

飞秒激光频率梳精密测距技术综述*

周维虎^{1,2}, 石俊凯¹, 纪荣祎¹, 黎尧¹, 刘娅¹

(1. 中国科学院光电研究院激光测量技术研究室 北京 100094; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:高精度绝对距离测量在科技发展中具有重要的作用,传统的测量方法已无法满足日益提高的测量要求。光学频率梳是重频和相位完全锁定的锁模脉冲激光,具有很高的空间、时间和频率分辨率。基于光频梳的测距技术由于在大尺寸计量及未来空间任务中的应用潜力引起了极大关注。介绍了光频梳测距技术的发展与现状,重点介绍了5种测量原理,包括合成波长干涉法、多波长干涉法、色散干涉法、双光梳干涉法和飞行时间法。

关键词:飞秒激光频率梳;激光测距;合成波长干涉;多波长干涉;色散干涉

中图分类号: TH741.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

High-precision distance measurement using femtosecond laser frequency comb

Zhou Weihu^{1,2}, Shi Junkai¹, Ji Rongyi¹, Li Yao¹, Liu Ya¹

(1. Laboratory of Laser Measurement Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High-precision absolute distance measurement plays an important role in the development of sciences and technology. The traditional methods are gradually unable to meet the increasing requirements. Optical frequency comb is mode locked pulse laser with repetition rate and phase controlled, which has higher temporal, spatial, and frequency resolution. Thus, comb-based distance measurement has attracted lots of attention due to its application in high accuracy large scale metrology and satellite flying formation. In this paper, the development and status of comb-based distance measurement is summarized, and five measurement principles are introduced in detail, including synthetic wavelength interferometry, multi-wavelength interferometry, dispersive interferometry, dual-comb interferometry, and time-of-flight method.

Keywords: femtosecond laser frequency comb; laser ranging; synthetic wavelength interferometry; multi-wavelength interferometry; dispersive interferometry

0 引 言

长度是七大基本物理量之一,高精度长度测量在科技发展中具有重要作用^[1-6]。传统的绝对测距方法^[7-11]主要有脉冲激光飞行时间法、连续激光强度调制法、连续激光扫频法以及伪随机微波信号互相关法。近年来,诸多测量应用领域对绝对测距的精度、量程和测量带宽提出了更高的指标要求。大尺寸空间绝对距离快速测量是卫星编队飞行、地球观测、深空探测成像以及高端制造领域不可或缺的关键技术。卫星编队队形保持与控制是高

分辨干涉成像任务的关键,要实现星间位置和姿态的精确控制,必须突破长距离(数十千米)、超高准确度(微纳米量级)、快速(数千赫兹)绝对测距。高端制造领域大型零部件外形测量、大型设备装配对接也对大尺寸高精度快速无导轨测距提出了迫切需求。传统测距方法已无法满足日益提高的要求。

随着光学频率梳技术^[12-14]的飞速发展,其光谱范围宽、脉宽窄、重复频率稳定性高等优良的时频域特性给精密光谱测量、时间频率测量和绝对距离测量提供了新的技术手段。自2000年Minoshima K等人^[15]将飞秒激光应用于测距领域,研究人员对此做了大量工作^[16-57],报道

了多种原理的光频梳测距方法。基于光频梳的测距方法可将飞行时间测量和干涉测量集于一身,有望实现高精度、大量程、快速绝对测距。

1 飞秒激光频率梳特性

飞秒激光自诞生之日起便引起了广泛的关注。由于具有短脉宽、宽光谱、高重复频率和高峰值功率等特点,飞秒激光在精密计量、微纳加工、光通信等领域获得了广泛应用^[58]。如图1所示,飞秒激光在时域上是等间距分布的激光脉冲序列,在频域表现为一系列等间距排列的纵模分量,相邻纵模之间的频率间隔为脉冲激光的重复频率。飞秒激光的光谱范围通常达到几十纳米,包含的纵模数为百万量级。通过对飞秒激光的重复频率(f_{rep})和载波包络偏移频率(f_{CEO})进行精密锁定,频域中所有的纵模分量都获得了极高的稳定度。由于该光谱在频域与日常生活中的梳子极为相似,因此锁定后的飞秒激光被称为飞秒激光频率梳。

