

基于可重构微波光子滤波器的双频光电振荡器

郑佳伟 刘显著 李德琦 陈严 娄宏博 刘东梅 王天枢

Dual-frequency optoelectronic oscillator based on reconfigurable microwave photonic filters

ZHENG Jiawei, LIU Xianzhu, LI Deqi, CHEN Yan, LOU Hongbo, LIU Dongmei, WANG Tianshu

引用本文:

郑佳伟, 刘显著, 李德琦, 等. 基于可重构微波光子滤波器的双频光电振荡器[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1300–1308. DOI: 10.5768/JAO202546.0612012

ZHENG Jiawei, LIU Xianzhu, LI Deqi, et al. Dual-frequency optoelectronic oscillator based on reconfigurable microwave photonic filters[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1300–1308. DOI: 10.5768/JAO202546.0612012

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种微波光子探测器组件的封装设计与实现

Package design and realization of a microwave photon detector component

应用光学. 2020, 41(2): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205004>

基于耦合式光电振荡器的注入锁定效应研究

Injection locking effect based on coupled optoelectronic oscillator

应用光学. 2025, 46(1): 62–70 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101005>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

基于游标效应的双芯光子晶体光纤温度传感器

Dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on vernier effect

应用光学. 2022, 43(3): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308002>

光子计数集成成像的压缩与重构

Compression and reconstruction of photon counting integral imaging

应用光学. 2023, 44(2): 295–306 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202001>

基于双光子吸收的宽谱光源关联特性测量方法

Measurement method of correlated properties of broad spectral sources based on two-photon absorption

应用光学. 2024, 45(6): 1158–1163 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601007>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1300-09

引用格式: 郑佳伟, 刘显著, 李德琦, 等. 基于可重构微波光子滤波器的双频光电振荡器 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1300-1308.

ZHENG Jiawei, LIU Xianzhu, LI Deqi, et al. Dual-frequency optoelectronic oscillator based on reconfigurable microwave photonic filters[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1300-1308.



在线阅读

基于可重构微波光子滤波器的双频光电振荡器

郑佳伟^{1,2}, 刘显著^{1,2}, 李德琦^{1,2}, 陈 严^{1,2}, 娄宏博^{1,2}, 刘东梅^{1,2}, 王天枢^{1,2}

(1. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 双频光电振荡器 (optoelectronic oscillator, OEO) 在双频无线网络、激光雷达和通信系统中具有潜在应用。提出一种基于可重构微波光子滤波器 (microwave photonic filter, MPF) 的双频 OEO, 2 个不同频率的微波信号同时在 OEO 的腔中振荡出现, 通过调节用于实现 MPF 的光谱切割, 获取不同光谱范围的正弦采样信号, 正弦采样信号经过色散补偿光纤的线性时不变系统对信号加权 and 延时叠加, 生成一个双频 MPF, 在 MPF 的基础上可以实现双频微波信号的同时输出, 以及单、双频的切换输出和单频不同频率的调谐。实验结果表明: OEO 输出的信号在 370 MHz、763 MHz、1 GHz 和 1.36 GHz 可实现稳定调谐, 且在 370 MHz 和 763 MHz 实现双频带切换输出。

关键词: 可重构性; 微波光子滤波器; 光电振荡器; 光谱切割

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0612012

Dual-frequency optoelectronic oscillator based on reconfigurable microwave photonic filters

ZHENG Jiawei^{1,2}, LIU Xianzhu^{1,2}, LI Deqi^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, LOU Hongbo^{1,2},
LIU Dongmei^{1,2}, WANG Tianshu^{1,2}

(1. Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Dual-frequency optoelectronic oscillators have potential applications in dual-frequency wireless networks, laser radar, and communication systems. This article proposes a dual-frequency optoelectronic oscillator based on a reconfigurable microwave photonic filter. Two microwave signals of different frequencies oscillate simultaneously in the cavity of the photonic oscillator. By adjusting the spectral cutting used to achieve the microwave photonic filter, sinusoidal sampling signals of different spectral ranges can be obtained. The sinusoidal sampling signals are weighted and delayed by a linear time invariant system of dispersion compensation fibers to generate a dual-frequency microwave photonic filter. Based on the microwave photonic filter, dual-frequency microwave signals can be simultaneously output, as well as switching between single and dual-frequencies and tuning different frequencies of a single frequency. The results indicate that the output signal of the optoelectronic oscillator can achieve stable tuning at 370 MHz, 763 MHz, 1 GHz, and 1.36 GHz, and achieve dual-band switching output at 370 MHz and 763 MHz.

