

基于偏振自稳定双环的受激 Brillouin 散射光电振荡器

韩璐¹, 刘璐²

(1. 吉林省教育学院 学报编辑部, 长春 130022; 2. 长春工程学院 能源动力工程学院, 长春 130012)

摘要: 基于偏振自稳定双环结构提出一种受激 Brillouin 散射(SBS)光电振荡器(OEO), 利用 SBS 的窄带宽增益谱实现相位调制到强度调制的转换(PM-IM), 并选择 OEO 的振荡模式, 构造偏振自稳定双环结构, 在每个回路中的输入光被 45° Faraday 旋转镜反射后, 将通过 45° Faraday 旋转器和不同长度单模光纤返回其路径, 保证输出信号和输入信号的偏振态始终相差 180°, 从而消除外界机械振动和温度干扰. 由于环路结构为反射式往返传输, 因此所需光纤长度缩短 1/2. 实验结果表明, 该 OEO 通过改变泵浦光波长实现频率调谐, 可产生 1~16 GHz 的微波信号, 10 GHz 处边模抑制比(SMSR)达 67.14 dB, 相位噪声为 -116.3 dBc/Hz@10 kHz.

关键词: 受激 Brillouin 散射; 光电振荡器; 偏振自稳定; 双环

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2024)05-1241-07

Stimulated Brillouin Scattering Optoelectronic Oscillator Based on Self-polarization-stabilization Dual-Loop

HAN Lu¹, LIU Lu²

(1. Editorial Department of Journal, Jilin Provincial Institute of Education, Changchun 130022, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: We proposed a stimulated Brillouin scattering (SBS) optoelectronic oscillator (OEO) based on a self-polarization-stabilization dual-loop structure. By utilizing the narrow bandwidth gain spectrum of SBS to achieve the conversion from phase modulation to intensity modulation (PM-IM), and selecting the oscillation mode of the OEO. A polarization self-polarization-stabilization dual-loop structure was constructed. After the input light in each loop was reflected by a 45° Faraday rotator mirror. It would return to its path through a 45° Faraday rotator and different lengths of single-mode fiber, ensuring that the polarization state of the output signal and the input signal always differed by 180°, thereby eliminating external mechanical vibrations and temperature disturbances. Since the loop structure was reflective and bidirectional, the required fiber length was reduced by half. The experimental results show that the OEO can achieve frequency tuning by changing the pump wavelength, and can generate microwave signals of 1—16 GHz, with a side mode suppression ratio (SMSR) of 67.14 dB at 10 GHz, and a phase noise of -116.3 dBc/Hz@10 kHz.

收稿日期: 2024-04-02.

第一作者简介: 韩璐(1989—), 女, 汉族, 硕士, 从事物理实验教学和编辑学的研究, E-mail: hanl1012@163.com. **通信作者简介:** 刘璐(1987—), 女, 汉族, 博士, 副教授, 从事光电催化技术的研究, E-mail: liulu@ccit.edu.cn.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(批准号: YDZJ202201ZYTS502).

Keywords: stimulated Brillouin scattering; optoelectronic oscillator; self-polarization-stabilization; dual-loop