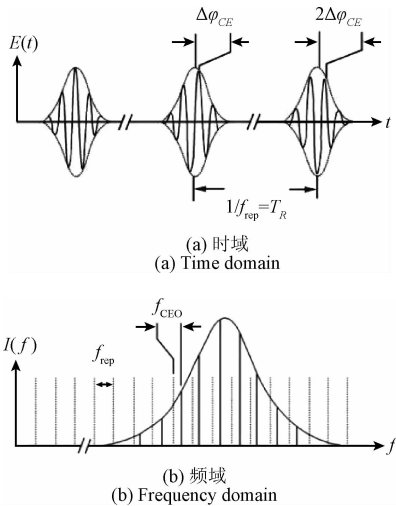


图1 飞秒激光特性

Fig. 1 Characteristics of femtosecond laser

20世纪70年代,德国科学家 Eckstein J. N. 等人^[59]率先提出光学频率梳的概念。经过几十年的发展,光频梳技术日臻成熟,目前已出现商业化产品。与传统的连续激光、长脉冲激光和白光等光源相比,飞秒激光频率梳同时具有很高的时间分辨率和光谱分辨率,可同时实现时间测量和频率测量,为测量领域带来革命性的突破。

2 光梳测距方法

目前报道的光频梳测距方法有很多种,但最基本的测距方法主要有5种,包括合成波长干涉法^[15-22]、多波长

干涉法^[23-27]、色散干涉法^[28-35]、双光梳干涉法^[36-41]和飞行时间法^[3,4,42-45]。其他方法大多是这5种方法的改进或组合。

2.1 合成波长干涉法

2000年,日本国家工业研究院的 Minoshima K 等人^[15]为克服连续激光测距中激光器腔内周期误差对测距精度的影响,提出通过锁模激光器纵模之间拍频信号的相移获得绝对距离信息。该方法首次将飞秒光频梳应用于绝对距离测量领域。

飞秒激光通常具有宽约数十纳米的光谱,在频域包含数量为百万量级的频率模式。其包含的任意相邻频率模式之间都具有固定的相位关系,不同的频率模式之间相互拍频,可产生一系列稳定的微波信号,相邻微波信号间隔等于飞秒激光的重复频率。这些微波信号可以由高速光电探测器探测,其频率稳定度取决于飞秒激光重复频率的稳定度。因此,可采用重复频率锁定的飞秒激光器作为光源,以重复频率的某一阶高次谐波为载波,测量参考信号和测量信号的相位差,计算出待测距离,其实验装置如图2所示。

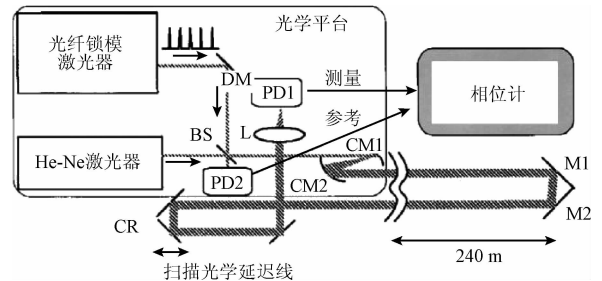


图2 合成波长干涉测距实验装置图^[15]

Fig. 2 Experimental setup for synthetic wavelength interferometry^[15]

采用光纤锁模激光器作为测量光源,重复频率 f_{rep} 约为50 MHz,脉冲宽度180 fs。飞秒脉冲序列由分束器BS分为两束:一束作为参考光,直接由光电探测器PD2探测;另一束作为测量光,依次经过扩束,路径传输,光延迟线后由探测器PD1探测。氦氖激光器输出的光束与测量光同轴传输,用于校准光路。通过相位计处理参考光和测量光的探测信号,可以直接计算得到两者的相位差 φ ,待测距离 D 与 φ 的关系可由下式表示:

$$(N + \varphi/2\pi) = 2fn_g D/c \quad (1)$$

式中: N 为整数, c 为真空中的光速, n_g 为空气群折射率, f 为载波频率。为了评估本方案的测距精度,通过调节光学延迟线得到不同距离的测量结果,延迟线的调节距离由具有纳米分辨率的光学干涉仪测量,与光频梳测量结果进行精度比对。实验中选取了 f 分别为 f_{rep} 、 $2f_{\text{rep}}$ 、 $19f_{\text{rep}}$

的 3 个频率模式进行测量, 最终在 240 m 距离处获得了 50 μm 的分辨率, 测量不确定度达到 8×10^{-6} 。2010 年, 该课题组采用光频梳重频的 821 次谐波信号进行测距, 获得了 200 nm 的测量标准偏差^[16]。