Key words: reconfigurability; microwave photonic filters; optoelectronic oscillators; spectral cutting

收稿日期: 2025-01-14; 修回日期: 2025-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (62105042); 吉林省自然科学基金 (YDZJ202201ZYTS418, YDZJ202401626ZYTS)

第一作者: 郑佳伟, E-mail: 2022100431@mails.cust.edu.cn

通信作者: 刘显著, E-mail: liuxianzhu@cust.edu.cn

引言

双频信号发生器在光学通信系统^[1]、无线网络^[2]和传感系统^[3-5]中广泛应用,引起人们极大的兴趣。相比于传统电学振荡器,光电振荡器由于频率源为光信号,具有更高的频率范围^[6]、更低的相位噪声^[7-8]、更强的抗干扰能力以及更好的频率稳定性,因此受到积极研究。

根据 OEO 的原理,在频率锁定过程中滤波器需要提取和选择反馈信号,为了获得特定频率的微波信号,滤波器至关重要,滤波器可分为电带通滤波器和微波光子滤波器。虽然电带通滤波器已经取得重大的进展,但迄今为止,大部分产品和论文仅仅涉及单频 OEO^[9-10]。目前高性能多频电子系统的实现,需要生成多频微波信号的 OEO 系统^[1-5, 11]。最近有文章演示了利用双频率通带的电滤波器搭建双频 OEO^[12-14],选择 2 个频率并提供足够的增益,保持 2 个频率的相干性,但传统电学的限制仍然存在。因此,多频 MPF 作为选频器件搭建多频 OEO 逐渐受到重视。其中相位调制到强度调制转换的 MPF^[15]广泛用于双频光电振荡器,利用双通道陷波滤波器打破边带的相位平衡。例如,根据相移布拉格光栅对压力和温度等参量变化敏感的特性搭建双频 MPF,可用于多参数传感系统^[16],但是对信号激光源的频率抖动要求较高,并且要有较高的稳定性。受激布里渊效应也可实现双频的窄带 MPF^[17-18],利用二级布里渊双选频实现双频带的 MPF,通带带宽窄对于选频更具优势,可增加 MPF 的频率稳定性。但是上述双频 OEO,需要额外的泵浦源和高稳定的信号源,且不可以单频和双频切换。或者利用窗函数对光谱切割提供的抽头进行采样叠加,对搭建的 MPF 进行选频^[19],但是此方法加大了复杂程度。

我们提出一种包含单频可调谐和单、双频可切换的 OEO。MPF 是宽谱光源被梳状滤波器进行光谱切片,多抽头延时实现的,梳状滤波器由 2 个二阶 Lyot 滤波器发挥作用,通过调节二阶 Lyot 中的偏振角度,实现了不同偏振角度对应 Lyot 滤波器不同的保偏光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) 有效长度。Lyot 滤波器的原理是根据不同长度的保偏光纤来获得不同的相位差,以此对应光谱不同的自由光谱范围。此外,还证明了类似双波长激光器机制,在单一腔内同时产生 2 个微波信号。实验结果表明,在提出的方案中 2 个振荡模式被同时增益和放大,可以在 370 MHz、763 MHz、

1 GHz 和 1.36 GHz 实现单频振荡,调节偏振角度偏转 45°,可以灵活地进行单频和双频 OEO 的切换,切换到双频 OEO 后,可以实现 370 MHz 和 763 MHz 双频输出。实验结果保证了所提方案的灵活性,并促进了宽带微波测量系统中 MPF 的多频带特性,为获得多频输出提供了可能性。

1 原理

图 1 给出了基于有限脉冲响应滤波器架构的双频带光电振荡器 OEO 示意图。采用宽带光源,光线通过 2 个级联的基于 PMF 的二阶 Lyot 环路滤波器,提供自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 为 Δf_{FSR} 的正弦采样信号,二阶 Lyot 环路滤波器提供通带数量的切换和可调谐性。通过调整偏振控制器 (PC) 改变往返 PMF 偏振光的角度,以此获得不同的相位差,实现切换正弦采样信号的 FSR。采用相位调制器 (phase-modulator, PM) 调制并通过一段色散补偿光纤 (dispersion compensating fiber, DCF) 传输后,正弦采样信号由掺铒光纤放大器 (Erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA) 放大,然后发送到光电探测器 (photodetector, PD) 进行光电转换。来自 PD 的输出微波信号最终由电放大器 (electrical amplifiers, EA) 放大,并通过功率分束器 (electrical power divider, EPD) 反馈回 PM,形成双频 OEO 环路。

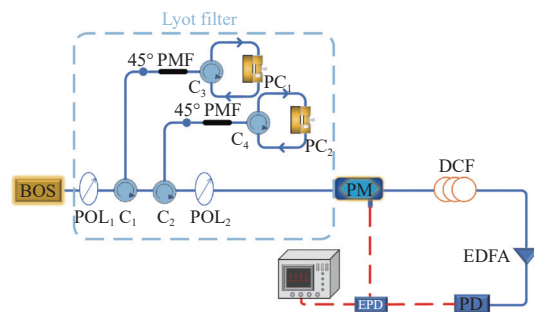


图 1 基于可重构 MPF 的 OEO 结构图

Fig. 1 OEO structure based on reconfigurable MPF

下面分析可重构 OEO 的工作原理。可重构 OEO 的开环响应是一个可重构的 MPF,在 MPF 中起到可重构性作用的结构为 2 个级联的二阶 Lyot 滤波器。

光源部分为输出功率为 10 dBm 的 ALED 的宽带光源 (HY-SLED-1550-10-100-B-FA-T),作为本实验的光源,通过 2 个二阶 Lyot 滤波器,宽谱光经过起偏器演变为慢轴平行方向传播的线偏阵光,经

