物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

基于光学-微波同步的低噪声微波产生方法

王凯 林百科 宋有建 孟飞 林弋戈 曹士英 胡明列 方占军

Low-noise microwave generation based on optical-microwave synchronization

Wang Kai Lin Bai-Ke Song You-Jian Meng Fei Lin Yi-Ge Cao Shi-Ying Hu Ming-Lie Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 044204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211253
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20211253
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生
Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb
物理学报. 2021, 70(13): 134204 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925

超稳光生微波源研究进展
Progresses of ultrastable optical-cavity-based microwave source
物理学报. 2018, 67(16): 160602 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180751

基于1085 km实地光纤链路的双波长光纤时间同步研究
High-precision dual-wavelength time transfer via1085-km telecommunication fiber link
物理学报. 2021, 70(7): 070702 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201277

极紫外飞秒光学频率梳的产生与研究进展
Generation and research progress of femtosecond optical frequency combs in extreme ultraviolet
物理学报. 2020, 69(22): 224203 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200851

基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生
Tunable microwave frequency comb generation based on double-loop mixing-frequency optoelectronic oscillator
物理学报. 2018, 67(23): 238401 https://doi.org/10.7498/aps.67.20181582

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳
Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser
物理学报. 2018, 67(9): 094207 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172503

基于光学-微波同步的低噪声微波产生方法*

王凯[1)] 林百科[2)†] 宋有建[1)] 孟飞[2)] 林弋戈[2)]
曹士英[2)] 胡明列[1)] 方占军[2)]

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

2) (中国计量科学研究院时间频率计量研究所光学频率标准实验室, 北京 100029)

(2021 年 7 月 5 日收到; 2021 年 10 月 23 日收到修改稿)

低噪声微波在冷原子光钟、光子雷达、大科学装置远程同步等领域具有重要的应用价值. 本文介绍了一种基于光学-微波相位探测技术的低噪声微波产生方案, 利用光纤环路光学-微波鉴相器, 将超稳激光的频率稳定度相干传递至介质振荡器. 实验采用梳齿相位参考至超稳激光的窄线宽掺铒光纤飞秒光学频率梳, 结合光纤环路光学-微波鉴相器和精密锁相装置, 将 7 GHz 介质振荡器同步至光频梳重复频率的高次谐波, 同步后的光脉冲序列与微波信号的剩余相位噪声为–100 dBc/Hz@1 Hz, 定时抖动为 8.6 fs [1 Hz—1.5 MHz]; 通过搭建两套低噪声微波产生系统, 测得 7 GHz 微波的剩余相位噪声为–90 dBc/Hz@1 Hz, 对应的频率稳定度为 4.8×10^{-15}@1 s. 该研究结果对基于光学相干分频的低噪声微波产生提供了一种新思路.

关键词: 超稳激光, 飞秒光学频率梳, 低噪声微波, 时间同步

PACS: 42.62.Eh, 43.60.Hj, 07.57.Hm, 06.30.Ft **DOI**: 10.7498/aps.71.20211253

1 引 言

低噪声微波信号被广泛应用于各类科学研究和工程实践领域, 包括任意波形产生[1]、原子频率标准[2]、大科学装置的远程同步[3]以及长基线干涉测量[4]等. 现阶段, 低噪声微波主要有 3 种产生方式, 一是基于石英晶体振荡器的频率综合技术[5]; 二是基于蓝宝石谐振腔的低温蓝宝石振荡器(CSO)[6]; 三是基于微波光子学技术的光电振荡器(OEO)[7]. 3 种方式各有缺陷, 经频率综合生成的微波的相位噪声随倍增系数呈对数增长; 低温蓝宝石振荡器具有极高的短期频率稳定度[8], 但此类装置多工作在实验室环境, 不仅结构复杂, 而且维护成本高昂; 光电振荡器虽可调谐性好, 但仅在高偏置频率处具有较低的相位噪声. 如何让信号在宽傅里叶频率范围内保持低噪声特性, 是当前微波领域的研究热点之一.

光学频率梳的出现为低噪声微波的产生拓展了新思路. 2005 年, NIST 的 Bartels 等[9]展示了一种基于超稳激光和光学频率梳生成高质量微波的方案: 锁定到高 Q 值光学参考腔上的连续光具有极高的短期频率稳定度, 而相位参考到此类超稳激光的光学频率梳具有把频率稳定度从光频域传递到微波域的能力, 对光学频率梳的光脉冲序列进行光电探测, 将获得包含重复频率及其高次谐波的射频谱, 选择合适的带通滤波器可以获得任意谐波频率, 并且该频率信号将具有超稳激光的频率稳定度. 该研究组利用上述方案最终得到了稳定度为 3.5×10^{-15}@1 s, 剩余相位噪声为–98 dBc/Hz@1 Hz 的 10 GHz 微波信号.

