

基于受激布里渊散射的频率和相位可调谐五倍频光电振荡器

王悦¹, 董玮², 李世银^{1*}

¹中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

²吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012

摘要 光电振荡器(OEO)作为微波信号源是微波光子学领域的研究热点,提出并理论分析了一种基于受激布里渊散射(SBS)效应和载波相移单边带调制的频率和相位均可调谐的五倍频OEO。在该结构中,利用级联调制器结构产生5个功率相等、频率间隔相同的光作为泵浦光,并通过布里渊增益损耗补偿原理得到五倍频OEO。利用布里渊波长依赖特性得到了频率可调谐的微波信号,通过调节双平行马赫-曾德尔调制器实现了输出微波信号的相位可调谐。所设计的OEO可以输出高频率微波信号,频率调谐范围为44.00~47.25 GHz,并在频率可调谐的基础上实现了0°~360°的相位可调谐。

关键词 光电子学; 微波光子学; 光电振荡器; 微波信号产生; 受激布里渊散射效应

中图分类号 O437.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2225001

Quintuple Frequency-Tunable and Phase-Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Stimulated Brillouin Scattering

Wang Yue¹, Dong Wei², Li Shiyin^{1*}

¹School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

²State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China

Abstract Optoelectronic oscillator (OEO), a microwave signal source, is a popular research topic in microwave photonics. A quintuple OEO with tunable frequency and phase is proposed and theoretically analyzed, which is based on the stimulated Brillouin scattering (SBS) effect and carrier phase-shifted single-sideband modulation. In this structure, a cascade modulator structure is used to generate five lights with the same power and frequency interval as the pump lights, and then the quintuple OEO is obtained by the Brillouin gain-loss compensation principle. The frequency-tunable microwave signal is obtained by using the Brillouin wavelength-dependent property, and phase-tunable output microwave signal is obtained by adjusting the dual-parallel Mach-Zehnder modulator. The designed OEO can output high-frequency microwave signals with a frequency tuning range of 44.00–47.25 GHz, and on this basis, it can achieve a tunable phase range of 0°–360°.

Key words optoelectronics; microwave photonics; optoelectronic oscillator; generation of microwave signals; stimulated Brillouin scattering effect

1 引言

高频率、低相位噪声的可调谐微波信号源在无线通信、光载射频传输(RoF)和雷达等系统中发挥着非

常重要的作用,并成为了微波光子领域的研究热点^[1-2]。光电振荡器(OEO)作为一种光生微波信号源,属于微波光子领域^[3-4],具有低相位噪声、相位噪声特性与频率无关等优势,因此受到了广泛关注。传统结

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2022QN1052)

通信作者: *lishiyin@cumt.edu.cn

构的 OEO 通常以电学手段产生,而电学器件会受到电子瓶颈效应和器件带宽等因素影响,故产生微波信号的振荡频率、可调谐性和相位噪声等性能均会受到限制。为解决这一问题,近年来研究学者提出了多种方案来实现可调谐 OEO,如:基于双端口电极马赫-曾德尔调制器(MZM)、可调谐微波衰减器和啁啾光纤光栅提出了宽带可调谐光电振荡器^[5],产生了 5.8~11.0 GHz 的微波信号;利用基于受激布里渊散射(SBS)和耦合型双环实现了可调谐 OEO^[6],产生了 2~12 GHz 范围内可调谐的微波信号;实现了二倍频 OEO^[7],输出信号频率为 18.38~18.74 GHz。然而,上述方法仍不能满足具有更高信号频率需求的相关应用。为了获得更高的频率,一种基于双环路和偏振调制器的可调谐四倍频 OEO 被提出^[8],输出信号调谐范围为 32.0~42.7 GHz,但偏振调制器的引入会增加系统的复杂度。为解决这一问题,一种基于 SBS 的双环 OEO 被提出^[9],利用两个激光器实现了 0~60 GHz 宽调谐范围微波信号的输出,但使用两个激光源会导致 OEO 环路的稳定性变差。对于一些特殊的应用场合,不仅需要信号源的输出频率范围较宽,还需要实现频率的精确调谐。此外,输出微波信号的相位可调谐性可以大大增加其应用的灵活性,因此频率和相位均可调谐的三倍频 OEO 被提出^[10],但仍存在输出信号频率不够高的问题。