过 45° 错角熔接后, 通过长 1 m 的 PMF (Thorlabs, PM1550-XP), 纤芯中同时激发正交偏振模式, 由于快慢轴群速度不同, 传输一定距离后会产生相位差, 随着传输距离的增加, 相位差会不断积累, 相位差和长度成正比。在光纤尾端使用检偏器对偏振态进行合束, 可以实现正交 2 个模式的偏振干涉。对光谱进行梳状切割, 通过保偏环行器的 2 口, 环行器的 3 口和 1 口连接。环行器作为一个反射镜, 光重新返回 PMF 中, Lyot 滤波器所积累的相位差由两段 PMF 决定。仔细调节环行器 3 口和 1 口中间的偏振控制器 (polarization controller, PC), 以调整线偏振的宽谱光通过两段 PMF 的角度 φ_1 , 当 φ_1 为 0° 时, 光通过两段 PMF, PMF 是慢轴对慢轴, 所以 PMF 的有效长度为 $L+L$, 积累的相位差为两段 PMF 之和。当 φ_1 为 $\pi/2$ 时, 第 1 段 PMF 快轴和第 2 段 PMF 慢轴相连接, 第 1 段积累的相位差被第 2 段补偿, PMF 的有效长度为 $L-L=0$, 滤波器没有积累任何相位差, 因此整个 Lyot 滤波器不具有梳状滤波的特性。当 φ_1 为 $\pi/4$ 时, 在第 1 段 PMF 传递的入射光的偏振角度与慢轴夹角为 45°, 经过 PC 旋转出射光的偏振角度与慢轴平行, 出射光经过第 2 段 PMF 并没有积累相位差, 视为有效长度为 1 m, 整体 PMF 的有效长度为 L 。第 2 个 Lyot 滤波器的原理与上述原理相同, φ_2 为第 2 个 Lyot 滤波器两段 PMF 的旋转角度。

本文滤波器的原理是通过控制延时来控制特定频率信号的高透过率, $T = \Delta\omega \cdot L_{DCF} \cdot D$, 延时与梳齿间隔 $\Delta\omega$ 、色散介质色散补偿光纤 L_{DCF} 长度和色散参量 D 相关。色散补偿光纤在滤波器设计完成后便无法进行更改, 色散参量 D 也为定制, 调节 Lyot 滤波器中的 PC, 积累相位差的不同, 可实现梳齿间隔的灵活切换, 即可实现延时量的切换, 进而可实现特定高透过率的频率调谐。基于 Lyot 滤波器的可重构 MPF 如图 2 所示。

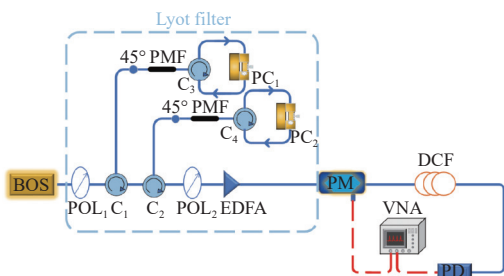


图 2 基于 Lyot 滤波器的可重构 MPF

Fig. 2 Reconfigurable MPF based on Lyot filter

简化 Lyot 滤波器模型如图 3 所示。二阶 Lyot 滤波器可以视为两段 PMF 的级联, 两段 PMF 夹角调整由 PC 控制。

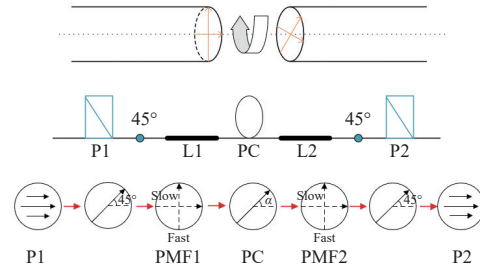


图 3 Lyot 滤波器简化模型

Fig. 3 Simplified model of Lyot filter

图 3 中第 3 行表示光谱经过起偏器 1 变为线偏振光, 可以用琼斯矩阵对偏振光的传输特性进行描述, 偏振器件用一个 2×2 的琼斯矩阵表示。为了简化推导, 起偏器的琼斯矩阵为

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \cos \theta_1 \sin \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

检偏器的琼斯矩阵可以表示为

$$J_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_2 & \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_2 & \sin^2 \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: θ_1 和 θ_2 是起偏器的偏振角度。双折射是保偏光纤的特性, 入射光沿着快轴和慢轴传播时由于群速度的差异, 会积累一定的相位差, 用 PMF 的琼斯矩阵表示为

$$J_{\text{PMF}} = \begin{bmatrix} e^{-i2\pi n_s L/\lambda} & 0 \\ 0 & e^{-i2\pi n_f L/\lambda} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: n_s , n_f 分别为 PMF 中快轴和慢轴的折射率; L 为 PMF 的长度。Lyot 滤波器中各个器件可以用琼斯矩阵表示, 则推导出 Lyot 滤波器的出射光的琼斯矢量为

$$E = J_2 J_{\text{PMF}} J_1 \quad (4)$$

出射光的光强表达式为

$$I = E^* \cdot E \quad (5)$$

式中: E^* 表示出射光的广义逆矩阵。最后推导出经过 Lyot 滤波器的光强表达式为

$$I = \frac{1}{2} [\cos^2(\theta_1 + \theta_2) + \cos^2(\theta_1 - \theta_2) + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\frac{2\pi(n_s - n_f)L}{\lambda})] \quad (6)$$

本文设计的微波光子滤波器的光源为多波长载波, 获得多波长的方法是宽谱光源的谱分割, 多波长光源的波长间隔就是梳状光谱的梳齿间隔 $\Delta\omega$ 。Lyot 滤波的有效长度不同, 梳齿间隔也不同,