虽然经过多年发展, 光学分频方案已经逐渐趋

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304404) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linbk@nim.ac.cn

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

于成熟, 并且获得了许多成果[10,11], 但该技术尚未发挥其全部潜力, 究其原因, 光电探测难以精确还原亚皮秒、高峰值功率的光脉冲序列包含的关键信息. 光电探测过程引入的任何噪声均会降低原始信号的完整性, 这些噪声包括由光束指向和振幅波动引入的幅度-相位转换噪声[12,13]、光电二极管的饱和行为和脉冲畸变效应导致生成的电脉冲信噪比下降[14]、由电阻元件热扰动引起的热噪声、由入射光子随机性引起的散粒噪声. 优化光电探测过程对于从光频梳中提取低噪声的频率信号至关重要, 最根本的措施是发展高功率、高线性的光电探测器, 提升探测器的输入光功率以抑制热噪声和散粒噪声; 其次是增大脉冲重复频率, 从而降低脉冲峰值功率防止探测器快速饱和, 同时提升目标频率的信噪比, 实现重复频率倍增的主要手段包括采用级联的马赫-增德尔干涉仪 (MZI)[15], 基于 F-P 腔的光学模式滤波[16] 等; 对于幅度-相位转换噪声, 抑制手段包括基于声光调制器的光功率稳定技术[17], 基于马赫-增德尔调制器 (MZM) 的下变频技术[18,19] 等. 虽然上述手段能在一定程度上抑制光电转换引入的过量相位噪声, 但性能优良的改进型单行载流子光电二极管 (MUTC-PD)[20,21] 等关键器件目前仍依赖进口, 重复频率倍增技术也存在相当的复杂性, 种种因素制约了这项低噪声微波产生技术的自主、可控水平.

本文介绍了一种基于光纤环路光学-微波鉴相器 (FLOM-PD) 的低噪声微波产生方法, 该方法通过测量窄线宽光学频率梳的光脉冲中心与介质振荡器 (DRO) 输出的微波信号过零点的相对相位误差, 利用高速伺服控制器反馈控制 DRO 的输出频率, 实现微波与光学频率梳高精度定时同步, 完成频率稳定度从光频域到微波域的相干传递. 实验采用中国计量科学研究院光学频率标准实验室自主研制的窄线宽飞秒光学频率梳系统作为参考源, 该光频梳梳齿频率稳定度为 5.7×10^{-15}@1 s, 线宽为 20 Hz. 利用 FLOM-PD 实现 7 GHz 的 DRO 与光频梳重复频率的 35 次谐波同步, 同步后光学-微波剩余相位噪声为–100 dBc/Hz@1 Hz, 环外定时抖动为 8.6 fs[1 Hz—1.5 MHz]. 为准确评估微波噪声水平, 搭建了两套基于窄线宽光学频率梳和 FLOM-PD 低噪声微波产生系统, 测试结果表明, 7 GHz 微波在 1 Hz 偏置频率处剩余相位噪声为 –90 dBc/Hz, 频率稳定度为 4.8×10^{-15}@1 s. 本研究为基于光学-微波同步方案从光学频率梳中提取低噪声微波提供了理论和实验论据.

2 FLOM-PD 的基本原理

韩国科学技术院 (KAIST) 的 Kim 研究小组[22] 在 2012 年首次提出 FLOM-PD 的概念, 并基于 FLOM-PD 实现了锁模激光器与介质振荡器亚飞秒量级的定时同步. 其后, 英国国家物理实验室 (NPL)[23]、北京大学等机构也相继开展了光学-微波相位探测技术的研究, 在时间频率传递[24]、微位移测量[25] 以及光纤应变传感[26] 等多方向取得丰富的研究成果.

FLOM-PD 的原理如图 1 所示, 该装置的核心是保偏光纤 Sagnac 环, 环内放置有电光相位调制器和非互易性相位偏置单元. 锁模激光器输出的以 $T_{\rm rep}$ 为周期的脉冲序列, 先后经过光纤环形器和 2 × 2 的 3 dB 光纤耦合器, 被分为两路强度相等且存在固定相位关系的子脉冲序列, 分别沿 Sagnac 环路的顺时针和逆时针方向传输. 其中, 沿顺时针方向传输的子脉冲经过相位调制器时, 相位受到周期为 $T_{\rm RF}$ 的电场调控, 而后经过非互易性相位偏置单元, 与逆时针方向传输的脉冲序列在光纤耦合器内产生干涉. 由于相位调制器的特殊设计, 沿逆时针方向传输的脉冲在经过相位调制器时不会受到调制电场的作用.

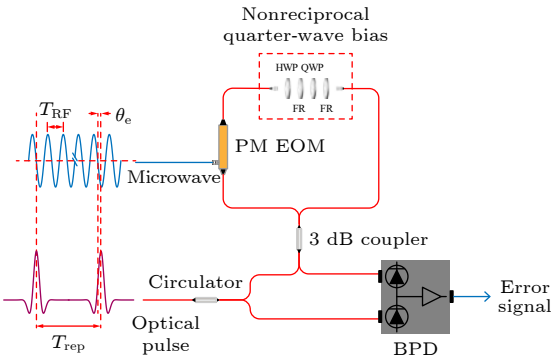

图 1 FLOM-PD 原理图. 其中, Circulator 为保偏光纤环形器, PM EOM 为保偏光纤电光调制器, QWP 为 1/4 波片, FR 为法拉第旋光镜, HWP 为 1/2 波片, 3 dB coupler 为 2 × 2 的 3 dB 保偏光纤耦合器, BPD 为平衡光电探测器

Fig. 1. Schematic diagram of FLOM-PD. Circulator represents polarization-maintaining fiber circulator; PM EOM represents polarization-maintainingelectro-optic modulator; QWP represents quarter-wave plates; FR represents faraday rotators; HWP represents half-wave plate; 3 dB coupler represents 2 × 2 3 dB polarization-maintaining fiber coupler; BPD represents balanced photodetector.

