

## 基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

邵晓东 韩海年 魏志义

### Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

Shao Xiao-Dong Han Hai-Nian Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 134204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201925

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

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

#### 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>

#### 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>

#### 光频链接的双光梳气体吸收光谱测量

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement

物理学报. 2018, 67(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180150>

#### 基于非简并光学参量放大器产生光学频率梳纠缠态

Generation of continuous variable frequency comb entanglement based on nondegenerate optical parametric amplifier

物理学报. 2020, 69(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200107>

#### 光频梳频域干涉测距主要参数分析及一种改进的数据处理方法

Analysis of main parameters of spectral interferometry ranging using optical frequency comb and an improved data processing method

物理学报. 2019, 68(19): 190602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190836>

## 综述

## 基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生\*

邵晓东<sup>1)2)</sup> 韩海年<sup>1)†</sup> 魏志义<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

(2020 年 11 月 16 日收到; 2021 年 1 月 14 日收到修改稿)

低噪声的微波频率在雷达, 长基线干涉仪等领域有重要应用. 基于光学频率梳产生的微波信号的相位噪声在 1 Hz 频偏处低于 -100 dBc/Hz, 在高频 ( $> 100$  kHz) 处低于 -170 dBc/Hz, 是目前所有的微波频率产生技术中噪声最低的. 文章介绍了光学频率梳产生微波频率的基本原理, 对基于光梳产生的微波频率信号的各类噪声和抑制噪声的技术进行了分析和总结. 随后对低噪声的测量方法进行介绍, 并展示了几种典型的微波频率产生实验装置和结果. 随着光学频率梳和噪声抑制技术的不断提升, 基于光梳的极低噪声微波频率源将有更广泛的应用前景和应用领域.

**关键词:** 光学频率梳, 微波频率产生, 微波光子学, 相位噪声

**PACS:** 42.62.Eh, 42.55.-f, 06.20.-f, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201925

## 1 引言

2020 年是光学频率梳技术发明 20 周年, 20 年前光学频率梳被美国的 Hall 教授和德国的 Hansch 教授提出并实现<sup>[1-3]</sup>, 迄今已经在光频标及各类精密测量领域发挥着革命性的作用. 光梳的出现代替了传统的频率链, 成为了精确测量光学频率的重要工具; 在天文学领域, 高重复频率的光学频率梳用于校准天文光谱仪寻找地外行星<sup>[4]</sup>; 在光谱学领域, 双光梳光谱的发展使得分子光谱的测量速度和精度都得到了前所未有的提高<sup>[5]</sup>; 光学频率梳还应用于精密测距<sup>[6]</sup>、阿秒科学<sup>[7]</sup>等重要领域. 目前人们普遍认为, 光学频率梳将在基于光学原子钟<sup>[8]</sup>的下一代时间频率标准中发挥至关重要的作用. 作为精密的光学频率综合器, 光学频率梳能够将相位和频率信息从光学频率传递到微波频率. 除此之外, 光学频率梳结合高非线性光纤可以产生跨越倍频程

的光谱, 这使得光学频率梳可以将不同频率的原子钟联系起来, 实现不同原子钟之间的精确对比. 基于光学频率梳的时间频率传递技术则可以实现空间远距离频率标准的传递<sup>[9]</sup>. 因此, 光学频率梳作为频率综合器和传递频率标准的收发器, 将成为构建下一代时间频率标准系统及网络的核心部件.

另一方面, 低相位噪声的微波信号对于工程和科学应用都具有非凡的吸引力, 其主要应用包括雷达系统<sup>[10]</sup>, 喷泉钟的本振源改进<sup>[11]</sup>, 甚长基线干涉仪和大型设施的远程同步<sup>[12]</sup>等. 除了使用传统的晶体振荡器产生微波频率之外, 微波光子学的发展使得人们可以利用光子学方式产生低噪声微波频率信号, 其中包括光学延迟线振荡器, 回音壁模式参数振荡器<sup>[13]</sup>以及双模激光器外差<sup>[14]</sup>等. 而另外一种方法则是基于高 Q 值的光学腔和光学频率梳来产生极低噪声的微波频率信号<sup>[15-30]</sup>. 经过良好隔绝和温度控制的法布里-珀罗 (F-P) 光学腔在室温下 Q 值可以达到  $10^{11}$  量级, 空腔的平均波动在

\* 中国科学院战略重点研究计划 (批准号: XDA1502040404, XDB21010400) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hmhan@iphy.ac.cn

1 s 内小于 100 am<sup>[31,32]</sup>. 将一台连续激光器锁定到这样稳定的光学参考腔, 其线宽可以达到毫赫兹量级, 激光 1 s 的频率稳定性将达到  $10^{-16}$  量级<sup>[33]</sup>. 光学频率梳作为一个精密的光学频率分频器, 可以将连续激光器的频率稳定度传递到微波频率信号, 这使得微波频率信号也获得极高的频率稳定度. 除此之外, 光学频率梳将 (300—500) THz 的光学频率分频到 10 GHz, 分频因子一般为  $3.0 \times 10^4$ — $5.0 \times 10^4$  量级, 分频过程使得微波频率信号的相位噪声显著的降低, 相比于传统的室温晶体振荡器的相位噪声低 40 dB, 甚至优于低温蓝宝石振荡器<sup>[21]</sup>. 基于以上这些优点, 基于光梳的微波频率产生技术受到了科学和工程界的普遍重视. 本文将对基于光学频率梳的微波频率产生技术原理, 探测和噪声测量技术以及发展现状进行总结和展望.

## 2 基于光梳的微波频率产生原理

基于光学频率梳的低噪声的微波频率产生可以分为以下几个步骤: 首先, 利用 Pound-Drever-Hall(PDH) 稳频技术, 将一台连续激光器稳定到高精细度的 F-P 腔, 该连续激光的输出可以作为光学参考; 然后, 将光学频率梳的一个频率梳齿锁定到光学参考, 并稳定其载波包络相移 (CEO) 频率, 得到稳定的光梳; 最后, 用光电探测器 (PD) 探测光梳的输出激光, 就可以得到重复频率信号和重复频率的高次谐波信号; 再利用合适的滤波器滤出特定的谐波就可以得到低噪声的微波信号. 光学频率梳在微波频率产生的过程中作为光学频率分频器, 是整个装置的核心, 下面围绕光梳的锁定和分频过程, 详细阐述基于光梳的微波频率产生原理.

如图 1 所示, 锁模脉冲激光在时域上表现为一系列等时间间隔的脉冲, 时间间隔为脉冲在谐振腔

内循环一周的时间  $\tau = 1/f_{\text{rep}}$ , 其中  $f_{\text{rep}}$  是激光器的重复频率. 在频域上, 锁模激光表现为一系列等频率间隔的纵模频率梳, 纵模间隔等于激光器的重复频率  $f_{\text{rep}}$ , 因此频率稳定的锁模激光也被称为光学频率梳, 一系列纵模被称为光学频率梳的“梳齿”.

脉冲激光在谐振腔内传播时, 载波传播的相速度  $v_p$  和包络传播的群速度  $v_g$  不同, 因此脉冲的载波和包络之间会形成相位差. 脉冲在腔内循环一周后载波包络相移可以表示为  $\Delta\phi_{\text{ce}} = (1/v_g - 1/v_p)l_c\omega_c$ , 其中  $l_c$  表示激光往返一周的腔长,  $\omega_c$  表示载波频率. 在频域上, 载波包络相移对应的载波包络相移频率为  $f_{\text{ceo}} = (1/2\pi)f_{\text{rep}}\Delta\phi_{\text{ce}}$ , 它表示光学频率梳纵模模式相对于零频的整体偏移. 如图 1 的频域模型所示, 第  $N$  个光学纵模的频率可以表示为

$$f_N = Nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}, \quad (1)$$

其中,  $N$  为正整数, 一般为  $10^5$ — $10^6$ . 对于通常的光学频率梳, 重复频率  $f_{\text{rep}}$  和谐振腔的光学长度直接相关, 其典型值为 100 MHz—1 GHz. 载波包络相移频率  $f_{\text{ceo}}$  主要受到腔内色散的影响. 此外, 在光纤光学频率梳中, 当增益和脉冲参数发生变化时, 自相位调制效应、三阶色散、自陡峭、谱频移等效应也会改变载波包络相移, 从而影响  $f_{\text{ceo}}$  频率<sup>[34]</sup>.

通常情况下,  $f_{\text{rep}}$  频率和  $f_{\text{ceo}}$  频率都会由于外界扰动而抖动, 从而造成频率梳纵模间隔改变和频率梳的整体偏移. 由于  $f_{\text{rep}}$ ,  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_N$  三者存在式 (1) 的关系, 因此, 一般需要精确控制  $f_{\text{rep}}$ ,  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_N$  三个参数中的两个, 才能够得到稳定的光学频率梳. 实现光学频率梳稳定的方式有很多种, 最常用的有两种. 如图 2(a) 所示, 第一种方法是将  $f_{\text{rep}}$  和  $f_{\text{ceo}}$  信号直接和微波参考信号混频得到误差信号, 然后通过锁相环电路反馈控制光梳的制动器, 从而将光梳锁定到微波参考上; 图 2(b) 中的第二种方法是将  $f_{\text{ceo}}$  频率锁定到微波参考, 同时将光频域的一根梳齿  $f_N$  锁定到光学参考. 光学参考一般是一台锁定到 F-P 腔上的连续激光器, 或者进一步稳定到原子或离子吸收谱线上的光钟. 这两种方法都可以实现光学频率梳频率的稳定和梳齿线宽的压窄, 但是稳定后的梳齿频率的频率稳定度和梳齿线宽有数量级的差别. 在锁定之前, 钛宝石光梳和全固态光梳的梳齿线宽一般为几万赫兹到十万赫兹, 光纤光梳的梳齿线宽通常  $> 100$  kHz. 当采用第一种方法将重复频率信号和 CEO 信号都锁定

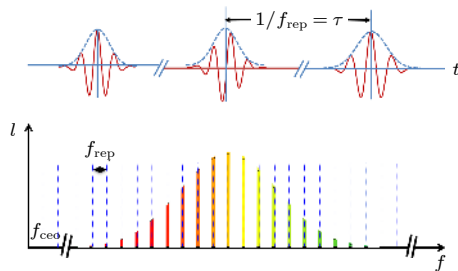


图 1 光学频率梳的时域和频域模型

Fig. 1. Time domain and frequency domain models of optical frequency comb.