因此可以获得不同中心频率 Ω_0 的高透过率通带, 即:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{\beta_2 L_D \Delta\omega} \quad (7)$$

式中: β_2 是色散光纤的色散系数; L_D 是色散光纤的长度。

基于宽谱切割的单双通带可切换 MPF 的基本结构见图 3 所示。综上所述, 介绍了 BOS 光的原理和获取方法, 宽带光信号经过 Lyot 滤波器等光谱切片滤波器时, 生成传输谱呈正弦或者余弦型周期性变化的 BOS 信号, 每一个梳齿可视为一个抽头, 每一个抽头被 VNA 提供的扫频信号利用 PM 调制, 调制后的信号入射到一段色散介质中, 随后被 PD 进行光电转换, 生成的电信号返回 VNA 中, 并在 VNA 中显示出滤波器的频幅响应。MPF 频幅响应仿真图如图 4 所示。

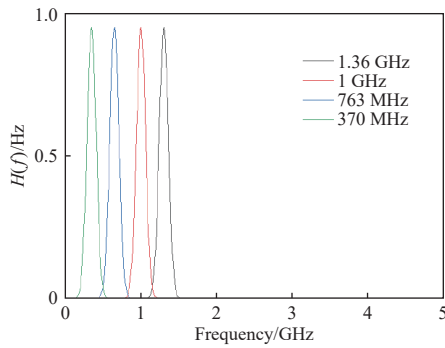


图 4 MPF 频幅响应仿真图

Fig. 4 MPF frequency amplitude response simulation diagram

2 微波光子滤波器频率响应仿真

设计的 MPF 的光源为多波长光源, 是通过对宽谱光进行切割获得的。根据 Lyot 滤波器各个器件的琼斯矩阵可以推导出 Lyot 滤波器的传递函数为

$$T_{\text{Lyot}}(\omega) = \frac{1}{2} [1 - \exp(-jBL\omega)] \quad (8)$$

式中: B 为保偏光纤的双折射系数; L 为 PMF 的有效长度。切割光谱的自由光谱范围由 Lyot 滤波器确定, 即 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \lambda^2 / BL$ (nm), 则切割光谱的光电场可以表示为

$$E_A(\omega) = E(\omega) T_{\text{Lyot}}(\omega) = \frac{1}{2} [1 - \exp(-j2\pi BL\omega)] E(\omega) \quad (9)$$

假设 VNA 提供的扫频信号频率为 f , 在调制深度远远小于 1 的情况下, 忽略高阶边带, 只保留正负一阶边带, 此时相位调制器的输出光电场可表示为

$$E(\omega) = e^{j\omega t} (1 + m_1 e^{-2j\pi f t} - m_2 e^{+2j\pi f t}) \quad (10)$$

式中: m_i 是调制器对调制深度相关的调制系数。相位调制器的一阶边带具有 π 的相位差, 也就是反相, 所以公式 (9) 第 2 项和第 3 项具有符号的正负差异。随后, 被调制的光信号传播至色散介质, 即单模光纤、色散补偿光纤或者相移布拉格光栅。简化模型忽略了色散介质的传播损耗, 其传递函数为

$$H(\omega) = |H(\omega)| \cdot e^{-j\phi(\omega)} \quad (11)$$

式中: $|H(\omega)|$ 为幅度项, 在建立模型中一般取值为 1; $e^{-j\phi(\omega)}$ 为相位项; 相位依赖性 $\phi(\omega)$ 可以通过以频率 ω_0 为中心的泰勒公式展开推导:

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \tau(\omega_0) \cdot (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta \cdot L(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3} \chi(\omega - \omega_0)^3 \quad (12)$$

式中: $\tau(\omega_0)$ 为频率 ω_0 处的群延迟时间; β 为二阶色散常数; χ 为长度为 L 的 DCF 光纤链路的色散斜率。用 L_{DCF} 表示色散补偿光纤的长度。将各个器件的传递函数进行级联, 获得的最终 MPF 的传递函数为

$$H(\Omega) = \int S(\omega) \cdot T(\omega) \cdot [H^*(\omega) \cdot H(\omega + \Omega) + H(\omega) \cdot H^*(\omega - \Omega)] d\omega \quad (13)$$

利用以上公式对 MPF 进行仿真, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 MPF 仿真参数

Table 1 MPF simulation parameters

名称	符号	数值
保偏光纤长度/m	L	1、2、3、4
保偏光纤双折射系数	B	4.5×10^{-4}
调制系数	m_i	1、1
色散系数/ps/(nm·km)	β	-98
色散补偿光纤长度/m	L_{DCF}	3 000

Lyot 滤波器仿真透射光谱图如图 5 所示。由图 5 可以看出, Lyot 滤波器的自由光谱范围随着 PMF 的有效长度的增大而变小, 即 3.14 nm~0.7 nm, 与公式 (7) 对应。通过调整 PMF 的偏振角度实现了光谱 FSR 的改变, 并且 MPF 频率响应的中心通带波长与光谱的 FSR 相反, MPF 的中心频率在 370 MHz~1.36 GHz 之间调谐, 3.14 nm 的自由光谱范围对应 370 MHz, 1.5 nm 对应 763 MHz, 1 nm 对应 1 GHz, 0.7 nm 对应 1.36 GHz。由于 Lyot 滤波器结构为全保偏, 因此干涉图谱稳定且纯净, 在无外力作用下受温度等因素影响极小, 在调整到设定偏转角度后, 可实现长时间稳定工作。MPF 的通带为单通带, 通过调整 Lyot 滤波器的偏振角

