase noise on FMCW radar performance [C]//2006 European Radar Conference, September 13-15, 2006, Manchester, UK. New York: IEEE, 2006: 331-334.
- [4] Li C X, Zhang B F, Lu L, *et al.* Microwave photonics frequency conversion and phase-shifting technology of photoelectronic oscillator loop [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0101001. 李诚鑫, 张宝富, 卢麟, 等. 光电振荡环路的微波光子变频与移相技术研究 [J]. 中国激光, 2019, 46 (1): 0101001.
- [5] Shen Y, Zhang X M, Chen K S. All-optical generation of microwave and millimeter wave using a two-frequency Bragg grating-based Brillouin fiber laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23 (5): 1860-1865.
- [6] Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [7] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [8] Devgan P S, Urick V J, Diehl J F, *et al.* Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonics gain [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27 (15): 3189-3193.
- [9] Volyanskiy K, Chembo Y K, Larger L, *et al.* Contribution of laser frequency and power fluctuations to the microwave phase noise of optoelectronic oscillators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(18): 2730-2735.
- [10] Hong J, Yang C, Chong Y H, *et al.* Optimization of phase noise of opto-electronic oscillator through low-biasing technology for modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806002. 洪俊, 杨春, 崇毓华, 等. 调制器低偏置方案优化光电振荡器相位噪声 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806002.
- [11] Okusaga O, Cahill J P, Docherty A, *et al.* Suppression of Rayleigh-scattering-induced noise in OEOs [J]. Optics Express, 2013, 21 (19): 22255-22262.
- [12] Docherty A, Menyuk C R, Cahill J P, *et al.* Rayleigh-scattering-induced RIN and amplitude-to-phase conversion as a source of length-dependent phase noise in OEOs [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 5500514.
- [13] Peng H F, Peng X F, Xu Y C, *et al.* Suppression of phase noise induced by optical interference in optoelectronic oscillators [C]//2016 21st Opto Electronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), July 3-7, 2016, Niigata, Japan. New York: IEEE, 2016: WA2-106.
- [14] Cahill J P, Zhou W M, Menyuk C R. Additive phase noise of fiber-optic links used in photonic microwave-generation systems [J]. Applied Optics, 2017, 56 (3): B18-B25.
- [15] Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE Journal of

- Quantum Electronics, 1989, 25(11): 2297-2306.
- [16] Sato K, Toba H. Reduction of mode partition noise by using semiconductor optical amplifiers [C]// Conference Digest. 2000 IEEE 17th International Semiconductor Laser Conference. (Cat. No. 00CH37092), September 25-28, 2000, Monterey, CA, USA. New York: IEEE, 2000: 73-74.
- [17] McCoy A D, Horak P, Thomsen B C, *et al.* Noise suppression of incoherent light using a gain-saturated SOA: implications for spectrum-sliced WDM systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8): 2399-2409.
- [18] Zhang Y D, Yu J L, Wang Y T, *et al.* The investigation of suppressing the low-frequency noise in all-optical clock recovery using SOA [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 267-269.
- 张艳冬, 于晋龙, 王耀天, 等. 全光时钟提取中利用 SOA 抑制低频噪声的实验研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(2): 267-269.
- [19] Chembo Y K, Volyanskiy K, Larger L, *et al.* Determination of phase noise spectra in optoelectronic microwave oscillators: a Langevin approach [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(2): 178-186.
- [20] Zhang X L, Ren X B, Liu X F, *et al.* Study on gain saturation characteristics of semiconductor optical amplifier [J]. Semiconductor Technology, 1997, 22(6): 17-19.
- 张新亮, 任雪斌, 刘雪峰, 等. 半导体光放大器增益饱和特性的研究 [J]. 半导体技术, 1997, 22(6): 17-19.