当待测距离较大时, 空气抖动和大气折射率变化限制了所能获得的最高测量精度。因此, Minoshima 教授课题组^[17-19]采用双色干涉法修正大气折射率系数, 降低环境因素产生的影响。在干涉仪前引入倍频晶体产生倍频光, 倍频光与基频光同时完成距离测量, 根据两个测距结果修正大气折射率系数, 距离测量不确定度达到 10^{-8} 量级。

由式(1)可以看出, 该测距方法的有效量程为 $D = c/2fn_g$ 。式(1)中的整数 N 需要通过辅助的粗测距来确定。为了解决这个问题, 2014 年韩国科学技术院的 Jang Y. S. 等人^[21]提出一种基于微调光频梳重复频率的粗测方法, 大大扩展了合成波长干涉法测距的有效量程。假设初始载波频率为 f , 此时测得的相位差为 φ_1 ; 微调重频后载波频率变化量为 Δf , 测得的相位差为 φ_2 , 则有:

$$D = \left(N + \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) \frac{c}{2fn_g} \quad (2)$$

$$D = \left(M + \frac{\varphi_2}{2\pi} \right) \frac{c}{2(f + \Delta f)n_g} \quad (3)$$

式中: M, N 为整数。当 $\varphi_2 \geq \varphi_1$ 时, $M = N$, 则有:

$$M = \left[\frac{\varphi_2 f - \varphi_1 (f + \Delta f)}{2\pi \Delta f} \right] \quad (4)$$

式中: $[\]$ 表示对计算结果取整。

当 $\varphi_2 < \varphi_1$ 时, $M = N + 1$, 则有:

$$M = \left[\frac{\varphi_2 f + (2\pi - \varphi_1) (f + \Delta f)}{2\pi \Delta f} \right] \quad (5)$$

将 M 代入式(3)即可得到待测距离 D 。实验中采用重频可调的掺铒光纤飞秒激光器作为测量光源, 重复频率 100 MHz, 脉冲宽度 150 fs。飞秒激光器的重复频率通过锁相环锁定到铷钟上, 锁定后重频稳定度达到 10^{-12} @ 10 s。采用重复频率的 10 次谐波作为载波信号, 最终实现 13.3 m 的绝对距离测量, 测量重复性为 9.5 μm, 根据与氦氖激光器干涉仪的比对结果, 测量精度为 31.2 μm。扩展合成波长干涉法可用于大尺寸精密工程、地球测绘和未来空间任务中的长程测距。

2.2 多波长干涉法

2006 年, 韩国科学技术院的 Jin J 等人^[23]为了解决量块校准的问题, 提出一种基于光频梳的新的测距方法。该方法将连续激光器锁定至光频梳, 利用产生的稳定准单色光进行干涉测量。选择合适的波长, 利用多个准单色光同时进行测量, 根据不同波长测量得到的距离值可合成得到精确的待测距离。多波长干涉测距装置如图 3 所示。

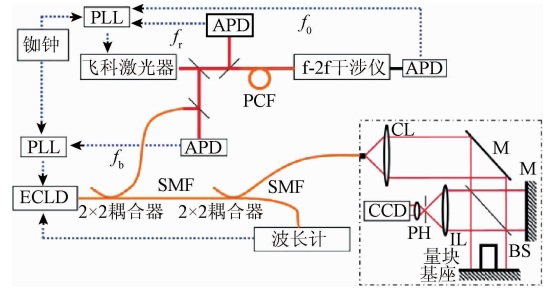


图 3 多波长干涉测距实验装置^[23]
Fig. 3 Experimental setup for multi-wavelength interferometry^[23]

光频梳的重复频率和载波偏移频率都通过锁相环锁定到铷钟输出的频率基准上, 梳齿稳定度达到 1.3×10^{-12} @ 10 s, 可作为波长标尺用于绝对测距。但是光频梳输出平均功率约为 200 mW, 对应单个梳齿的平均功率只有约 10 nW, 无法满足干涉测距的要求。因此采用波长可调谐的外腔半导体激光器 (external-cavity laser diode, ECLD) 作为测量光源, 通过锁相环电路将 ECLD 输出的准单色连续光与光频梳的拍频信号锁定到铷钟上, 获得 1.9×10^{-10} 的波长稳定度。锁定后的准单色连续光通过分光镜进入迈克尔逊干涉仪, 干涉信号由电荷耦合探测器 (charge coupled detector, CCD) 探测。通过分析测量光与参考光的干涉信号可以确定测量臂与参考臂的光程差。假定准单色光波长为 λ_1 , 则有待测距离 $D = (\lambda_1/2)(m_1 + g_1)$, 其中 m_1 和 g_1 分别为整数 ($m_1 = 0, 1, 2, \dots$) 和小数 ($1 > g_1 \geq 0$)。小数部分 g_1 可以通过分析干涉信号直接获得, 但是整数部分 m_1 无法直接确定。因此需要调节 ECLD 的波长, 利用不同波长的准单色连续光实现多组干涉测距, 则有:

$$D = \frac{\lambda_1}{2}(m_1 + g_1) = \frac{\lambda_2}{2}(m_2 + g_2) = \dots = \frac{\lambda_N}{2}(m_N + g_N) \quad (6)$$

式中: N 为使用的不同波长的准单色光的数量, m_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为正整数。解算过程中所需波长最小数量随着待测距离 D 的增加而增加。当对待测距离 D 的数值有准确预估时, 通过 4 个方程就可以推导出准确的距离值, 误差小于 ± 1 mm。对每个波长对应的小数部分重复测量 20 次并取平均值, 以降低振动和温度波动的影响。最终解算出量块高度为 24.999 89 mm, 测量误差为 15 nm。该方案提供了可溯源到国际时间定义的精密长度计量技术。

2006 年法国的 Schuher N 等人^[24]提出了类似的方案。将两台波长接近的连续激光器输出波长锁定到同一台光频梳的不同纵模上, 实现双波长干涉测距, 在 800 mm 的量程内实现了优于 0.2×10^{-6} 的测量精度。

2008年 Salvadé Y 等人^[25]又在该方案的基础上引入了超外差探测机制,实现了优于 10^{-7} 的距离测量精度。

2.3 色散干涉法

2006年韩国科学技术院的 Joo K N 等人^[28]提出基于飞秒激光的色散干涉法实现了高精度绝对测距。色散干涉法最早用于白光干涉测距,测量范围只限于微米量级。由于飞秒光频梳存在大量分立的光学模式,利用它们进行色散干涉测距,可得到比传统白光色散干涉测距更大的测量范围和更高的测量分辨率。色散干涉测距实验装置如图4所示。光频梳产生的飞秒脉冲通过光隔离器后进入干涉仪。干涉仪中参考镜固定不动,测量镜沿测量光光轴方向移动。测量光和参考光合束后经过 F-P 标准具实现频域滤波,滤波后进入光谱仪。光谱仪由线性光栅和线阵 CCD 组成,线性光栅将合束光衍射到线阵 CCD 上进行探测,通过对 CCD 探测的干涉条纹进行处理就可以获得待测距离 D 。

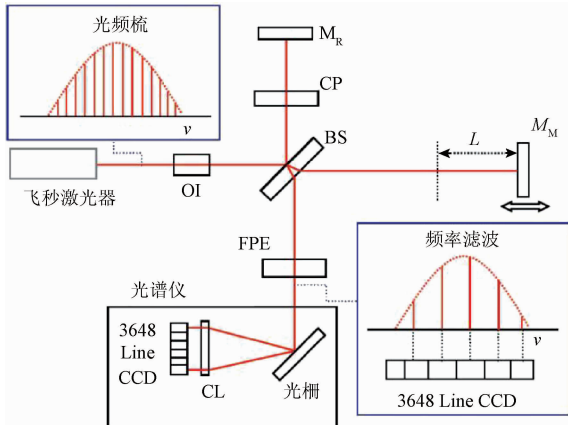


图4 色散干涉测距实验装置^[28]

Fig. 4 Experimental setup for dispersive interferometry^[28]