度可切换不同 PMF 的有效长度, 从而实现通带中心波长的调谐。

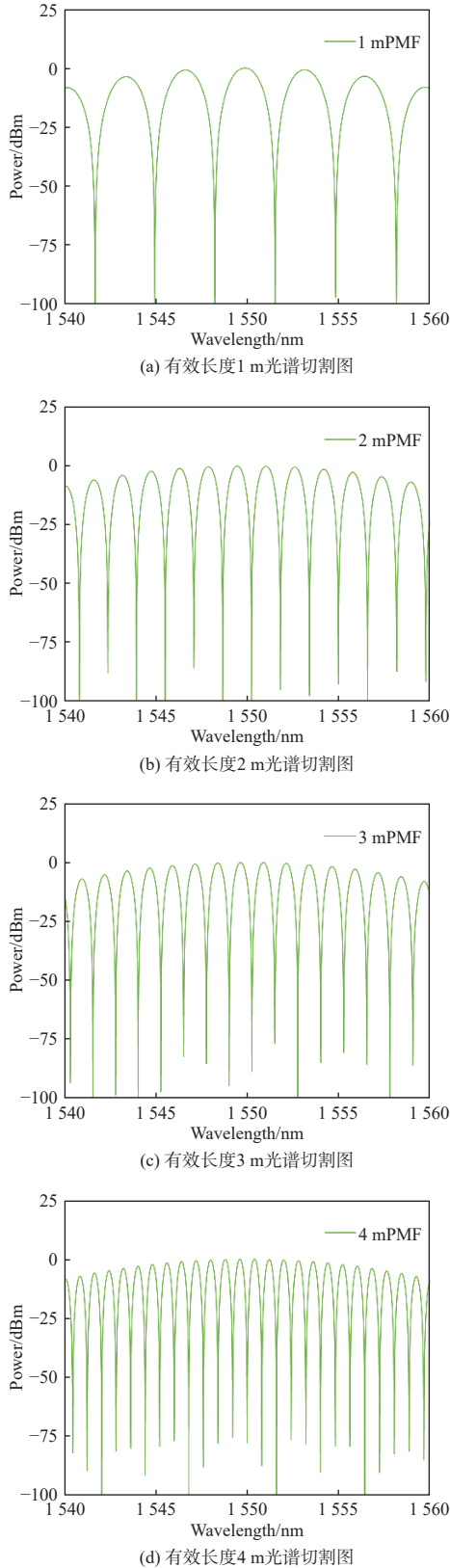


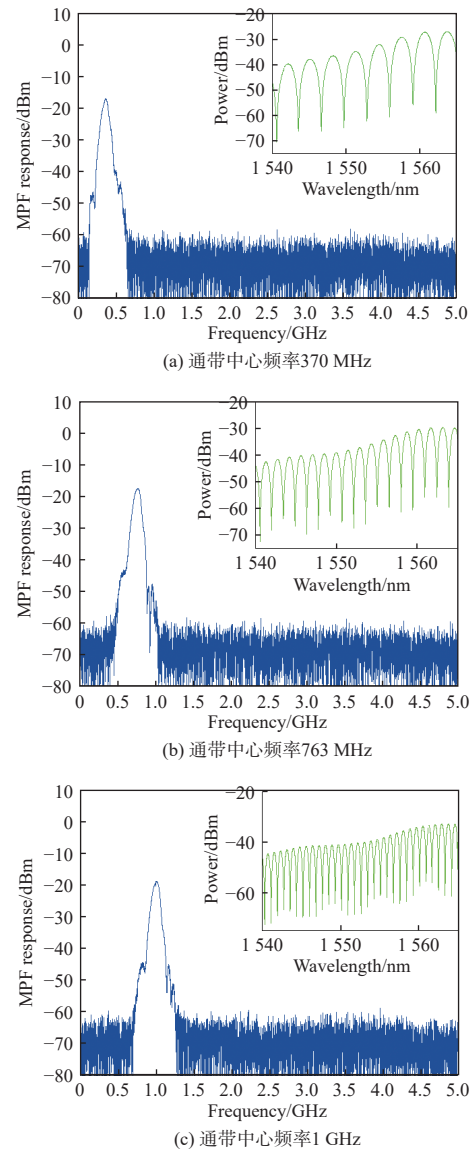
图5 Lyot滤波器仿真透射光谱

Fig. 5 Simulation transmission spectrum of Lyot filter

3 实验结果讨论

3.1 单通带 MPF 及 OEO

设定宽谱光源的输出中心波长为 1 550 nm, 波长范围为 20 nm, 图 6 为 MPF 单通带频幅响应曲线。从图 6 可以看出, Lyot 滤波器的 PMF 的 φ 从 0° 调谐到 90° 过程中, 微波光子滤波器的滤波中心频率随着梳状光谱间隔变小而增大, 控制光谱间隔为 3.14 nm, 对应的 MPF 通带的中心频率为 370 MHz, 通带是由不同间隔的多波长光谱产生的。每一束光作为一个抽头, 对光域进行调制和叠加, 对特定波长干涉相有高透过率, 在频域上表现为对频率具有高透过率的通带。随着光谱的梳齿间隔不断调节, 梳齿间隔变为 1.56 nm、1 nm 和 0.7 nm 时, MPF 通带的中心频率分别为 763 MHz、1 GHz 和 1.36 GHz, 中心频率的调谐步长