光电振荡器(OEO)可产生高光谱纯度和低相位噪声的微波和毫米波信号^[1-4],在无线通信^[5]、光信号处理^[6]、雷达^[7]和现代仪器^[8]等领域应用广泛.传统的单回路 OEO 由一个强度调制器(IM)、长度为几百米的单模光纤(SMF)、一个光电二极管(PD)和一个电带通滤波器^[9]组成.光纤是储能组件,较长光纤会产生更高的光谱纯度信号.但较长光纤会引入更小的模式间距,导致需具有较窄带宽的电带通滤波器^[8].由于电滤波器不易调谐,因此 OEO 的可调谐性也受到限制.当电滤波器被光滤波器取代时,通过改变激光器的波长或光滤波器的中心频率可实现 OEO 的频率可调性.受激 Brillouin 散射(SBS)可提供窄带放大,其带宽低至几十兆赫兹^[10-11].它可应用于 OEO 中,同时实现信号增益和滤波^[12-15].在文献[12,14]中,一个激光器的光波被分为两条路径,分别作为信号光和泵浦光.文献[12]通过改变 SBS 效应的波长变化,将 OEO 的输出频率调谐在 400 MHz 内.为克服频率调谐范围的限制,文献[16]利用两个激光器分别作为信号光和泵浦光,通过改变信号光的波长实现大范围调谐.但为获得高非线性而使用了较长光纤,导致 OEO 系统环路较长,自由光谱范围(FSR)较小. SBS 的增益谱无法滤除单一频率导致 OEO 存在多模振荡,信号的边模抑制比较高且不稳定.为提高基于 SBS 的 OEO 性能,构建了双光路和双光探测器(PD)的双环配置^[17],由于需两个 PD,因此双环配置结构较复杂.文献[10]研究了一种基于波长复用技术的双环 OEO,该方案使用了一个 PD,但仍需两个不同波长的激光器和一个波分复用器.文献[13]提出了一种基于受激 Brillouin 散射的双环光电振荡器,该结构产生 10 GHz 微波信号的边模抑制比仅为 35 dB.为降低系统的复杂性,文献[11]提出了另一种基于偏振复用技术的方案,并将这两个环路直接组合在光域中,而没有任何额外的有源器件.上述研究虽然采用了双环结构提高了系统性能,但双环路的长光纤导致系统产生偏振不稳定性.由于每根光纤的特性均易受温度和机械振动等环境因素的影响,因此不易保持这两个环路中光信号的偏振状态稳定.全保偏结构成本较高,且工艺复杂,为此保持双环路中长光纤的偏振稳定至关重要.

本文提出一种利用偏振自稳定技术的双环受激 Brillouin 光电振荡器.该方案有 2 对 Faraday 旋转器(FR)和 Faraday 旋转器反射镜(FRM)用于保持正交偏振态,消除偏振态不稳定的影响.与传统偏振复用的双环相比,该系统不需保偏光纤、偏振控制器(PC)、偏振合束器(PBC)和多个 PD,反射式双环路结构光纤较短.即使环路中单模光纤受机械振动或温度影响,光信号的偏振状态也始终保持正交,从而提高了系统的稳定性.实验结果表明,该方案具有比传统单环和偏振复用方法更优的相位噪声,有效抑制了微波信号的边模,改善了传统受激 Brillouin 散射型光电振荡器的性能.

1 原 理

基于偏振自稳定双环的受激 Brillouin 散射光电振荡器示意图如图 1 所示.来自信号激光器频率为 f_s 的光波经 PC 送入相位调制器中,经反馈信号调制的光波通过隔离器(ISO)进入色散补偿光纤(DCF)中.频率为 f_p 的泵浦激光器通过掺铒光放大器(EDFA)进入环形器 1,将调制光波信号以传播相反的方向注入 DCF 以提供 SBS 增益.采用色散位移光纤(DSF)作为 SBS 介质以确保相位转强度调制是 Brillouin 放大而不是光纤色散所致.由图 1 可见,调制光经 DCF 后在 A 点被反向传输的 SBS 增益谱放大,打破了 ± 1 阶边带幅值平衡,实现了相位转强度调制. B 点所示的不平衡相位调制器(PM)信号经环形器 2 发送到 EDFA2 中被放大后进入偏振分束器(PBS)偏振自稳定双环结构.强度调制的光被分割成两个正交偏振态.在每个回路中,输入光在经 45° FRM 反射后,先将通过 45° FR 和不同长度的单模光纤返回其路径,再将这些双回路光信号组合到 PBS 中后被光电探测器(PD)捕获.最后,生成的射频信号通过电放大器(EA)放大,经电功分器,一部分用于监测,一部分返回 PM 形成闭环.为消除各偏振回路中偏振态变化的干扰,两条光信号耦合时需保持光信号的偏振态稳定且相互正交.