光谱仪测量的频域干涉强度可以由功率谱密度 $g(\nu)$ 来描述,其表达形式为 $g(\nu) = a(\nu) + b(\nu) \cos\varphi(\nu)$ 。其中平均强度 $a(\nu)$ 和调制振幅 $b(\nu)$ 与光源功率谱密度 $s(\nu)$ 的关系为 $a(\nu) = (1/2)s(\nu) [r_r^2(\nu) + r_m^2(\nu)]$, $b(\nu) = s(\nu)r_r(\nu)r_m(\nu)$ 。 $r_r(\nu)$ 和 $r_m(\nu)$ 分别表示参考镜和测量镜的反射率。一般而言,反射率随着频率 ν 缓慢变化,为了简化计算过程设定在频带范围内反射率为常数。因此功率谱密度可重新表达为 $g(\nu) = s(\nu) [1 + \cos\varphi(\nu)]$ 。本实验中测量到的功率谱密度 $g(\nu)$ 的典型分布如图5(a)所示。相位 $\varphi(\nu)$ 通常表达为 $\varphi(\nu) = 2\pi\nu\alpha$ 。其中 $\alpha = 2n(\nu)D/c$ 为光程延迟, n 和 c 分别表示大气折射率和真空中光速, D 为参考臂和测量臂的路径差,即待测距离。

将 $\varphi(\nu)$ 的表达式代入 $g(\nu)$ 的表达式并做傅里叶变换,得到:

$$G(\tau) = \text{FT}\{g(\nu)\} = S(\tau) \otimes [\delta(\tau + \alpha)/2 + \delta(\alpha) + \delta(\tau - \alpha)/2] \quad (7)$$

式中: $\delta(\tau)$ 为 δ 函数, τ 为变量,表示光程延迟。 $S(\tau)$ 为 $s(\nu)$ 的傅里叶变换 (FT) 形式。功率谱 $g(\nu)$ 是实函数,因此它的傅里叶变换形式关于 $\tau = 0$ 对称,在 $-\alpha, 0$ 和 α 处有 3 个波峰,如图 5(b) 所示。使用合适的带通滤波器将 $\tau = \alpha$ 处的波峰滤出,并做逆傅里叶变换将其变换到频域,得:

$$g'(\nu) = \text{FT}^{-1}\{S(\tau) \otimes \delta(\tau - \alpha)/2\} = s(\nu) \exp(i\varphi(\nu))/2 \quad (8)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$ 。对 $g'(\nu)$ 做反正切运算 (见图 5(c)) 和解包处理后可以得到相位 $\varphi(\nu)$ 的绝对数值 (见图 5(d))。通过换算获得待测距离 D 为:

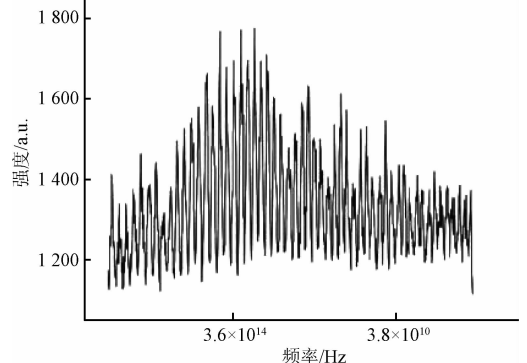
$$D = (c/4\pi n_g) d\varphi/d\nu \quad (9)$$

式中: n_g 为大气群折射率。实验中采用的测量光源是钛宝石锁模激光器,脉宽为 10 fs,重复频率为 75 MHz,每个频率模式的线宽小于 1 MHz。最终在 0.89 m 测量距离下实现了 7 nm 的测量分辨率,非模糊距离为 1.46 mm。

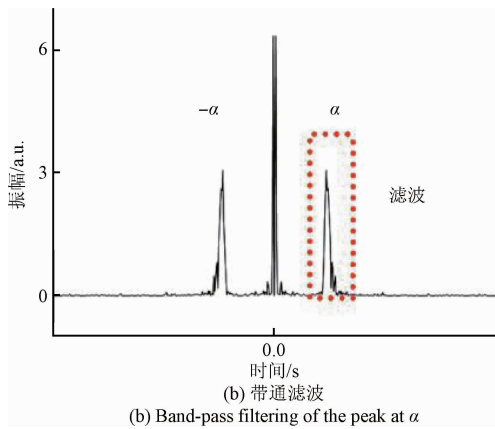
2007年该课题组将这种测距方法用于测量样品的光学厚度和几何厚度,进而得出样品的折射率^[29]。实验中分别测量了 BK7 和紫外石英样品的折射率,通过与生产厂家提供的参考数据对比,测量准确度分别为 9.3×10^{-4} 和 4.3×10^{-4} 。

2011年荷兰代尔夫特理工大学的 Cui M 等人^[31]采用光频梳色散干涉法在大气中测量 50 m 的距离,通过测量微小位移替代光谱仪校准,实现了 1.5 μm 的测距精度。