到微波参考时, 重复频率信号  $f_{\text{rep}}$  和 CEO 信号  $f_{\text{ceo}}$  的线宽都会降低到毫赫兹量级, 但是由于  $f_N = Nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ ,  $N$  为  $10^5$ — $10^6$  之间的正整数, 光学频率梳齿线宽仍然在千赫兹量级, 光梳的频率稳定度约为  $10^{-11} \text{ s}^{-1}$  [35]. 如果采用第二种锁定方法将光学频率梳锁定到光学参考, 梳齿  $f_N$  可以获得与所参考的连续激光器相同的频率稳定度和线宽, 因此其频率稳定度可以达到  $10^{-16} \text{ s}^{-1}$ , 线宽可以达到毫赫兹量级 [35,36]. 光学频率梳作为连接光学频率和微波频率, 以及连接不同光学频率的频率综合器, 它可以将光学参考的频率稳定度传递到其他光学频率或者微波频率, 也可以将微波参考的频率稳定度传递到光学频率. 光学频率梳作为传递链路, 其剩余不稳定性远低于最先进的光学原子钟 [37,38]. 因此, 光学频率梳的绝对稳定性主要取决于其所选择的参考源. 相比于锁定到微波参考, 锁定到光学参考的光学频率梳的频率稳定度有数量级的提升.

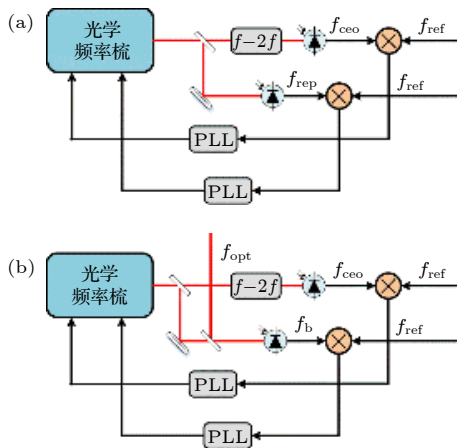


图 2 光学频率梳的锁定方式 (a) 锁定到微波频率参考; (b) 锁定到光学频率参考

Fig. 2. Locking methods of optical frequency comb: (a) Lock to microwave frequency reference; (b) lock to optical frequency reference.

无论是哪种锁定方式, 光学频率梳的稳定都是通过了对激光腔长和腔内色散的反馈调节, 主动地控制  $f_{\text{rep}}$  (或者  $f_N$ ) 和  $f_{\text{ceo}}$  的值来实现的. 最典型的方法是通过调节压电驱动器和腔内 EOM 晶体来控制激光器的腔长 [39], 调节激光器的泵浦功率或者腔内尖劈从而控制腔内色散.

低噪声的微波频率产生是建立在光学频率梳锁定到光学参考的基础之上的. 当光学频率梳的一根梳齿  $f_N$  紧密的锁定到一个光学参考上时, 根据式 (1), 光学频率梳的重复频率可以表示为

$$f_{\text{rep}} = (f_N - f_{\text{ceo}})/N = (f_{\text{opt}} - f_b - f_{\text{ceo}})/N, \quad (2)$$

其中,  $f_{\text{opt}}$  为光学参考的频率,  $f_b$  为光学参考和  $f_N$  的拍频信号. 如图 3 所示为微波频率产生的原理图, 光学频率梳锁定到光学参考之后, 用光电探测器对光学频率梳的光脉冲串进行探测, 就可以得到重复频率  $f_{\text{rep}}$  和重复频率的谐波信号. 所得到的最高阶次谐波的频率取决于光电探测器的响应速度和带宽. 选用适当的滤波器, 可以滤出重复频率的  $n$  次谐波, 其频率可以表示为  $f_n = nf_{\text{rep}}$ , 它可以作为一个低噪声的微波频率源. 光学频率梳在微波频率产生过程中作为光学频率分频器, 将光学频率参考的频率稳定性传递到微波频率, 根据式 (1) 和式 (2), 传递过程满足:

$$\delta f_{\text{opt}}/f_{\text{opt}} = \delta f_{\text{rep}}/f_{\text{rep}} = \delta f_n/f_n, \quad (3)$$

其中  $\delta f_{\text{opt}}$ ,  $\delta f_{\text{rep}}$ ,  $\delta f_n$  分别代表光学参考、重复频率以及重复频率第  $n$  次谐波的频率抖动. 这表明, 由光学频率梳分频产生的微波频率信号的频率稳定度等于光学参考的频率稳定度.

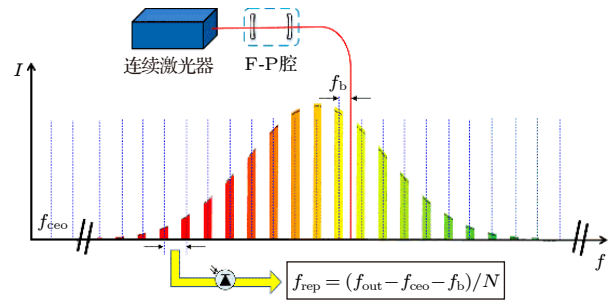


图 3 微波频率产生原理示意图

Fig. 3. Schematic of microwave frequency generation.

基于光学频率梳的微波频率产生的最大优点是光学频率到微波频率的分频, 伴随着相位噪声的大幅降低. 当光电探测器所探测的重复频率的  $n$  次谐波时, 所对应的分频数记为  $M = N/n$ , 那么该微波频率信号的相位噪声相比于光学参考会衰减  $M^2$  倍, 即:

$$S_{\phi,n}(f) = S_{\phi,\text{opt}}(f)/M^2, \quad (4)$$

其中,  $S$  代表相位噪声. 因此, 当一个频率为  $300 \text{ THz}$  ( $\lambda_{\text{opt}} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ) 的光学参考被光学频率梳分频到  $10 \text{ GHz}$  时, 将会产生  $(10 \lg (300 \text{ THz}/10 \text{ GHz})^2) \approx 90 \text{ dB}$  的相位噪声降低. 因此, 对于  $10 \text{ GHz}$  载波, 基于光学频率梳产生的微波频率在  $1 \text{ Hz}$  频偏处的相位噪声通常低于  $-100 \text{ dBc/Hz}$ .



### 3 低噪声微波频率的探测

#### 3.1 基于光梳的微波频率源的噪声分析

基于光学频率分频产生的微波频率信号的噪声主要取决于光学参考的噪声. 理想情况下, 微波频率信号的频率稳定度等于光学参考的频率稳定度. 但是实际分频过程中还会引入各类噪声. 文献[24]中用掺铒光纤光梳产生微波信号时, 对分频过程中引入的主要噪声进行了测量. 如图4所示, 这些噪声主要包括: 1) 频偏  $> 100$  kHz 的光电探测器的散粒噪声 (图中 (a) 的高频部分); 2) 光学频率梳锁定的剩余噪声 (图4(b)和4(c)); 3) 激光器的强度噪声 (RIN) 经由光电探测器转化为的相位噪声 (图4(d)); 4) 从  $1$  Hz— $1$  kHz 的低频闪变噪声 ( $1/f$  噪声) 等. 为了得到更低噪声的微波频率信号, 必须对这些噪声进行有效的抑制.

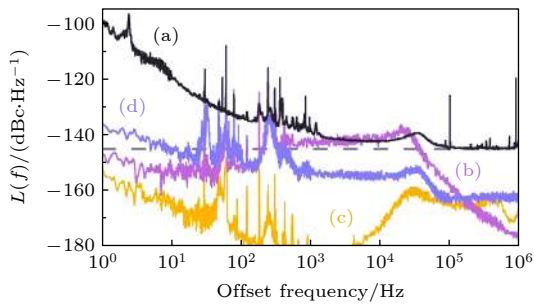


图4 (a) 掺铒光梳分频产生的  $10$  GHz 微波信号的相位噪声; (b)  $f_{\text{ceo}}$  锁定的剩余噪声; (c)  $f_b$  锁定的剩余噪声; (d) RIN 经由光电探测器转换为的相位噪声[24]

Fig. 4. (a) Phase noise of  $10$  GHz microwave signal generated by erbium-doped optical comb; (b)  $f_{\text{ceo}}$  residual noise; (c)  $f_b$  residual noise; (d) phase noise converted by RIN via photodetector[24].