若不考虑环路损耗引起的光强度变化, 从光纤耦合器输出的两路干涉光的光功率可分别表示为

$$P_2 = P_{\rm avg}\cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right), \tag{1}$$

$$P_2 = P_{\rm avg}\sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right), \tag{2}$$

其中 $P_{\rm avg}$ 代表入射光平均功率, $\Delta\Phi$ 代表对向传输的光脉冲到达 3 dB 光纤耦合器时的相位差. 为了提升鉴相灵敏度, 按照图 1 虚线框内的结构搭建非互易性固定相位偏置单元, 使 Sagnac 环内对向传输的光脉冲分别经过 1/4 波片的快轴和慢轴, 从而向两束光引入 $\pi/2$ 的相位差, 此时平衡探测器的输出可近似表示为

$$U_{\rm out} = GRP_{\rm avg}\cos\left(\Phi_0\sin\theta_{\rm e} + \frac{\pi}{2}\right), \tag{3}$$

其中 G 和 R 分别代表平衡探测器的跨阻增益和响应率, Φ_0 表示相位调制器的调制深度, $\theta_{\rm e}$ 表征光脉冲中心与微波信号过零点位置的相位差. 当微波频率与锁模激光器重复频率的 N 次谐波接近时, 平衡探测器的输出可进一步简化为

$$U_{\rm out} = GRP_{\rm avg}\Phi_0\theta_{\rm e}, \tag{4}$$

对应的鉴相灵敏度 $K_{\rm d}$ 为

$$K_{\rm d} = \frac{U_{\rm out}}{\theta_{\rm e}} = GRP_{\rm avg}\Phi_0. \tag{5}$$

3 实验装置

3.1 窄线宽光学频率梳

本实验采用中国计量科学研究院光学频率标准实验室自主研制的窄线宽光学频率梳作为参考光源, 系统如图 2 所示. 图 2(a) 表示超稳激光系统, 两台低噪声集成外腔半导体激光器 (RIO, ORION 1550 nm laser module) 分别输出波长为 1542.18 nm 和 1563.47 nm 的连续光, 采用 PDH 方法, 锁定到同一个高 Q 值光学参考腔上. 参考腔购买自 SLS (Stable Laser System) 公司, 长度为 50 mm, 精细度 $> 5\times10^5$, 为立方体型, 腔内使用单层控温结构, 零膨胀温度为 (59 ± 1) ℃, 对应的真空度为 5×10^{-7} Pa, 整个系统安放在一个被动隔振平台上, 并置于隔声箱内.

光学频率梳的相位锁定原理如图 2(b) 所示. 系统包含自制的掺 Er 光纤飞秒激光器, 采用非线性偏振旋转 (NPR) 技术实现自启动锁模, 重复频率约为 200 MHz, 可依靠腔内的电动位移台和压电位移器 (PZT) 分别实现大范围 (1—2 MHz) 和精细 (1—2 kHz) 调节 [27]. 实验建立两套锁相环路来精密控制光学频率梳的两个自由度 [28]. 锁相环 Ⅰ 用于光频梳与 1542 nm 超稳激光的锁定, 超稳激光与光频梳拍频产生误差信号, 经 PID 控制器 (Vescent, D2-125) 反馈腔外声光调制器 (AOM), 用于快速伺服光频梳的载波包络偏移频率, 同时通过控制器辅助输出端口, 缓慢调控激光器腔内 PZT 驱动电压, 抑制重复频率的漂移; 锁相环 Ⅱ 用于光频梳与 1563 nm 超稳激光的锁定, 结构与锁相环 Ⅰ 大致相同, 拍频形成的误差信号经高速伺服控制器 (New Focus, LB1005) 反馈至泵浦激光的驱动电流, 进而控制光频梳的重复频率和载波包络偏移频率, 最终实现光频梳相位稳定.

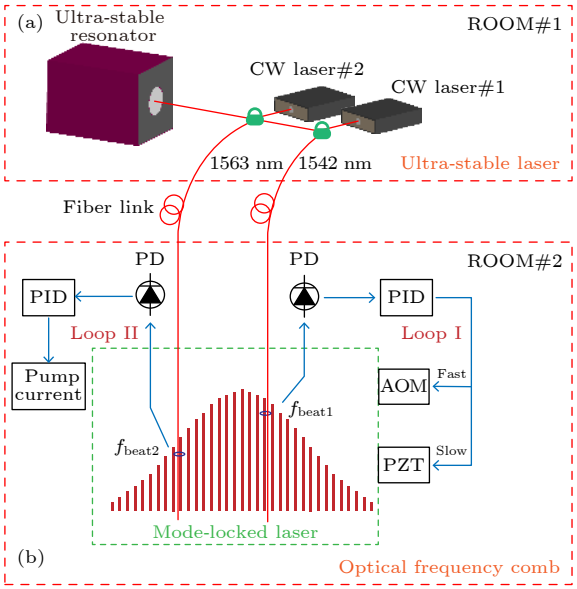

图 2 窄线宽光学频率梳原理图 (a) 超稳激光系统; (b) 飞秒光学频率梳. 其中, CW laser 为连续激光, PID 为比例-积分-微分控制器, PD 为光电探测器, AOM 为声光调制器, PZT 为压电位移器

Fig. 2. Schematic diagram ofnarrowlinewidth optical frequency comb: (a) Ultra-stable laser system; (b) optical frequency comb. CW laser represents continuous-wave laser, PID represents proportional-integral-differentialcontroller, PD represents photodetector, AOM represents acousto-optical modulator, PZT represents piezoelectric transducer.