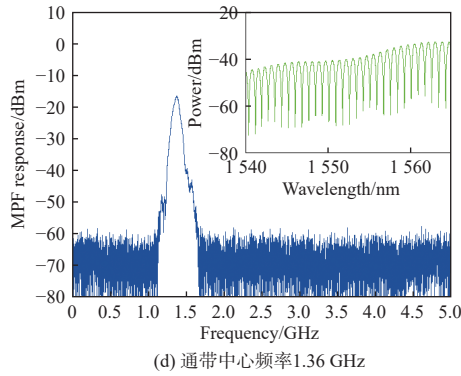


图6 MPF 单通带频幅响应

Fig. 6 MPF single passband frequency amplitude response
为 300 MHz, 调谐范围为 1 GHz。本文滤波器的信噪比高达 46 dBm, 3 dB 带宽为 100 MHz。

利用 MPF 的开环结构闭环搭建 OEO, VNA 进行替换, 利用 MPF 对 OEO 进行选频, 单频光电振荡器微波信号频谱图如图 7 所示。从图 7 可以看出, OEO 输出的微波信号的中心频率与 MPF 通带的中心频率对应, MPF 作为滤波器很好地选择了目标频率, 并实现 OEO 的振荡。通过 ESA 测得 370 MHz、763 MHz、1 GHz 和 1.3 GHz 的微波信号的相位噪声分别为 $-95.8 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 、 $-94.98 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 、 $-94.5 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 和 $-92.5 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$, 如图 8 所示。

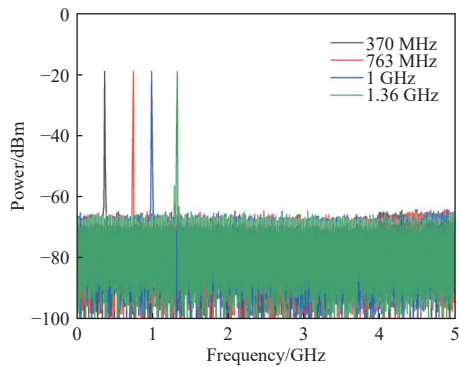


图7 单频光电振荡器微波信号频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of microwave signal of single frequency optoelectronic oscillator

将 MPF 通带的中心频率从 370 MHz 调谐到 1.36 GHz, 输出的微波信号也相应地从 370 MHz 调谐到 1.36 GHz, OEO 调谐范围为 1 GHz。为了分析信号的稳定性, 在 30 min 内每隔 1 min 对 OEO 输出的微波信号的频率和功率进行记录, 在扫描频率 500 kHz 情况下, OEO 输出的微波信号频率稳定性利用艾伦标准差表示, 如图 9(a) 所示, 扫描 30 min 的强度变化如图 9(b) 所示。与传统电滤波器作为

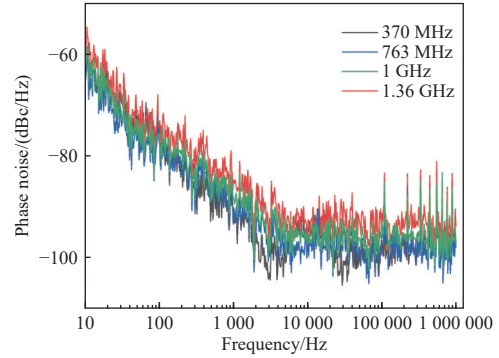
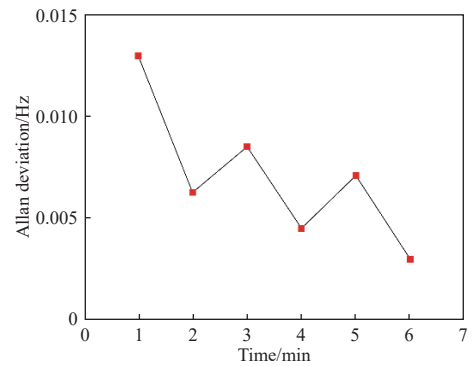


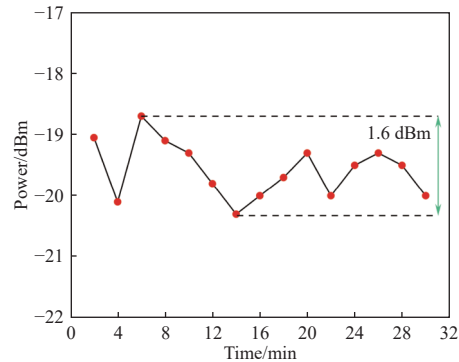
图8 单频微波脉冲相位噪声

Fig. 8 Single-frequency microwave pulse phase noise

选频的 OEO^[13] 相比, 本文大幅提升了灵活性。使用电滤波器的 OEO 输出微波信号的频率单一, 不可调谐, 使用 MPF 代替电滤波器, 提升了装置的集成度, 减少了电学器件的使用。



