

## 双光梳测距及其应用

吴冠豪<sup>1\*</sup>, 周思宇<sup>1\*\*</sup>, 杨越棠<sup>1</sup>, 倪凯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;

<sup>2</sup>清华大学深圳国际研究生院先进制造学部, 广东 深圳 518055

**摘要** 距离测量作为几何量测量关键共性基础技术之一, 在科学研究、高端装备制造及空间探测等领域有重要应用。新兴的双光梳绝对测距技术充分发挥了光学频率梳的时域超短脉冲和频域高分辨特性, 能实现大范围、高精度、高测速的绝对距离测量。首先, 在简要阐述双光梳基本原理的基础上, 着重介绍了双光梳飞行时间法测距和相位法测距的研究进展; 然后, 介绍了双光梳测距技术的功能拓展、仪器化进程及应用实例; 最后, 对双光梳测距的发展进行了展望。

**关键词** 测量; 绝对距离测量; 双光梳; 飞行时间法测距; 相位法测距; 仪器化及应用

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1504002

### 1 引言

绝对距离测量对紧密卫星编队飞行、卫星天线定位及航空装备、微机电系统、微电子等领域高精尖产品的加工制造至关重要<sup>[1-7]</sup>。目前, 高精度距离测量主要通过光学干涉方法来实现, 干涉相位以  $2\pi$  为周期随着光信号的传播不断积累, 被测距离可溯源至波长基准。为确定干涉相位的整数周期, 传统干涉测距方法只能实现增量式测量, 即在测量过程中需移动靶标实现条纹连续计数<sup>[8]</sup>。尽管可采用合成波长法或多波长法来增大非模糊测距范围, 但需要使用多个连续激光器作为光源, 一方面使得系统体积庞大, 另一方面扩展范围有限<sup>[9]</sup>。解决传统干涉测量方法的问题, 实现大范围、高精度绝对距离测量是计量研究人员一直努力的目标。21 世纪初, 光学频率梳(光频梳)的发明给精密测距研究领域带来了重大机遇, 提供了新的发展方向<sup>[10]</sup>。

光频梳在时域上有一系列脉宽在飞秒级别的超短脉冲, 在频域上表现为在一定光谱宽度内等间隔分布的窄线宽光学纵模, 其光谱像一把“梳状尺”, 序号为  $i$  的纵模频率  $f(i)$  可用重复频率  $f_r$ ,

简称重频)和载波包络偏移频率( $f_o$ , 简称偏频)表示, 即  $f(i) = if_r + f_o$ <sup>[11-13]</sup>。光频梳精确衔接了光频域和射频域, 推动了光钟<sup>[14-15]</sup>、频率综合器<sup>[16-18]</sup>、时频传递<sup>[19-21]</sup>、精密光谱测量<sup>[22-30]</sup>、精密几何量测量<sup>[31-41]</sup>等重要技术领域的发展, 其中绝对距离测量是光频梳在精密几何量测量领域的主要研究方向。

从 2000 年开始, 国内外学者基于光频梳的时频域特性相继提出了利用光频梳多纵模之间的拍频相位信息进行测距的模间拍频法<sup>[42]</sup>; 通过扫描光频梳重复频率进行脉冲对准测距的扫描重频法<sup>[43-44]</sup>; 利用光频梳干涉光谱信息进行测距的色散干涉法<sup>[45-46]</sup>; 利用光频梳宽光谱、纵模离散的优势, 构成高稳定性合成波长的光频梳合成波长法<sup>[47-48]</sup>; 通过两台光频梳多纵模外差干涉相位信息进行测距的双光梳法<sup>[49-50]</sup>等几种基于光频梳的测距方法。这些方法解决了传统干涉测距相位模糊的问题, 实现了绝对距离测量<sup>[51-52]</sup>。然而上述几种方法各有不足, 其中模间拍频法的测量精度受限于探测器的带宽; 扫描重频法的测量速度受限于重频的扫描速度, 且存在测距盲区; 合成波长测距法系统复杂, 非模糊范围

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101804)、国家自然科学基金(51835007)、北京市科技计划(Z191100007419011)、清华大学“水木学者”计划

通信作者: \*guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn; \*\*zhousiyu@mail.tsinghua.edu.cn

小,通过频率调谐构造多波长可增大非模糊范围,但同步降低了测量速度;色散干涉测距方法基于零差干涉的原理,容易受到直流噪声的影响,并且测距速度和动态测距范围分别受限于 CCD 或者光谱仪的采样速度和分辨率。与几种基于单光频梳的测距方法相比,双光梳测距法虽然需要两台光频梳作为光源,系统稍显复杂,但充分发挥了光频梳脉冲速率快和光谱分辨率高的优势,在测量速度、非模糊范围及测量精度等技术指标方面具备更好的综合性能,也成为近年来测距领域的研究热点。

双光梳测距技术的发展脉络如图 1 所示,双光梳的测量思想最早在 2002 年由德国的 Schiller<sup>[53]</sup> 提出,2009 年美国国家标准技术研究院(NIST)的 Coddington 等<sup>[49]</sup> 首先将该技术应用于绝对测距。近十几年报导的双光梳测距方法主要以光纤光频梳作为测量光源,基于飞行时间法<sup>[50]</sup> 和相位法<sup>[49]</sup> 两

种测距原理实现绝对距离测量。对双光梳参数模型进行优化<sup>[54]</sup> 并对系统噪声进行抑制<sup>[55]</sup> 是实现高精度双光梳测距的两大关键技术,其中飞行时间法测距主要关注前者,而相位法测距是以后者的实现为基础。从 2013 年至今,国内外学者同步探索了双光梳测距方法的性能提升、功能扩展及仪器化应用,主要研究内容包括双光梳测距盲区的消除<sup>[56]</sup> 及非模糊范围的扩展(飞行时间法测距)<sup>[56-57]</sup>、双光梳测距精度及测速提升(飞行时间法和相位法组合测距)<sup>[58]</sup>、从双光梳测距到双光梳多自由度测量<sup>[59]</sup> 的功能扩展、双光梳测距技术的仪器化及应用。2018 年,关于微腔双光梳测距的研究首次被报导<sup>[60-61]</sup>,微腔光频梳因具有微型化、易于片上集成的特点,相比光纤光频梳,在测距领域具有更好的应用前景,也为双光梳测距技术的进一步发展带来了新的机遇。

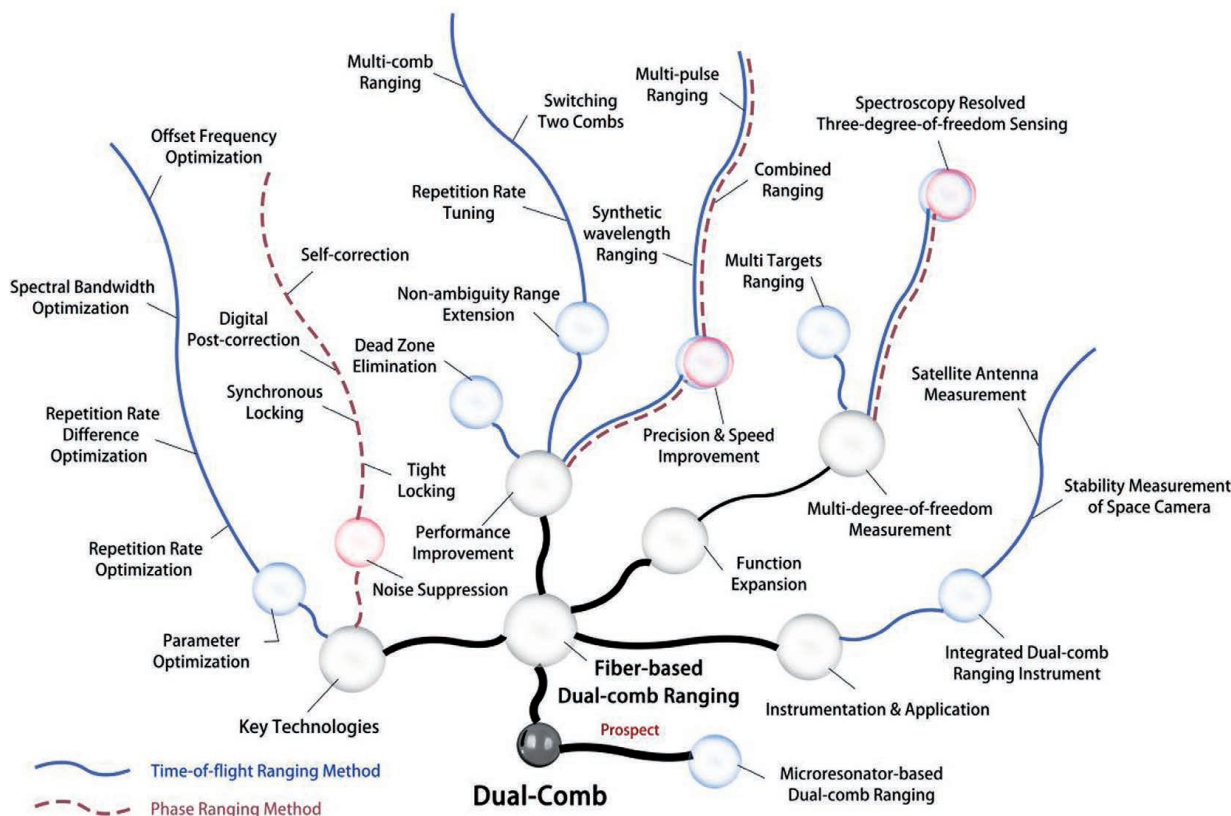


图 1 双光梳测距的发展脉络图

Fig. 1 Development venation of dual-comb ranging

## 2 双光梳飞行时间法测距

### 2.1 双光梳时频域特性

双光梳采用两台重频有微小差别的光频梳作为光源,其中光频梳 1 为信号光梳,其重频为  $f_{r1}$ ,光频梳 2 为本振光梳,重频为  $f_{r2} = f_{r1} + \Delta f_r$ ,  $\Delta f_r$  为两

台光频梳之间的重频差。从时域角度考虑,由于重频的不同,每经过一个脉冲时间周期,本振光梳发出的采样脉冲和信号光梳发出的信号脉冲会产生时间滑移  $\Delta T = \Delta f_r / (f_{r1} \cdot f_{r2})$ 。采样脉冲和信号脉冲将在时域上发生周期性的重叠与错位,在每个测量周期( $T_{\text{update}} = 1/\Delta f_r$ )内将产生一个如图 2(a)所

示的互相关干涉信号。从频域角度分析,图 2(b)中红色箭头实线所示的光频梳 1 频率纵模和蓝色箭头实线所示的光频梳 2 频率纵模在光谱带宽  $\Delta\nu_{\text{comb}}$  内发生多纵模外差干涉,光频域的信号传递到射频域,外差信号通过一个 0 至  $f_{r2}/2$  的低通滤波器后,忽略直流信号的影响,将产生图 2(b)下部紫色箭头实线所示的子频率梳,其梳齿间隔为  $\Delta f_r$ 。双光梳系统的优势在于将原本光频域的信

息映射至射频域,子频率梳的间隔相对于光频梳的间隔缩小了  $\Delta f_r/f_{r1}$ ,而对应的时域信息周期,即干涉信号的周期则被放大了  $f_{r1}/\Delta f_r$  [62]。双光梳法以一种低频探测的方式实现了光信号的测量,极大地降低了对探测器带宽的依赖,巧妙地利用双光梳系统时域线性光学互采样和频域多纵模外差干涉的特性,实现了大范围、动态高精度绝对距离测量。

