

傅里叶域锁模光电振荡器的锁模匹配精度研究

牛嘉琪^{1,2}, 郝鹏^{1,2*}, 王凯¹, 姚晓天^{1,2}¹河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;²河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

摘要 为研究傅里叶域锁模光电振荡器(FDML OEO)的锁模匹配精度,首先通过分析 FDML OEO 在滤波器调谐周期与环路延迟时间整倍数存在误差时的起振过程,研究建立 FDML OEO 开环增益、可调滤波器半波带宽、扫频输出带宽与傅里叶域锁模匹配精度之间的关系;随后选取 FDML OEO 的输出线性扫频信号延时自外差拍频信号的相位噪声作为振荡器输出信号质量的评价参数。通过实验验证 FDML OEO 中可调谐滤波器半波带宽、系统开环增益与傅里叶域锁模匹配精度之间的关系;实验分析了傅里叶域匹配精度对 FDML OEO 输出射频信号带宽的影响。实验结果与理论相一致,结果表明:可调谐滤波器的半波带宽越大,开环增益越大,傅里叶域锁模的匹配精度要求越低;傅里叶域锁模输出频率范围越大,对傅里叶域锁模的匹配精度要求越高;失谐情况越严重,FDML OEO 可实现的最大扫频范围将越小。该研究结果为宽带、低相噪 FDML OEO 的发展提供了重要的技术理论参考。

关键词 光学器件; 傅里叶锁模; 光电振荡器; 可调射频滤波器; 相位噪声

中图分类号 TN752

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1023001

Mode-Locked Matching Accuracy of Fourier Domain Mode-Locked Optoelectronic Oscillator

Niu Jiaqi^{1,2}, Hao Peng^{1,2*}, Wang Kai¹, Steve Yao X^{1,2}¹ Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;² Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

Abstract To study the mode-locked matching accuracy of the Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator (FDML OEO), we analyze the starting process of the FDML OEO when the filter tuning period deviates from an integral multiple of the loop round-trip time. We investigate the relationships among the FDML matching accuracy, the open-loop gain of FDML OEO, the half-wave bandwidth of the tunable filter, and the frequency-swept output bandwidth. Then, the phase noises in the beat frequency signal generated by delayed self-heterodyne (DSH) from the output linear sweep signal of FDML OEO are used to characterize the quality of the FDML OEO output signal. Experiments are conducted to verify the relationships among the half-wave bandwidth of the tunable filter in the FDML OEO, the open-loop gain of the system, and the FDML matching accuracy. The influence of the matching accuracy in the Fourier domain on the bandwidth of the radio-frequency FDML OEO output signal is experimentally analyzed. The experimental results are consistent with the theoretical ones. Specifically, a larger half-wave bandwidth of the tunable filter and a higher open-loop gain correspond to a lower requirement for FDML matching accuracy; in contrast, a larger frequency range of the FDML output results in higher matching accuracy required. A

收稿日期: 2021-09-10; 修回日期: 2021-10-29; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(12004092)、河北省创新能力提升计划项目(20542201D)、河北省自然科学基金重点项目(F2021201013)、河北省自然科学基金(F2020201041)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019035)、河北大学高层次人才科研启动项目(801260201243)

通信作者: *haopeng@hbu.edu.cn

more serious detuning indicates a smaller maximum frequency sweep range that can be achieved by the FDML OEO. The research results provide significant technical and theoretical support for the development of the broadband FDML OEO with low phase noise.

Key words optical devices; Fourier domain mode-locking; optoelectronic oscillator; tunable radio frequency filter; phase noise

1 引言

随着“智慧城市”“万物互联”“智能驾驶”这些新的应用场景的普及,现代微波技术对于高质量线性扫频射频信号的需求越来越迫切。传统产生线性扫频信号的电学方案很难突破相位噪声和扫频带宽的限制^[1-2],利用微波光子学产生宽带低噪声线性扫频射频信号的研究越来越多^[3-6]。傅里叶域锁模光电振荡器(FDML OEO)在光电振荡器的基础上,借鉴激光器中的傅里叶域锁模技术,为高频可调谐低相噪射频信号的产生提供了一种新的技术途径^[7]。