(a) 微波信号频率稳定性



(b) 微波信号功率稳定性

图9 OEO 微波信号频率及功率稳定性

Fig. 9 Frequency and power stability of OEO microwave signal

3.2 双通带 MPF 及 OEO

PMF 偏振角度严格对准 0° 、 45° 和 90° 时, Lyot 切割的光谱为单周期光谱, 梳齿间隔为单一间隔。偏振角度不完全对准情况下, 由于积累相位不同, 对光谱有不同效果的切割, 如图 10 所示。从

图 10 可以看出, 光谱呈现双周期, 在周期光谱之外, 还存在一个大的周期性包络, 其中小周期的 FSR 为 1.56 nm, 是有效长度 2 m 的 PMF 提供的相位差所引起的光谱切割效果。大周期的自由光谱范围是 $2 \times \text{FSR}$, 为 3.14 nm, 是有效长度 1 m 的 PMF 所带来的切割光谱效果。在 φ 不严格对准时, 由两段 PMF 共同提供相位差的作用, 由于长度不同, 是 2 倍关系, 所以呈现在光谱上的 FSR 也是 2 倍关系。一个周期的光谱的抽头进行调制干涉叠加, 存在一个 MPF 中心频率的通带, 如图 11 所示。图 11 中 MPF 的频幅响应为 2 个通带, 通带的中心频率分别为 370 MHz 和 763 MHz, 通带的信噪比为 38 dBm。

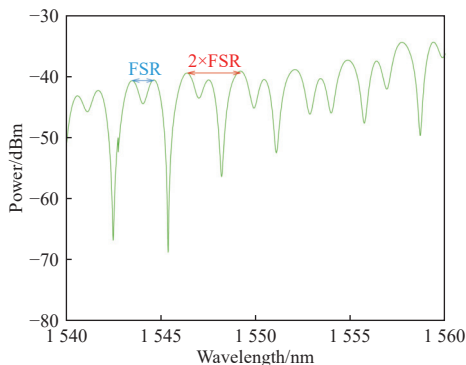


图 10 双周期光谱图

Fig. 10 Dual period spectrum

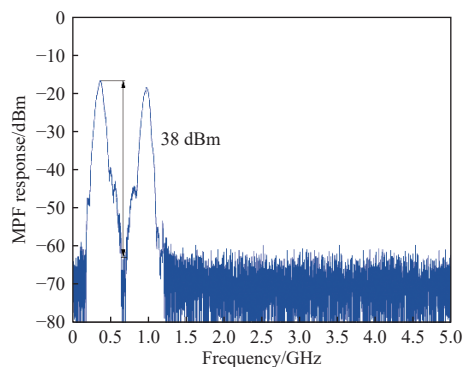


图 11 双通带 MPF 频幅响应图

Fig. 11 Dual-band MPF frequency amplitude response

利用 MPF 的双通带对 OEO 进行选频, 在一个腔内 2 个频率的微波信号同时具有高透率, 在增益下实现振荡。双频 OEO 微波信号频谱图如图 12 所示。从图 12 可以看出, 2 个微波信号的中心频率分别为 370 MHz 和 763 MHz, 实现了光电振荡器的双频振荡。此时双频微波脉冲相位的噪声为 $-93.62 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$, 如图 13 所示。

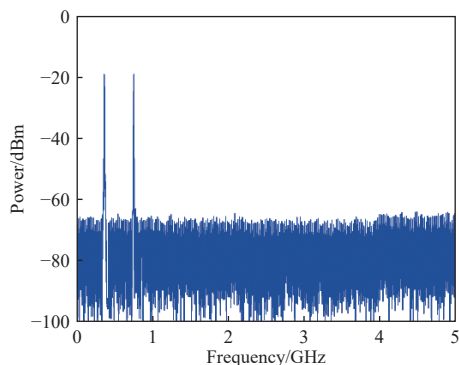


图 12 双频 OEO 微波信号频谱图

Fig. 12 Spectrum diagram of dual-frequency OEO microwave signal

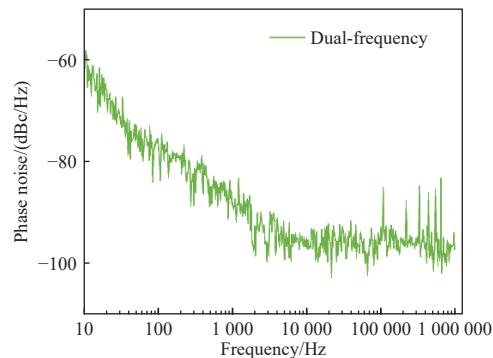
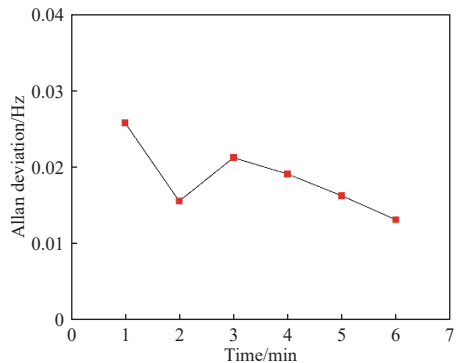