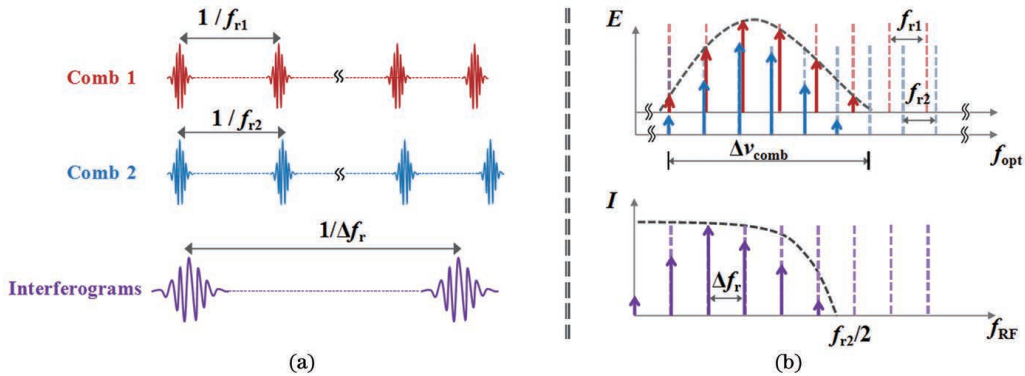


图 2 双光梳时频域特性。(a)时域线性光采样原理;(b)频域多模外差干涉原理

Fig. 2 Time and frequency domain characteristics of dual-comb system. (a) Principle of linear optical sampling in time domain; (b) principle of multimode heterodyne interference in frequency domain

### 2.2 飞行时间法测距原理

双光梳测距原理如图 3 所示,光频梳 1 出射的信号脉冲序列经过迈克耳孙干涉光路,由分光镜 1 分成两路,经参考镜和测量镜反射成为两列具有一定时间延迟 ( $\Delta t$ , 由参考臂和测量臂的臂长之差决定) 的脉冲序列,两列脉冲经分光镜 1 合光后再与光频梳 2 发出的采样脉冲在分光镜 2 处合光,最后被探测器接收,在每隔  $1/\Delta f_r$  的测量周期内分别得到一个参考干涉信号 ( $I_R$ ) 和一个测量干涉信号 ( $I_M$ )。被测距离值  $D_{\text{TOF}}$  可表示为

$$D_{\text{TOF}} = \frac{v_g}{2} \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta f_r}{f_{r1}}, \quad (1)$$

式中:  $v_g$  为光脉冲的群速度;  $\Delta t$  为参考与测量干涉信号之间的时间延迟,其值通常是利用频域外差信号的相频斜率信息,即对采集的时域干涉信号进行傅里叶变换,再对相位谱解包裹求斜率计算得到的。这种测距方法叫作双光梳飞行时间法。2009 年, NIST 的 Coddington 等 [49] 首次将双光梳技术应用于测距领域,在 1.5 m 非模糊范围内, 200  $\mu\text{s}$  响应时间下,实现了精度(阿伦方差)为 3  $\mu\text{m}$  的绝对距

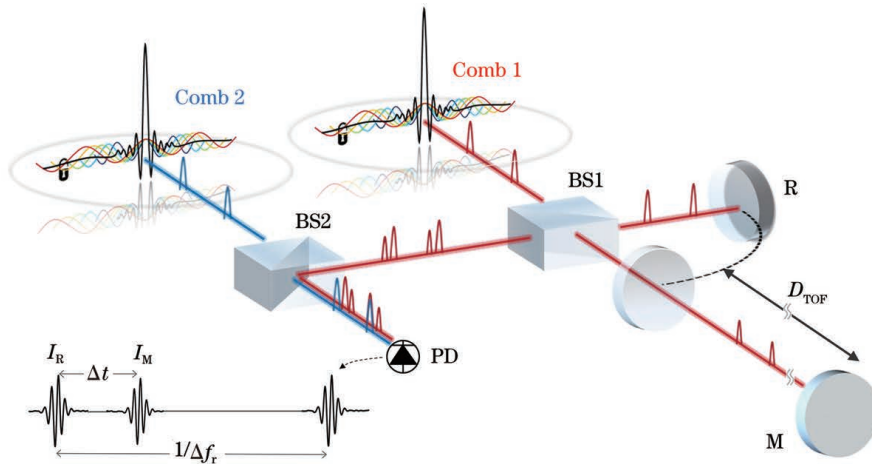


图 3 双光梳测距原理图

Fig. 3 Schematic of dual-comb ranging system

离测量。

除了通过相频斜率求解时延  $\Delta t$  外,也可利用时域干涉信号的包络信息直接计算得到。当光频梳时域脉冲不含有较大的啁啾,即形状接近高斯型时,通过对干涉信号进行希尔伯特变换并取模提取干涉信号包络,再对信号包络进行高斯拟合,可求解出参考和测量干涉信号包络顶点的时延。2011 年, NIST 的 Liu 等<sup>[50]</sup>通过提取包络计算时延的方式在 7 kHz 的测量速度下,获得了  $2 \mu\text{m}$  的绝对测距精度。2014 年,清华大学 Zhang 等<sup>[57]</sup>在双光梳测距光路中引入非线性 BBO 晶体,利用第二类相位匹配倍频技术直接提取了干涉信号包络,并对包络信号进行 sech 函数拟合,精确解算了包络时延。该方法在 2 kHz 的测量速度下,实现了  $1.48 \mu\text{m}$  的测量精度。类似的,2015 年天津大学 Shi 等<sup>[63]</sup>采用 PPKTP 晶体获取双光梳干涉信号的包络,同样获得了微米级精度的测距结果。

### 2.3 非模糊范围拓展及盲区消除

光频梳 1 发出的脉冲序列以重频  $f_{r1}$  为周期,脉冲周期对应的距离定义为  $L_{pp} = v_g / f_{r1}$ ,考虑到测

距往返,双光梳飞行时间法对应的非模糊测距范围为  $L_{pp}/2$ 。当被测距离超出  $L_{pp}/2$  时,被测距离  $D_{\text{TOF}}$  可表示为  $m \cdot L_{pp}/2 + L$ ,  $L$  为非模糊范围以内的测距值。为获得超过非模糊范围以外的测距值,需通过其他方法辅助确定整数周期  $m$ 。需要特别说明的是,采用图 3 所示的双光梳测距光路形式,当被测距离接近于  $L_{pp}/2$  的整数倍时,参考和测量干涉信号会在时域重叠,导致无法测量,干涉信号时域长度对应的距离范围称为测距“盲区”。为实现非模糊范围的拓展并消除测距“盲区”,2013 年,韩国科学技术院(KAIST)的 Lee 等<sup>[56]</sup>设计了如图 4 所示的正交偏振光路,用两个光电探测器分别探测参考和测量干涉信号,避免了测距“盲区”的影响。此外,通过微调光频梳的重频,产生了两个不同的脉冲间隔  $L_{pp1}$ 、 $L_{pp2}$ ,在一定的范围内,被测距离  $D_{\text{TOF}}$  可表示为  $m \cdot L_{pp1}/2 + L_1$  或  $m' \cdot L_{pp2}/2 + L_2$ ,其中  $m' = m$  或者  $m' = m + 1$ 。经过两次测量即可确定唯一整数周期  $m$ ,增大了非模糊测距范围。基于上述方法,在开放空间中实现了 69.3 m 的绝对测距,以  $200 \mu\text{s}$  为采样周期,测距精度优于  $170 \mu\text{m}$ 。

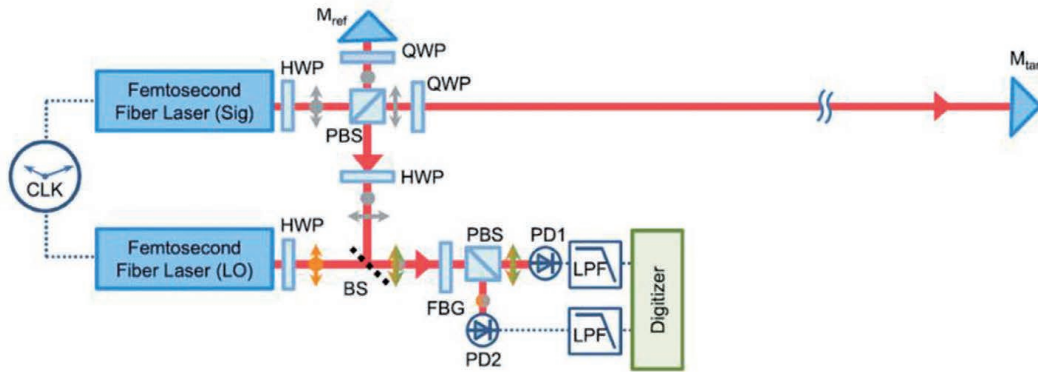


图 4 双光梳正交偏振光路测距原理图<sup>[56]</sup>

Fig. 4 Schematic of dual-comb ranging system with orthogonal polarization structure<sup>[56]</sup>

除上述方法外,基于游标原理,通过交换双光梳测距系统中的信号光梳和本振光梳,也可以实现非模糊范围的扩展<sup>[49]</sup>。非模糊范围扩展还可通过多光频梳测距的方式实现,2018 年,天津大学 Zhao 等<sup>[64]</sup>采用电光调制光频梳作为光源产生三光梳,其中两台为信号光梳,另外一台为本振光梳,以  $167 \mu\text{s}$  为采样周期,在 80 m 的测距范围内,实现了精度为 750 nm 的绝对测距。除利用电光调制的方法产生三光梳外,也可以在飞秒光纤激光器中引入复用机制,产生三光梳甚至四光梳。2019 年, Li 等<sup>[65]</sup>利用波长复用和偏振复用技术产生单腔三光梳,并开展了测距范围为 894.47 m 的测距实验。

### 2.4 参数模型优化

双光梳系统的参数与测距精度、速度等指标密切相关,对参数模型进行优化,是实现高性能双光梳测距的关键。双光梳系统基于多纵模外差干涉的原理将光频域的信息传递到射频域,为满足奈奎斯特采样定理,两台光频梳的光谱宽度  $\Delta\nu_{\text{comb}}$  需小于  $f_{r1}f_{r2}/2\Delta f_r$ ,此外子频率梳的频谱应分布在  $0 \sim f_{r2}/2$ ,如图 2(b)所示,以防止子频率梳和光频梳纵模之间的映射错误。在满足上述基本条件外,重频、重频差及空气折射率等参数也会对测距结果造成影响。根据双光梳飞行时间法测距原理,相对测距不确定度( $u_D/D$ )可表示为

$$\frac{u_D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln D}{\partial v_g}\right)^2 u_{v_g}^2 + \left(\frac{\partial \ln D}{\partial \Delta t}\right)^2 u_{\Delta t}^2 + \left(\frac{\partial \ln D}{\partial \Delta f_r}\right)^2 u_{\Delta f_r}^2 + \left(\frac{\partial \ln D}{\partial f_{r1}}\right)^2 u_{f_{r1}}^2} = \sqrt{\left(\frac{u_{v_g}}{v_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta f_r}}{\Delta f_r}\right)^2 + \left(\frac{u_{f_{r1}}}{f_{r1}}\right)^2} \quad (2)$$