利用偏振自稳定技术可解决该问题,偏振自稳定示意图如图 2 所示.由图 2 可见,输入光在每个回路中先通过 45° FRM 反射后,再利用 45° FR 和单模光纤调整偏振态返回其路径.点 A 处输入光信号

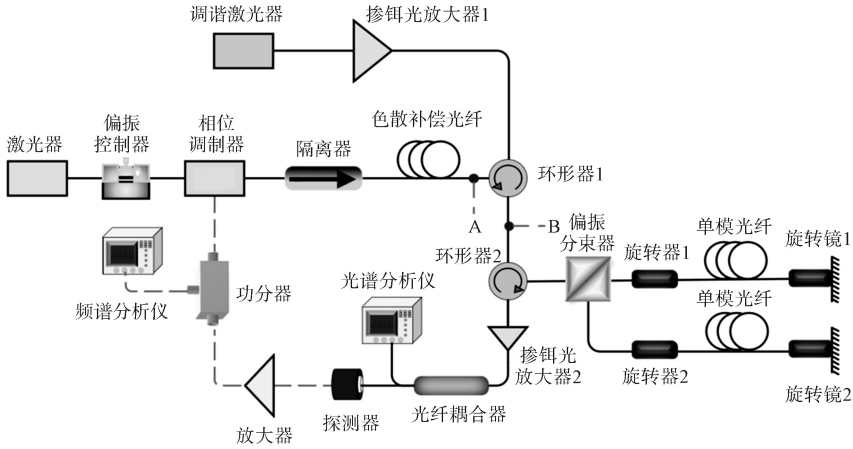


图 1 基于偏振自稳定双环的受激 Brillouin 散射光电振荡器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stimulated Brillouin scattering optoelectronic oscillator based on self-polarization-stabilization dual-loop

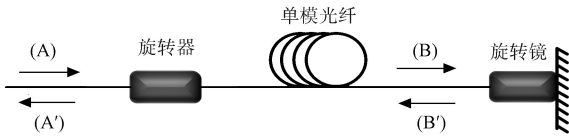


图 2 偏振自稳定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of self-polarization-stabilization

的 Jones 矩阵可表示为

$$P_A = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix},$$

其中 E_x 和 E_y 分别表示 x 轴和 y 轴的偏振分量。偏振旋转 Jones 矩阵为

$$R_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix},$$

其中 φ 为偏振旋转角度。反射镜的 Jones 矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{1}$$

假设标准单模光纤的偏振相关损耗非常小, 光纤传输的 Jones 矩阵可由一个 Jones 矩阵 U 表示

$$U = \begin{pmatrix} e^{-i\theta_1/2} \cos \phi & e^{-i\theta_2/2} \sin \phi \\ -e^{i\theta_2/2} \sin \phi & e^{i\theta_1/2} \cos \phi \end{pmatrix}, \tag{2}$$

其中 θ_1, θ_2 和 ϕ 分别表示改变光纤中偏振态的参数。随着外界环境因素的改变, 导致光纤中偏振光的偏振态发生改变, 3 个参数也随之变化。由于外界环境变化使偏振态的扰动时间远大于光纤往返一圈的时间, 等同于 θ_1, θ_2 和 ϕ 这 3 个参数是保持不变的, 因此光纤的反向传输 Jones 矩阵为正向传输 Jones 矩阵的转置矩阵。假设从 FR 到 FRM 输入端的传输 Jones 矩阵为 U , 则从 FRM 反射输出的光到 FR 的传输 Jones 矩阵为 U^T 。从 A 点出发回到 A' 点的传输 Jones 矩阵为

$$T_{AB} = \alpha^2 R(45^\circ) U^T R(45^\circ) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} R(45^\circ) U R(45^\circ), \tag{3}$$

其中 α 为从 A 点到 FRM 的单程损耗。将 U 和 $R(\varphi)$ 代入 T_{AB} 可得

$$T_{AB} = \alpha^2 \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \alpha^2 R(180^\circ), \tag{4}$$

因此, 输出光的偏振状态可表示为

$$P_{A'} = T_{AB} P_A = -\alpha^2 \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \tag{5}$$

由于在点 A' 的输出信号的偏振状态总是与点 A 输入信号的偏振状态相差 180° , 并且它与往返光纤双折射的所有细节均无关, 因此在基于 SBS 的 OEO 中引入这种偏振自稳定双环技术能保证这两条路径的两个输出信号的偏振态总是正交的, 并且可在 PBS 中完美组合, 而无需考虑在往返光纤中的影响。此外, 由于在每条路径上往返传输所需的光纤长度缩短了 $1/2$, 因此降低了光电振荡器的结构

体积.