2018年 Hao等^[8]首次将激光器中傅里叶域锁模的概念引入光电振荡器(OEO)中,采用傅里叶锁模光电振荡器(FDML OEO)技术打破了振荡建立时间的限制,采用一种基于相位调制到强度调制(PM-IM)转换的快速扫频微波光子滤波器进行傅里叶域锁模,实现了啁啾率和扫频范围分别为 0.34 GHz/ μs 和 7.5 GHz 的线性调频信号输出。随后,各个研究小组提出了基于受激布里渊散射的微波光子滤波器的 FDML OEO^[9],以及基于环形谐振可调射频(RF)滤波器的傅里叶锁模光电振荡器等技术方案^[10]。基于傅里叶锁模光电振荡器技术可产生多波段线性调频微波信号^[11],利用扫频范围和扫频中心频率均可调谐线性调频信号、相位编码和频率编码微波信号^[12-14],这在现代雷达、电子侦察、无线通信等系统中有着广阔的应用前景^[15-16]。

实现 FDML OEO 技术的关键是在光电振荡器中引入一个同步快速可调谐滤波器,环路延迟时间等于滤波器调谐周期的整倍数^[17]。在 FDML OEO 系统中,需要对滤波器调谐周期(调谐频率)进行精确控制,使其与环路延迟时间相匹配,可调滤波器(TBF)的调谐周期(调谐频率)的匹配误差将对 FDML OEO 输出信号的性能产生直接影响;而可调滤波器的调谐周期(调谐频率)的匹配精度要求取决于 FDML OEO 的开环增益、可调谐滤波器 3 dB 带宽等结构参数。因此,本文从 FDML OEO 工作原理出发,理论分析了 FDML OEO 系统结构参数与傅里叶域光电振荡器锁模匹配精度之间的关系,以及

傅里叶域锁模匹配误差对 FDML OEO 产生的线性扫频信号的影响,并对理论分析结果进行实验验证。

2 基本原理

FDML OEO 的基本原理是信号在光电环路中循环一圈的时间与滤波器的调制周期或其整数相等,使得信号在环路内循环一圈后恰好能够再次无损地通过可调滤波器,如图 1(a)所示。傅里叶域锁模可以使扫频范围内所有纵模依次起振,并在时域上按照可调滤波器的调制信号依次输出。因此,FDML OEO 能够稳定输出的条件是环路延迟时间 T_{OEO} 等于可调滤波器调制周期或其整数^[8],可表示为

$$T_{\text{OEO}} = n \times T_{\text{TBF}}, \quad (1)$$

式中: T_{TBF} 为可调滤波器的调制周期; n 为整数。如图 1(b)所示,当可调滤波器的调制周期和环路延迟时间 T_{TBF} 存在偏差 ($|T_{\text{OEO}} - n \times T_{\text{TBF}}|$) 时^[18],某一频率成分经过环路光纤延时后再次经过可调滤波器,其相对于可调滤波器中心频率的偏移量为

$$\Delta f = |T_{\text{OEO}} - n \times T_{\text{TBF}}| \frac{B_{\text{scan}}}{T_{\text{TBF}}}, \quad (2)$$

式中: B_{scan} 为滤波器的扫描带宽。从式(2)可以看出: FDML OEO 的扫频输出频率范围越大,频率偏移量 Δf 越大。对于 RF 可调滤波器来说, Δf 越大,滤波器的透过率就越低,产生的损耗就越大, OEO 振荡器的环路增益就越小。光电振荡器需要经过多次循环实现起振,每经过一次可调谐 RF 滤波器,频率偏移量 Δf 增大。当锁模周期匹配误差引起的频率偏移量 Δf 过大导致光电振荡器未达到饱和输出时, OEO 振荡器的环路增益小于 1,不能实现正反馈, OEO 振荡器不能得到稳定的信号输出。假设信号频率与滤波器的中心频率的偏移量为 ΔF 时 OEO 环路的开环增益刚好等于 1, M 为此时的循环往返的次数,满足

$$M \times \Delta f = \Delta F, \quad (3)$$

$$\frac{M \times |T_{\text{OEO}} - n \times T_{\text{TBF}}| B_{\text{scan}}}{T_{\text{TBF}}} = \Delta F. \quad (4)$$