此处为简化公式,用符号  $D$  代替飞行时间法测距结果  $D_{\text{TOF}}$ 。对于第 1 项  $u_{v_g}/v_g$  而言,其不确定度的提升受限于环境参数传感器的精度和空气折射率修正方法的精度,通常在  $10^{-7}$  量级<sup>[66]</sup>。重频  $f_{r1}$  的相对不确定度受到射频基准,即原子钟频率不确定度的限制,一般能优于  $10^{-11}$  量级,相较于(2)式中第 2 项和第 3 项的影响,可忽略不计。时延  $\Delta t$  的不确定度主要受到双光梳系统时间抖动和强度噪声的影响,其中时间抖动带来的影响可通过比例法测距的方式进行优化,此时(1)式中的  $\Delta t$  可通过  $\Delta t_{\text{rm}}/\Delta t_{\text{rr}} \cdot T_{\text{update}}$  求解得到,其中  $\Delta t_{\text{rm}}$  为参考和测量干涉信号包络之间的时延,而  $\Delta t_{\text{rr}}$  为相邻周期参考干涉信号包络之间的时延<sup>[50]</sup>。而强度噪声带来的影响可通过对多组测量结果取平均值的方法进行抑制,但也同步降低了测量速度<sup>[67-68]</sup>。考虑重频差  $\Delta f_r$  的不确定度对测距结果的影响,显然,选择更大的  $\Delta f_r$  可以减小相对测距不确定度,但较大的  $\Delta f_r$  会降低系统等效采样率,不利于干涉信号的恢复,且根据奈奎斯特采样定理,当  $f_{r1}, f_{r2}$  和  $\Delta v_{\text{comb}}$  不变时,更小的  $\Delta f_r$

有利于防止频谱混叠。因此,通常采用同步增大重频和重频差的方式来降低  $u_{\Delta f_r}/\Delta f_r$  和  $u_{f_{r1}}/f_{r1}$  这两项对测距不确定度的影响。而当重频一定时,则需要选择一个适合双光梳测距的  $\Delta f_r$  最优区域。

2015 年,清华大学 Wu 等<sup>[54]</sup> 系统地分析了重频差、重频、光谱带宽、偏频等参数对测距精度的影响。图 5(a) 仿真分析了当重频为 56 MHz 时,重频差与测距精度之间的关系。结果表明:重频差取值存在一个最优的区间,大约在 3400 Hz 附近。这与理论分析结果是吻合的,在满足奈奎斯特采样定理的前提下,即  $\Delta f_r$  小于  $f_{r1}f_{r2}/2\Delta v_{\text{comb}}$  时,在适当范围内提升  $\Delta f_r$  可以减小  $u_{\Delta f_r}/\Delta f_r$  引起的测距误差,而较大的  $\Delta f_r$  会降低系统等效采样率,影响测距精度。因此,当重频一定时,测距精度会随着  $\Delta f_r$  的增加呈先提升后降低的趋势,并存在一个最优取值区间,即图 5(a) 所示结果。需要注意的是,在重频差变化过程中,子频率梳频谱会移动,导致周期性的频谱混叠,从而发生了如图 5(b) 所示的测距精度周期性突变。

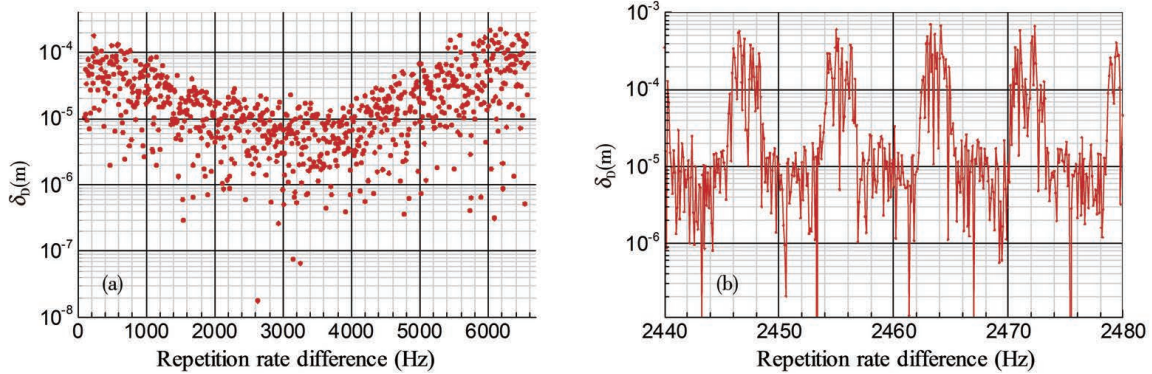


图 5 重频差优化<sup>[54]</sup>。(a)重频差最优区间分析;(b)频谱混叠对测距精度的影响

Fig. 5 Optimization of repetition rate difference<sup>[54]</sup>. (a) Optimal range analysis of repetition rate difference; (b) impact of spectrum aliasing on ranging precision

双光梳系统的等效采样率由重频和重频差共同决定,因此研究重频对测距性能的影响也是必要的。在仿真中,将重频依次设置为 50, 100, 150, 200 MHz,研究不同重频处测距精度与重频差之间的关系。从图 6(a)可以看出,每个重频值都存在一个重频差最优的区间。随着重频的增加,重频差的

最优值增加,最优区间范围也增大,对应的最优测距精度也提升。需要指出的是,重频差的最优区间还与光谱带宽有关。从图 6(b)可以看出,假定光频梳重频为 100 MHz,将光谱带宽从 200 GHz 增大到 400 GHz(对应 1.5 nm 到 3 nm 的波长范围),受奈奎斯特采样条件  $\Delta v_{\text{comb}} < f_{r1}f_{r2}/2\Delta f_r$  的限制,重频

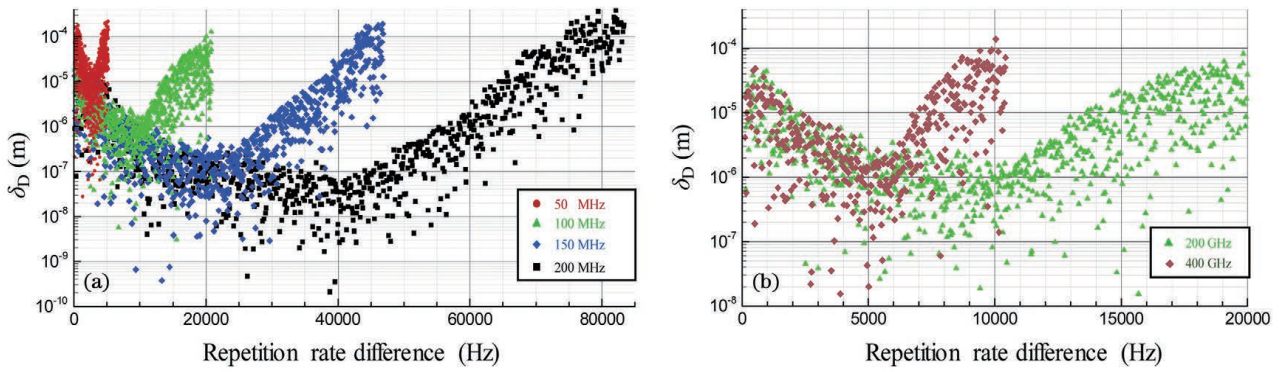


图 6 重频与光谱带宽优化<sup>[54]</sup>。(a)重频对测距精度的影响;(b)光谱带宽对测距精度的影响

Fig. 6 Optimization of repetition rate and spectral bandwidth<sup>[54]</sup>. (a) Impact of repetition rate on ranging precision; (b) impact of spectral bandwidth on ranging precision

差的取值上限从 25 kHz 减小到 12.5 kHz,重频差的最优值也从 10 kHz 减小到 5.5 kHz 附近。文献还分析了双光梳偏频差变化对测距精度的影响,对偏频差进行控制,以防止子频率梳频谱漂移引起的频谱混叠。

光频梳是一个多参数系统,各参数对测距精度的影响会相互耦合,上述内容总结了光频梳重频差、重频、光谱带宽、偏频等参数对测量精度的影响规律,并从理论建模、数值仿真和实验探索三个角度建立了光频梳测距系统的参数匹配模型,为双光梳测距系统参数设计提供了依据。

### 3 双光梳相位法测距

飞行时间法通过测量参考和测量干涉信号之间的时延来解算被测距离,其测量精度通常只能达到微米级,为实现更高精度的双光梳测距,需要进一步利用子频率梳纵模的相位信息。然而在典型的重频和偏频全锁定的光纤双光梳系统中,光频梳的梳齿线宽在百 kHz 量级,经过双光梳多纵模外差之后传递到子频率梳的梳齿线宽也在百 kHz 量级,而子频率梳的梳齿间隔仅为 kHz 量级,因此子频率梳的纵模是无法独立分辨的,对应的纵模相位信息也是不可用的<sup>[68]</sup>。为利用纵模相位信息实现更高精度的双光梳测距,必须对双光梳系统进行噪声抑制。

#### 3.1 双光梳噪声抑制

双光梳系统噪声抑制的实现方法主要包括紧密锁定法和非紧密锁定法两大类,前者指的是将两台光频梳紧密锁定至超稳连续激光<sup>[69-71]</sup>,而非紧密锁定法则不需要依靠超稳连续激光,根据技术方法的不同,又可细分为同步锁定法、数字补偿方法、自补偿法。同步锁定法不依赖于超稳连续激光,采用高

速同步锁定的方式实现两台光频梳的高互相关性<sup>[72-74]</sup>;数字补偿方法通过连续记录两台光频梳之间的参数波动,线下补偿干涉信号噪声<sup>[55, 75]</sup>;自补偿法则不借助外部的辅助系统,依靠双光梳的自身信号实现干涉信号噪声的提取和补偿<sup>[76-80]</sup>。

最早在 2010 年由 Coddington 等<sup>[69]</sup>详细介绍紧密锁定法的原理并将其应用于气体吸收光谱的高精度测量中,将两台连续激光器锁定到超稳腔上,一台连续激光器用于锁定两台光频梳的重频,另一台连续激光器用于锁定两台光频梳的偏频,获得了相对线宽小于 0.3 Hz 的双光梳系统。2016 年,为简化装置,Truong 等<sup>[70]</sup>单独通过  $f-2f$  干涉仪提取两台光频梳的偏频并锁定至射频基准,通过一台窄线宽外腔半导体激光器控制两台光频梳的重频,同样实现了双光梳系统的紧密锁定。

在双光梳系统中,实际上主要关注的是两台光频梳之间的互相关性。2012 年, Kuse 等<sup>[72]</sup>提出了同步锁定噪声抑制方法,通过两台不同频率的连续激光器分别获取两台光频梳梳齿之间的相对拍频,然后通过这两个拍频信号,分别反馈控制其中一台光频梳的重频和偏频,实现了两台光频梳的高互相关性。2018 年,清华大学 Zhu 等<sup>[73]</sup>提出了一种如图 7(a)所示的同步锁定双光梳系统,其原理是将两台光频梳的偏频通过  $f-2f$  干涉方式锁定,并利用压电陶瓷和温控装置锁定一台光频梳的重频,然后将两台光频梳分别与一台连续激光做拍,对得到的两个拍频电学信号进行差频,即可提取出两台光频梳梳齿之间的相对拍频信号。该信号表征了两次光频梳之间的相对稳定性。再进一步将相对拍频信号作为待锁定信号,通过电光调制器(EOM)、压电陶瓷和温控的联合反馈锁定另一光频梳的重频,从而