当循环回路的增益大于损耗时,即可建立在 SBS 增益带宽中选择振荡的模式. 由于游标效应,因此只有在短环和长环频率对应的最小公倍数下,振荡模式才能稳定起振,并能有效抑制边模^[18-19].

基于受激 Brillouin 散射的相位转强度调制如图 3 所示,其中 f_c 为光载波频率, f_m 为反馈进入调制器的射频频率, f_p 为泵浦光的频率, $f_B \approx 10$ GHz 为 Stokes 频移量. 当光载波通过相位调制器后产生 $f_c + f_m$ 和 $f_c - f_m$ 两个一阶边带. 由于两条边带幅值相同,相差的相位为 π ,因此无法直接通过光电探测器拍频. 利用受激 Brillouin 散射产生约为 30 MHz 带宽的带通增益谱,调节泵浦光频率,控制 Brillouin 增益谱频移量 $\nu_B = 2n_p V_A / \lambda_p$ (n_p 为光纤在 λ_p 波长处的折射率, V_A 为声波在光纤中的传播速度),使 Brillouin 增益谱落在相位调制的 +1 边带上对其增益, +1 边带幅值被增益后打破 ± 1 阶边带幅值平衡的幅值,实现相位转强度调制,进而实现 OEO 光域内的滤波,构成受激 Brillouin 散射微波光子滤波器,代替了传统电滤波器. OEO 的输出频率为

$$f_{osc} = f_p - f_B - f_c. \quad (6)$$

由图 3 和式(6)可见, SBS 产生的增益谱增益 +1 边带后得到频率为 ν_B 的振荡信号. 该微波信号闭环反馈驱动 PM,产生相位调制的光载波在相同位置产生强度更大的边带. 通过这种正反馈作用,最终得到稳定振荡的微波信号. 因此通过改变信号激光器或泵浦激光频率可实现可调谐 OEO 的输出频率. 同时通过偏振自稳定双回路 OEO 可将不平衡 PM 信号的游标效应和偏振状态改变为 PBS,从而灵活分配长环路和短环路的功率,且两个环路的整个功率保持恒定值而不衰减. 这种稳定性可较好地抑制边模噪声,其结构简单且成本更低.

2 结果与讨论

根据图 1 配置进行实验. 采用输出功率为 10 dBm 分布式反馈激光器(DFB, Emcore-1772 型,线宽为 380 kHz)和输出功率为 8 dBm 的可调谐激光器(NKT, DK-3460 型,线宽为 0.9 kHz)分别为信号激光器和泵浦激光器. DFB 产生的光波通过偏振控制器使载波的偏振态与相位调制器的主轴对准,并被反馈到相位调制器中的电信号调制. 被调制的光经隔离器确保光波不会回返. 泵浦光被 EDFA1 放大后达到受激 Brillouin 散射阈值,在长度为 600 m 的 DSF 上产生与泵浦光反向传播的 Stokes 光和增益. 调制光的 +1 阶边带在 A 点被 SBS 增益谱放大后,通过环形器 1 到达 B 点. 此时的调制光为强度调制,通过环形器 2 进入 PBS 偏振自稳定双环路. 偏振分束器分为两条路径,光纤长度分别为 100 m 和 1 km. 光信号通过 FR 和 FRM 对偏振进行自稳定,反射光从环形器 2 出来经 1 W 的 EDFA2 以补偿回路中的损耗. EDFA2 输出的光信号进入功率比为 90 : 20 光纤耦合器(OC)中,90% 的光进入带宽为 18 GHz 的光电探测器(GD45220R-Ku-1 型)进行拍频,经放大器(TLLA1G18G-48-30 型)放大增益最终反馈进入 PM 构成闭环. 用电频谱分析仪(E4440A 型)测量电功分器分路微波信号的频谱和相位噪声. 20% 的光进入光谱仪(AQ6375 型)观测系统内光谱的变化情况.

将传统基于 SBS 的 OEO 与双环结构 OEO 的系统稳定性进行比较. 传统结构的受激 Brillouin 光电振荡器示意图如图 4 所示. 在与图 1 所示装置相同环境下,利用外界振动和移动光纤导致偏振态变化,测量其光功率的稳定性.