3.2 基于 FLOM-PD 的光学-微波同步系统

采用 FLOM-PD 和光学频率梳的低噪声微波生成装置如图 3(a) 所示.

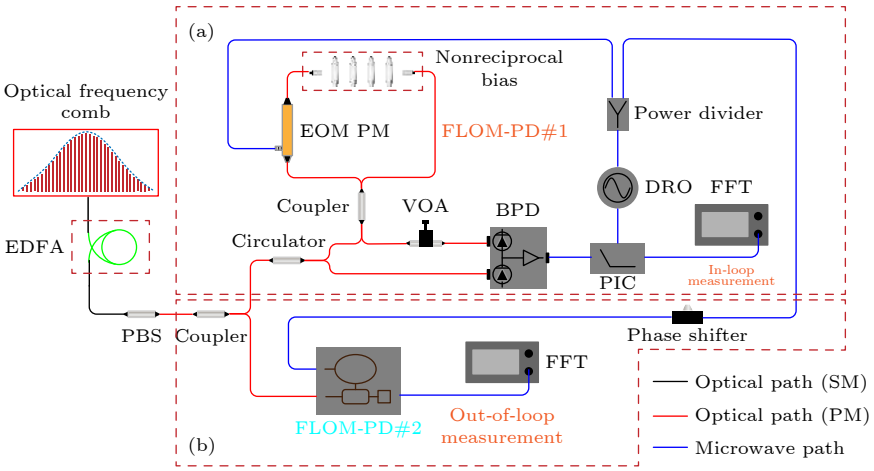

图 3 基于 FLOM-PD 和光学频率梳的光学-微波同步方案 (a) 光学-微波同步装置; (b) 环外相位噪声测量装置. 其中, EDFA 为掺铒光纤放大器, PBS 为偏振光束分束器, Coupler 为保偏光纤耦合器, Circulator 为保偏光纤环形器, VOA 为可调光学衰减器, BPD 为平衡光电探测器, PIC 为比例积分控制器, DRO 为介质振荡器, Power divider 为微波功率分配器, FFT 为快速傅里叶变换分析仪

Fig. 3. Optical-microwave synchronization scheme based on FLOM-PD and optical frequency comb. (a) Optical-microwave synchronization setup; (b) out-of-loop phase noise measurement setup. EDFA represents erbium-doped fiber amplifiers, PBS represents polarization beam splitter, Coupler represents polarization-maintaining fiber coupler, Circulator represents polarization-maintaining-fiber circulator, VOA represents variable optical attenuators, BPD represents balanced photodetector, PIC represents proportional-integral controller, DRO represents dielectric resonator oscillator, Power divider represents microwave power divider, FFT represents fast Fourier transform analyzer.

图示装置围绕 FLOM-PD 构建锁相环, 实现微波与光脉冲的紧密锁相. 实验使用单个光纤器件替代传统空间光结构的非互易性 $\pi/2$ 相位偏置单元, 在提升系统稳定性的同时使结构更为紧凑; 电光相位调制器 (EOSpace, PM-DSE-10-PFA-PFA-LV) 由 $LiNbO_3$ 晶体制成, 调制带宽 $>$ 10 GHz, 1 GHz 处的半波电压小于 4 V. 实验还引入可调光学衰减器 (VOA) 用于平衡光纤环形器造成的插入损耗, 抑制同步过程中的幅度-相位转换噪声.

实验使用的光学频率梳重复频率为 199.988 MHz, 最大输出功率为 2.7 mW, 经 EDFA 放大, 再由偏振光束分束器将其转换为线偏振光, 分束后作用于 FLOM-PD#1 的光功率约为 4.5 mW, 调节 VOA 使进入平衡探测器 (Thorlabs, PDB-450C) 的光功率保持一致, 约为 550 μW, 环路损耗为 9.1 dB. 介质振荡器 (Synchronization Technology, DRO-7000) 中心频率为 7 GHz, 输出功率为 16 dBm, 直接作用于相位调制器的功率为 10 dBm. FLOM-PD 搭建完成后, 使用示波器采集平衡探测器输出的误差信号, 计算得到鉴相器的鉴相灵敏度为 2.34 V/rad, 这是众多电子类鉴相器不具有的鉴相精度.

实验搭建了第二套 FLOM-PD 用于评估光学-微波同步性能, 实验原理如图 3(b) 所示, 锁相环保持闭合状态, 将介质振荡器的部分输出和光频梳部分输出作为 FLOM-PD#2 的输入, 对 FLOM-PD#2 的输出信号进行表征. 此外, 由于两套 FLOM-PD 的光纤路径和同轴电缆线无法做到完全等长, 锁相环闭合后作用于两个相位调制器的微波信号之间存在一个固定的相位差, 因此引入机械移相器 (Phase shifter) 对调制信号的相位进行精细调节, 从而移除 FLOM-PD#2 误差信号的附加直流偏置.