本文利用 SBS 效应和级联调制器结构产生的多泵浦光实现频率和相位均可调谐的五倍频光电振荡器。利用光频梳作为 SBS 效应的泵浦光来代替单个泵浦光以提高输出微波信号的频率,产生的输出信号频率可达到五倍布里渊频移。改变可调谐激光器(TLS)的波长来调节输出微波信号的频率值。利用双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)的特性,通过调节对应的偏置电压点来实现输出微波信号的相位可调谐。最后,实现了输出频率调谐范围为 44.00~47.25 GHz、相位调谐范围为 0°~360°的微波信号。所提方案可以作为一种实现频率和相位均可调谐的高频率 OEO 的新方式,对于提高微波信号发生器的可调谐输出范围的研究和应用实现具有重要意义和参考价值。

2 研究内容与结果

2.1 工作原理

可调谐五倍频 OEO 原理图如图 1,该系统由 TLS、MZM、DPMZM、耦合器(C)、环形器(OC)、高非线性光纤(HNLF)、掺铒光纤放大器(EDFA)、隔离器(ISO)、光电探测器(PD)、光可调谐带通滤波器(TBPF)、电放大器(EA)和电谱分析仪(ESA)组成。TLS 提供的波长为 f_c 的光波被耦合器一分为二。第一部分,频率为 f_c 的光波经过 C1 和 C2 后被作为 SBS 效应的泵浦光通过 OC1 后进入到 HNLF 中。当光功率超过 SBS 效应的阈值时,SBS 效应会发生并产生和泵浦光方向相反、频率为 $f_c - f_b$ 的一阶斯托克斯光,其中

f_b 为布里渊频移。一阶斯托克斯光经 EDFA 放大后通过 OC2 进入到 HNLF 中,并被作为第二次 SBS 效应的泵浦光,以产生频率为 $f_c - 2f_b$ 的二阶斯托克斯光。二阶斯托克斯光和频率为 f_c 的光载波在 PD1 中拍频后可得到频率为 $2f_b$ 的微波信号,此微波信号被用来调制 MZM 和 DPMZM1。为了获得更高的输出频率,采用多个泵浦光来代替单个泵浦光。由于激光源个数的增加会导致系统不稳定,因此采用一个激光器和级联调制器结构来产生多个泵浦光。利用 MZM 和 DPMZM1 级联的结构,产生 5 条功率相等、频率间隔相等的泵浦光,如图 1 所示。

第二部分,来自 TLS 的频率为 f_c 的光载波通过 C1 和 C3 后进入到工作在载波相移双边带(CPS-DSB)调制 DPMZM2 中,产生的 CPS-DSB 信号被作为 SBS 效应的信号光经过 ISO 后进入到 HNLF 中。然后,利用级联调制器结构生成的 5 个泵浦光发生的 SBS 效应进行布里渊增益-损耗补偿技术。频率为 f_c 的光载波和经过 SBS 效应处理后的光耦合后进入到 PD2 中进行拍频,可产生频率为 $5f_b$ 的微波信号。该微波信号经 EA 放大后会被反馈给 DPMZM2,形成 OEO 环路。经 DPMZM2 输出的 CPS-DSB 信号进入到 TBPF 中被用于单边带滤波,产生载波相移单边带(CPS-SSB)调制信号,此信号和频率为 f_c 的光载波在 PD3 中拍频,并产生频率为 $5f_b$ 的微波信号。系统中两段 HNLF 是具有相同类型、相同长度的光纤,以保证在两段 HNLF 中 SBS 效应引起的布里渊频移相等。