图 13 双频微波脉冲相位噪声

Fig. 13 Dual-frequency microwave pulse phase noise

从图 13 可以看出, 双频振荡的微波信号的频率变化比单频大 62 MHz, 是因为 Lyot 滤波器的偏振不完全对准, 对偏振十分敏感, 导致光谱间隔有微小变化, 从而使 MPF 的通带中心频率发生偏移, OEO 中心频率信号也会受到影响。双频 OEO 微波信号频率及功率稳定性如图 14 所示。从图 14 可以看出, 功率上下浮动 3.1 dBm, 是因为双频同时受到增益, 会有增益竞争, 功率使 2 个微波信号互相转移, 但总体处于一个稳定的状态。



(a) 微波信号频率稳定性

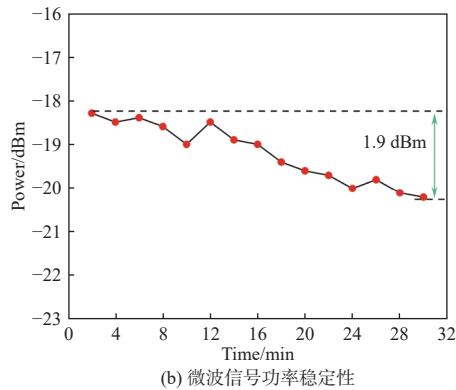


图 14 双频 OEO 微波信号频率及功率稳定性

Fig. 14 Frequency and power stability of dual-frequency OEO microwave signal

4 结论

搭建了基于可重构微波光子滤波器的 OEO, 该 OEO 具有频率可调谐、单频和双频切换的可重构、稳定性高和相位噪声低等优势。通过改变 Lyot 滤波器可实现 MPF 的通带中心频率从 370 MHz~1.36 GHz, 调谐步长为 370 MHz 的通带可调谐双通带中心频率为 370 MHz 和 763 MHz。此 MPF 用于 OEO 的选频, 可以使 OEO 的中心频率的特点与 MPF 一致, 单频 OEO 30 min 内频率无漂移, 功率浮动量为 1.36 dBm, 双频 OEO 30 min 内频率漂移为 62 MHz, 功率漂移为 3.1 dBm。利用可重构的 MPF 实现了新型双频带 OEO。

参考文献:

- [1] TEJERO S, SIART U, DETLEFSEN J. Coherent and non-coherent processing of multiband radar sensor data[J]. *Advances in Radio Science*, 2006(4): 73-78.
- [2] DALMIA S, BAVISI A, MUKHERJEE S, et al. A multiple frequency signal generator for 802.11 a/b/g VoW-LAN type applications using organic packaging technology[C]//2004 Proceedings. 54th electronic components and technology conference (IEEE Cat. No. 04CH37546). NV, USA: IEEE, 2004: 1664-1670.
- [3] XU O, ZHANG J, DENG H, et al. Dual-frequency optoelectronic oscillator for thermal-insensitive interrogation of a FBG strain sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 357-360.
- [4] WANG Y, WANG M, XIA W, et al. Optical fiber Bragg grating pressure sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1864-1867.
- [5] YIN B, WANG M, WU S, et al. High sensitivity axial strain and temperature sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator using PMFBG Fabry-Perot filter[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14106-14113.
- [6] HASANUZZAMAN G K M, IEZEKIEL S, KANNO A. W-band optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(13): 771-774.
- [7] YAN D, GE J, LIU D. Ultralow phase noise optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2889(1): 012007.
- [8] 范志强, 邱琪, 苏君, 等. 光电振荡器相位噪声和频率稳定性研究进展[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 562-568.
FAN Zhiqiang, QIU Qi, SU Jun, et al. Research progress on phase noise and frequency stability of optoelectronic oscillators[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 562-568.
- [9] GE Z, HAO T, CAPMANY J, et al. Broadband random optoelectronic oscillator[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5724.
- [10] TIAN H, ZHANG L, ZENG Z, et al. Neuromorphic regenerative memory optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27529-27542.
- [11] SERAFINO G, SCOTTI F, LEMBO L, et al. Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 643-650.
- [12] XIE Z, LI S, YAN H, et al. Tunable dual frequency optoelectronic oscillator with low intermodulation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30282-30288.
- [13] LIU S, DU C, YANG L, et al. Coherent dual-frequency signal generation in an optoelectronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2921-2924.
- [14] ZHANG J, WANG Y, LI X, et al. Tunable multi-frequency optoelectronic oscillator based on a microwave photonic filter and an electrical filter[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(7): 407.
- [15] LI C X, TANG D S, LIAO J, et al. Widely tunable frequency-doubling optoelectronic oscillator using a polarization modulator and a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(2): 026105.
- [16] XU Z, SHU X, FU H. Fiber Bragg grating sensor interrogation system based on an optoelectronic oscillator loop[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23274-23281.

-
- [17] LIU P, LIU S, YANG H, et al. K-band optoelectronic oscillator based on a double-Brillouin- frequency shifter[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(10): 100501.
- [18] 徐恩明, 李凡, 张祖兴, 等. 单双通带可切换的微波光子滤波器[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0506003-1-7.
- YANG Enming, LI Fan, ZHANG Zuxing, et al. Single and double passband switchable microwave photonic filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0506003-1-7.
- [19] LIU L, JIN X, NING T, et al. Dual-frequency optoelectronic oscillator incorporating a single cavity and multiband microwave photonic filter[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 14006-14015.