3.3 低噪声微波的性能评估

为准确评估该光学-微波同步装置产生微波信号的频率稳定度, 搭建了两套结构相似的低噪声微波产生装置, 并调节光频梳的重复频率使其具有微小的频差, 而后以下混频的方式获得 7 GHz 信号的频率稳定度. 实验装置如图 4 所示.

实验用于比对的第二套光学频率梳, 锁定方案与 3.1 节所述结构完全一致, 与第一套光学频率同时锁定在相同的两个超稳激光上, Comb#2 锁定后重复频率为 199.985 MHz, 因而混频后的信号频率约为 96 kHz. 微波信号的相位噪声可通过调节光频梳重复频率使其保持一致, 使用 FFT 频谱分析仪测量混频信号获得.

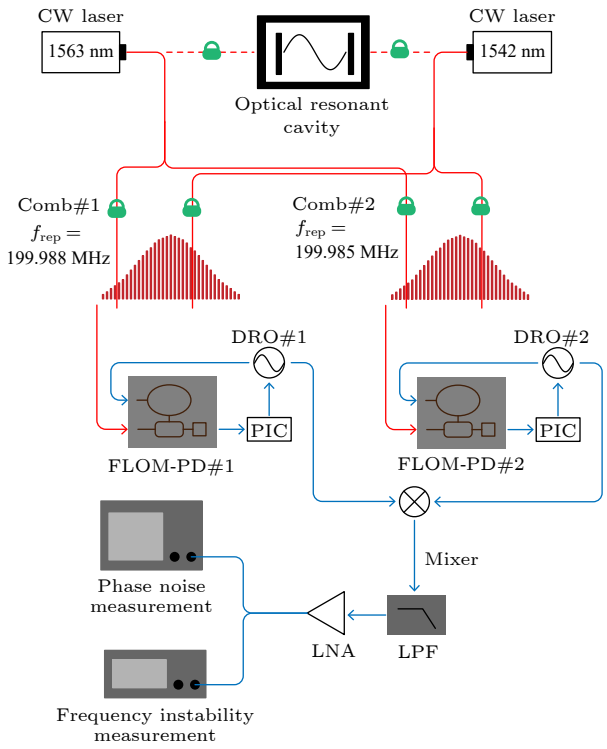

图 4 微波性能表征方案. 其中, CW Laser 为连续激光, DRO 为介质振荡器, PIC 为比例积分控制器, LPF 为低通滤波器, LNA 为低噪声放大器.

Fig. 4. Microwave performance characterization setup. CW laser represents continuous-wave laser, DRO represents dielectric resonator oscillator, PIC represents proportional-integral controller, LPF represents lowpass filter, LNA represents low noise amplifier.

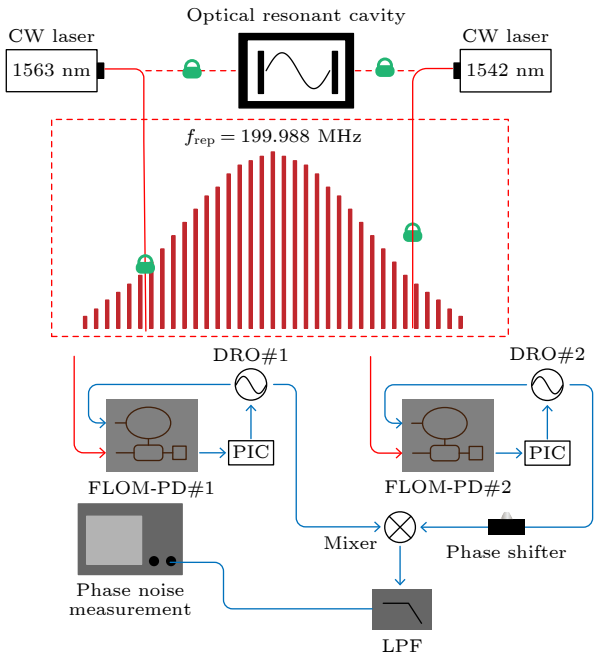

图 5 FLOM-PD 及锁相系统的噪声测量方案.其中, CW Laser 为连续激光, DRO 为介质振荡器, PIC 为比例积分控制器, LPF 为低通滤波器, Phase shifter 为微波相移器

Fig. 5. Phase noise characterization setup of FLOM-PDand-phase-lock system. CW laser represents continuous-wave laser, DRO represents dielectric resonator oscillator, PIC represents proportional-integral controller, LPF represents lowpass filter, Phase shifter represents microwave phase shifter.

为明晰光学-微波同步系统中由 FLOM-PD 和锁相环引入的噪声, 将两个独立的介质振荡器通过 FLOM-PD 锁定到同一个光学频率梳, 并对两个 7 GHz 微波的混频信号相位噪声进行测量, 原理如图 5 所示.

4 实验结果

实验测量了相位锁定到超稳激光的光学频率梳梳齿的绝对线宽和频率稳定度. 通过引入一台商用的单频窄线宽连续激光器 (Stable laser systems, 标称线宽为 1 Hz, 中心波长为 1542.38 nm), 与光学频率梳邻近梳齿拍频, 利用频谱仪 (Rohde & Schwarz, FSH8) 和频率计数器 (Agilent 53220A) 分别测量拍频信号的线宽和频率值, 从而获得梳齿线宽和 Allan 偏差. 测量结果表明, 光频梳梳齿频率稳定度为 5.7×10^{-15}@1 s, 线宽为 20 Hz, 满足后续实验需求. 对于实际的窄线宽光频梳系统, 超稳激光与光学频率梳系统分处两个实验室, 有近 20 m 的空间距离, 系统之间采用保偏光纤进行连接, 但未对传输链路噪声进行补偿, 若后续将两个系统置于同一个隔振平台上, 有望获得更高的频率稳定度指标.