实现光频梳 1 和光频梳 2 的高互相关性。该技术有效抑制了双光梳系统的相对噪声,干涉信号时间抖

动从 35 ns 减小至 1.3 ns,对应原始光脉冲抖动从 680 fs 减小至 25 fs,如图 7(b)所示。

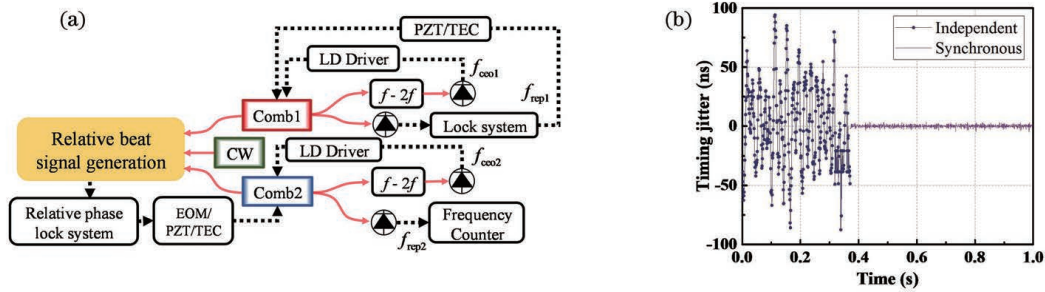


图 7 同步锁定双光梳系统<sup>[73]</sup>。(a)系统结构图;(b)噪声抑制前后的时间抖动

Fig. 7 Synchronous locking of dual-comb system<sup>[73]</sup>. (a) System structure; (b) timing jitter before and after noise suppression

除基于硬件的锁定方法之外,还可通过数字补偿的方式实现噪声抑制。2012 年, Roy 等<sup>[55]</sup>引入两台辅助连续激光器来提取子频率梳两根梳齿的实时相位噪声,并基于双光梳噪声理论模型,数字校正了双光梳干涉信号的载波相位波动和时间抖动,并将所述校正方法集成到现场可编程门阵列(FPGA)上,实现了长时间的噪声抑制。2018 年,清华大学 Zhu 等<sup>[75]</sup>也提出一种双光梳噪声数字后处理校正方法,原理如图 8(a)所示。在

两台光频梳独立锁定情况下,利用一台连续激光器分别与两台光频梳做拍,再提取出相对拍频信号作为补偿信号,分别对干涉信号的载波相位噪声和包络时间抖动进行数字补偿。实验结果证明,该方法可以恢复较为理想的子频率梳,校正后干涉信号的载波相位抖动和时间抖动阿伦方差如图 8(b)所示,无平均情况下载波相位抖动约为 0.2 rad,时间抖动约为 1 ns,实现了与同步锁定系统相当的性能。

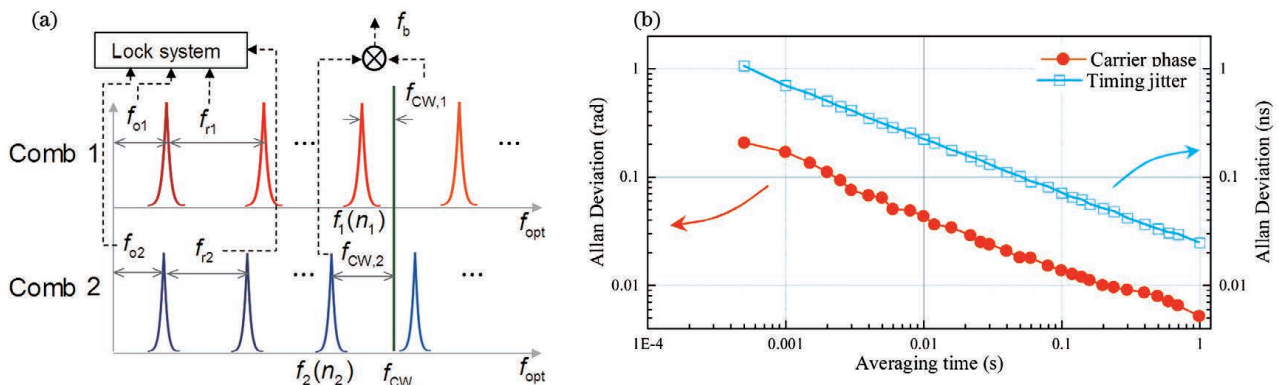


图 8 双光梳噪声数字后处理校正方法<sup>[75]</sup>。(a)系统原理图;(b)载波相位抖动和时间抖动的阿伦方差

Fig. 8 Digital post-correction method of dual-comb noise<sup>[75]</sup>. (a) System schematic diagram; (b) Allan deviation of carrier phase jitter and timing jitter

2016 年, Burghoff 等<sup>[76]</sup>基于高重频的量子级联激光器,仅根据双光梳干涉信号的信息,利用 Kalman 滤波算法提取出子频率梳重频、载波频率、梳齿的频谱幅度随时间的变化,实现了噪声自补偿。2017 年, Hébert 等<sup>[77]</sup>针对梳齿较多的光频梳激光器,提出了另一种自补偿方法,该方法利用非模糊互相关函数提取时间抖动和载波频率漂移,随后通过插值来补偿这两个噪声,也实现了双光梳子频率梳纵模分辨。2019 年,清华大学 Yu 等<sup>[78]</sup>提出了另一

种自补偿的方法,对载波的频率抖动、相位噪声、干涉信号的时间抖动分别进行了校正,校正后子频率梳线宽可优于 1 Hz。双光梳噪声抑制为高精度纵模相位提取提供了关键技术,推动了双光梳测距向更高精度发展。

### 3.2 相位法测距原理及研究进展

双光梳飞行时间法测距具有非模糊范围大的优势,但测量精度通常只能达到微米级。双光梳本质上通过多纵模外差干涉相位信息来解算被测距

离,噪声抑制后可实现稳定的单纵模外差干涉相位提取,通过参考和测量干涉信号的载波相位差  $\Delta\varphi_c$  可以得到更精确的距离值  $D_c$ ,数学表达式为

$$D_c = (N_c + \Delta\varphi_c/2\pi) \cdot \frac{\lambda_c}{2}, \quad (3)$$

式中: $\lambda_c$  表示空气中的载波波长; $N_c$  表示半载波波长( $\lambda_c/2$ )的整数周期。基于双光梳相位法,又称载波干涉相位法,提取干涉信号中的载波相位信息可

以实现更高精度测距,但对应的非模糊范围仅为载波波长的一半。基于双光梳的多光谱优势,如图 9 所示,当飞行时间法的测距精度优于  $\lambda_c/4$  时,可以唯一确定  $\lambda_c/2$  的整数周期  $N_c$ ,将飞行时间法直接与相位法相衔接,通过组合测距的方式可实现大非模糊范围、高精度的距离测量。需要说明的是,如果需要得到准确的载波相位信息,必须获得偏频和重频的准确值,否则无法准确溯源相位对应的光学频率值。

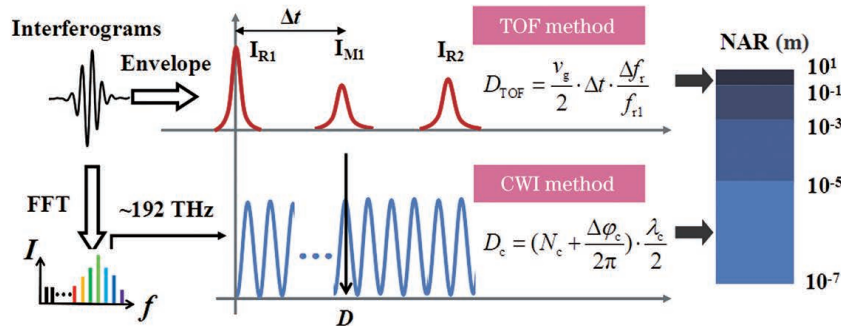


图 9 双光梳组合测距原理

Fig. 9 Principle of dual-comb combined ranging method

2009 年,NIST 的 Coddington 等<sup>[49]</sup> 在双光梳飞行时间测距方法的基础上,将两台光频梳锁定至两台稳频窄线宽激光器,如图 10 所示,实现了稳定

的外差干涉相位信息提取。通过 60 ms 的时间平均,将飞行时间法粗测结果与载波干涉相位相衔接,实现了精度为 5 nm 的绝对距离测量。

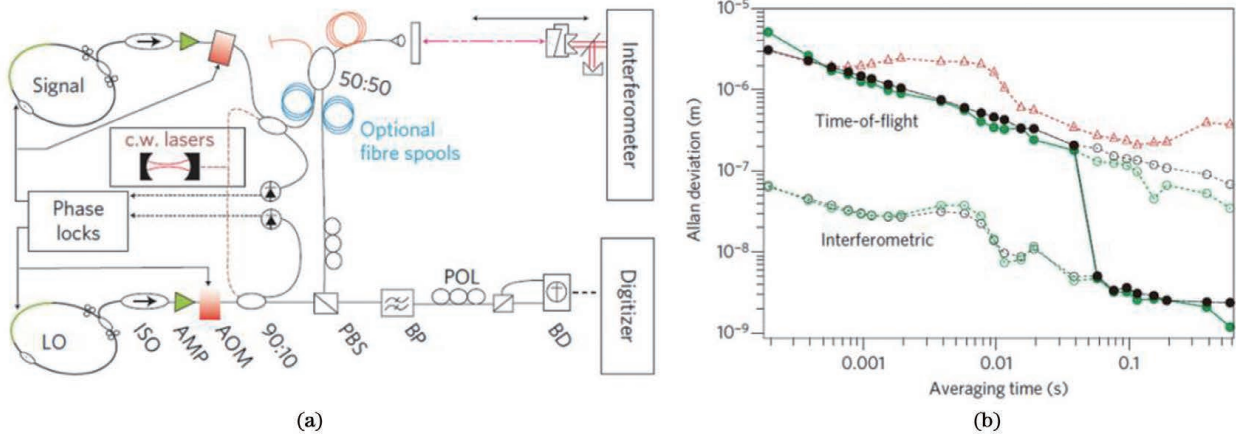


图 10 锁定至超稳连续激光的双光梳组合测距方法<sup>[49]</sup>。(a)系统原理图;(b)阿伦方差(精度)与平均时间的关系

Fig. 10 Dual-comb combined ranging method locked to CW reference lasers<sup>[49]</sup>。(a) System schematic diagram;

(b) Allan deviation (precision) versus averaging time

现有的双光梳噪声抑制技术主要对频率噪声进行抑制,还没有对强度噪声进行很有效抑制的方法,其对飞行时间法测距精度的影响成为了飞行时间法与载波干涉相位准确快速衔接的主要障碍。2018 年,清华大学 Zhu 等<sup>[58]</sup> 利用光频梳的宽光谱特性,如图 11(a)所示,将合光后的双光梳信号分别通过中心波长为  $\lambda_a$  (1578 nm) 和  $\lambda_b$  (1546 nm) 的带通滤波片滤光再进行探测,得到两组波长成分不同的干

涉信号,并利用两组干涉信号的载波波长构建适宜的非模糊距离,以合成波长测距结果作为飞行时间法和相位法之间的过渡衔接。实验结果表明:所述组合测距方法仅需 10 ms 的时间平均,即可实现在 2.67 m 非模糊范围内,3 nm 精度的绝对距离测量,如图 11(b)所示。对该测距系统和商用干涉仪进行对比,对比残差优于  $\pm 50$  nm。