这里分两种情况进行分析: 1) OEO 振荡经过 M 次正反馈循环后,若 OEO 环路中的光电调制器

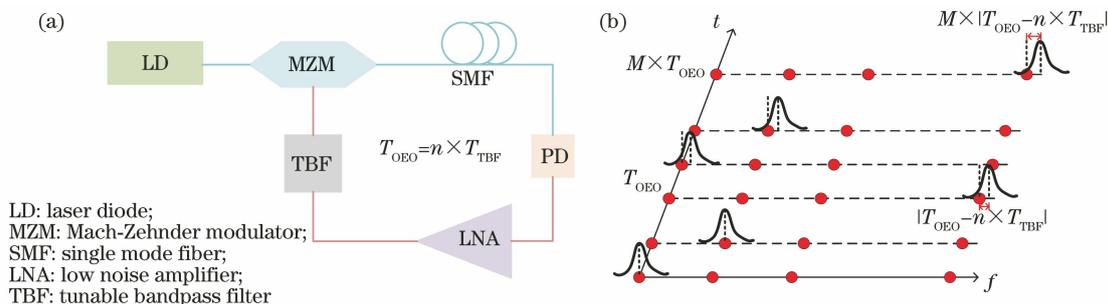


图 1 FDML OEO 的原理和可调滤波器调谐周期与环路延迟时间的失谐。(a) FDML OEO 的原理；(b) 可调滤波器调谐周期与环路延迟时间的失谐

Fig. 1 Schematic diagram of FDML OEO, and detuning between period of TBF and loop delay time. (a) Schematic diagram of FDML OEO; (b) detuning between period of TBF and loop delay time

或者 RF 放大器达到饱和, 环路形成稳定的振荡; 2) OEO 振荡器经过 M 次正反馈循环后, 环路未达到稳定的振荡。OEO 振荡器实现稳定振荡输出的循环次数 K 主要受环路开环增益的影响^[19], 可表示为

$$K \propto \frac{P_{\text{sat}}/P}{\beta}, \quad (5)$$

式中: P_{sat} 为饱和输出功率; P 为起振噪声功率; β 为小信号的往返净增益。当 $K < M$ 时, 虽然存在一定的可调 RF 滤波器傅里叶锁模频率匹配误差, OEO 振荡器仍然可以实现扫频信号输出。当 $K > M$ 时, 可调 RF 滤波器傅里叶锁模频率匹配误差将导致 OEO 振荡器不能实现稳定信号输出。OEO 振荡器的环路开环增益越大, K 越小, 实际应用对傅里叶锁模的精度要求越低。同时, 根据可调滤波器的传输特性, 可调滤波器的半波带宽越大, 偏离中心频率一定频率的信号衰减越小, ΔF 就越大, 由式(4)可以得到可调滤波器的半波带宽越大, 实际应用对傅里叶锁模的精度要求越低。

3 实验验证

基于可调 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器的实验装置如图 2 所示, 该实验装置与本课题组前期提出的基于环形谐振式可调滤波器的 FDML OEO 实验装置相一致^[10]。1550 nm 的分布反馈式半导体激光器模块 (RP-FM-10-0080-02, 大族锐波) 发出的光经半波电压为 4.4 V 的马赫-曾德尔调制器 (Oclaro: F-10) 输出, 输出的光信号经过一个 1:9 的分束器, 10% 的光用来进行延时自外差 (DSH) 的测试, 90% 的光在约 2000 m 的色散补偿光纤中进行传输, 到达光电探测器 (GD45220R, 中国电子科技集团公司第四十四所) 并进行光电转换。光电探测器的 3 dB 带宽是 12 GHz, 响应度为 0.84 W/A。被解调后的电信号经低噪声放大器 (DBLNA200011500A, Qotana) 的放大后, 再经过可调滤波器和一个 8.8~9.2 GHz 的宽带 RF 滤波器 (DBBF0008800920w, Qotana), 宽带滤波器的通过频率范围与可调滤波器的扫频范围相一致, 得到的

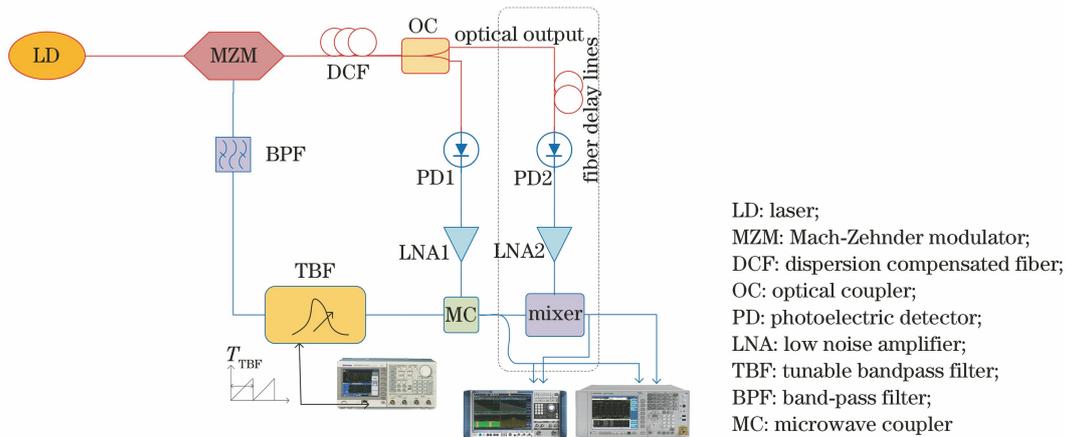


图 2 基于环形谐振 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器实验装置

Fig. 2 Experimental device of low phase noise FDML OEO based on ring resonant RF filter