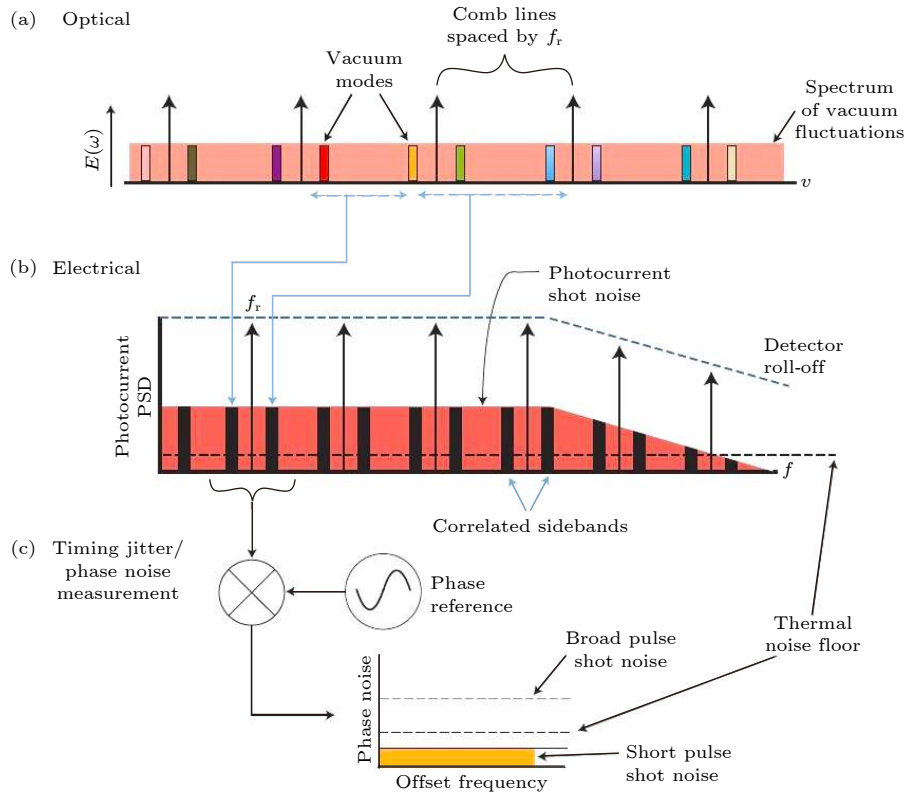
在电子器件中, 散粒噪声起源于电荷的离散性; 在光子计数中, 散粒噪声和光子的粒子性有关. 当进行光场检测时, 光子流的基本随机性由光电探测器转化为光电流的波动, 即散粒噪声. 散粒噪声属于白噪声, 在很宽频谱范围都存在. 但是由于在低频处闪变噪声等参数噪声占主导地位, 因此散粒噪声的噪底在高频处才能够体现出来. 散粒噪声的电流谱密度可以定义为  $2qI_{\text{avg}}$ , 单位为  $(\text{A}^2/\text{Hz})$ , 其中  $q$  为基本电荷,  $I_{\text{avg}}$  为平均光电流. 在不考虑压缩态光的情况下, 光电探测中可实现散粒噪声的极限可以表示为  $2qI_{\text{avg}}R/2I_{\text{avg}}^2R = q/I_{\text{avg}}$ . 在光电探测器没有饱和的情况下, 散粒噪声的下限会随着检测

的光功率的增大而成比例的降低. 这意味着光功率增大  $10$  倍, 散粒噪声的下限将会减小  $10$  dB. 为了进一步降低散粒噪声极限, 可以从光电探测器和光学频率梳两个方面进行改进. 对于光电探测器的要求是直接的, 需要更高功率高线性的光电探测器[29,40].

除了高功率光电探测器不断发展使得散粒噪声极限降低之外, 进入光电探测器前光学频率梳的脉宽同样会影响散粒噪声极限. 2013 年, Quinlan 等[41]进行了超短脉冲探测中散粒噪声相关性的研究. 如图5所示为光学频率梳散粒噪声产生原理示意图, 光学频率梳的梳齿和真空波动的外差拍频产生光电流中的散粒噪声. 由于光学频率梳的梳状线具有相关性, 因此和真空波动拍频产生的光电流谱也具有相关性, 这些相关性可以导致一系列光探测脉冲的定时精度的量子极限提高几个数量级. 只要保持探测器处的光脉冲宽度足够短, 就可以控散粒噪声, 从而显著提高光脉冲的定时精度.

其次, 光学频率梳锁定过程中的剩余噪声有时候也会成为微波频率信号的噪声主要贡献. 光学频率梳的  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_b$  信号的锁定结果会受到光梳腔内噪声、锁定环路带宽以及电路调节等多种因素的影响. 特别是对于一些光纤光学频率梳, 由于自发辐射和色散等因素的影响, 锁定后  $f_{\text{ceo}}$  信号的相位噪声会高于光学参考的相位噪声. 经过光学频率梳分频后, 噪声较高的  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_b$  就会成为微波频率信号噪声的主要来源.

通过对光梳和锁定电路进行更合理的设计可以实现  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_b$  信号更好的锁定, 从而实现对光梳剩余噪声的抑制. 低噪声光梳一直以来都是一个重要的研究课题[42,43]. 除此之外, 还可以通过改变锁定方式, 获得一个“ $f_{\text{ceo}}$  自由”的光学频率梳可以降低光梳剩余噪声的影响[18,20,44]. 首先仍然需要获得  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_b$  信号, 然后将  $f_b$  信号和  $f_{\text{ceo}}$  信号混频, 混频之后的信号中包含了一个独立  $f_{\text{ceo}}$  的相对稳定的边带记为  $f_{\text{mix}} = f_b + f_{\text{ceo}} = f_{\text{opt}} - Nf_{\text{rep}}$ . 该信号  $f_{\text{mix}}$  只与  $f_{\text{opt}}$  和  $f_{\text{rep}}$  有关, 和  $f_{\text{ceo}}$  无关. 一般经过滤波、分频之后再和一个频率综合器  $f_{\text{syn}}$  混频得到误差信号, 经过锁相环电路反馈光学频率梳实现锁定. 反馈的方式可以有多种, 如反馈泵浦电流, 或者反馈泵浦电流和压电陶瓷 (PZT), 或者反馈电光调制器 (EOM) 和 PZT 都可以实现  $f_{\text{rep}}$  的锁定. 不同的反馈方式主要取决于光学频率梳的制动器, 并

图 5 频域中的散粒噪声产生原理<sup>[41]</sup>Fig. 5. Schematic of shot noise generation in frequency domain<sup>[41]</sup>.

且会有不同的反馈带宽. 相比于  $f_{\text{ceo}}$  和  $f_b$  同时锁定, 该方式只需要一个锁相环电路, 并且反馈控制的主要稳定对象是  $f_{\text{rep}}$ , 非常适合于微波频率产生过程中光学频率梳的锁定.

第 3 种噪声是 AM-PM 噪声. 即光电探测器的非线性会将光脉冲的幅度噪声转化为相位噪声. 与散粒噪声类似, 这部分需要对光电探测器提出要求, 即需要可以承受更高功率同时保持高线性的光电探测器<sup>[29,40]</sup>. 此外, 通过监测光电探测输出信号的幅度抖动, 再将该信号反馈控制光电探测器前的声光调制器 (AOM) 可以有效的控制激光的强度变化, 降低 AM-PM 噪声<sup>[20,44]</sup>.

第 4 种是闪变噪声 ( $1/f$  噪声). 闪变噪声 ( $1/f$  噪声) 也是微波频率产生过程中的一种主要噪声, 它随着偏移频率靠近载波而增大, 因此在低频处占主导地位. 最新研究表明<sup>[45]</sup>, 脉冲宽度和光斑大小都会影响, 而且脉冲宽度越短, 探测器探测到的闪变噪声就越低, 这也同样适用于散粒噪声. 另外, 光斑越小, 闪变噪声也会越低; 但是紧聚焦和实现高线性探测的要求相矛盾, 因此实际探测过程需要平衡考虑.

除此之外, 还有一些技术用于直接提高 10 GHz 谐波的信噪比, 可以有效地降低散粒噪声和热噪声的噪底. 如前所述, 基于锁模激光的光学频率梳的重复频率约为 100 MHz—1 GHz, 当用光电探测器进行探测时, 由于光电探测器在短时间内的饱和效应, 主要功率集中在较低阶次的谐波上, 而高频谐波的信噪比会逐渐降低.

因此, 发展高重复频率的光学频率梳是解决该问题最直接的方法. 但是高重复频率意味着振荡器的腔长更短, 在光纤这类掺杂浓度较低的介质中实现  $> 1$  GHz 是比较困难的. 固态激光器可以实现较高重复频率的输出, 但是高重频造成单脉冲能量较低, 很难经过高非线性光纤产生倍频程光谱, 从而增加探测  $f_{\text{ceo}}$  信号的难度.

对于重复频率为 100 MHz—1 GHz 的光梳, 还可以通过 F-P 腔滤波或者脉冲交错技术提高重复频率. F-P 滤波一直用于产生高重频天文光梳, 文献<sup>[19, 46]</sup>中证明这种方法也可以提高约 10 GHz 微波信号信噪比. 但是 F-P 腔滤波也会使得激光功率降低, 因此最终探测的信噪比提高是综合优化的结果. 如图 6 所示是用光纤马赫-曾德尔干涉仪

(MZI) 来提高激光器的重复频率<sup>[23,24,44,46,47]</sup>, 脉冲在两臂中经历不同延时而实现脉冲交错. 通过调节两臂之间的路径差, 以获得等于两个单独级的输入脉冲持续时间一半的传播延时. 并且可以通过多级串联实现重复频率的数十倍提升. 文献<sup>[23]</sup>中通过图 6 的装置实现重复频率为 250 MHz 的光梳的 8 次倍频, 最终探测的 12 GHz 谐波信号的信噪比相比于倍频之前提升了 17 dB.