为了进一步抑制随机噪声,清华大学 Zhou



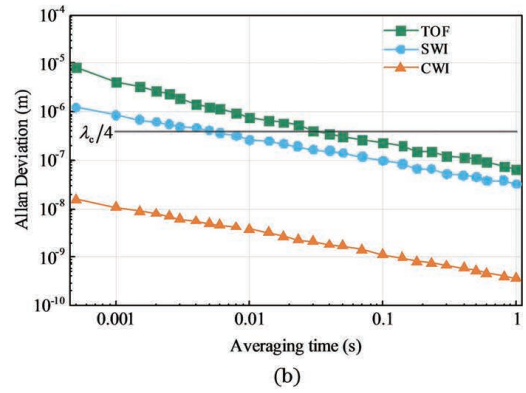
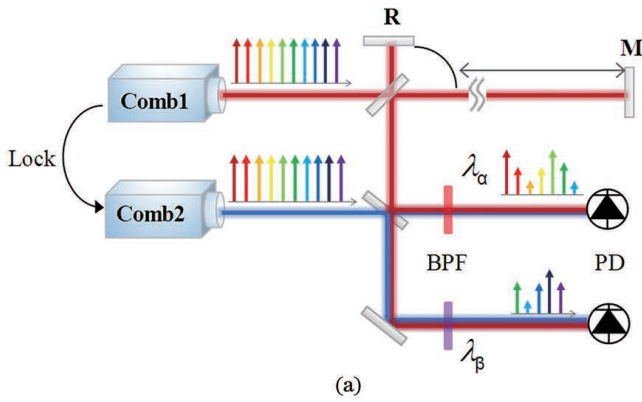


图 11 双光梳合成波长测距方法<sup>[58]</sup>。(a)系统原理图;(b)三种测距方法的阿伦方差(精度)与平均时间的关系

Fig. 11 Synthetic-wavelength-based dual-comb ranging method<sup>[58]</sup>. (a) System schematic diagram; (b) Allan deviation (precision) of three ranging methods versus averaging time

等<sup>[81]</sup>在 2020 年提出了一种双光梳时域干涉信号倍增技术,同时提高了飞行时间法和相位法的测距精度。从图 12 可以看出,来自光频梳 2 的  $n$  个采样脉冲序列与来自光频梳 1 的  $m$  个参考脉冲序列和  $m$  个测量脉冲序列依次发生重叠与错位,在  $1/\Delta f_r$  的测量周期内,可产生  $m \times n$  个参考干涉信号及  $m \times n$  个测量干涉信号,实现单个测量周期内干涉信号的倍增,进而可计算出多组测距结果,系统的随机噪声可通过对多组测距结果平均的方式进行抑制。在实验中将  $m$  设置为 2,  $n$  设置为 4,通过光纤分束耦合的方式产生时域多脉冲序列。该方法通过多脉冲序列互采样的技术,克服了传统双光梳系统中线性光学采样的局限性,在不降低非模糊范围的前提下,实现了更快速、更高精度的绝对距离测量。实验结果表明:飞行时间法和相位法的测距精度均提升了约  $\sqrt{m \times n}$ ,仅通过 15 ms 的平均时间,即可实现在 2.67 m 非模糊范围内精度为 3.1 nm 的绝对距离测量。

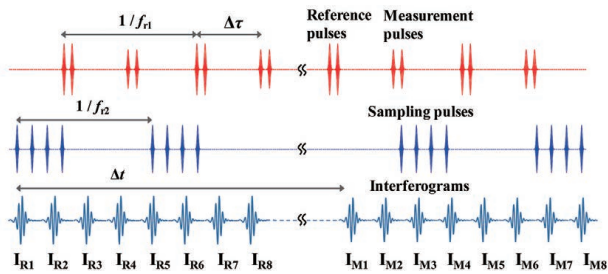


图 12 多脉冲线性光学互采样原理<sup>[81]</sup>

Fig. 12 Principle of multi-pulse linear optical sampling<sup>[81]</sup>

需要指出的是,根据双光梳系统的噪声理论模型,当参考臂和测量臂光程差在脉冲间隔整数倍附近时(测距“盲区”以外),参考与测量干涉信号之间的时延抖动及相位差噪声均较小。基于这个特点,

清华大学 Zhou 等<sup>[82]</sup>实现了无需噪声补偿的高精度绝对测距,只需锁定光频梳的重频和偏频,无需任何其他噪声补偿措施,在 4.3 mm 的动态范围内,50 Hz 的测量速度下,实现了精度优于 22 nm 的绝对距离测量。该方法适用于动态测距范围小、精度要求高的应用场景,例如固定长度的卫星天线测量、振动测量等。

## 4 双光梳多自由度测量

在多维自由空间中,除了要确定目标的绝对距离信息外,通常还需要测量俯仰和偏摆姿态以确定目标的方向,例如确定编队卫星的指向、飞行器装配中部件的方向等,因此姿态测量也是非常重要的<sup>[83-84]</sup>。在双光梳测距的研究基础上,有研究团队也开始了基于双光梳位姿同时测量的研究。

### 4.1 双光梳多目标绝对距离测量

2015 年,韩国 KAIST 的 Han 等<sup>[59]</sup>报导了一种通过双光梳多目标绝对测距实现距离和角度同时测量的方法,原理如图 13 所示。该方法采用衍射光学元件(DOE)产生多路衍射光束作为测量光束,通过双光梳多目标测距,实现了轴向距离、偏摆角及俯仰角的同时测量。实验证明,通过 0.5 s 的时间平均,该方法轴向测距精度可达 17 nm,偏摆角和俯仰角的测量精度优于 0.073"。该方法将双光梳测距技术与传统的多自由度测量光路相结合,实现了绝对距离与姿态的同时测量,具有更广泛的应用前景。然而,为同时获得俯仰角和偏摆角,上述方法需要在被测靶标上安装多个空间分离的目标靶镜,并且为实现高精度角度测量,还要求不同目标靶镜之间保持较长的间距,使得被测靶标体积庞大。此外,光频梳中的不同纵模分量经过 DOE 后,衍射角不同,测

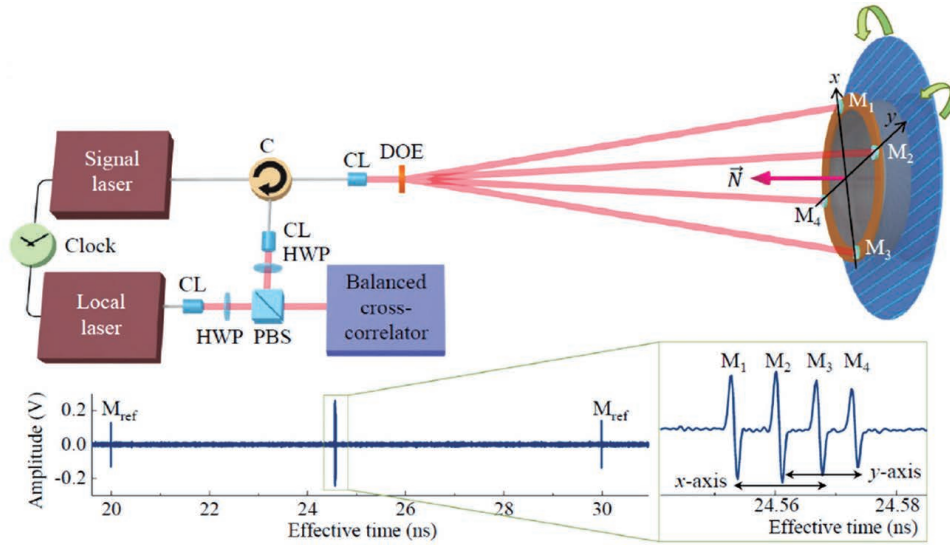


图 13 基于双光梳多目标测距的多自由度测量方法<sup>[59]</sup>

Fig. 13 Multi-degree-of-freedom measurement method based on multi-target dual-comb ranging<sup>[59]</sup>

量光束将随着被测距离的增大而不断发散,造成系统能量损耗较大,难以实现远距离测量。

#### 4.2 基于双光梳光谱相位辨析的三自由度测量

2021 年,清华大学 Zhou 等<sup>[85]</sup>将光栅对光谱相位的操控和双光梳对光谱相位的精密辨析有机结合,充分发挥了光频梳的时频域特性,提出了基于双光梳光谱相位精密辨析技术的三自由度测量方法。该方法巧妙地结合二维透射光栅的衍射特性和角锥棱镜的定向反射特性,将制作的二维透射光栅紧贴贴在角锥棱镜前表面,构建了如图 14(b)所示的新型无源靶镜——光栅角锥,该靶镜保留了角锥

棱镜的定向反射功能,用于获取绝对距离信息,光栅的多维衍射光束用于感知姿态信息,实现了用单测头同时解耦多自由度参数的目标。进一步以双光梳测距为基础,双光梳光谱相位高精度测量作为角度参数解耦的关键技术,实现了 1 kHz 测量速度下,精度优于 13.7 nm 与 0.088" 的轴向距离与二维姿态角同时测量。该方法解决了传统干涉位姿测量方法相位模糊的问题,具备高动态精度、大非模糊范围、紧凑靶镜、可长距离工作的综合性能优势,有望在空间探测和先进制造等领域广泛应用。

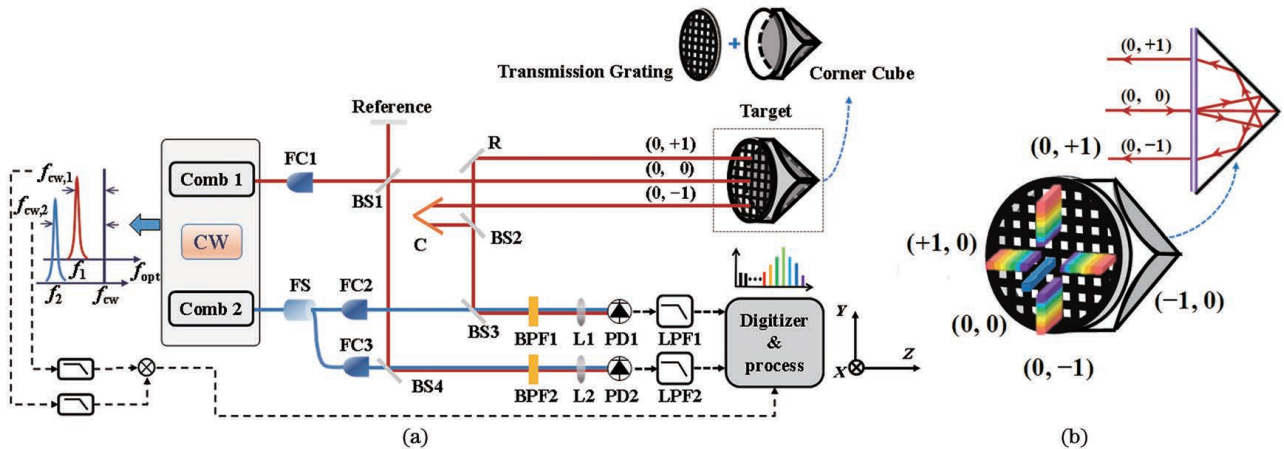


图 14 基于双光梳光谱相位辨析的三自由度测量方法<sup>[85]</sup>。(a)系统原理图;(b)光栅角锥示意图

Fig. 14 Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing<sup>[85]</sup>. (a) System schematic diagram; (b) schematic of grating-corner-cube sensor