对于五倍频 OEO 的起振,来自 TLS 的光载波在 OEO 环路中的 DPMZM2 中被整个系统的噪声所调制,调制器输出调制的噪声边带被作为信号,信号光通过环形器 OC3 与级联 MZM 和 DPMZM1 输出的 5 个泵浦光分别在 HNLF 中发生 SBS 效应。将 DPMZM1 输出的 5 个泵浦光分别记为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 ,作为中心泵浦光的 P_3 的频率为 f_c ,相邻泵浦光间隔的频率为 $2f_b$,5 条泵浦光的频率从左到右分别为 $f_c - 4f_b$ 、 $f_c - 2f_b$ 、 f_c 、 $f_c + 2f_b$ 、 $f_c + 4f_b$,如图 2(a)所示。当泵浦光的功率超过 SBS 效应的阈值时会激发 SBS 效应,每个泵浦光会在其两侧产生洛伦兹形状的增益谱和损耗谱。由于相邻两个泵浦光之间的频率等于二倍布里渊频移的值($2f_b$),且 5 条泵浦光的功率是相等的,故 P_2 产生的增益谱和 P_1 产生的损耗谱可以完全抵消,如图 2(b)所示。同样, P_2 和 P_3 、 P_3 和 P_4 、 P_4 和 P_5 的增益损耗补偿原理相同。因此,5 个泵浦光经过 SBS 效应后会显著放大频率为 $f_c - 5f_b$ 的边带而衰减频率在 $f_c + 5f_b$ 处的边带,如图 2(c)所示。综上,只有频率在 f_c 和 $f_c - 5f_b$ 的边带被保留,并在经过 PD2 后被拍频生成 $5f_b$ 的微波信号,来反过来调制 DPMZM2。通过正反馈, $5f_b$ 的微波信号将越来越强,直到整个 OEO 环路维持稳定振荡。

此外,DPMZM 在所提方案中至关重要,DPMZM2 不仅作为整个振荡环路的调制器,还作为输

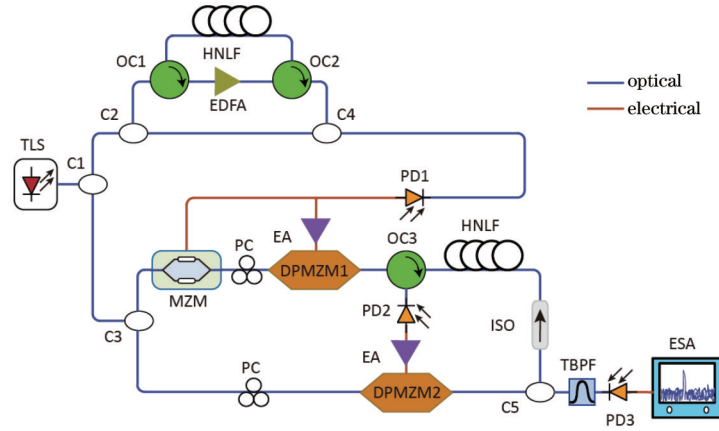


图 1 频率和相位均可调谐的五倍频 OEO 系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of quintuple frequency-tunable and phase-tunable OEO

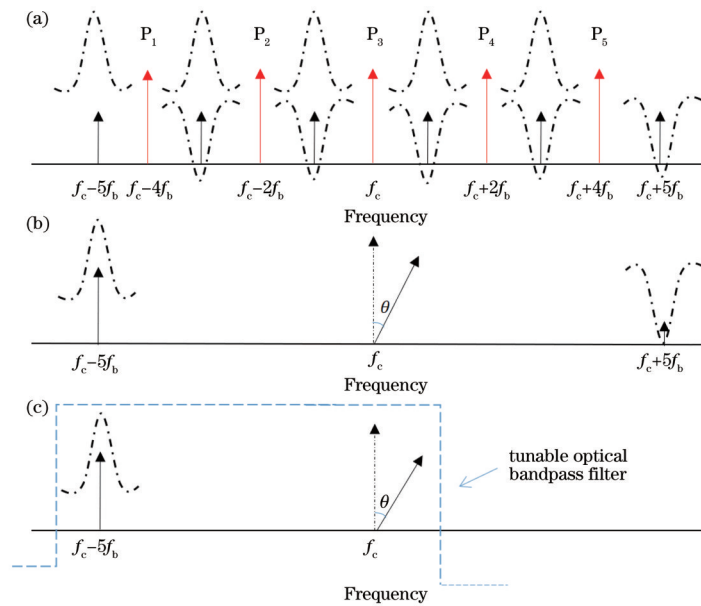


图 2 HNLF 中 SBS 效应的光谱处理过程。(a) 布里渊增益损耗补偿的光谱；(b) TBPF 之前的光谱；(c) PD3 之前的光谱

Fig. 2 Spectral processing of SBS effect in HNLF. (a) Spectrum of Brillouin gain-loss compensation; (b) spectrum before TBPF; (c) spectrum before PD3