光学-微波同步系统的锁相环闭合后, 利用信号源分析仪 (Agilent E5052 B) 测量了 FLOM-PD 为核心的锁相环的环内及环外相位噪声, 测量结果以 7 GHz 载波的形式绘制, 如图 6 所示. 需要说明的是, 信号源分析仪的测量结果是以 dBV/$\sqrt{\text{Hz}}$ 为单位的电压噪声谱密度, 需要通过除以鉴相灵敏度 (单位为 V/rad) 才能转换成以 rad^2/Hz 或 dBc/Hz 为单位的相位噪声.

由图 6 可知, 基于光学-微波同步系统锁相带宽为 1.5 MHz. 环内相位噪声 (图 6(a) 蓝色线), 即锁相环闭合后 FLOM-PD#1 平衡探测器输出信号的相位噪声, 在 1 Hz 偏频处为–121 dBc/Hz, 锁定带宽内 [1 Hz—1.5 MHz] 的定时抖动为 3.52 fs, 表明该锁相环具有较好的跟踪能力. 环外相位噪声

(图 6(a) 绿色线), 即锁相环闭合后 FLOM-PD#2 平衡探测器输出信号的相位噪声, 在 1 Hz 偏频处为–100 dBc/Hz, 定时抖动为 8.6 fs[1 Hz—1.5 MHz], 表明基于 FLOM-PD 的锁相系统可实现光与微波飞秒量级的定时同步. 图 6(a) 蓝色线代表 FLOM-PD 的背景噪声, 表示在无调制输入时 FLOM-PD 输出信号的单边带噪声功率谱密度, 在测量区间 [1 Hz—10 MHz] 内的定时抖动为 2.43 fs, 根据输入参数计算得到平衡探测器散粒噪声 (图 6(a) 橙色线) 为–153.7 dBc/Hz@1 Hz, 在整个测量区间 [1 Hz—10 MHz] 引入的定时抖动为 2.1 fs, 因此实验搭建的 FLOM-PD 背景噪声受限于平衡探测器的散粒噪声.

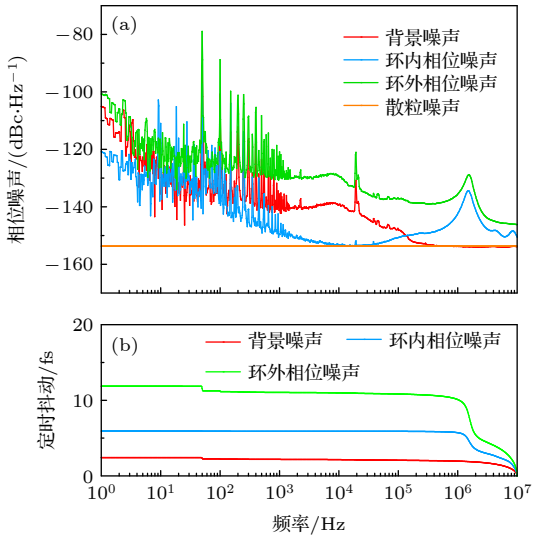

图 6 相位噪声和定时抖动测量结果 (a) 相位噪声; (b) 定时抖动

Fig. 6. Phase noise and timing jitter measurement results: (a) Phase noise; (b) RMS time jitter.

在微波信号的频率稳定度评估实验中, 96 kHz 的混频信号经滤波放大后输出功率为 6 dBm, 利用频率计数器 (Keysight 53220A) 对其计数, 结果如图 7 所示.

图 7(a) 表示混频信号在 6000 s 内频率随时间变化的结果, 两个连续测量点间抖动量仅在几十微赫兹量级, 根据测量结果计算 7 GHz 信号的 Allan 偏差, 并将计算结果除以 $\sqrt{2}$ 用以表征单个系统生成微波的频率稳定度, 结果如图 7(b) 所示, 7 GHz 信号在 1 s 的频率稳定度为 4.8×10^{-15}, 并且由于同源比对关系, 两套系统的噪声具有关联性, 频率稳定度随时间逐渐降低, 在 256 s 降至 3.3×10^{-16}.

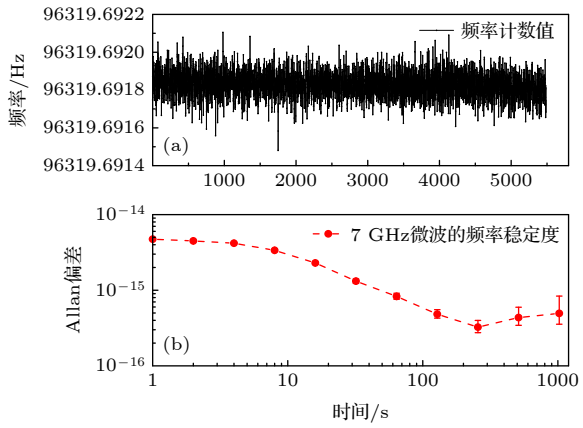

图 7 信号频率为 7 GHz 的抖动与频率稳定度 (a) 频率抖动; (b) 频率稳定度

Fig. 7. Frequency jitter and Allan deviation of 7 GHz microwave: (a) Frequency jitter; (b) frequency stability.