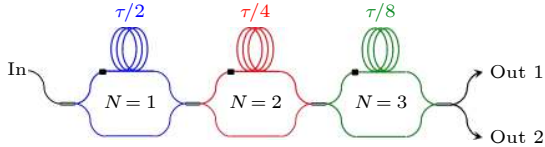


图 6 MZI 光纤脉冲重复频率倍频装置示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 6. An illustration of the cascaded MZI scheme used to achieve a pulse rate multiplication<sup>[23]</sup>.

### 3.2 低相位噪声测量技术

利用光学频率梳分频获得低噪声微波频率信号后, 还需要用相位噪声测量系统进行测量和评估. 低噪声测量技术和低噪声微波频率源的发展可以说是相辅相成, 相互促进的. 现如今, 低相位噪声频率源的应用越来越广泛, 对该频率源的相位噪声进行有效和准确的测量和评估也越来越重要.

相位噪声常用的测量技术主要有直接频谱测量法、相干外差法、鉴相法、鉴频法等. 除了鉴频法外, 这些测量方法都需要额外的参考源, 因此测量结果中就会携带参考源的相位噪声. 而鉴频法虽然不需要额外参考源, 但是其缺点是测量带宽较窄, 在近载频处测量灵敏度会降低, 高频处会周期性出现无法测量的频点. 另外, 较长延迟线可能会导致插入损耗超过信号源功率.

已经证明, 基于光学频率梳的微波频率产生的待测源相位噪声低于传统的微波频率源<sup>[44]</sup>, 因此如果测量系统中引入了额外参考源的噪声, 参考源的相位噪声会占主导地位, 对正确估量待测源相位噪声造成干扰. 因此低噪声的测量方案对于光学分频的微波频率源是必须的. 现在用于光学分频的微波频率信号的测量方法主要有互相关测量<sup>[48–50]</sup>和微波干涉测量<sup>[20,51]</sup>. 这两种测量方法可以有效去除参考源引入的相位噪声, 从而实现待测源的真实相位噪声的测量. 下面对最常用的互相关噪声测量方案原理进行阐述.

如图 7 所示, 互相关测量技术结合了两个重复的单通道参考信号源和锁相环 (PLL) 系统, 将两个通道的输出端之间进行互相关操作.

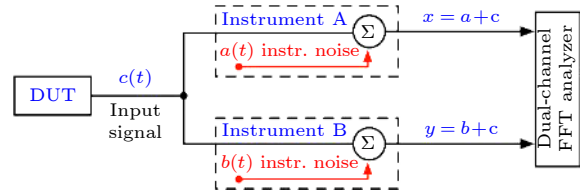


图 7 双通道互相关测量技术原理图<sup>[52]</sup>

Fig. 7. Basics of the cross-spectrum method<sup>[52]</sup>.

通过每个通道的被测件噪声是相干的且不会受到互相关的影响, 但是每个通道的内部产生的噪声不相干, 并且通过互相关操作, 非相干噪声以  $m^{1/2}$  ( $m$  是互相关级数) 速率的降低. 这可以表示为

$$\langle S_{xy} \rangle_m = S_{cc} + o(\sqrt{1/m}), \quad (5)$$

其中,  $\langle S_{xy} \rangle_m$  是测量得到的总噪声,  $S_{cc}$  是被测信号的噪声,  $m$  是互相关级数. 该公式表明随着平均次数  $m$  增大, 非相关噪声迅速衰减, 互相关测量的总噪声越来越接近待测信号的噪声. 可以看出, 测量的次数越多, 进行的互相关运算越多, 两个独立测量系统不相关的本底噪声相互抵消的也就越多, 因此测量灵敏度大大提高. 双通道互相关技术无需非常好的硬件性能, 便可实现出色的测量灵敏度. 但是, 互相关级数增加会影响到测量速度, 高灵敏度意味着更多的测量次数和更长的测量时间.

互相关测量的关键在于两路中的相关信号通过平均得以凸显, 非相关噪声会迅速衰减, 其具体的测量装置可以有多种变形. 如图 8 所示为基于光学频率梳的微波频率源测量系统的两种装置. 对于单个频率约为 10 GHz 待测源, 需要额外的参考源和待测源混频到较低频率, 进行如图 8(a) 所示的互相关测量. 而对于两个频率接近的噪声性能相同的待测源, 也可以直接进行如图 8(b) 的互相关测量.

## 4 光学频率梳产生微波频率研究进展

光学频率梳技术出现之后, 就被用来进行频率综合低噪声的微波信号<sup>[53]</sup>, 将光学原子钟的频率稳定性传递到微波频率. 基于光学频率梳的微波频率产生技术围绕着不断降低噪声水平而发展. 2003 年, Diddams 等<sup>[53]</sup>将钛宝石激光锁定到 456 THz 的连续单频激光器上, 单频激光器则是稳



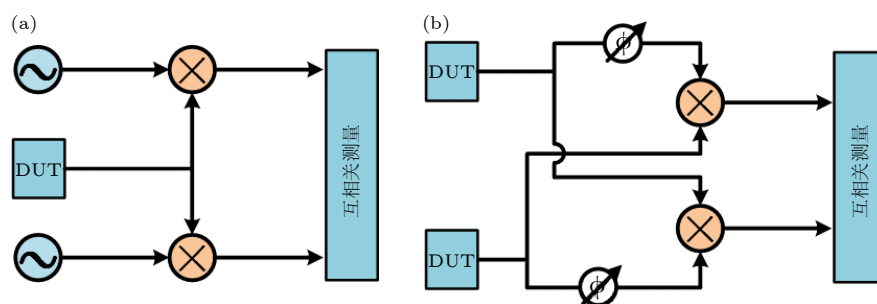


图 8 两种互相关测量装置

Fig. 8. Two types of cross correlation measuring devices.

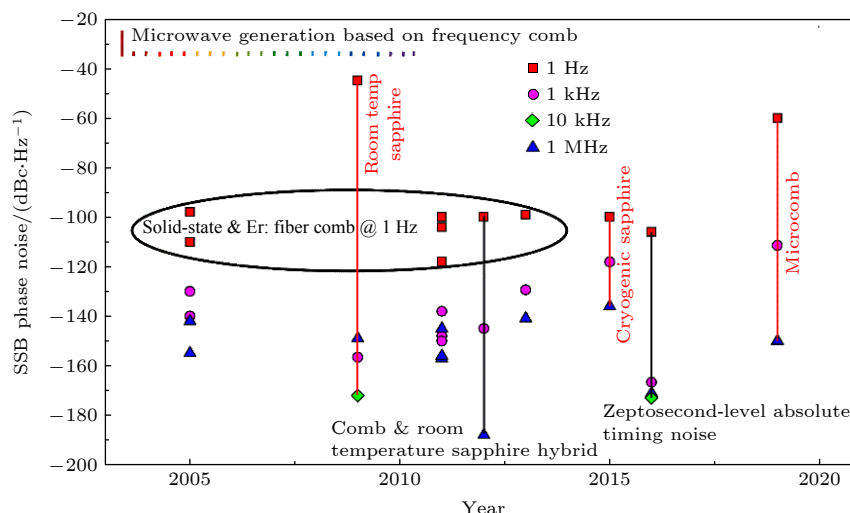


图 9 10 GHz 范围低噪声微波源研究进展

Fig. 9. Research progress of low noise microwave sources in 10 GHz range.

定到钙原子的跃迁谱线上. 由钛宝石光梳产生的 1 GHz 微波信号在低于 1 kHz 频偏处的相位噪声低于高质量的石英振荡器、低噪声频率综合器以及蓝宝石谐振腔振荡器. 实验表明, 光学频率梳在低噪声和传递光学原子钟频标的频率稳定性方面具有非常大的潜力.

随后, 更多的实验验证了不同类型的光学频率梳均可以产生极低噪声的微波信号. 如图 9 所示总结了一些光梳产生约 10 GHz 低噪声微波频率的主要研究进展 [15,17,21,23,25,27,44,54,55]. 图 9 也给出了室温蓝宝石振荡器 [56]、低温蓝宝石振荡器 [57] 和微腔光梳 [55] 产生的约 10 GHz 微波频率的相位噪声. 在频偏为 1 Hz 的低频处, 基于锁模激光器的固态光梳和光纤光梳产生的微波源的噪声处于  $-100$  dBc/Hz 左右, 和低温蓝宝石振荡器在相同水平, 甚至更低. 室温蓝宝石振荡器和基于微腔光梳产生的微波频率在低频处的噪声较大. 在高频 ( $> 10$  kHz) 处, 室温蓝宝石振荡器具有极低的相

位噪声, 光梳产生的微波频率也已经达到相同的噪声水平. 后面介绍一些具体的研究进展.

2009 年, 法国天文台的 Millo 等 [18] 利用光纤光梳来产生微波信号, 并应用于原子喷泉钟. 在他们的实验中将一台重复频率为 250 MHz 的商用掺铒光纤飞秒激光锁定到一台 1542 nm 的腔稳激光器上, 所产生的 9—12 GHz 的微波频率信号由噪声补偿的光纤链路传递到远处的实验室. 实验钟还将光纤光梳产生的微波信号和钛宝石光梳产生的微波信号以及低温蓝宝石振荡器进行了对比. 该系统在 1—10 s 的频率稳定性为  $3.0 \times 10^{-15}$ . 同年, 他们将两台 250 MHz 的掺铒光梳锁定到同一台 1542 nm 的腔稳激光 [17]. 然后对两个系统产生的 11.55 GHz 的信号相对相位噪声进行测量, 在低频处 (1—10 Hz), 其相位噪声约为  $-111$ — $10 \lg(f)$  dBc/Hz, 受限于测量系统的噪声. 在高频处 ( $> 100$  Hz), 由于光梳锁定带宽的限制, 噪声比测量系统的噪声底要高很多. 实验还对微波频率信号



进行了长时间的计数, 计算得到的 1—10 s 的频率稳定性约为  $1.6 \times 10^{-16}$ , 在 65536 s 下降到  $3.0 \times 10^{-19}$ .