出振荡微波信号的相位可调谐装置,其工作在 CPS-DSB 调制模式。DPMZM 由三个 MZM 组成,其中 MZM- α 和 MZM- β 位于母 MZM- γ 的两臂上,如图 3 所

示,其中 V_{RF1} 和 V_{RF2} 为射频信号 RF1 和 RF2 的幅值电压。DPMZM 的工作状态由三个直流偏置电压控制。DPMZM 输出光场的表达式^[10]为

$$E_{DPMZM} = \frac{E_c \exp(j\omega_c t)}{4} \left\{ \exp\left(j\pi \frac{V_{DC1}}{V_\pi}\right) \exp[jm \cos(\omega_m t)] + \exp[jm \cos(\omega_m t)] + \exp\left(j\pi \frac{V_{DC2} + V_{DC3}}{V_\pi}\right) \exp[jm \cos(\omega_m t)] + \exp\left(j\pi \frac{V_{DC3}}{V_\pi}\right) \exp[jm \cos(\omega_m t)] \right\}, \quad (1)$$

式中: V_{DC1} 、 V_{DC2} 和 V_{DC3} 是 DPMZM1 的直流偏置电压; V_π 是 DPMZM 的半波电压; V_m 是射频驱动信号的幅值; $E_c \exp(j\omega_c t)$ 是输入光信号的光场,其中 E_c 为光信号幅值, ω_c 为光信号角频率, t 为时间自变量; ω_m 为射频驱动信号的角频率。在所提方案中, MZM- α 被设置为载波抑制-双边带(CS-DSB)调制模式, MZM- β

被设置为只允许光载波通过的最大传输点,通过调节 DPMZM 的偏置电压 V_{DC3} 得到 CPS-DSB 信号,进而改变输出的 $5f_b$ 微波信号的相位。

2.2 二阶斯托克斯光的产生

在实验测试布里渊频移时,使用的高非线性光纤的长度为 1 km,增益和损耗峰值为 5 dB。当输入泵浦

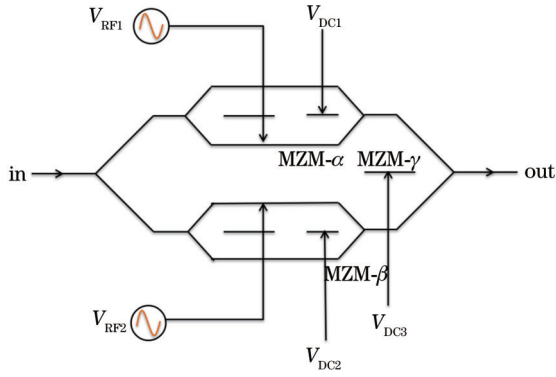


图 3 DPMZM 结构图

Fig. 3 Structural diagram of DPMZM

光的波长为 1550 nm 时, 布里渊频移的值约为 9.2 GHz, 布里渊增益谱线宽为 $f_0=30$ MHz。SBS 效

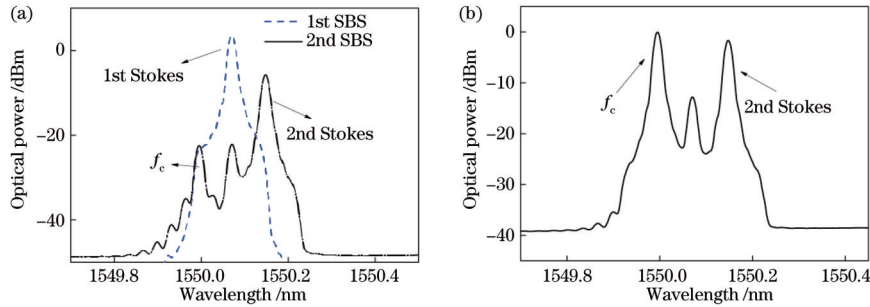


图 4 实验光谱。(a) 实验测得的两次 SBS 效应的光谱; (b) PD1 之前的光谱

Fig. 4 Experimental spectra. (a) Spectra of two SBS effects measured by experiment; (b) optical spectrum before PD1