偏振态的不稳定直接影响输出光功率的抖动强弱,易导致频率偏移. 分别对单环结构和双环结构的 OEO 进行对比测量,测量结果如图 5 所示. 由图 5 可见,在传统单环结构中,由于温度和机械振动的影响,所测光功率波动较大,功率抖动约为 3.82 dB,在双环结构中,光功率波动约为 0.08 dB,因

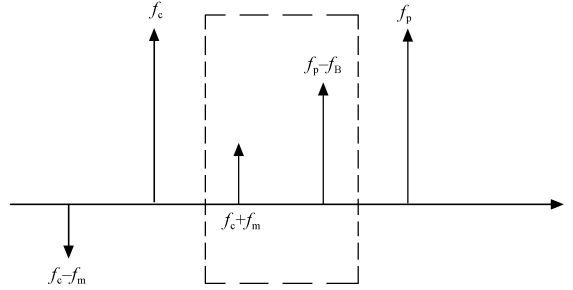


图 3 基于受激 Brillouin 散射的相位转强度调制

Fig. 3 Conversion from phase modulation to intensity modulation based on stimulated Brillouin scattering

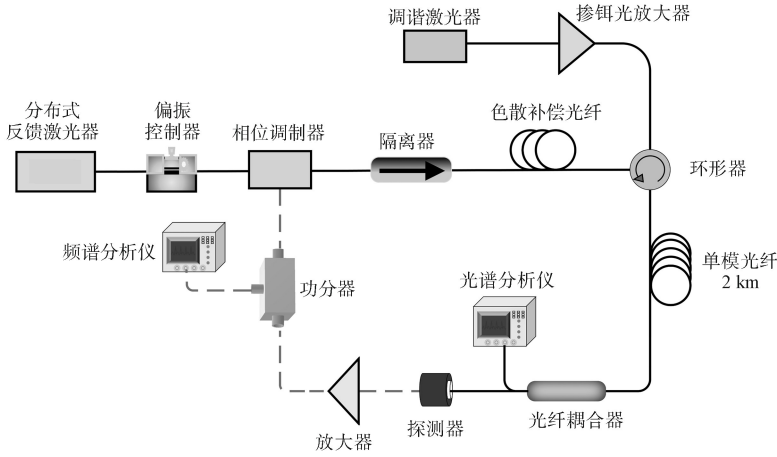


图 4 传统结构的受激 Brillouin 光电振荡器示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stimulated Brillouin scattering optoelectronic oscillator with traditional structure

此双环结构在长单模光纤环路中实现了偏振自稳定, 有效消除了偏振扰动.

通过改变泵浦激光器的频率可实现频率调谐. 以 0.008 nm 的调节步长调谐频率, 测量双环 OEO 的输出微波信号如图 6 所示. 在测量过程中, 经 EA 放大后, 高功率微波信号可从 1 GHz 调谐到 16 GHz. 调谐频率的范围受调制器、电功分器、光电探测器和电放大器带宽的限制, 频率上限受相位调制器和 PD 频率响应带的限制. 若相应器件具有高带宽, 则可实现更大的调谐范围.

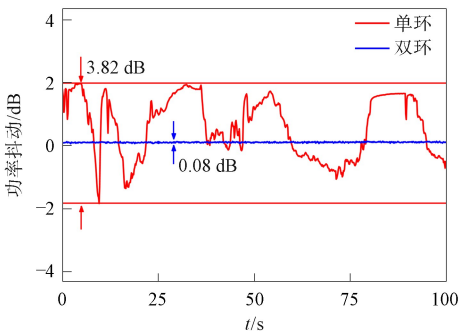


图 5 传统单环结构和基于自偏振稳定双环结构输出的光功率

Fig. 5 Optical power output of traditional single-loop structure and dual-loop structure based on self-polarization-stabilization

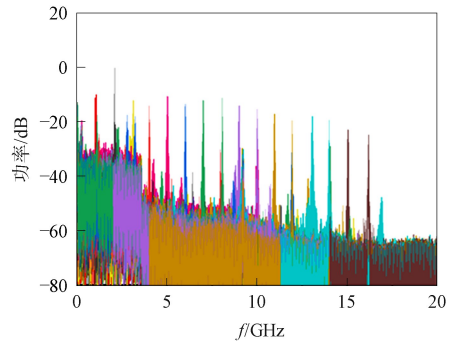


图 6 通过改变泵浦激光器的频率调谐微波信号

Fig. 6 Microwave signal tuned by changing frequency of pump laser

传统单环和偏振自稳定双环结构 OEO 产生 10 GHz 的振荡信号频谱如图 7 所示. 在测试中采用相同的扫频宽度 (SPAN) 和分辨率带宽 (RBW) 进行观测. 结构中有约 500 m 的高非线性光纤 (HNL) 和约 2 km 的 SMF, 在基于 SBS 光滤波器的带宽中仍存在几种振荡模式在增益中相互竞争. 图 7(A)