射频信号经过一个功分器,一路用于扫频信号的测试,另一路返回 MZM 调制器并形成反馈回路。

为了表征傅里叶锁模光电振荡器扫频信号输出的傅里叶域锁模效果,采用其输出线性扫频信号的延时自外差拍频信号相位噪声评判扫频信号的质量,如图 2 中虚线框内所示。在 FDML OEO 光电振荡环路光电探测器 PD1 前插入一个 10:90 光纤耦合器。10% 的光信号经光纤延时后进入光电探测器 PD2,经过光电转换后得到自延时线性扫频信号,该信号与环路 RF 耦合器 MC 耦合输出的线性扫频信号在 RF 混频器中进行混频后,得到延时自外差产生的拍频信号。延时自外差产生的拍频信号的相位 $\varphi_b(t, \tau_D)^{[20]}$ 可表示为

$$\varphi_b(t, \tau_D) = 2\pi\alpha\tau_D t + \Delta\phi_d(t, \tau_D) + \Delta\phi_s(t, \tau_D), \quad (6)$$

式中: α 为扫频输出信号的频率扫描速度; τ_D 为拍频信号延时; $\Delta\phi_d(t, \tau_D)$ 为扫频非线性产生的相位差, $\Delta\phi_d(t, \tau_D) = \phi_d(t) - \phi_d(t - \tau_D)$, $\phi_d(t)$ 、 $\phi_d(t - \tau_D)$ 分别为时刻 t 和 $t - \tau_D$ 时扫频非线性产生的相位误差; $\Delta\phi_s(t, \tau_D)$ 为扫频信号的瞬时相位噪声的相位差, $\Delta\phi_s(t, \tau_D) = \phi_s(t) - \phi_s(t - \tau_D)$, $\phi_s(t)$ 、 $\phi_s(t - \tau_D)$ 为时刻 t 和 $t - \tau_D$ 时线性扫频信号的相位噪声产生的相位误差,对 $\Delta\phi_d(t, \tau_D)$ 和 $\Delta\phi_s(t, \tau_D)$ 进行傅里叶变换频谱分析,可得

$$f_b(t, \tau_D) = \alpha\tau_D + \frac{d[\Delta\phi_d(t, \tau_D)]}{dt} + \frac{d[\Delta\phi_s(t, \tau_D)]}{dt}, \quad (7)$$

从式(7)可以看出,第一项 $\alpha\tau_D$ 为理想线性扫频信号

延时自外差产生拍频信号的频率,第二项 $\frac{d[\Delta\phi_d(t, \tau_D)]}{dt}$ 为扫频非线性引起的频率展宽,第三项 $\frac{d[\Delta\phi_s(t, \tau_D)]}{dt}$ 为线性扫频信号的相位噪声引起延时自外差产生拍频信号的相位噪声。因此,本文通过 FDML OEO 线性扫频信号延时自外差产生拍频信号相位噪声的测量评价 FDML OEO 锁模效果和输出扫频信号的质量。

3.1 可调滤波器半波带宽对傅里叶域光电振荡器锁模匹配精度的影响

对于环形谐振可调 RF 滤波器来说,其半波带宽与环形谐振滤波器的开环增益有关^[21],当环形谐振滤波器的开环增益无限接近于 1 时,滤波器半波带宽越来越窄,但是环形谐振滤波器环路中放大器、移相器、衰减器等器件的损耗或增益频率不平坦性使得滤波器开环增益也具有不平坦性,不同频率处滤波器的半波带宽也有所不同。通过调整 RF 滤波器中的可调衰减器对其开环增益进行精确调控,可实现环形谐振可调 RF 滤波器在一定范围内半波带宽的调控。通过对环形谐振可调滤波器开环增益的调控,分别获得了 50 MHz 频率范围内滤波器半波带宽相对一致的半波带宽为 6, 12, 20 MHz 的可调滤波器,其矢量网络分析仪 S_{21} 参数测量结果如图 3(a) 所示。实验时,在环路中加入可调衰减器,调整可调滤波器在不同中心频率下的 S_{21} 产生的开环增益差异。在开环增益为 3 dB 时,对具有 3 种不同可调滤波器半波带宽的傅里叶域光电振荡器输出的