2.3 多泵浦光的产生

级联 MZM 和 DPMZM 结构可以产生功率相等、频率间隔相等的多个泵浦光, 两个调制器被频率为 $2f_b$

应在光纤中引起的布里渊增益谱和损耗谱^[11]为

$$g(f) = \frac{g_B I_P}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} + j \frac{g_B I_P}{4} \frac{\Delta\nu_B f}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (2)$$

$$\alpha(f) = -\frac{g_B I_P}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} - j \frac{g_B I_P}{4} \frac{\Delta\nu_B f}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (3)$$

式中: g_B 是谱线中心的增益系数; I_P 是泵浦光的功率; $\Delta\nu_B$ 是布里渊线宽; f 是距离增益 $g(f)$ 或损耗谱 $\alpha(f)$ 中心的频率偏差。

在两次 SBS 效应中, 第一次 SBS 效应产生的一阶斯托克斯光作为第二次 SBS 效应的泵浦光, 继而产生二阶斯托克斯光, 实验测得的光谱如图 4 所示。

的正弦信号所调制。来自 TLS 的光波进入到 MZM 后, MZM 的输出可以被看作是 DPMZM1 的输入信号光。因此, 级联的 MZM 和 DPMZM 的输出^[12-13]为

$$E_{out}(t) = \frac{E_c}{8} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ J_n(m_{DP}) \times \left\{ \exp[j(V_{b1} + m_{DP})] + \exp[j(V_{b2} + V_{b3})] + \exp[j(V_{b3})] \right\} + \right. \\ \left. J_n(m_{DP} + m_{MZM}) \times \left\{ \exp[j(V_{b1} + \alpha)] + \exp[j(V_{b2} + V_{b3} + \alpha)] + \exp[j(V_{b3} + \alpha)] \right\} + \right. \\ \left. J_n(m_{MZM}) \times \exp[j(m_{MZM} + \alpha)] \right\} \times j^n \exp[j(\omega_c + n\omega)t], \quad (4)$$

式中: $V_{b1} = \pi V_{DC1}/V_{\pi 2}$ 、 $V_{b2} = \pi V_{DC2}/V_{\pi 2}$ 和 $V_{b3} = \pi V_{DC3}/V_{\pi 2}$ 是归一化偏置电压, 其中 $V_{\pi 2}$ 是 DPMZM 的半波电压; $m_{DP} = \pi V_{RF2}/V_{\pi 2}$; $\alpha = \pi V_b/V_{\pi 1}$, 其中 $V_{\pi 1}$ 为 MZM 的半波电压; $m_{MZM} = \pi V_{RF1}/V_{\pi 1}$; n 是泵浦光个数; $J_n(\cdot)$ 是第一类 n 阶贝塞尔函数, 在小信号调制下, n 的取值为 0 和 1; ω 为微波信号的角频率。

在实验中, 利用 MZM 和 DPMZM1 级联结构产生 5 个泵浦光。将频率为 18.4 GHz (等于二倍布里渊频移的值)、功率为 25 dBm 的射频信号分别加载到 MZM 和 DPMZM1 上, 在 DPMZM1 的输出光谱中可以得到 5 个离散的线谱, 这些线谱可以作为 5 个泵浦光的光谱, 如图 5 所示。通过光谱分析仪 (AQ6370D) 可以看到 5 个泵浦光的功率近似相等, 平坦度为 0.89 dB (理论上平坦度可以更好^[12]), 此时 DPMZM1 的偏置

电压点为 $V_{DC1}=10.9$ V、 $V_{DC2}=0.41$ V、 $V_{DC3}=12.4$ V, MZM 的偏置电压点为 $V_b=4.5$ V。

2.4 五倍频微波信号的产生

由式 (1) 推导出在 CPS-DSB 调制模式下的 DPMZM2 的输出光场为

$$E_{DPMZM2} \propto \exp(j2\pi f_c t + j\theta) + J_{-1}(\beta) \times \\ \exp[2\pi j(f_c - 5f_b)t] + J_1(\beta) \exp[2\pi j(f_c + 5f_b)t], \quad (5)$$

式中: $J_{-n}(\beta) = (-1)^n J_n(\beta)$; $\beta = \pi V_m/2V_{\pi}$ 是 DPMZM2 的调制指数, 其中 V_m 是调制信号的幅值; $\theta = \pi V_{DC3}/V_{\pi}$ 是载波和 CPS-DSB 信号之间的相移。CPS-DSB 信号被 TBPF 滤除上边带后转换成 CPS-SSB 信号, CPS-SSB 信号的表达式为