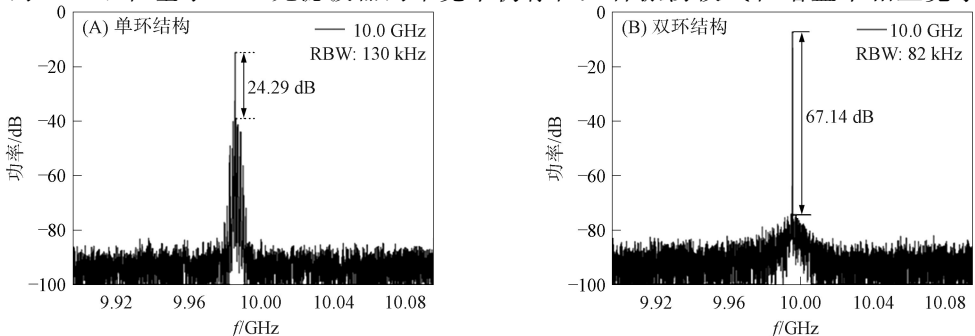


图 7 单环路 OEO(A) 和双环路 OEO(B) 中产生的振荡信号功率谱

Fig. 7 Power spectra of oscillating signals generated in single-loop OEO (A) and dual-loop OEO (B)

为 2 km 单环路 OEO 振荡产生的微波信号. 由图 7(A)可见, 边模抑制比为 24.29 dB. 由于光纤环路较长, 因此自由光谱范围较小. 受激 Brillouin 增益谱的频谱带宽约为 30 MHz, 并不能单一滤出频率分量, 导致多个频率模式分量均被增益. 图 7(B)为采用偏振自稳定双环 OEO 振荡产生的微波信号. 由图 7(B)可见, 边模抑制比为 67.14 dB, 比单环结构提升了 42.85 dB. 双环结构的光电振荡器需同时满足短环路与长环路模式间距的最小公倍数才能起振, 既保证了短光纤自由光谱范围的间隔, 又保持了长光纤环路低相位噪声的优势.

为研究所提偏振自稳定双环路 OEO 的边模抑制效果和整体性能特性, 使用频谱仪中的相位噪声测试模块对系统进行测量. 双环 OEO 和单环 OEO 在 10 GHz 频率下的相位噪声如图 8 所示. 在实验过程中, 1 kHz 附近单环路 OEO(抑制前)优于双环路 OEO(抑制后)的相位噪声. 这是由于存在双环路, 光功率分散到两个环路中, 储能时间变少所致. 此外, 相位噪声受边模的影响, 使双环结构的相位噪声边模受到大幅度抑制, 与图 7 相符. 在 10 kHz 处边模抑制下, 双环结构的相位噪声为 -116.3 dBc/Hz, 单环路的相位噪声为 -105.6 dBc/Hz. 与单环结构相比, 双环结构中的相位噪声得到优化.

综上, 本文提出了一种基于偏振自稳定双环的受激 Brillouin 散射光电振荡器, 该方案通过偏振自稳定技术消除了外界环境对长光纤偏振干扰的问题, 有效抑制了链路杂散的问题. 通过 Brillouin 选择侧带放大以实现有效的相位转强度调制, 实现了 1~16 GHz 的宽带调谐. 振荡产生的边模抑制比约为 67.14 dB, 在加入偏振自稳定双环后, OEO 的相位噪声在 10 kHz 偏移处降低了 10.7 dB, 避免了频率漂移或多模振荡. 因此, 相比于传统单环 OEO, 基于偏振自稳定双环的 OEO 各项性能均有提升, 该结构为发展集成 OEO 提供了新思路, 进一步拓展了 OEO 潜在的应用.