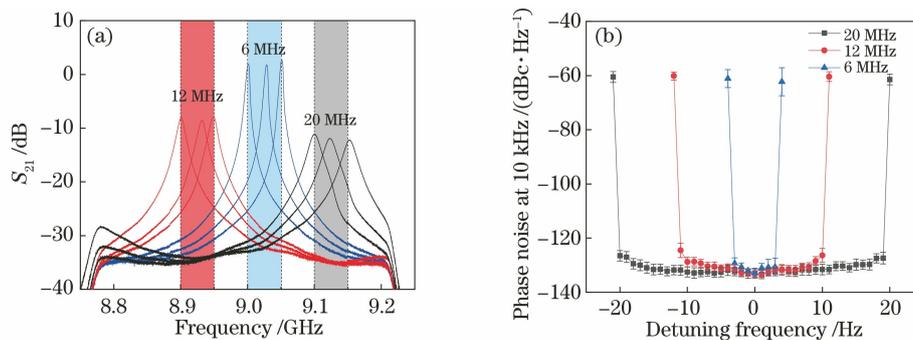


图 3 RF 快速可调滤波器半波带宽对傅里叶域光电振荡器锁模匹配精度的影响。(a) 不同半波带宽可调滤波器的 S_{21} 参数测试结果; (b) 不同傅里叶域锁模频率偏差情况下基于 3 种不同半波带宽可调滤波器的傅里叶域光电振荡器输出的 50 MHz 扫频信号的延时自外差拍频信号的相位噪声测量结果

Fig. 3 Effect of half wave bandwidth of RF fast tunable filter on mode-locked matching accuracy of FDML OEO. (a) Measured frequency response S_{21} of tunable filter with different half-wave bandwidth; (b) phase noise measurement results of DSH beat signal of 50 MHz sweep signal from FDML OEO based on three different half wave bandwidth tunable filters under condition of different mode-locked frequency deviation in Fourier domain

50 MHz 扫频信号进行延时自外差产生拍频信号相位噪声测量。本文搭建的 FDML OEO 环路中延时光纤长度约为 2000 m, 一阶傅里叶域锁模频率为 103.4 kHz, 设置 103.4 kHz 傅里叶域锁模频率为中心频率, 改变傅里叶域锁模调制频率, 对于 3 种不同的可调滤波器半波带宽下 100 m 光纤延时拍频信号 (2.47 MHz) 的 10 kHz 频偏处相位噪声进行测量, 测量结果如图 3(b) 所示。

可以看出: 在环形谐振可调滤波器的半波带宽为 6 MHz 时, 傅里叶域锁模调制信号频率相对于中心频率的变化约 ± 4 Hz 的范围内拍频信号在 10 kHz 的相位噪声为 -133 dBc/Hz, 且基本不变; 当超过这个范围后拍频信号的相噪急剧恶化; 在滤波器半波带宽为 12 MHz 时, 傅里叶域锁模调制信号相对于中心频率变化约 ± 10 Hz 内拍频信号在 10 kHz 的相位噪声为 -133 dBc/Hz, 且基本保持不变; 当中心频率变化超过 ± 10 Hz 时, 拍频相噪急剧恶化; 在滤波器带宽为 20 MHz 时, 傅里叶域锁模调制信号相对于中心频率变化约 ± 20 Hz 内, 拍频信号在 10 kHz 的相位噪声为 -133 dBc/Hz, 且基本保持不变; 当中心频率变化超过 ± 20 Hz 范围, 拍频信号的相噪急剧恶化。基于不同半波带宽的环形谐振可调滤波器, FDML OEO 生成的扫频信号的相位噪声水平相一致, 但环形谐振可调滤波器不同的半波带宽对应着不同的傅里叶域锁模频率偏移范围。该实验结果与上述理论分析结果相一致, 可调滤波器的半波带宽越小, 对傅里叶锁模的匹配精度要求越高; 可调滤波器的半波带宽越大, 对傅里叶锁模的匹配精度要求越低。

3.2 OEO 振荡环路开环增益对傅里叶域光电振荡器锁模匹配精度的影响

为了验证 OEO 振荡环路开环增益对傅里叶域光电振荡器锁模匹配精度的影响, 在图 2 中傅里叶域光电振荡器环路可调 RF 滤波器 (TBF) 和宽带 RF 滤波器 (BPF) 之间加入不同衰减量的固定衰减器以调整环路的开环增益, 傅里叶域光电振荡器环路的开环增益分别设置为 2 dB、5 dB 和 10 dB。对 8.95~9.05 GHz 的线性扫频输出信号进行测量, 用相位噪声分析仪测量 100 m 光纤延时 4.95 MHz 拍频信号的 10 kHz 频偏处相位噪声, 以 103.4 kHz 傅里叶域锁模频率为中心频率, 改变傅里叶域锁模调制频率, 对不同开环增益情况下自延时拍频信号的相位噪声进行测量, 测量结果如图 4 所示。