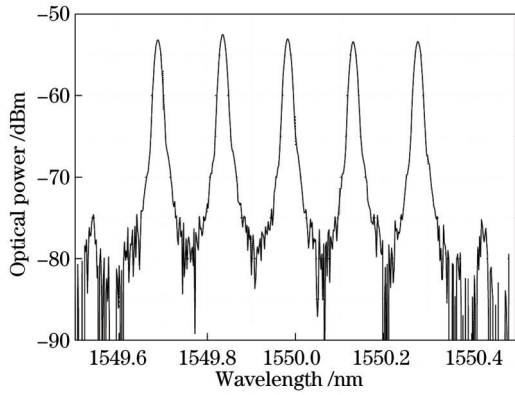


图 5 实验测量产生的 5 个泵浦光的光谱

Fig. 5 Optical spectra of generated five pump lights measured by experiment

$$E'_{\text{DPMZM}} \propto \exp(j2\pi f_c t + j\theta) + J_1(\beta) \times \exp[2\pi j(f_c - 5f_b)t]. \quad (6)$$

因此, PD3 输出的微波信号为

$$I = E'_{\text{DPMZM}} \cdot (E'_{\text{DPMZM}})^* \propto |E'_{\text{DPMZM}}|^2 \propto J_1^2(\beta) \cos(2\pi 5f_b t + \theta), \quad (7)$$

式中: $(E'_{\text{DPMZM}})^*$ 为 E'_{DPMZM} 的复共轭。

当布里渊频移 f_b 约为 9.2 GHz 时, PD3 拍频后的微波信号的频率为 $5f_b$, 仿真结果如图 6 所示, 此时可产

生频率为 46 GHz 的高频微波信号, 这与理论计算结果一致。

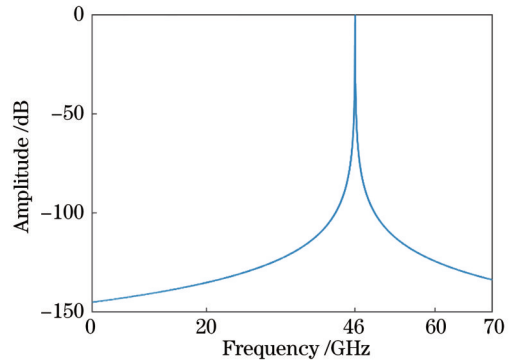


图 6 当 TLS 的波长为 1550 nm 时, OEO 输出微波信号的仿真电频谱图

Fig. 6 Simulated output electrical frequency spectrum of OEO when TLS wavelength is 1550 nm

2.5 频率和相位可调谐性

由式(5)可知, 通过调节 DPMZM1 的偏置电压 V_{DC3} 可以改变 θ 的大小, 进而改变输出微波信号的相位。在 $V_{\pi}=7 \text{ V}$ 的条件下, 调节 V_{DC3} 从 0 变化至 14 V, 可以得到 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的相移, 输出相位可调谐仿真图如图 7 所示, 表明所提 OEO 可以增加输出微波信号相位可调谐的灵活性。

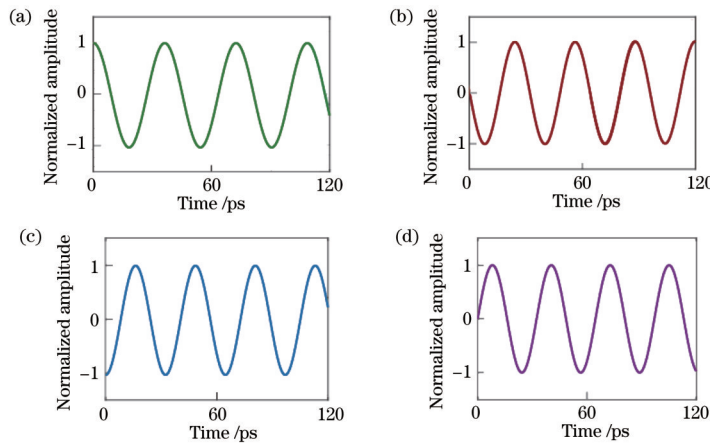


图 7 输出相位可调谐仿真图。(a) $0^\circ(360^\circ)$; (b) 90° ; (c) 180° ; (d) 270°

Fig. 7 Output phase tunable simulation diagram. (a) $0^\circ(360^\circ)$; (b) 90° ; (c) 180° ; (d) 270°