图 8 展示了 3.3 小节所述的相位噪声测量结果. 其中粉红色线代表自由运转的 DRO 的相位噪声, 在测量区间内近似以–25 dBc/dec 的斜率下降, 即介质振荡器受白频率噪声和闪烁噪声的影响. 红色线表示由 FLOM-PD 和锁相系统引入的噪声, 在 1 Hz 偏频处为–90 dBc/Hz, 测量区间 [1 Hz—10 MHz] 内的定时抖动为 14 fs, 在 1—100 Hz 区间内近似以–10 dB/dec 斜率下降, 因此该频段测量结果受限于测量系统 (混频器等电子器件). 黑色线表示包括由光频梳和 FLOM-PD 及锁相系统在内引入的噪声, 相位噪声为–90 dBc/Hz@1 Hz, 引入的定时抖动为 114 fs[1 Hz—10 MHz], 该相噪曲线在 100 Hz—1.5 MHz 区间内有一个最高约 35 dB 的凸起, 引入定时抖动为 102 fs. 由于黑色线代表 FLOM-PD 和锁相系统引入的相位噪声, 红色线则代表光频梳与 FLOM-PD 及锁相系统引入的相位噪声, 两者的区别在于是否包含光频梳的噪声, 因而 100 Hz—1.5 MHz 的凸起完全源于光频梳引入, 且占据整个噪声的 89%, 所以黑色线所示的噪声几乎完全受限于光频梳, 该现象的形成原因为: 一是微波的频率稳定度源于光频梳的重复频率稳定度, 而实验采用的光学频率梳缺少对重复频率进行宽带伺服和控制的机制, 换言之重复频率的稳定度未完全复制超稳激光的频率稳定度; 二是光学频率梳系统未置于完全封闭和隔振的环境内, 环境扰动 (声音、振动等) 均会对光频梳锁定状态产生影响. 但即使如此, 微波的频率稳定度也能达到 4.8×10^{-15}@1 s 的水平, 1 Hz 处相位噪声低至

–90 dBc/Hz, 该结果与采用多级马赫-增德尔干涉仪和高性能光电探测器的光学分频方案[27, 29]相比, 近载波频率处的相位噪声指标基本一致, 频率稳定度指标略胜一筹, 表明实验搭建的系统完全具有从窄线宽光频梳中提取低相位噪声和高频率稳定度微波信号的能力, 并且本文所采用的光学-微波同步方案, 相比直接探测方案, 无需高功率、高线性的光电探测器和重复频率倍增装置, 成本更低, 系统复杂程度也更低.

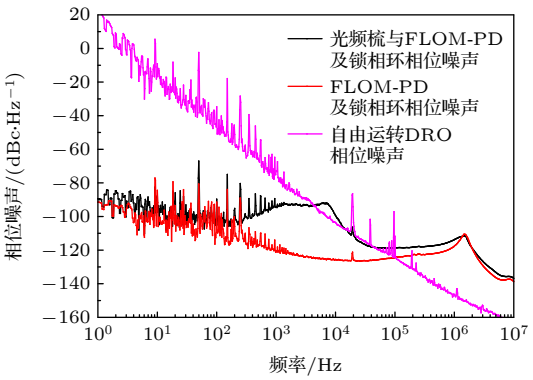

图 8 7 GHz 载波的单边带相位噪声

Fig. 8. SSB Phase noise of 7 GHz carrier.

5 结 论

实验展示了基于窄线宽光学频率梳和 FLOM-PD 的低噪声微波产生方案. 利用全光纤光学-微波鉴相器实现了飞秒光学频率梳与介质振荡器的飞秒级定时同步, 环外定时抖动仅为 8.6 fs[1 Hz—1.5 MHz], 所产生的 7 GHz 微波信号在 1 Hz 偏频处的剩余相位噪声约为–90 dBc/Hz, 频率稳定度为 4.8×10^{-15}@1 s, 表明光学-微波同步方案在低噪声微波产生应用中拥有卓越的性能. 与传统的直接光电探测方案相比, 本实验采用的光学-微波同步方法, 结构简单, 且兼具优异的相位噪声和频率稳定度指标, 是一种极其出色的频率稳定度相干传递手段.

参考文献

[1] Capmany J, Novak D 2007 *Nat. Photon.* **1** 319

[2] Millo J, Abgrall M, Lours M, English E M L, Jiang H, Guéna J, Clairon A, Tobar M E, Bize S, Le Coq Y, Santarelli G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 141105

[3] Kim J, Cox J A, Chen J, Kärtner F X 2008 *Nat. Photon.* **2** 733

[4] Doeleman S 2009 *Frequency Standards and Metrology-Proceedings of the 7th Symposium* (PacificGrove: World Scientific) p175

[5] Francois B, Calosso C E, Danet J M, Boudot R 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 094709

[6] Grop S, Bourgeois P Y, Boudot R, Kersalé Y, Rubiola E, Giordano V 2010 *Electron. Lett.* **46** 420

[7] Maleki L 2011 *Nat. Photon.* **5** 728

[8] Giordano V, Grop S, Fluhr C, Dubois B, KersaléY, Rubiola E 2015 *8th Symposium on Frequency Standards and Metrology* (Potsdam: IOP Publishing Ltd), p012030