从图 4 中实验测试结果可以看出: 当开环增益

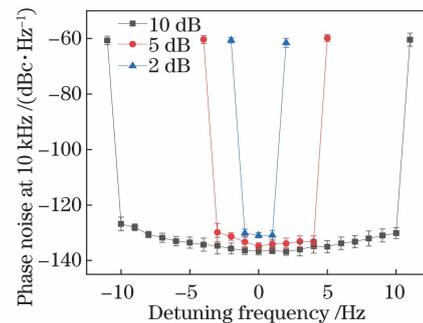


图 4 不同傅里叶域锁模频率偏差情况下 3 种不同开环增益的傅里叶域光电振荡器输出的 100 MHz 扫频信号的延时自外差 4.95 MHz 拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声测量结果

Fig. 4 Phase noise of DSH 4.95 MHz beat frequency signal of 100 MHz frequency sweep signal from FDML OEO based on three different open-loop gains measured at 10 kHz offset under condition of different Fourier domain mode-locked frequency deviation

在 2 dB 时, 在 103.4 kHz 调制信号频率的傅里叶域锁模频率变化 ± 1 Hz 范围内, 4.95 MHz 拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声保持 -132 dBc/Hz 基本不变; 调制信号频率变化超过 ± 1 Hz 后, 拍频相位噪声急剧恶化; 当开环增益在 5 dB 时, 调制信号频率变化在 ± 3 Hz 范围内的 4.95 MHz 拍频信号在 10 kHz 偏频处保持 -133 dBc/Hz 基本不变, 调制信号频率变化超过 ± 3 Hz 后, 相位噪声急剧恶化; 当开环增益在 10 dB 时, 调制信号频率变化在 ± 10 Hz 范围内的 4.95 MHz 拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声保持 -134 dBc/Hz 基本不变, 调制信号频率变化超过 ± 10 Hz 后, 相位噪声急剧恶化。在不同的开环增益下, FDML OEO 生成的扫频信号的拍频相位噪声随开环增益的增大而减小, 优于 -132 dBc/Hz, 但不同的开环增益对应着不同的傅里叶域锁模频率偏移范围。可以发现, 前后频率偏移对应的拍频相位噪声测试结果有着一定的不对称性, 这主要是由相位噪声测量误差导致的。该实验结果与上述理论分析结果相一致, 开环增益越小, 对傅里叶锁模的匹配精度要求越高, 开环增益越大, 对傅里叶锁模的匹配精度要求越低。

3.3 傅里叶域锁模匹配精度对系统扫频信号频率输出范围的影响

扫频信号的带宽直接决定了调频连续波 (FMCW) 雷达的距离分辨率^[22], 扫频范围越大, 测距精度越高。由上述理论分析可知, 傅里叶锁模匹配精度与 FDML OEO 扫频输出范围有着直接关

系。为了验证傅里叶域锁模匹配精度对系统扫频信号的频率输出范围的影响,在开环增益为 3 dB、滤波器 3 dB 带宽不大于 10 MHz 时,在不同傅里叶域锁模匹配精度的情况下,针对以 9.0 GHz 为中心频率的 200 MHz(8.9~9.1 GHz)、300 MHz(8.85~9.15 GHz)、400 MHz(8.8~9.2 GHz) 3 种线性扫频范围,对 20 m 光纤延时的自外差拍频信号的相位噪声进行了测量,测试结果如表 1 所示。可以看出,当调制信号在偏离 103.4 kHz 傅里叶锁模中心频率 ± 3 Hz 以内时,FDML OEO 输出的 200 MHz 线性扫频信号的 1.98 MHz 延时自外差拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声约为 -132 dBc/Hz 以上,频偏超过 ± 3 Hz 的相位噪声产生严重恶化;当调制信号在偏离 103.4 kHz 傅里叶锁模中心频率

± 2 Hz 以内时,FDML OEO 输出的 300 MHz 线性扫频信号的 2.97 MHz 延时自外差拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声约为 -132 dBc/Hz 以上,频偏超过 ± 2 Hz 时相位噪声产生严重恶化;当调制信号在偏离 103.4 kHz 傅里叶锁模中心频率 ± 1 Hz 以内时,FDML OEO 输出的 400 MHz 线性扫频信号的 3.96 MHz 延时自外差拍频信号在 10 kHz 偏频处的相位噪声约为 -127 dBc/Hz 以上,频偏超过 ± 1 Hz 的相位噪声产生严重恶化。失谐情况越严重,FDML OEO 产生射频信号的最大扫频范围将越小。FDML OEO 输出扫频范围越大,对傅里叶域锁模匹配精度要求越高,实验结果与上述理论分析结果相一致。