此外, 得益于布里渊频移的波长依赖特性, 通过改变 TLS 的波长可以改变输出微波信号的频率^[14]。通常, 布里渊频移^[14]为

$$f_b = 2n_{\text{eff}}v_A/\lambda_p, \quad (8)$$

式中: v_A 是声波的速度; n_{eff} 是光纤的有效折射率; λ_p 是泵浦光的波长。在实验中, 当 TLS 的波长从 1510 nm 调整到 1620 nm 时, 布里渊频移 f_b 从 8.80 GHz 变到 9.45 GHz。因此, 当将 TLS 的波长从 1510 nm 调整到 1620 nm 且步长为 10 nm 时, 可以得到一个频率调谐范围为 44.00~47.25 GHz 的微波信号, 仿真图如图 8 所示。此时, 可以获得一个频率和相位

均可调谐的高频率 OEO。

2.6 相位噪声性能

一般来讲, SBS 效应引入的自发辐射(ASE)噪声对整个系统的相位噪声有很大的影响。由于基于 SBS 效应的 OEO 包含传统 OEO 的一些器件, 故该器件中的噪声也包含了传统 OEO 的噪声^[9]。因此, 频率和相位均可调的五倍频 OEO 相位噪声包括 ASE 噪声、热噪声、散粒噪声、相对强度噪声和闪烁噪声等。根据振荡器的 Leeson^[15] 理论模型, 可以得到由 OEO 产生的振荡信号的单边带相位噪声

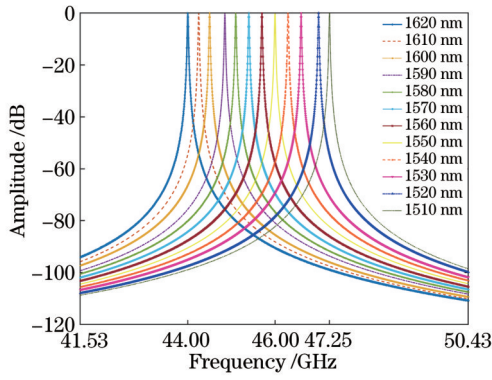


图 8 当 TLS 的波长从 1510 nm 调谐到 1620 nm 时, OEO 的仿真输出微波信号

Fig. 8 Simulated output microwave signal of OEO when wavelength of TLS is tuned from 1510 nm to 1620 nm

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2} |H(jf)|^2 \left\{ \frac{\alpha_1 N_{\text{RIN}} (RP)^2 Z}{P_{\text{RF}}} + \frac{2qRPZ}{P_{\text{RF}}} + \frac{FK_b T}{P_{\text{RF}}} + \frac{b_{-1}}{f} + \frac{hv_s n_{\text{sp}}}{2\eta J_0(\beta) [J_1(\beta)]^2 P_0} \right\}, \quad (9)$$

式中: $\alpha_1=0.5$ 是 PD 的强度噪声和相位噪声的转换系数, 相对强度噪声为 -140 dBc/Hz; R 是 PD 的响应率; $\eta=0.45$ 是 PD 的量子效率; P_{RF} 是射频信号在 PD 解调时的功率; q 是电子电荷值; $Z=50 \Omega$ 是负载电阻; $F=6$ dB 是电放大器的噪声系数; K_b 为玻尔兹曼常数; $b_{-1} \approx 10^{-8} \text{ rad}^2$ 为所有器件的闪烁噪声系数之和; $n_{\text{sp}} \approx K_b T / (hf_b)$ 为自发辐射因子, 其中 h 是普朗克常数, T 为室温; v_s 是斯托克斯波的频率; P_0 是光载波的功率; $H(jf)$ 为系统函数; N_{RIN} 为相对强度噪声; P 为泵浦光功率。此时, 饱和光功率为 10 mW, 室温为 298 K。当 TLS 的波长被设置在 1550 nm 时, 理论仿真的五倍频 OEO 的相位噪声在 10 kHz 偏移处约为 -112.79 dBc/Hz, 如图 9 所示, 达到了 OEO 相位噪声的基本要求。