### 5 双光梳绝对测距仪器及其应用

经过十余年的发展,双光梳测距在原理和方法

上已经取得了一系列突破,发展已经比较成熟,因此相关团队也相继开始聚焦于该技术的仪器化研究并基于该技术开展实际应用。清华大学吴冠豪团队基

于前期的基础研究,针对双光梳绝对距离测量系统现场化应用的难题,突破了一系列仪器化关键技术,自主开发了光频梳光源、测距光路、频率锁定控制器、信号采集处理系统全链条模块,集成了大范围、高测速、高分辨力、高精度的双光梳绝对距离测量仪器,并开展了示范性应用。

### 5.1 仪器化进程

清华大学吴冠豪团队自主开发的双光梳绝对测距仪器关键组件如图 15(a)所示,包括研制了基于可饱和吸收镜(SESAM)锁模原理的全保偏飞秒激光谐振腔;提出了温控和压电陶瓷组合的联合控制锁定方法,研制了高速、大范围闭环反馈系统,实现了光频梳重频的长时间、高精度锁定;设计并研制了

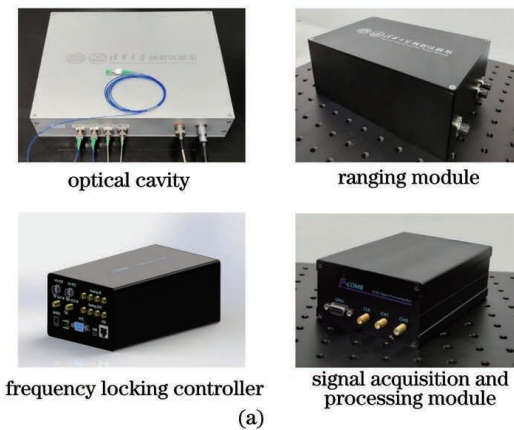


图 15 双光梳测距仪器。(a)仪器的关键组件;(b)测距比对结果

高可靠、低漂移的集成测距光路;提出了双光梳测量信号实时采集和处理的关键技术,研制了测距信号实时处理模块,最高测量频率可达 20000 Hz。

所研制的绝对测距仪器在中国计量科学研究院昌平基地 14# 80 m 平台进行了测试,测试结果如图 15(b)所示。在 45 m 范围内,以 5 m 为步长,与中国计量科学研究院标准干涉仪进行比对,比对残差  $\sigma$  为  $-2 \sim 2 \mu\text{m}$ 。实验结果表明:该仪器实现了大量程绝对距离测量,测距准确度优于  $0.5 \mu\text{m} + 0.2 \mu\text{m}/\text{m}$ ,测距速度大于 1000 次每秒。该仪器有效弥补了传统激光干涉仪的短板,在大尺寸绝对距离测量的工程需求中有重要的应用价值。

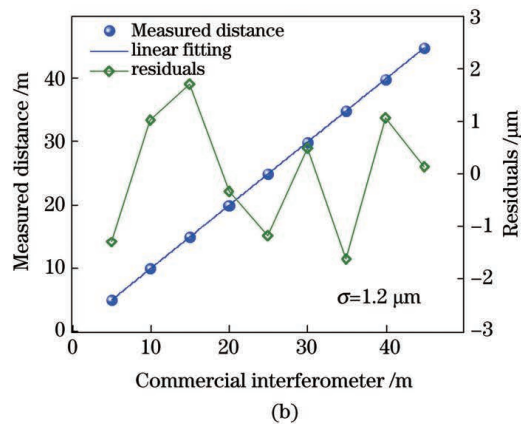


Fig. 15 Instrument of dual-comb ranging. (a) Key components of the instrument; (b) comparison results of ranging

2015 年,天津大学许立明等<sup>[86]</sup>报导了一种针对工业应用需求研制的双光梳绝对测距系统。该系统采用全保偏光纤化的光源设计,并对测距光路模块进行了集成化,在 2 m 的绝对距离处实现了 2 kHz 更新速率下  $3.3 \mu\text{m}$  的测距精度。

### 5.2 双光梳绝对测距应用

近几年来,有些团队也开展了关于双光梳测距技术的应用研究。2018 年,华东师范大学 Wang 等<sup>[38]</sup>基于双光梳飞行时间法测距原理,利用光栅的一维色散特性,将光频梳发出的宽光谱光束横向展开为一维线光源,并在空间分离编码,物体横向不同位置处的入射光束对应光频梳不同的光谱成分,通过相频斜率测距的方式,可解算出物体对应区域的深度信息,结合另一维度横向平移,可实现物体的三维形貌测量,原理光路如图 16 所示。该系统重频为 480 MHz,重频差为 5 kHz,两台光频梳的平均功率约为 400 mW,在 1.93 mm 的测量范围内横向分辨率可达  $22 \mu\text{m}$ ,物体深度测量精度为  $12 \mu\text{m}$ ,展示了

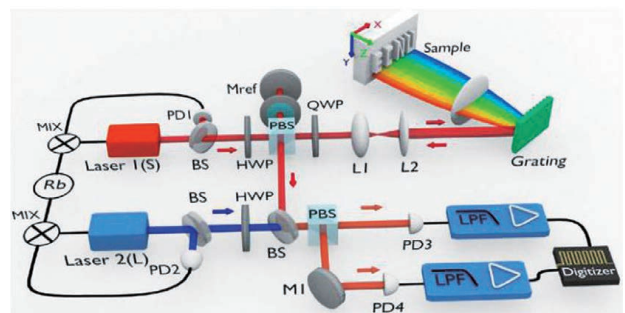


图 16 双光梳线扫描三维成像系统示意图<sup>[38]</sup>

Fig. 16 Schematic of dual-comb line-scan 3D imaging<sup>[38]</sup>

双光梳测距技术在三维形貌测量中的应用前景。

2020 年,韩国 KAIST 的 Kim 等<sup>[87]</sup>利用不同距离处产生的双光梳干涉信号在时域中分离的优势,将双光梳测距技术拓展应用于复杂光学组件的无损检测中,以透镜表面反射光束作为测量光束,通过飞行时间测距原理对透镜组中 12 个透镜的绝对位置信息进行了同时测量,准确度可优于  $1 \mu\text{m}$ 。2021 年,天津大学 Hu 等<sup>[88]</sup>将双光梳测距技术应用于非

合作目标测量,对 3.46 m 绝对距离处的铝板进行了定位。为得到有效的测量信号,在测量臂中加入了一个 5 inch(1 inch=2.54 cm)口径的望远镜,非同轴收集非合作目标的回射光束,所获得的探测光功率约为入射光功率的 1/5000,通过结合 Kalman 滤波技术,在 20 Hz 的实时测量速度下获得了 225.7 nm 的测距精度。进一步的,通过测量标准量块组装的 2 mm 固定高度台阶和平均深度约为 7.6  $\mu\text{m}$  的三维轮廓,验证了该方法测量非合作目标的准确性。2021 年,天津大学的 Cao 等<sup>[89]</sup>将双光梳测距技术应用于振动测量,基于双光梳飞行时间测距原理对物体小幅度的振动状态进行了还原。采用奇异谱分析的方法从低信噪比的测距信号中提取出了振动的有效频率成分,在 2 kHz 的重频差下进行了 100 Hz 的振动测量实验,和干涉仪比对,残差标准差优于 0.6  $\mu\text{m}$ 。2017 年,瑞典查尔姆斯理工大学的 Teleanu 等<sup>[90]</sup>利用电光双光梳测距系统测量物体的高速微小振动,重频差设定为 25 MHz,经过 100 次的相干平均后,可以精确捕捉 50 kHz 的目标振动。基于电光调制原理的光频梳重频主要取决于外部的射频信号源,可实现几十 GHz 的高重频输出,远高于光纤光频梳数十至数百 MHz 的重频,因此距离测量的速度也更快,可探测到的振动频率也更高。2018 年,德国卡尔斯鲁厄理工学院的 Weimann 等<sup>[91]</sup>提出了一种基于双色调制器的电光双光梳测距系统,该系统通过双波长光源补偿了温度引起的光纤漂移,抗扰动能力强,具备良好的工业适用性。实验结果表明:该系统的测距精度在 9.1  $\mu\text{s}$  的测量周期下可达 2  $\mu\text{m}$ ,通过将光纤耦合测头连接至工业坐标测量机上,利用实时信号处理和连续光纤漂移补偿,实现了集成电路板表面、硬币表面及台阶样品的测量,并展示了在测头连续移动过程中获取数百万个数据点的点云结果。

上述方法充分利用双光梳系统时域线性光学互采样和频域多纵模外差干涉的优势,展示了双光梳绝对测距技术在三维形貌动态测量、复杂光学组件无损检测、非合作目标测量及振动测量中应用的可行性,凸显了双光梳测距方法高精度、高测速、大非模糊范围、绝对量测量的综合性能优势。电光调制双光梳相比光纤双光梳测速更快,但非模糊范围会同步减小,更适用于对测速要求高、绝对测距范围小的应用场景,例如振动测量等。需要提到的是,上述所报导的双光梳测距应用还处于实验室阶段,离实际工程应用还有一段距离。清华大学吴冠豪团队研

制的双光梳绝对测距仪器实现了从光频梳光源到测距模块的系统全链条集成,已在高分对地观测空间相机的稳定性测量、微波遥感卫星天线展开测量等国家重点工程中开展了示范应用。

空间相机成像分辨率受光学系统支撑结构稳定性的制约,进行地面实验时,必须测试其经历低温和振动实验后光学系统支撑结构的变形。为实现高分辨观测,国家新一代某高分卫星大口径空间相机要求支撑结构经历极端实验后稳定性达到亚微米级,最先进的三坐标测量机也无法满足该精度需求,因此亟需高精度绝对距离测量手段解决空间相机稳定性的测量难题。清华大学吴冠豪团队在双光梳绝对测距仪器的基础上进行进一步应用开发,利用光频梳光纤输出的优势,将测量光分成 20 束,每束光对应一对测量终端,如图 17 所示,终端 1 中集成了分束器和参考镜,终端 2 为测量靶镜。在空间相机经历低温和振动实验后,双光梳测距仪通过并行测量在相机光学系统结构上布置的 20 对终端之间的绝对距离来精确测量相机光学系统的整体变形。与三坐标测量机相比,变形测量精度从 1  $\mu\text{m}/\text{m}$  直接提升至 0.2  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,测量时间从数小时缩短到 1 min 以内。该仪器成功解决了空间相机整体稳定性高精度测量的难题,保障了新一代空间相机型号研制任务的顺利实施。

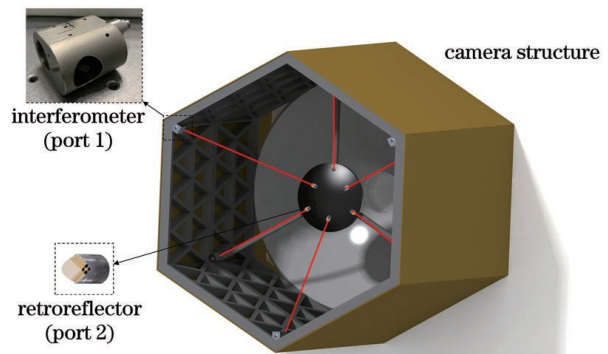


图 17 空间相机整体结构稳定性测量

Fig. 17 Stability measurement of space camera overall structure

微波遥感卫星入轨后,支撑臂末端天线展开的位姿准确与否直接影响遥感分辨率,必须依靠高精度的绝对距离测量仪器进行多路并行测量,获取位置和姿态。在航天某部门承担的某民用高分辨率微波遥感卫星型号预研项目中,支撑臂长为 60 m,绝对距离测量精度需优于 20  $\mu\text{m}$ ,现有技术难以满足要求。清华大学吴冠豪团队研制的双光梳绝对测距仪器成功应用于卫星天线展开测量的地面验