表 1 不同傅里叶域锁模匹配精度情况下的 3 种线性扫频范围延时自外差拍频信号相位噪声

Table 1 Phase noise of DSH beat signal of three different frequency scanning ranges for different mode-locked matching accuracy in Fourier domain

Frequency scanning bandwidth /MHz	Detuning frequency /Hz								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
200	-59.8	-131.7	-132.0	-132.1	-132.2	-132.0	-132.0	-131.9	-62.1
300	-57.2	-61.2	-131.9	-131.6	-132.0	-131.8	-131.2	-59.2	-58.9
400	-59.1	-61.2	-70.1	-127.2	-129.3	-127.6	-58.1	-61.2	-59.2

基于可调 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器,在开环增益为 3 dB、可调谐滤波器 3 dB 带宽不大于 10 MHz、锁模匹配精度优于 ± 2 Hz 的情

况下,最终实现了 8.8~9.2 GHz 线性扫频信号的产生,线性信号输出测量结果如图 5 所示。图 5(a)为利用高速示波器(采样率为 100 GSa/s, MSO

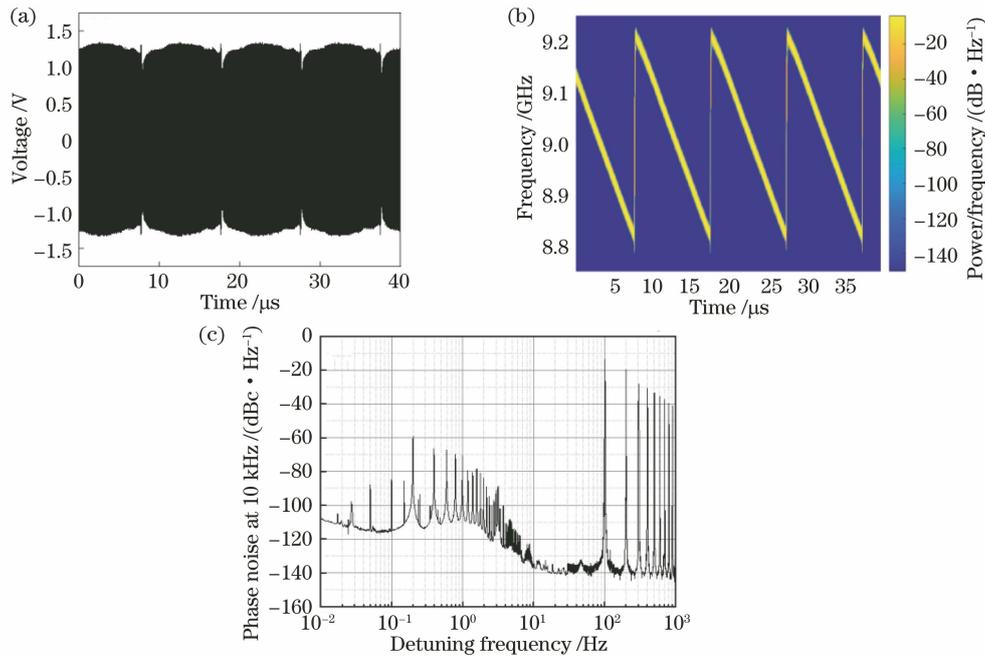


图 5 FDML OEO 产生的线性扫频信号测量结果。(a)以 9.0 GHz 为中心频率的 400 MHz 扫频范围的时域包络测量结果;(b)短时傅里叶变换的瞬时频谱;(c)延时自外差拍频信号的相位噪声测试结果

Fig. 5 Linear frequency sweep signal generated by FDML OEO. (a) Temporal waveform for frequency scanning bandwidth of 400 MHz centered at 9.0 GHz; (b) frequency distribution of short-time Fourier transform; (c) phase noise of DSH signal

71604C, Tektronix) 获得的 4 个完整周期的时域包络, 由于光电振荡器环内器件频域响应的不平坦性, 信号包络有一定的起伏, 信号的重复周期为 $9.87 \mu\text{s}$ 。对该时域信号进行短时傅里叶变换, 获得其瞬时频域信息如图 5(b) 所示, 可以看出信号频率在一个周期内的线性变化范围为 $8.8 \sim 9.2 \text{ GHz}$, 线性度为 2.27% , 具有良好的线性度。该线性输出信号经 20 m 延时光纤后的 3.96 MHz 延时自外差拍频信号的相位噪声测量结果如图 5(c) 所示, 10 kHz 频偏处的相位噪声为 -136 dBc/Hz , 这证明基于环形谐振 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器的线性扫频输出信号具有优越的相位噪声性能。