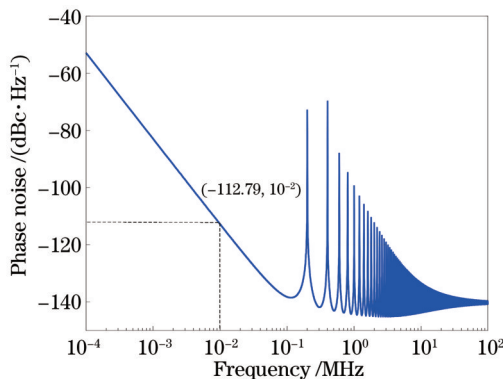


图 9 当 TLS 被设置在 1550 nm 时, 所提 OEO 的仿真相位噪声

Fig. 9 Simulated phase noise of proposed OEO when wavelength of TLS is set at 1550 nm

3 结 论

提出并分析了基于 SBS 效应和载波相移单边带的可调谐五倍频 OEO。一方面, 利用两次 SBS 效应产生二阶斯托克斯波, 并用产生的频率为 $2f_b$ 的微波信号来调制级联的 MZM 和 DPMZM1, 以多个泵浦光来代替单个泵浦光, 实现了输出信号频率的提高。另一方面, 通过调节 DPMZM2 和 TBPZ 得到 CPS-DSB 信号, 此时 DPMZM2 不仅作为整个 OEO 环路振荡的调制器, 还作为输出微波信号的相位可调器件。由于布里渊频移的波长依赖特性, 故系统可以简单地通过调节 TLS 的频率来实现输出可调谐的五倍频微波信号, 频率调谐范围为 44.00~47.25 GHz。同时, 通过调节 DPMZM2 的偏置电压可实现相位可调谐的微波信号, 相位调谐范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。最后, 计算得到了当 TLS 的波长被设置在 1550 nm 时, OEO 的单边带相位噪声在 10 kHz 偏移处约为 -112.79 dBc/Hz。综上, 所提 OEO 具有输出频率高、输出微波信号的频率和相位均可调谐等优势, 因此其在雷达通信和毫米波生成系统等领域中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 周涛, 李涛, 谢爱平, 等. 微波光子技术在电子战中的应用探讨(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 20211049.
Zhou T, Li T, Xie A P, et al. Application and development of microwave photonics in electronic warfare (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 20211049.
- [2] 李明, 郝腾飞, 李伟. 微波光子与多学科交叉融合的前景展望(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 20211042.
Li M, Hao T F, Li W. Prospects of cross research between microwave photonics and multidiscipline (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 20211042.
- [3] 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.
- [4] 张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106001.
Zhang Z P, Niu X C, Huang J, et al. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106001.
- [5] Wei Z H, Wang R, Pu T, et al. A tunable optoelectronic oscillator based on a tunable microwave attenuator[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 383-386.
- [6] 范峰, 王加彬, 朱文武, 等. 基于受激布里渊散射和耦合型双环的可调谐光电振荡器[J]. 光子学报, 2019, 48

- (8): 0823001.
Fan F, Wang J B, Zhu W W, et al. Tunable optoelectronic oscillator based on stimulated Brillouin scattering and coupled dual-loop[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0823001.
- [7] 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.
- [8] Zhu D, Pan S L, de Ben. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(3): 194-196.
- [9] 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.
- [10] Wang Y, Du C, Zhou W N, et al. Triple frequency- and phase-tunable optoelectronic oscillator based on stimulated Brillouin scattering and carrier phase-shifted single sideband modulation[J]. Optical Engineering, 2019, 58(3): 036109.
- [11] Wang Y, Zhou W N, Ding Y J, et al. Simple and flexible all-optical microwave photonic frequency converter based on stimulated Brillouin scattering effect [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(5): 7801108.
- [12] Zhang Q, Li J Q, Jiang L K, et al. Research of dual-band microwave photonic filter for WLAN based on optical frequency comb[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5520-5525.
- [13] 黄蓝锋, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于单光路偏振复用的微波瞬时频率测量方案[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1929002.
Huang L F, Li Y J, Zhao S H, et al. Microwave instantaneous frequency measurement based on single lightpath polarization multiplexing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1929002.
- [14] Yeniay A, Delavaux J M, Toulouse J. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(8): 1425-1432.
- [15] García S, Gasulla I. Multi-cavity optoelectronic oscillators using multicore fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2403-2415.