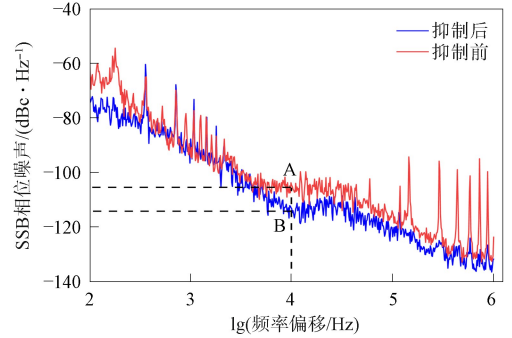


图 8 200 m OEO, 2 km OEO 和双环 OEO 的 SSB 相位噪声曲线

Fig. 8 SSB phase noise curves of 200 m OEO, 2 km OEO, dual-loop OEO

参 考 文 献

- [1] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic Microwave Oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [2] YAO X S, MALEKI L. Dual Microwave and Optical Oscillator [J]. Optics Letters, 1997, 22(24): 1867-1869.
- [3] YU N, SALIK E, MALEKI L. Ultralow-Noise Mode-Locked Laser with Coupled Optoelectronic Oscillator Configuration [J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1231-1233.
- [4] MALEKI L. The Opto-Electronic Oscillator (OEO): Review and Recent Progress [C]//2012 European Frequency and Time Forum. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 497-500.
- [5] TSUCHIDA H, SUZUKI M. 40-GB/s Optical Clock Recovery Using an Injection-Locked Optoelectronic Oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 17(1): 211-213.
- [6] PAUL D. A Review of Optoelectronic Oscillators for High Speed Signal Processing Applications [J]. International Scholarly Research Notices, 2013, 2013: 1-17.
- [7] LI W Z, KONG F Q, YAO J P. Arbitrary Microwave Waveform Generation Based on a Tunable Optoelectronic Oscillator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3780-3786.
- [8] ZOU X H, LIU X K, LI W Z, et al. Optoelectronic Oscillators (OEOs) to Sensing, Measurement, and Detection [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 52(1): 1-16.
- [9] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic Oscillator for Photonic Systems [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(7): 1141-1149.
- [10] HU S L, LI L W, YI X K, et al. Ultraflat Widely Tuned Single Bandpass Filter Based on Stimulated Brillouin Scattering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1466-1469.

- [11] HAN X Y, WANG L N, SHAO Y C, et al. Filtering Properties of the Tunable Microwave Photonic Filter with Stimulated Brillouin Scattering [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 066110-1-066110-10.
- [12] YANG B, JIN X F, CHI H, et al. Optically Tunable Frequency-Doubling Brillouin Optoelectronic Oscillator with Carrier Phase-Shifted Double Sideband Modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 1051-1053.
- [13] PENG H F, ZHANG C, XIE X P, et al. Tunable DC-60 GHz RF Generation Utilizing a Dual-Loop Optoelectronic Oscillator Based on Stimulated Brillouin Scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2707-2715.
- [14] YAO X S. High-Quality Microwave Signal Generation by Use of Brillouin Scattering in Optical Fibers [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1329-1331.
- [15] 朱鸿飞, 段若东, 肖林, 等. 基于受激布里渊散射的可调谐稳定光电振荡器 [J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 209-216. (ZHU H F, DUAN R D, XIAO L, et al. Tunable and Stable Optoelectronic Oscillator Based on Stimulated Brillouin Scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 209-216.)
- [16] SUN T, ZHANG C, XIE X P, et al. A Wideband Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Stimulated Brillouin Scattering [C]//2013 18th Optoelectronics and Communications Conference and Photonics in Switching. Kyoto: Optica Publishing Group, 2013: 375-390.
- [17] JIANG Y, YU J L, WANG Y T, et al. An Optical Domain Combined Dual-Loop Optoelectronic Oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(11): 807-809.
- [18] ELIYAHU D, MALEKI L. Low Phase Noise and Spurious Level in Multi-loop Optoelectronic Oscillators [C]//IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 405-410.
- [19] BANKY T, HORVATH B, BERCILI T. Optimum Configuration of Multiloop Optoelectronic Oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, 23(7): 1371-1380.

(责任编辑: 王 健)