4 结 论

研究建立了 FDML OEO 开环增益、可调滤波器半波带宽、扫频输出范围与傅里叶域锁模匹配精度之间的关系, 以及失谐情况对产生的线性扫频信号质量的影响, 利用基于环形谐振可调 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器实验系统进行实验, 发现: 快速可调谐滤波器的半波带宽越大, 开环增益越大, 对傅里叶域锁模的匹配精度要求越低; 失谐情况越严重, FDML OEO 产生射频信号的最大扫频范围将越小。最终, 基于环形谐振可调 RF 滤波器的低相噪傅里叶锁模光电振荡器, 在 3 dB 开环增益、可调谐滤波器 3 dB 带宽不大于 10 MHz、锁模匹配精度优于 $\pm 2 \text{ Hz}$ 的情况下, 实现了 $8.8 \sim 9.2 \text{ GHz}$ 的线性扫频信号的产生, 3.96 MHz 延时自外差拍频信号在 10 kHz 频偏处的相位噪声为 -136 dBc/Hz , 具有优越的相位噪声性能。本文关于 FDML OEO 锁模匹配精度的分析对 FDML OEO 技术的发展具有重要的理论指导意义。宽带低相噪傅里叶锁模光电振荡器在现代先进雷达、雷达电子战、光载无线通信等领域具有广泛的应用前景。

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] 毛新丹, 于晋龙, 王菊, 等. 基于微波锁模的超低噪声微波频率梳的产生 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0514002.
Mao X D, Yu J L, Wang J, et al. Generation of ultra-low noise microwave frequency comb based on microwave mode locking technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0514002.
- [3] Hao T F, Tang J, Li W, et al. Harmonically Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(6): 427-430.
- [4] Zhu S, Fan X J, Xu B R, et al. Polarization manipulated Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5270-5277.
- [5] Wang Y L, Li X, Zhang J, et al. Spurious level and phase noise improved Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator based on a self-injection-locking technique [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7535-7543.
- [6] Hao T F, Liu Y Z, Tang J, et al. Recent advances in optoelectronic oscillators [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(4): 044001.
- [7] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier Domain Mode Locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3225-3237.
- [8] Hao T, Cen Q Z, Dai Y, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1839.
- [9] Zeng Z, Zhang L J, Zhang Y W, et al. Frequency-definable linearly chirped microwave waveform generation by a Fourier domain mode locking optoelectronic oscillator based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13861-13870.
- [10] Hao P, Lu H, Han R X, et al. Fourier domain mode-locked opto-electronic oscillator with a diode-tuned bandpass filter [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23454-23466.
- [11] Hao T F, Tang J, Shi N N, et al. Dual-chirp Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 1912-1915.
- [12] Zhang H, Zhang F Z, Pan S L, et al. Photonic generation of linearly chirped microwave waveforms with tunable parameters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(17): 1037-1040.
- [13] Li Y N, Hao T F, Li G Z, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signals based on Fourier domain mode locking [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(9): 433-436.
- [14] 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.
- [15] Zhang X P, Zeng H N, Yang J Y, et al. Novel RF-source-free reconfigurable microwave photonic radar [J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13650-13661.
- [16] Hao T, Tang J, Shi N, et al. Multiple-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator operating around oscillation threshold [J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3062-3065.
- [17] 韦达, 冯亭, 延凤平, 等. 傅里叶域锁模扫频光纤激光器研究方法: 以掺铒光纤激光器为例 [J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601003.
Wei D, Feng T, Yan F P, et al. Frequency-swept fiber laser based on Fourier-domain mode-locking: a case study on erbium-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601003.
- [18] 岑启壮. 基于光子技术的宽带射频信号产生研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 63-66.
Cen Q Z. Research on broadband radio-frequency signal generation based on photon technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019: 63-66.
- [19] Huber R, Wojtkowski M, Taira K, et al. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles [J]. Optics Express, 2005, 13(9): 3513-3528.
- [20] Melzer M, Starzer F, Jäger H, et al. On-chip delay line for extraction of decorrelated phase noise in FMCW radar transceiver MMICs [C] // Proceedings of the 2015 Austrian Workshop on Microelectronics, September 28, 2015, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 2015: 31-35.
- [21] 韩如霞. 基于环形谐振微波滤波器的傅里叶域锁模可调谐光电振荡器 [D]. 保定: 河北大学, 2020: 16-19.
Han R X. Fourier mode-locked tunable optoelectronic oscillator based on ring microwave filter [D]. Baoding: Hebei University, 2020: 16-19.
- [22] Behroozpour B, Sandborn P A M, Wu M C, et al. Lidar system architectures and circuits [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 135-142.