之后, 对低噪声微波信号的测量技术和对光学频率梳剩余噪声抑制技术等有了更进一步的发展. 2011 年, 美国国家标准与技术研究院 (NIST) 的 Fortier 等<sup>[21]</sup>利用两个完全独立的系统测量了光学频率梳产生的微波信号的绝对相位噪声. 如图 10 所示, 重复频率为 1 GHz 的钛宝石光梳锁定到 518 THz 的腔稳连续激光器, 重复频为 250 MHz 的掺铒光纤光梳锁定到 282 THz 的腔稳连续激光器. 两个系统的光梳输出分别由光电探测器探测, 得到 10 GHz 的微波信号. 然后, 再将两个 10 GHz 信号混频后用数字相位噪声测量系统进行噪声测量. 在 1 Hz 频偏处, 单边带的相位噪声为  $-104$  dBc/Hz, 在 1 MHz 频偏处为  $-157$  dBc/Hz. 由于采用了互相关测量方法, 系统的白噪声噪底低于  $-160$  dBc/Hz, 因此高频处的噪声也已经接近光子散粒噪声极限. 从 1 Hz—1 MHz 的积分定时抖动为 760 as.

基于光学频率梳产生的微波信号在低频 (1 Hz—1 kHz) 处的噪声比现在的任何传统微波振荡器都要低, 但是在高频 ( $> 1$  MHz) 处会受到光电探测器的散粒噪声的限制. 2012 年, Fortier 等<sup>[25]</sup>通过将室温蓝宝石谐振腔锁定到由光梳分频产生的微波频率上来突破高频处散粒噪声的限制. 在高

频处, 室温蓝宝石振荡器仅受到热噪声的限制, 因此有比光生微波频率有更低的相位噪声. 而在低频处的相位抖动通过锁定到光梳分频的微波信号而得到压制. 如图 11 所示为实验装置和测量结果. 光学频率梳为 1 GHz 克尔透镜锁模钛宝石振荡器, 锁定到约 500 THz 的光学参考上, 经过光电探测器后滤出 10 GHz 的微波频率信号. 室温蓝宝石振荡器在频偏  $> 1$  MHz 的噪底为  $-190$  dBc/Hz, 通过带宽为 5 kHz 的锁相电路锁定到光梳产生的微波频率上. 两套相同的混合振荡器进行互相关相位噪声测量. 锁定之后, 混合振荡器的微波信号结合了两种微波频率源的优势, 从 1 Hz—1 MHz 的定时抖动为 300 as, 扩展到 5 GHz 频偏时, 由热噪声所增加的定时抖动只有 590 as. 假设两个混合振荡器的噪声贡献是相同的, 单个振荡器的定时抖动仅为 420 as. 相比于混合前两个振荡器 300 fs 和 1.14 fs (1 Hz—5 GHz) 的定时抖动, 混合振荡器的定时抖动分别衰减了 500 倍和 20 倍.

2017 年, 由法国天文台, Menlo Systems, 马克斯普朗克量子光学研究所 (MPQ) 等单位通过低噪声的光纤光梳和尖端的光电探测技术, 实现了光学参考和微波信号之间频率稳定度的高保真传递<sup>[44]</sup>. 所产生的 12 GHz 微波频率信号的相位噪声低于  $-173$  dBc/Hz, 对应定时噪声的下限低于  $41$  zs/Hz<sup>1/2</sup>,

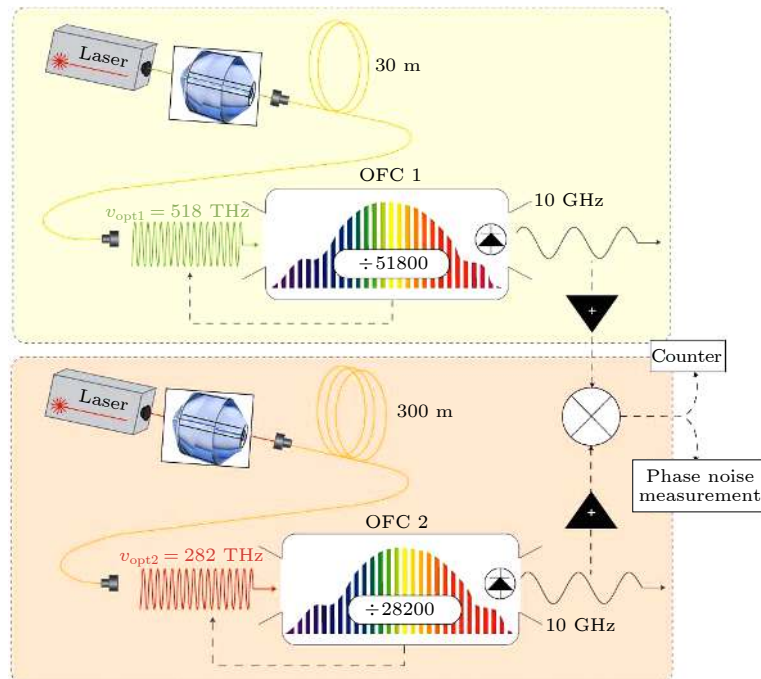


图 10 10 GHz 低噪声微波的实验装置示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 10. Schematic of the experimental set-up used for generation and characterization of the 10 GHz low-noise microwaves<sup>[21]</sup>.