证,实现了卫星主体到天线的高精度绝对距离测量,指标达到了项目要求,解决了卫星支撑臂末端天线

绝对位置和姿态测量的难题,保障了型号任务的立项,如图 18 所示。

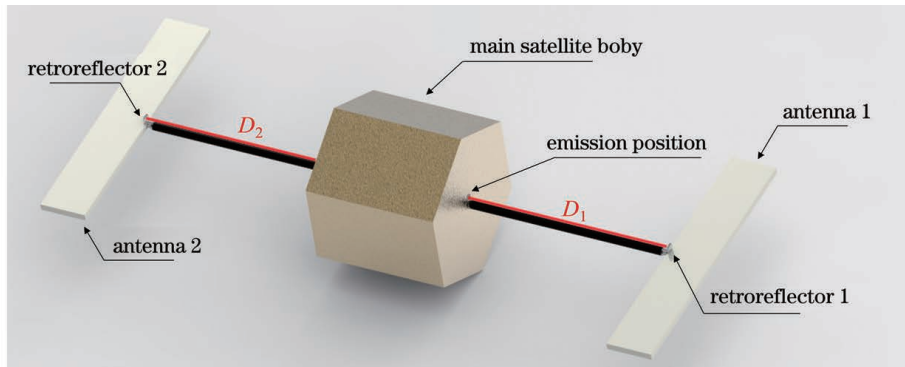


图 18 卫星天线测量

Fig. 18 Satellite antenna measurement

清华大学吴冠豪团队研制的双光梳测距仪器已经具备工程应用条件,有望进一步满足国家高端装备制造制造业包括航空装备制造、卫星装备制造、船舶制造等领域对高精度绝对距离测量的需求。

## 6 展 望

近几年出现的微腔光频梳因具有微型化、易于片上集成的特点,在测距领域具有更好的应用优势,也成为了近年来的研究热点<sup>[92-93]</sup>。微腔光频梳的出现极大地提升了光频梳的重频。在这种情况下,选

择更大的重频差,可以实现更快速、更高精度的绝对距离测量。2018 年, Suh 等<sup>[60]</sup>利用如图 19 所示的微腔光频梳从顺时针和逆时针两个方向分别产生信号脉冲和采样脉冲,信号重频为 9.36 GHz,重频差可调节的最大值为 20 kHz。通过飞行时间法提取包络的方式在 500 ms 的平均时间下,16 mm 的非模糊范围内,实现了 200 nm 的测距精度,进一步通过互换本振光梳和信号光梳重频,将非模糊范围扩展至约 26 km,并展示了在 26 m 处的绝对测距结果。

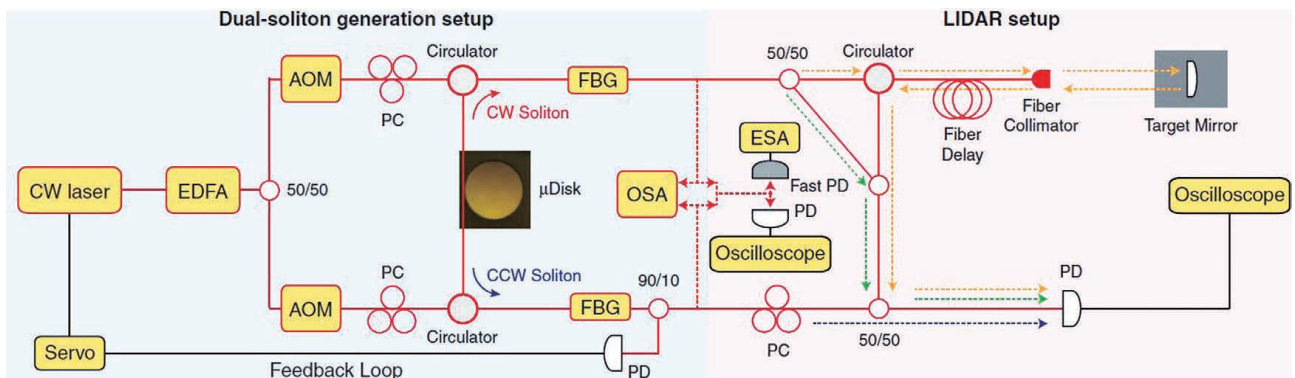


图 19 微腔双光梳测距原理图<sup>[60]</sup>

Fig. 19 Schematic of micro-comb dual-comb ranging<sup>[60]</sup>

2018 年, Trocha 等<sup>[61]</sup>利用两台微腔光频梳作为光源,系统重频约为 96 GHz,重频差为 96.4 MHz,通过 13  $\mu$ s 的时间平均,实现了精度为 12 nm 的绝对距离测量。该方法采用两台微腔光频梳作为光源,因此重频差可调节的范围大于图 19 中单腔双光梳方案。高重频双光梳测距系统带来的高精度结果符合参数模型优化中同步提高重频和重频差可以提升测距精度的结论。为进一步展示微腔双光梳系统高速测距性能,对时速超过 150 m/s 的气枪子弹轮

廓进行了重建。

2020 年, Lukashchuk 等<sup>[94]</sup>还将微腔双光梳测距拓展应用于激光雷达领域,基于调频连续波激光雷达的机理,利用双光梳多纵模外差的方式将不同通道在射频域中分离解调,展示了 24 个通道并行测距 33 m 的验证性实验。

需要指出的是,微腔光频梳除了应用于双光梳测距以外,在具有其他原理的光频梳测距中也体现了优异的性能。2020 年,天津大学 Wang 等<sup>[95]</sup>基于

光频梳色散干涉测距原理,利用重频约为 50 GHz 的微腔光频梳实现了大于 1 km 的长程高精度测距。在 1179 m 的绝对距离处,通过 0.2 ms 的时间平均,获得了 5.6  $\mu\text{m}$  的测距精度,该方法解决了传统低重频光纤光频梳色散干涉测距中存在测量死区的问题,为高精度远距离测距提供了新的解决方案。

微腔双光梳测距系统基于飞行时间测距原理已经实现了较好的测量精度和较高的测速,但目前对于微腔光频梳的重频和偏频同时锁定还难以实现,因此还不能够利用纵模相位信息实现更高精度的测距和量值溯源。当前微腔双光梳的技术成熟度距离工程应用也有一定差距,但不可否认的是微腔光频梳的出现给双光梳测距领域的进一步发展带来了新的机遇,更为紧凑的微腔光频梳已经可以实现片上集成,随着微腔光频梳光源的进一步发展和成熟,未来有望在部分测距应用场景代替发展较为成熟的光纤光频梳。

## 7 总 结

双光梳测距法充分发挥了光频梳的时域超短脉冲和频域宽光谱、窄线宽特性,为大量程、高精度、高测速绝对距离测量提供了一个高效的工具,也成为了测距领域的前沿技术热点。近十几年来,国内外学者相继开展了双光梳绝对距离测量原理、方法和测量系统仪器化中的科学技术问题研究,为光学精密计量领域带来了突破。随着双光梳测距技术的不断发展和成熟,光频梳光源、测距光路、频率锁定控制器、信号采集处理系统全链条模块的小型化和集成化,双光梳测距系统有望成为轻便的仪器化产品,在科学研究和工业领域得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- [1] Lim H C, Bang H. Adaptive control for satellite formation flying under thrust misalignment [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(1/2): 112-122.
- [2] Vassar R H, Sherwood R B. Formation keeping for a pair of satellites in a circular orbit [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1985, 8(2): 235-242.
- [3] Duren R M, Liebe C C. The SRTM sub-arcsecond metrology camera [C] // 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 10-17, 2001, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2001: 2037-2046.
- [4] Duren R M, Wong E, Breckenridge B, et al. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3365: 51-60.
- [5] Fan K C, Li R J, Xu P. Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machines [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2(1): 1-15.
- [6] Bosse H, Wilkening G. Developments at PTB in nanometrology for support of the semiconductor industry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(11): 2155-2166.
- [7] Peggs G N, Maropoulos P G, Hughes E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(6): 571-595.
- [8] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [9] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, et al. Large-scale metrology-an update [J]. *CIRP Annals*, 2002, 51(2): 587-609.
- [10] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications [J]. *Communications Physics*, 2019, 2: 153.
- [11] Kim S W. Combs rule [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 313-314.
- [12] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [13] Cundiff S T, Ye J. Colloquium: femtosecond optical frequency combs [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75(1): 325-342.
- [14] Diddams S A, Udem T, Bergquist J C, et al. An optical clock based on a single trapped  $^{199}\text{Hg}^+$  ion [J]. *Science*, 2001, 293(5531): 825-828.
- [15] Papp S B, Beha K, Del'Haye P, et al. Microresonator frequency comb optical clock [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 10-15.
- [16] Spencer D T, Drake T, Briles T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 557(7703): 81-85.
- [17] Jost J D, Hall J L, Ye J. Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator [J]. *Optics Express*, 2002, 10(12): 515-520.
- [18] Giorgetta F R, Coddington I, Baumann E, et al. Fast high-resolution spectroscopy of dynamic continuous-wave laser sources [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 853-857.

- [19] Kim J, Cox J A, Chen J, et al. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 733-736.
- [20] Marra G, Margolis H S, Lea S N, et al. High-stability microwave frequency transfer by propagation of an optical frequency comb over 50 km of optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1025-1027.
- [21] Marra G, Slavik R, Margolis H S, et al. High-resolution microwave frequency transfer over an 86-km-long optical fiber network using a mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 511-513.
- [22] Barmes I, Witte S, Eikema K S E. Spatial and spectral coherent control with frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(1): 38-42.
- [23] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3375-3382.
- [24] Ycas G, Giorgetta F R, Baumann E, et al. High-coherence mid-infrared dual-comb spectroscopy spanning 2.6 to 5.2  $\mu\text{m}$ [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 202-208.
- [25] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146-157.
- [26] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [27] Asahara A, Nishiyama A, Yoshida S, et al. Dual-comb spectroscopy for rapid characterization of complex optical properties of solids [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4971-4974.
- [28] Minamikawa T, Hsieh Y D, Shibuya K, et al. Dual-comb spectroscopic ellipsometry[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 610-617.
- [29] Guo J J, Ding Y H, Xiao X S, et al. Multiplexed static FBG strain sensors by dual-comb spectroscopy with a free running fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16147-16154.
- [30] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0400001.  
路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0400001.
- [31] Jang Y S, Kim S W. Distance measurements using mode-locked lasers: a review[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018, 1(3): 131-147.
- [32] Dong X, Zhou X, Kang J Q, et al. Ultrafast time-stretch microscopy based on dual-comb asynchronous optical sampling[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2118-2121.
- [33] Hase E J, Minamikawa T, Mizuno T, et al. Scanless confocal phase imaging based on dual-comb microscopy[J]. *Optica*, 2018, 5(5): 634-643.
- [34] Bao C Y, Suh M G, Vahala K. Microresonator soliton dual-comb imaging[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1110-1116.
- [35] Wu G H, Takahashi M, Arai K, et al. Extremely high-accuracy correction of air refractive index using two-colour optical frequency combs [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1894-1899.
- [36] Zhu Z B, Ni K, Zhou Q, et al. Two-color phase-stable dual-comb ranging without precise environmental sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4660-4671.
- [37] Shibuya K, Minamikawa T, Mizutani Y, et al. Scanless hyperspectral dual-comb single-pixel-imaging in both amplitude and phase[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21947-21957.
- [38] Wang C, Deng Z J, Gu C L, et al. Line-scan spectrum-encoded imaging by dual-comb interferometry [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1606-1609.
- [39] Duan Y H, Dong X, Zhang L, et al. Ultrafast discrete swept source based on dual chirped combs for microscopic imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2621-2631.
- [40] Joo W D, Kim S, Park J, et al. Femtosecond laser pulses for fast 3-D surface profilometry of microelectronic step-structures [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15323-15334.
- [41] Kang J Q, Feng P P, Li B W, et al. Video-rate centimeter-range optical coherence tomography based on dual optical frequency combs by electro-optic modulators [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24928-24939.
- [42] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [43] Jun Y. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [44] Wu G H, Liao L, Xiong S L, et al. Synthetic wavelength interferometry of an optical frequency comb for absolute distance measurement [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4362.
- [45] Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5954-5960.
- [46] van den Berg S A, Persijn S T, Kok G J, et al.

- Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(18): 183901.
- [47] Schuhler N, Salvadé Y, Lévêque S, et al. Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement[J]. Optics Letters, 2006, 31(21): 3101-3103.
- [48] Wang G C, Jang Y S, Hyun S, et al. Absolute positioning by multi-wavelength interferometry referenced to the frequency comb of a femtosecond laser[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9121-9129.
- [49] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [50] Liu T A, Newbury N R, Coddington I. Sub-micron absolute distance measurements in sub-millisecond times with dual free-running femtosecond Er fiber-lasers[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18501-18509.
- [51] Wu X J, Li Y, Wei H Y, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030001.  
吴学健, 李岩, 尉昊赞, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030001.
- [52] Wang Y L, Yang L H, Lin J R, et al. Absolute distance measurement based on coherent detection by femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0112003.  
王一霖, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对测距[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0112003.
- [53] Schiller S. Spectrometry with frequency combs[J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 766-768.
- [54] Wu G H, Xiong S L, Ni K, et al. Parameter optimization of a dual-comb ranging system by using a numerical simulation method[J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32044-32053.
- [55] Roy J, Deschênes J D, Potvin S, et al. Continuous real-time correction and averaging for frequency comb interferometry[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 21932-21939.
- [56] Lee J, Han S, Lee K, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with adjustable synthetic wavelength [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(4): 045201-045208.
- [57] Zhang H Y, Wei H Y, Wu X J, et al. Absolute distance measurement by dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling [J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6597-6604.
- [58] Zhu Z B, Xu G Y, Ni K, et al. Synthetic-wavelength-based dual-comb interferometry for fast and precise absolute distance measurement[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5747-5757.
- [59] Han S, Kim Y J, Kim S W. Parallel determination of absolute distances to multiple targets by time-of-flight measurement using femtosecond light pulses [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25874-25882.
- [60] Suh M G, Vahala K J. Soliton microcomb range measurement[J]. Science, 2018, 359(6378): 884-887.
- [61] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. Science, 2018, 359(6378): 887-891.
- [62] Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy[J]. Optica, 2016, 3(4): 414-426.
- [63] Shi H S, Song Y J, Liang F, et al. Effect of timing jitter on time-of-flight distance measurements using dual femtosecond lasers [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14057-14069.
- [64] Zhao X Y, Qu X H, Zhang F M, et al. Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using an electro-optic triple comb[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 807-810.
- [65] Li T, Zhao X, Chen J, et al. Absolute distance measurement with a long ambiguity range using a tri-comb mode-locked fiber laser [C] //CLEO: Science and Innovations 2019, May 5-10, 2019, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2019: SM2H.1.
- [66] Birch K P, Downs M J. An updated edlén equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30(3): 155-162.
- [67] Shi H S, Song Y J, Li R M, et al. Review of low timing jitter mode-locked fiber lasers and applications in dual-comb absolute distance measurement [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2018, 1(4): 205-217.
- [68] Zhu Z B, Wu G H. Dual-comb ranging[J]. Engineering, 2018, 4(6): 772-778.
- [69] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio [J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 043817-043829.
- [70] Truong G W, Waxman E M, Cossel K C, et al. Accurate frequency referencing for fieldable dual-comb spectroscopy [J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30495-30504.
- [71] Okubo S, Iwakuni K, Inaba H, et al. Ultra-



- broadband dual-comb spectroscopy across 1.0-1.9  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(8): 082402.
- [72] Kuse N Y, Ozawa A, Kobayashi Y. Comb-resolved dual-comb spectroscopy stabilized by free-running continuous-wave lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(11): 112402.
- [73] Zhu Z B, Xu G Y, Ni K, et al. Improving the accuracy of a dual-comb interferometer by suppressing the relative linewidth[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045007-045011.
- [74] Yasui T, Iyonaga Y, Hsieh Y D, et al. Super-resolution discrete Fourier transform spectroscopy beyond time-window size limitation using precisely periodic pulsed radiation[J]. *Optica*, 2015, 2(5): 460-467.
- [75] Zhu Z B, Ni K, Zhou Q, et al. Digital correction method for realizing a phase-stable dual-comb interferometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16813-16823.
- [76] Burghoff D, Yang Y, Hu Q. Computational multiheterodyne spectroscopy[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601227.
- [77] Hébert N B, Genest J, Deschênes J D, et al. Self-corrected chip-based dual-comb spectrometer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8168-8179.
- [78] Yu H Y, Ni K, Zhou Q, et al. Digital error correction of dual-comb interferometer without external optical referencing information [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29425-29438.
- [79] Sterczewski L A, Westberg J, Wysocki G. Computational coherent averaging for free-running dual-comb spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23875-23893.
- [80] Hébert N B, Michaud-Belleau V, Deschênes J D, et al. Self-correction limits in dual-comb interferometry[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(4): 1-11.
- [81] Zhou S Y, Lin C, Yang Y T, et al. Multi-pulse sampling dual-comb ranging method [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4058-4066.
- [82] Zhou S Y, Xiong S L, Zhu Z B, et al. Simplified phase-stable dual-comb interferometer for short dynamic range distance measurement [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22868-22876.
- [83] Wang P K C, Hadaegh F Y, Lau K. Synchronized formation rotation and attitude control of multiple free-flying spacecraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, 22(1): 28-35.
- [84] Uriarte L, Zatarain M, Axinte D, et al. Machine tools for large parts[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 731-750.
- [85] Zhou S Y, Le V, Xiong S L, et al. Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 243-251.
- [86] Xu L M, Song Y J, Liang F, et al. All polarization maintaining fiber based dual-comb high precision absolute distance measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S2): S212001.  
许立明, 宋有建, 梁飞, 等. 全保偏光纤化的双光梳高精度绝对测距系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(S2): S212001.
- [87] Kim W, Jang J, Han S, et al. Absolute laser ranging by time-of-flight measurement of ultrashort light pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2020, 37(9): B27-B35.
- [88] Hu D T, Wu Z L, Cao H, et al. Dual-comb absolute distance measurement of non-cooperative targets with a single free-running mode-locked fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126566.
- [89] Cao H, Song Y J, Hu M L, et al. Singular spectrum analysis for extracting low amplitude vibrations in femtosecond laser time-of-flight distance measurements[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-10.
- [90] Teleanu E L, Durán V, Torres-Company V. Electro-optic dual-comb interferometer for high-speed vibrometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16427-16436.
- [91] Weimann C, Messner A, Baumgartner T, et al. Fast high-precision distance metrology using a pair of modulator-generated dual-color frequency combs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34305-34335.
- [92] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 158-169.
- [93] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators [J]. *Science*, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [94] Lukashchuk A, Riemensberger J, Karpov M, et al. Microresonator dual-comb coherent FMCW LiDAR [C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-2.
- [95] Wang J D, Lu Z Z, Wang W Q, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1964-1972.

## Dual-Comb Ranging and Its Applications

Wu Guanhao<sup>1\*</sup>, Zhou Siyu<sup>1\*\*</sup>, Yang Yuetang<sup>1</sup>, Ni Kai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup> Division of Advanced Manufacturing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China

### Abstract

**Significance** Distance measurement is a common basic technology in the field of geometric measurement and has broad applications in scientific research and industry. Currently, high-precision distance measurement is normally achieved using the interferometric method, and the distance results can be directly traced to the optical wavelength. However, the phase ambiguity hinders the application of the traditional interferometric method in long-distance absolute positioning, such as space missions, including tight formation-flying satellites, antenna measurement, spacecraft rendezvous and docking, as well as precision manufacturing and assembly, including aircraft manufacturing, satellite equipment manufacturing, and synthetic aperture optical system assembly. Fortunately, invention of the optical frequency comb (OFC) provides great opportunities for geometric measurements.

In recent years, several OFC-based methods have been proposed for the measurement of distances, e. g., the intermode beat, dispersive interferometry, pulse alignment, and dual-comb methods. Compared with conventional methods, OFC-based methods are capable of resolving the problem of phase ambiguity and measuring the absolute distance. Among them, the dual-comb ranging method makes full use of the characteristics of OFC in the time and frequency domains and exhibits reasonable dynamics, precision, and unambiguity range. The dual-comb method opens up a new direction for distance measurement and is expected to bring great benefits to optical metrology. Since 2009, many advances have been achieved in dual-comb ranging techniques. However, there are still several challenges involving principle research and industrial applications. Hence, it is necessary to summarize progress of the dual-comb ranging technique to guide future development in this field more rationally.

**Progress** The progress of the dual-comb ranging method is illustrated in Fig. 1. The concept of dual-comb was first proposed in 2002 by Schiller, and was first applied to absolute distance measurement in 2009 by Coddington et al from NIST. Recently, the proposed dual-comb ranging method primarily uses fiber combs as the light source and achieves absolute distance measurement based on two principles, namely, time-of-flight-based and phase-based ranging. Optimizing the parameter model and suppressing the frequency noise of a dual-comb system are two key technologies to achieve high-precision distance measurement. Here, the time-of-flight ranging method mainly focuses on the former, while achieving the phase-ranging method is based on the latter. Since 2013, domestic and foreign researchers have explored the performance improvement, function expansion, and applications of the dual-comb ranging method, including the dead-zone elimination of dual-comb ranging, nonambiguity range extension, improvement of ranging precision and response speed, dual-comb multi-degree-of-freedom sensing, and instrumentation and applications of the dual-comb ranging technique. Since 2018, research on the microresonator-based dual-comb ranging method has been reported. The microcomb has the characteristics of miniaturization and easy on-chip integration. Compared with the fiber comb, the microcomb offers a better application prospect in the field of ranging, and provides new opportunities for further developments of dual-comb ranging.

**Conclusions and Prospects** In summary, the dual-comb ranging technique provides an efficient tool for absolute distance measurement with a large unambiguity range, high precision, and high speed, and it has also become a hot spot in the field of ranging. Such an overall performance brings great benefits to various tasks in optical metrology. With the continuous in-depth and detailed explorations of dual-comb ranging, it is expected to become a portable instrument product widely used in scientific research and industry.

**Key words** measurement; absolute distance measurement; dual-comb; time-of-flight-based ranging method; phase-based ranging method; instrumentation and application

**OCIS codes** 120.3930; 120.3940