[9] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, Wilpers G, Bergquist J C, Oskay W H, Hollberg L 2005 *Opt. Lett.* **30** 667

[10] Xie X, Bouchand R, Nicolodi D, Giunta M, Hänsel W, Lezius M, Joshi A, Datta S, Alexandre C, L Michel, Tremblin P, Santarelli G, Holzwarth R, Le Coq Y 2017 *Nat. Photon.* **11** 44

[11] Didier A, Millo J, Grop S, Dubois B, Bigler E, Rubiola E, Lacroûte C, Kersalé Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 3682

[12] Ivanov E N, Diddams S A, Hollberg L 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1059

[13] Ivanov E N, Diddams S A, Hollberg L 2005 *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* **52** 1068

[14] Wu K, Shum P P, Aditya S, Ouyang C, Wong J H, Lam H Q, Lee K E K 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 3622

[15] Haboucha A, Zhang W, Li T, Lours M, Luiten A N, Le Coq Y, Santarelli G 2011 *Opt. Lett.* **36** 3654

[16] Jiang H, Taylor J, Quinlan F, Fortier T, Diddams S A 2011 *IEEE Photonics J.* **3** 1004

[17] Nakamura T, Davila-Rodriguez J, Leopardi H, Sherman J A, Fortier T M, Xie X, Campbell J C, McGrew W F, Zhang X, Hassan Y S, Nicolodi D, Beloy K, Ludlow A D, Diddams S A, Quinlan F 2020 *Science* **368** 889

[18] Dai Y, Cen Q, Wang L, Zhou Y, Yin F, Dai J, Li J, Xu K 2015 *Opt. Express* **23** 31936

[19] Wang L, Dai Y, Zhou Y, Yin F, Dai J, Li J, Xu K 2015 *IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference* (Santa Barbara: IEEE) p40

[20] Chtioui M, Lelarge F, Enard A, Pommereau F, Carpentier D, Marceaux A, Dijk F, Achouche M 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24** 318

[21] Li J, Xiong B, Sun C, Miao D, Luo Y 2015 *Opt. Express* **23** 21615

[22] Jung K, Kim J. 2012 *Opt. Lett.* **37** 2958

[23] Lessing M, Margolis H S, Brown C T A, Gill P, Marra G 2013 *Opt. Express* **21** 27057

[24] Jung K, Shin J, Kang J, Hunziker S, Min C K, Kim J 2014 *Opt. Lett.* **39** 1577

[25] Lu X, Zhang S, Jeon C G, Kang C S, Kim J, Shi K 2018 *Opt. Lett.* **43** 1447

[26] Lu X, Zhang S, Chen X, Kwon D, Jeon C G, Zhang Z, Kim J, Shi K 2017 *Sci. Rep.* **7** 13305

[27] Cao S, Lin B, Yuan X, Fang Z 2020 *Opt. Commun.* **478** 126376

[28] Cui J, Lin B, Meng F, Cao S, Yang M, Lin Y, Song J, Hu M, Fang Z 2020 *Infrared Millim. W.* **39** 25 (in Chinese) [崔佳华, 林百科, 孟飞, 曹士英, 杨明哲, 林弋戈, 宋有建, 胡明列, 方占军 2020 红外与毫米波学报 **39** 25]

[29] Zobel J W, Giunta M, Goers A J, Schmid L R, Reeves J, Holzwarth R, Adles E J 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 1323

Low-noise microwave generation based on optical-microwave synchronization*

Wang Kai [1)] Lin Bai-Ke [2)†] Song You-Jian [1)] Meng Fei [2)] Lin Yi-Ge [2)]
Cao Shi-Ying [2)] Hu Ming-Lie [1)] Fang Zhan-Jun [2)]

1) (*Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

2) (*Laboratory of Optical Frequency Standard, Time and Frequency Metrology Division, National Institute of Metrology, Beijing* 100029, *China*)

(Received 5 July 2021; revised manuscript received 23 October 2021)

Abstract

Low-noise microwave signals are of vital importance in fields such as cold atomic optical clocks, photon radars, and remote synchronization at large facilities. Here, we report a compact all-optical-fiber method to generate a low noise microwave signal, in which the fiber loop optical-microwave phase detector is used to coherently transfer the frequency stability of the ultra-stable laser to the microwave. Combining a narrow linewidth optical frequency comb and a fiber loop optical-microwave phase discriminator, a tight phase-lock between 7 GHz dielectric oscillator and optical frequency comb is achieved, the remaining phase noise of the synchronized optical pulse sequence and the microwave signal is –100 dBc/Hz@1 Hz, and the timing jitter is 8.6 fs (1 Hz—1.5 MHz); by building two sets of low-noise microwave generation systems, the measured residual phase noise of the 7 GHz microwave is –90 dBc/Hz@1 Hz, and the corresponding frequency stability is 4.8×10^{-15}@1 s. These results provide a novel idea for generating the low-noise microwaves based on optical coherent frequency division.

Keywords: ultra-stable laser, optical frequency comb, low noise microwave signal, time synchronization

PACS: 42.62.Eh, 43.60.Hj, 07.57.Hm, 06.30.Ft **DOI:** 10.7498/aps.71.20211253

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grand No. 2017YFA0304404).

† Corresponding author. E-mail: linbk@nim.ac.cn