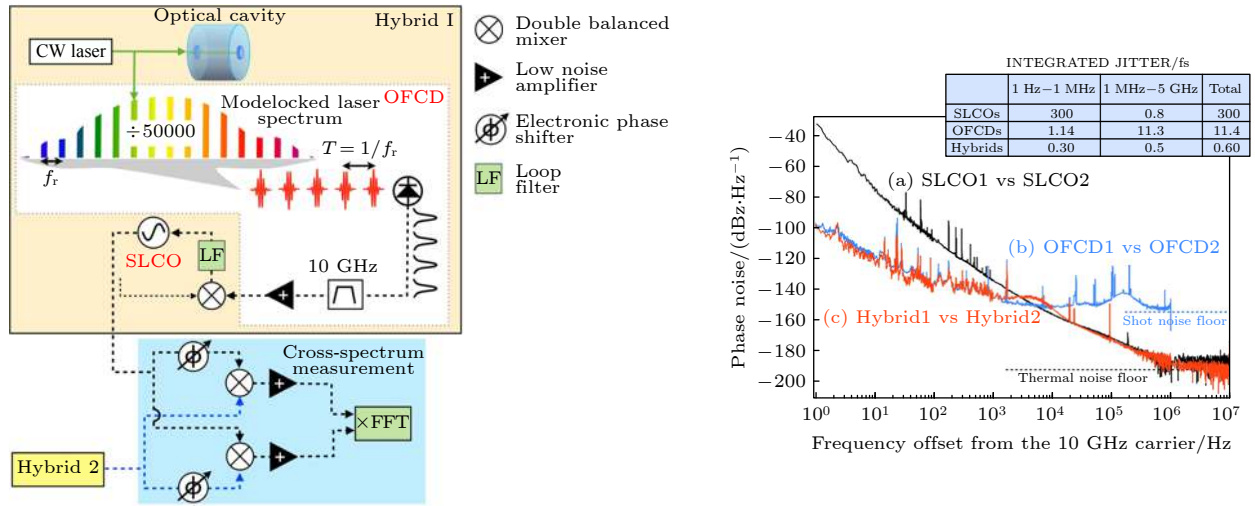

 图 11 混合微波振荡器的实验装置和测量结果<sup>[25]</sup>

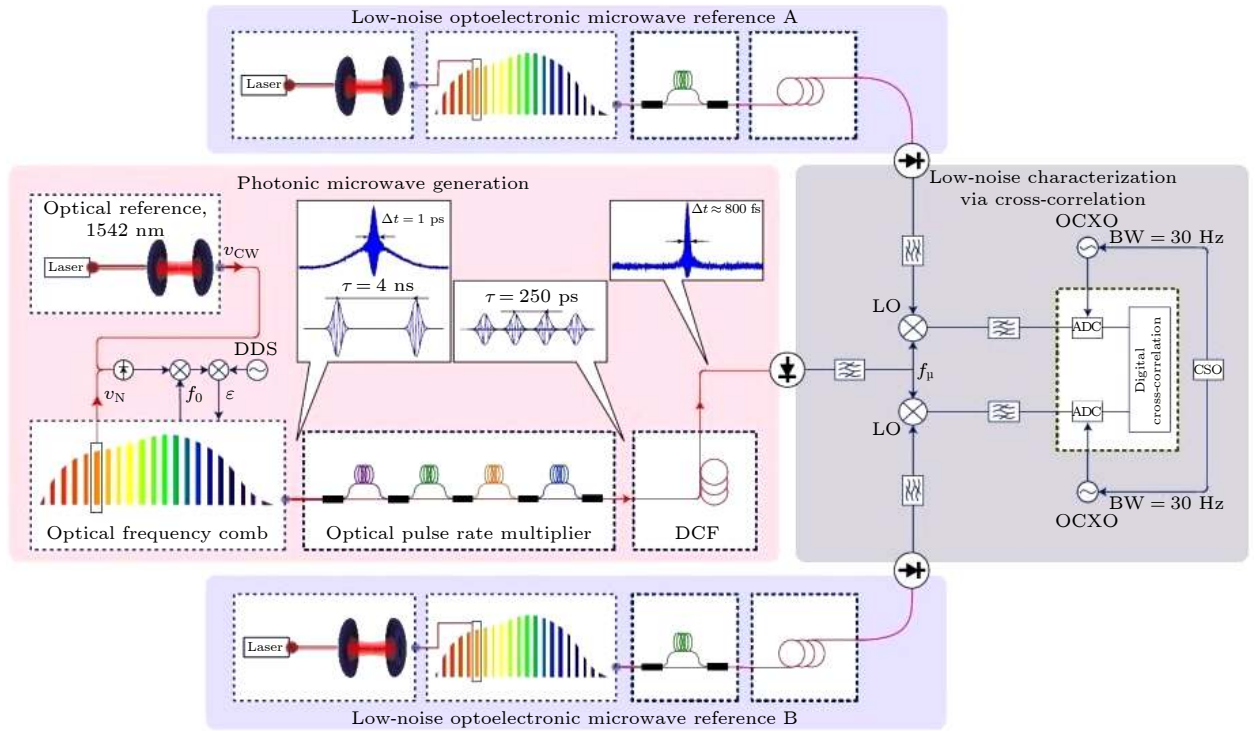
 Fig. 11. Generation and phase noise of 10 GHz signals from hybrid oscillators<sup>[25]</sup>.

 图 12 低噪声微波频率产生系统实验装置图<sup>[44]</sup>

 Fig. 12. Experimental set-up for low-noise microwave generation and characterization<sup>[44]</sup>.

基于光学频率梳的微波频率信号的噪声抑制水平达到了新的高度. 实验装置和测量结果如图 12 所示. 实验中, 重复频率为 250 MHz 的掺铒光纤光学频率梳锁定到一台 1542 nm 的超稳激光光学参考上, 光学参考 1 s 的频率稳定度为  $5.5 \times 10^{-16}$ . 为了提高信噪比, 使用光纤脉冲重复频率倍频器将重复频率提高到 48 次谐波. 另外, 在探测之间用色散补偿光纤将光脉冲压缩到 800 fs, 通过散粒噪声

的相关性降低散粒噪声的噪声底. 用特殊设计的高线性光电探测器将光脉冲串转换为微波频率信号, 光电探测器的闪变相位噪声低于  $-140 f^{-1}$  dBc/Hz. 同时也对 AM-PM 噪声也进行了主动控制. 为了实现高精度测量, 实验采用了一种基于 3 个类似但相互独立的微波产生系统的外差数字互相关测量方案, 该方案具有最低的检测噪声. 在  $> 1$  kHz 的傅里叶频偏处, 测量系统的噪声底低于  $-180$  dBc/Hz.

所产生的微波频率在 1 Hz 频偏处的相位噪声为  $-106$  dBc/Hz. 在低频偏 (1 Hz—400 Hz) 下, 相位噪声几乎完全由连续激光参考决定, 光学参考的频率稳定度近乎完全的转移到微波频率. 从 10 Hz—3 kHz 的杂散起伏源自于 50 Hz 的电源谐波, 在 3 kHz—1 MHz 之间, 传输受到光学分频方案的残余相位噪声和来自参考激光 PDH 锁定的环路误差的限制. 这表明, 这种光学频率梳产生的微波频率和测量方案在低频和高频处都具有最低的绝对相位噪声.

以上的工作实现了将腔稳激光器的频率稳定性传递到微波频率. 光学原子钟稳定性和准确度已经优于目前的微波原子钟标准<sup>[58]</sup>, 有望重新定义国际单位制 (SI) 中的秒<sup>[59]</sup>. 但是光学原子钟的频率稳定性还没有转移到微波领域. 2020 年, Nakamura 等<sup>[60]</sup>首次将两个独立的光钟经由光学频率梳分频产生 10 GHz 的微波信号, 两个微波信号的相位抖动和光钟的相位抖动完全一致, 绝对频率稳定性可以达到  $1.0 \times 10^{-18}$ , 和光钟相同量级. 如图 13 所示为光钟频率下转换到微波频率过程. 实验中采用两台重复频率分别为 208 MHz 和 156 MHz 的掺铒光梳分别锁定到两台独立的镱光钟上, 再由光电探测器分别探测 48 次谐波和 64 次谐波产生 10 GHz 微波信号. 然后, 分别在光学域和微波域拍频并记录了超过 44000 s 的相位抖动.

光学域的相位抖动按照分频因子 (约 26000) 进行缩放之后, 光学域和微波域的 RMS 相对定时抖动之后 900 as.

基于锁模激光器的固态光梳和光纤光梳在低噪声微波频率产生中发挥重要的作用, 其传递频率稳定性优于目前最好的光学原子钟. 除此之外, 微腔光梳的发展对光学频率梳的集成化方面具有不可替代的作用<sup>[61–63]</sup>. 相比于锁模激光器重复频率一般为几十兆赫兹到数吉赫兹, 微腔光梳重复频率在数十吉赫兹到太赫兹. 这使得它在产生高频电子学信号方面具有优势. 2020 年, Lucas 等<sup>[55]</sup>使用微腔光梳实现了低噪声的微波频率产生. 图 14 所示为微腔光梳产生微波频率的原理图. 实验中由一个亚赫兹线宽的超稳连续激光器泵浦微腔产生 14.09 GHz 重复频率的克尔光梳, 然后再借助一个辅助光纤频率梳获得载波包络相移频率并进行锁定. 由于该光梳是由超稳激光直接泵浦产生的, 因此重复频率不需要再进行锁定. 光电探测器探测其重复频率并用互相关方法测量相位噪声. 在 1 Hz 频偏处噪声为  $-60$  dBc/Hz, 受限于测量系统噪声. 在 1 MHz 处为  $-150$  dBc/Hz, 接近计算的散粒噪声极限. 相比于锁模激光器, 微腔光梳所产生的微波频率的噪声水平仍然需要进一步降低, 随着微腔光梳的研究逐步发展, 其应用领域会更加广泛.

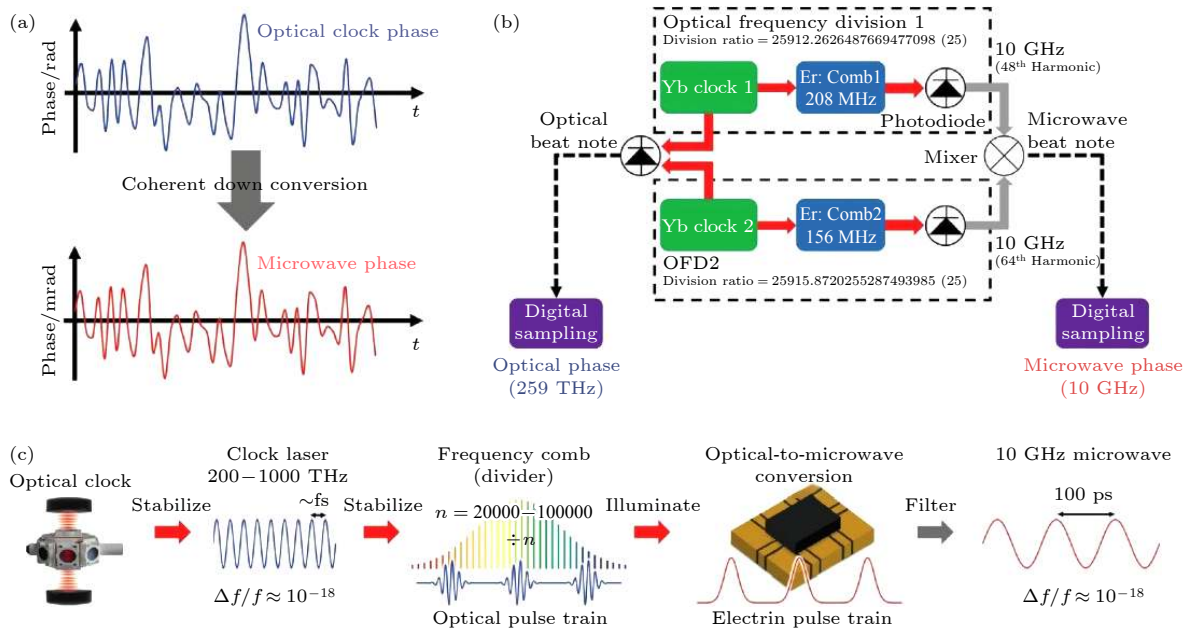
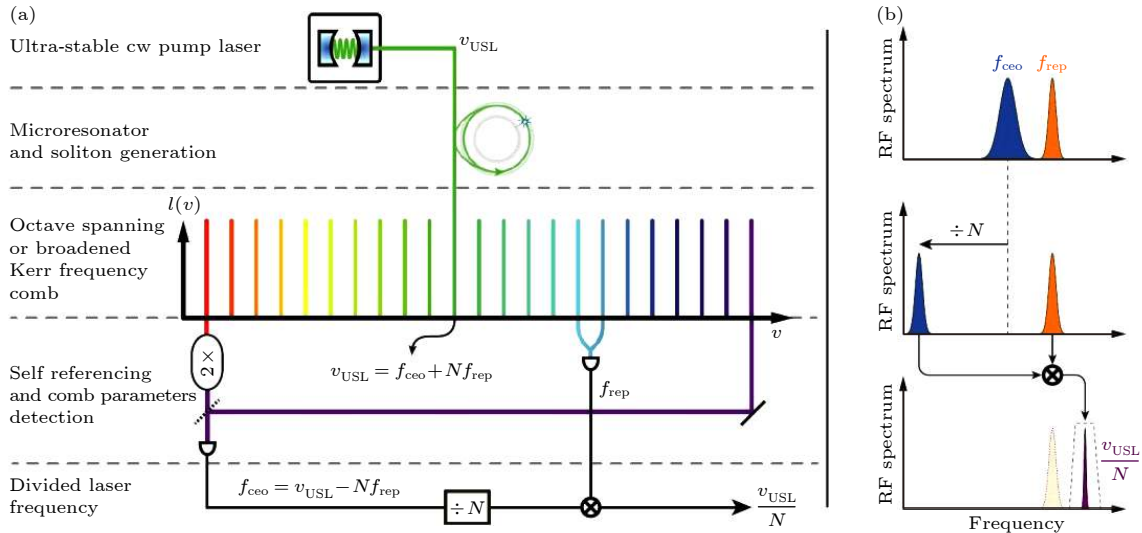


图 13 光学原子钟分频产生微波频率<sup>[60]</sup>

Fig. 13. Coherent optical clock down-conversion<sup>[60]</sup>.



图 14 微腔光梳产生微波频率原理示意图<sup>[55]</sup>Fig. 14. Principle of operation of the Kerr comb-based transfer oscillator<sup>[55]</sup>.

## 5 低噪声微波频率应用

获得更低噪声和更高稳定性的频率源是人们不断追求的目标, 它代表了人类对时间这一基础的物理量的计量精度. 涉及时间测量和时间同步的诸多应用都依赖于频率标准的稳定度或者低噪声特性, 如全球定位系统、深空导航、大型设施的远距离同步、雷达系统等. 下面介绍低噪声微波频率源在甚长基线干涉测量<sup>[64]</sup>、局域洛伦兹不变性的实验验证<sup>[65,66]</sup>和稳定喷泉钟<sup>[11,18]</sup>等前沿科学研究的典型应用.

甚长基线干涉测量 (VLBI) 是一种分辨率极高的天文观测技术. VLBI 技术可以通过在地球上两个或者多个相距很远的观察站, 同时接收同一个射电源的信号, 该信号经过低噪声高频放大后, 下变频转为中频信号和视频信号. 视频信号和时间信息分别记录到各观测站的磁带上或者实时传送到数据处理中心, 再对数据进行互相关计算. 由互相关数据计算得到的互相关谱再计算出射电源信号到达不同观测站的时延指和目标在一个方向上的角位置信息. VLBI 角位置信息的测量精度和观测站的距离成反比, 与时延测量精度成正比. 因此, 增大基线长度或者提高延时测量精度可以有效的提高角位置的测量精度. 基线长度原则上不受限制, 最长的基线可以跨越大洲, 长达数千千米. VLBI 的测量精度可以达到千分之几角秒, 甚至更高. 它可以对人造卫星和深空探测器等进行精确定位, 也

应用于各类射电源的精细结构研究和精确定位等. 如我国嫦娥探月工程探测器的精确定位也是基于 VLBI 技术. VLBI 的观测频率越来越高, 已经用于直接成像黑洞<sup>[64,67]</sup>. 2019 年 4 月 10 日 21 点整, 多个国家和地区的科学家同时举行发布会, 公布事件视界望远镜 (EHT) 为黑洞拍下的第一张照片. EHT 正是基于 VLBI 技术实现的, 它是由 8 台亚毫米射电望远镜构成虚拟望远镜, 其口径为 13000 km, 约等于地球直径.

在 VLBI 技术中, 时间同步是基础之一, 高稳定度和低噪声的微波源为 VLBI 系统的射频接收系统和数据采集系统提供高稳定度的频率标准和高精度同步的时间信号<sup>[64]</sup>, 保证了不同站点接收信号的同时性. 因此高质量的微波频率源的发展可以不断提升 VLBI 的测量精度.

高稳定度的微波频率源也在一些科学验证实验中发挥重要作用. 爱因斯坦等效原理是相对论中基本的原理. 局域洛伦兹不变性 (LLI) 是等效原理的组成部分, 它假定局部实验的结果与仪器的速度和方向无关. 这一假设的重要性激发了大量的工作在实验上来测试 LLI. 已经发展了很多理论用于解释在实验上对 LLI 的验证, 其中 Robertson-Mansouri-Sexl (RMS) 运动学构架假设了洛伦兹变换的一个简单参数化, 通过实验来限制这些参数与它们在狭义相对论中的值的偏差. 大多数测试 LLI 的现代实验基本上依赖于频率源的稳定性, 通过对两个频率源频率之差的稳定性测量, 来计算

RMS 参数的不确定性. 因此, LLI 测试的改进依赖于频率源技术的改进<sup>[65,66]</sup>.

此外, 更低噪声的微波频率源可以进一步提升喷泉钟的频率稳定度. 基于 Cs 原子的冷原子喷泉钟仍然是现行的一级频率标准. 国际单位制 (SI) 中的秒由喷泉钟定义, 其频率稳定度在  $10^{-15}$  量级甚至更好. 最先进的微波原子喷泉钟受限于量子投影噪声, 它主要由系统所囚禁的原子数目决定. 除此之外, 询问振荡器的固有相位噪声会通过 Dick 效应使得量子投影噪声的下限上升<sup>[68]</sup>, 从而造成喷泉钟的频率稳定度下降. 因此, 实现超低噪声微波振荡器对于达到高稳定的频率标准至关重要. 如前所述, 2009 年, Millo 等<sup>[18]</sup> 用基于光纤光学频率梳产生的微波频率源替代低温蓝宝石振荡器, 用于铯原子喷泉钟的询问振荡器. 通过和低温蓝宝石振荡器比较, 其频率稳定度为  $3.0 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ ,  $\tau$  为积分时间, 短期频率稳定度和基于低温蓝宝石的喷泉钟的频率稳定度相同.

低温蓝宝石振荡器以其优秀的低噪声和高频率稳定度特性, 在以上的科学研究工作中发挥重要的作用. 但是由于其需要维持低温冷却带来的不便, 人们期望新的替代技术. 基于光学频率梳产生的微波频率在性能上已经优于低温蓝宝石振荡器. 随着光学频率梳可靠性的提高, 极低噪声的光学频率梳产生的微波频率会在更多应用中发挥作用.

## 6 总结和展望

基于光梳的微波频率源的低噪声特性来自于光学脉冲的精密性, 因此提高光学频率梳的频率稳定性和降低传递过程中引入的噪声和失真是获得低噪声微波频率的关键. 对于光源, 低脉冲能量和高重复频率的光学频率梳源有利于获得更高光谱纯度的微波信号; 对于探测, 高功率高线性的光电探测器可以减轻失真和饱和, 显著的降低散粒噪声极限和 AM-PM 噪声. 另外, 低噪声测量技术是测量和评估相位噪声的重要工具, 对于噪声越来越低的微波频率源, 快捷方便的精确测量仍然是巨大的挑战.

未来, 超低相位噪声小型化、鲁棒性和可移动的微波频率源将会发展起来, 并应用于更多的领域. 随着微波光子学技术的发展, 更高频的低噪声信号, 如毫米波和太赫兹的产生也成为可能. 微腔

光梳拥有重复频率高, 可以进行片上集成等优势, 可能会成为了更高频低噪声信号产生的主要工具. 另外, 基于光学频率梳的其他微波光子学应用, 如宽带通讯<sup>[69]</sup>, 任意波产生<sup>[70]</sup>, 光子学模数转换<sup>[71]</sup>等技术也会随着低噪声微波频率源的发展而提高性能.

## 参考文献

- [1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [2] Hansch T W 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297
- [3] Hall J L 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1279
- [4] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, Sizmman A, Pasquini L, Araujo-Hauck C, Dekker H, D'odorico S, Fischer M, Hansch T W, Manescau A 2007 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **380** 839
- [5] Schiller S 2002 *Opt. Lett.* **27** 766
- [6] Hyun S, Kim Y J, Kim Y, Kim S W 2010 *CIRP Ann-Manuf. Technol.* **59** 555
- [7] Baltuska A, Udem T, Uiberacker M, Hentschel M, Goulielmakis E, Gohle C, Holzwarth R, Yakovlev V S, Scrinzi A, Hansch T W, Krausz F 2003 *Nature* **421** 611
- [8] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [9] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, Baumann E, Coddington I, Newbury N R 2013 *Nat. Photonics* **7** 435
- [10] Scheer J A, IEEE 1990 *Coherent Radar System Performance Estimation* (New York: IEEE) pp125–128
- [11] Santarelli C, Laurent P, Lemonde P, Clairon A, Mann A G, Chang S, Luiten A N, Salomon C 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4619
- [12] Kim J, Cox J A, Chen J, Kaertner F X 2008 *Nat. Photonics* **2** 733
- [13] Savchenkov A A, Rubiola E, Matsko A B, Ilchenko V S, Maleki L 2008 *Opt. Express* **16** 4130
- [14] Yao Y, Chen X F, Dai Y T, Xie S Z 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 187
- [15] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, Wilpers G, Bergquist J C, Oskay W H, Hollberg L 2005 *Opt. Lett.* **30** 667
- [16] Ivanov E N, McFerran J J, Diddams S A, Hollberg L 2007 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54** 736
- [17] Millo J, Boudot R, Lours M, Bourgeois P Y, Luiten A N, Le Coq Y, Kersale Y, Santarelli G 2009 *Opt. Lett.* **34** 3707
- [18] Millo J, Abgrall M, Lours M, English E M L, Jiang H, Guena J, Clairon A, Tobar M E, Bize S, Le Coq Y, Santarelli G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 1411053
- [19] Diddams S A, Kirchner M, Fortier T, Braje D, Weiner A M, Hollberg L 2009 *Opt. Express* **17** 3331
- [20] Zhang W, Xu Z, Lours M, Boudot R, Kersale Y, Santarelli G, Le Coq Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 2111053
- [21] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F, Taylor J, Bergquist J C, Rosenband T, Lemke N, Ludlow A, Jiang Y, Oates C W, Diddams S A 2011 *Nat. Photonics* **5** 425
- [22] Swann W C, Baumann E, Giorgetta F R, Newbury N R 2011 *Opt. Express* **19** 24387
- [23] Haboucha A, Zhang W, Li T, Lours M, Luiten A N, Le Coq Y, Santarelli G 2011 *Opt. Lett.* **36** 3654
- [24] Quinlan F, Fortier T M, Kirchner M S, Taylor J A, Thorpe M J, Lemke N, Ludlow A D, Jiang Y Y, Diddams S A 2011 *Opt. Lett.* **36** 3260

- [25] Fortier T M, Nelson C W, Hati A, Quinlan F, Taylor J, Jiang H, Chou C W, Rosenband T, Lemke N, Ludlow A, Howe D, Oates C W, Diddams S A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 2311113
- [26] Jung K, Kim J 2012 *Opt. Lett.* **37** 2958
- [27] Meyer S A, Fortier T M, Lecomte S, Diddams S A 2013 *Appl. Phys. B-Lasers Opt.* **112** 565
- [28] Jung K, Shin J, Kim J 2013 *IEEE Photonics J.* **5** 55009066
- [29] Fortier T M, Quinlan F, Hati A, Nelson C, Taylor J A, Fu Y, Campbell J, Diddams S A 2013 *Opt. Lett.* **38** 1712
- [30] Didier A, Millo J, Grop S, Dubois B, Bigler E, Rubiola E, Lacroute C, Kersale Y 2015 *Appl. Optics* **54** 3682
- [31] Ludlow A D, Huang X, Notcutt M, Zanon-Willette T, Foreman S M, Boyd M M, Blatt S, Ye J 2007 *Opt. Lett.* **32** 641
- [32] Millo J, Magalhaes D V, Mandache C, Le Coq Y, English E M L, Westergaard P G, Lodewyck J, Bize S, Lemonde P, Santarelli G 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053829
- [33] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, Fox R W, Sherman J A, Ma L S, Oates C W 2011 *Nat. Photonics* **5** 15
- [34] Newbury N R, Washburn B R 2005 *IEEE J. Quant. Electron.* **41** 1388
- [35] Wang H-B, Han H-N, Zhang Z-Y, Shao X-D, Zhu J-F, Wei Z-Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 030601
- [36] Pang L H, Han H N, Zhao Z B, Liu W J, Wei Z Y 2016 *Opt. Express* **24** 28994
- [37] Yao Y, Jiang Y, Yu H, Bi Z, Ma L 2016 *Natl. Sci. Rev.* **3** 463
- [38] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, Sonderhouse L, Bothwell T, Goban A, Kedar D, Sanner C, Robinson J M, Marti G E, Matei D G, Legero T, Giunta M, Holzwarth R, Riehle F, Sterr U, Ye J 2019 *Nat. Photonics* **13** 714
- [39] Hudson D D, Holman K W, Jones R J, Cundiff S T, Ye J, Jones D J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2948
- [40] Li Z, Fu Y, Piels M, Pan H, Beling A, Bowers J E, Campbell J C 2011 *Opt. Express* **19** 385
- [41] Quinlan F, Fortier T M, Jiang H, Hati A, Nelson C, Fu Y, Campbell J C, Diddams S A 2013 *Nat. Photonics* **7** 290
- [42] Endo M, Shoji T D, Schibli T R 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 1102413
- [43] Han H N, Wei Z Y 2016 *Physics* **45** 449 (in Chinese) [韩海年, 魏志义 2016 *物理* **45** 449]
- [44] Xie X P, Bouchand R, Nicolodi D, Giunta M, Hansel W, Lezius M, Joshi A, Datta S, Alexandre C, Lours M, Tremblin P A, Santarelli G, Holzwarth R, Le Coq Y 2017 *Nature Photonics* **11** 44
- [45] Lee D, Nakamura T, Campbell J C, Diddams S A, Quinlan F 2020/05/10 pSF1 G.7
- [46] Jiang H F, Taylor J, Quinlan F, Fortier T, Diddams S A 2011 *IEEE Photonics J.* **3** 1004
- [47] Quinlan F, Baynes F N, Fortier T M, Zhou Q G, Cross A, Campbell J C, Diddams S A 2014 *Opt. Lett.* **39** 1581
- [48] Walls W F, IEEE 1992 *Cross-Correlation Phase Noise Measurements* (New York: IEEE) pp257–261
- [49] Rubiola E, Giordano V 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** Pii [s0034-6748(00)01708-1] 3085
- [50] Hati A, Nelson C W, Howe D A 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 0347088
- [51] Ivanov E N, Tobar M E, Woode R A 1998 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **45** 1526
- [52] Rubiola E, Vernotte F 2010 *Physics*
- [53] Diddams S A, Bartels A, Ramond T M, Oates C W, Bize S, Curtis E A, Bergquist J C, Hollberg L 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1072
- [54] McFerran J J, Ivanov E N, Bartels A, Wilpers G, Oates C W, Diddams S A, Hollberg L 2005 *Electronics Lett.* **41** 650
- [55] Lucas E, Brochard P, Bouchand R, Schilt S, Sudmeyer T, Kippenberg T J 2020 *Nat. Commun.* **11** 3748
- [56] Ivanov E N, Tobar M E 2009 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **56** 263
- [57] Fluhr C, Grop S, Dubois B, Kersale Y, Rubiola E, Giordano V 2016 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **63** 915
- [58] Weyers S, Gerginov V, Kazda M, Rahm J, Lipphardt B, Dobrev G, Gibble K 2018 *Metrologia* **55** 789
- [59] Gill P 2011 *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **369** 4109
- [60] Nakamura T, Davila-Rodriguez J, Leopardi H, Sherman J A, Fortier T M, Xie X J, Campbell J C, McGrew W F, Zhang X G, Hassan Y S, Nicolodi D, Beloy K, Ludlow A D, Diddams S A, Quinlan F 2020 *Science* **368** 889
- [61] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J 2019 *Nat. Photonics* **13** 158
- [62] Kovach A, Chen D Y, He J H, Choi H, Dogan A H, Ghasemkhani M, Taheri H, Armani A M 2020 *Adv. Opt. Photonics* **12** 135
- [63] Wang W, Wang L, Zhang W 2020 *Advanced Photonics* **2** 1
- [64] Nand N R, Hartnett J G, Ivanov E N, Santarelli G 2011 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **59** 2978
- [65] Wolf P, Bize S, Clairon A, Luiten A N, Santarelli G, Tobar M E 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 060402
- [66] Stanwix P L, Tobar M E, Wolf P, Susli M, Locke C R, Ivanov E N, Winterflood J, van Kann F 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 040404
- [67] Rioja M, Dodson R, Asaki Y, Hartnett J, Tingay S 2012 *Astron. J.* **144** 121
- [68] Santarelli G, Audoin C, Makdissi A, Laurent P, Dick G J, Clairon A 1998 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **45** 887
- [69] Marin-Palomo P, Kemal J N, Karpov M, Kordts A, Pfeifle J, Pfeiffer M H P, Trocha P, Wolf S, Brasch V, Anderson M H, Rosenberger R, Vijayan K, Freude W, Kippenberg T J, Koos C 2017 *Nature* **546** 274
- [70] Jiang Z, Huang C B, Leaird D E, Weiner A M 2007 *Nat. Photonics* **1** 463
- [71] Deakin C, Liu Z X 2020 *Opt. Lett.* **45** 173



REVIEW

# Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb<sup>\*</sup>

Shao Xiao-Dong<sup>1)2)</sup> Han Hai-Nian<sup>1)†</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)2)</sup>

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 16 November 2020; revised manuscript received 14 January 2021 )

## Abstract

Low noise microwave frequency has important applications in radar, long baseline interferometer and other fields. The phase noise of microwave signal generated by optical frequency comb is lower than  $-100$  dBc/Hz at 1 Hz frequency offset and  $-170$  dBc/Hz at high frequencies ( $> 100$  kHz), which is the lowest in the noise produced by all existing microwave frequency generation technologies. This paper introduces the basic principle of optical frequency comb generating microwave frequency, analyzes and summarizes various kinds of noise of microwave frequency signals and noise suppressing technologies. Then the low noise measuring methods are introduced, and several typical experimental devices generating microwave frequency and the obtained results are described. With the continuous improvement of optical frequency comb and noise suppression technology, microwave frequency source with very low noise will have wider application prospects and application fields.

**Keywords:** optical frequency comb, microwave frequency generation, microwave photonics, phase noise

**PACS:** 42.62.Eh, 42.55.-f, 06.20.-f, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201925

<sup>\*</sup> Project supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDA1502040404, XDB21010400).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hnhan@iphy.ac.cn](mailto:hnhan@iphy.ac.cn)