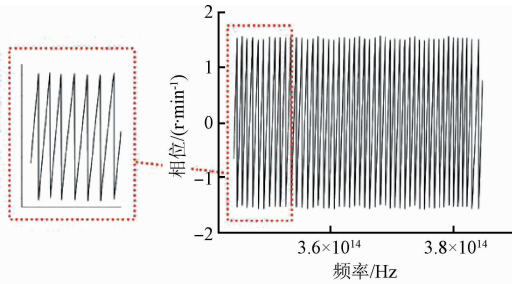
2012年荷兰代尔夫特大学的 Van Den Berg S. A. 等人^[32]提出了一种新的光频梳测距方法。迈克尔逊干涉仪输出的信号经过虚成像相控阵标准具后被光栅衍射,最终由 CCD 探测。由于光频梳梳齿间距达到 1 GHz,可以将每个梳齿都看成一束连续激光。该方法集多波长干涉测量与色散干涉测量于一体,在 15 cm 的模糊距离下测距精度达到 $\lambda/30$ 。2015年该课题组采用该方法在大气中测量了 50 m 的待测距离,测量不确定度小于 1 μm ^[35]。



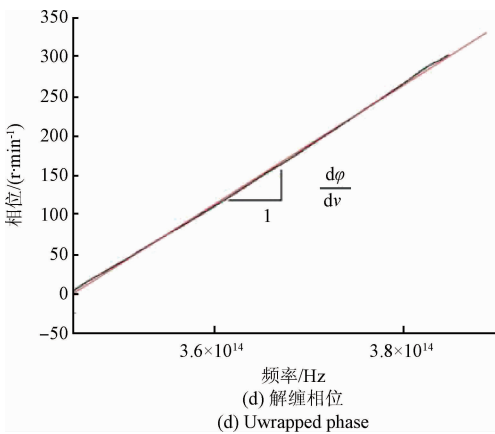
(a) 色散干涉强度
(a) Dispersed interference intensity



(b) Band-pass filtering of the peak at α



(c) 缠绕相位
(c) Wrapped phase



(d) 解缠相位
(d) Unwrapped phase

图 5 距离测量数据处理过程^[28]

Fig. 5 Data processing procedure for distance measurement^[28]

2.4 双光梳干涉法

2009 年, 美国国家标准技术研究院的 Coddington I 等人^[36] 报道了一种快速、高精度、大量程绝对测距方法, 即双光梳干涉法。该方法采用两台具有微小重频差的光频梳作为测量光源。一台光梳作为信号光源, 信号脉冲序列通过待测路径后携带距离信息。另一台光梳作为本振光源, 本振脉冲序列通过对返回的信号脉冲进行线性光学采样, 最终还原出距离信息。测量原理如图 6 所示。

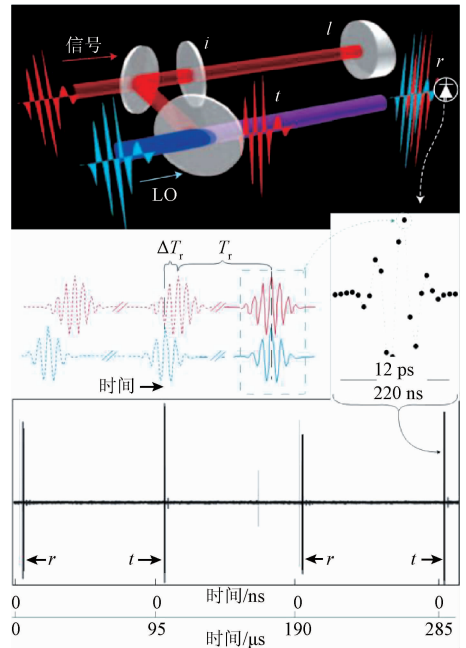


图 6 双光梳干涉法^[36]

Fig. 6 Dual-comb interferometry^[36]

采用两台相干宽带的飞秒激光频率梳作为测量光源, 两台光梳的重复频率略有差别, 分别为 f_r 和 $f_r + \Delta f_r$, 对应的周期分别为 T_r 、 $T_r - \Delta T_r$ 。一台光频梳作为信号光源, 信号脉冲序列进入干涉仪, 通过由目标和参考面定义的待测距离后返回; 另一台光频梳作为宽带本振光源, 通过线性光学采样的方法 (见图 6) 还原出距离信息。该方法实质上是一个光学下采样的过程, 将真实信号在时域上放大了 M 倍 ($M = f_r / \Delta f_r$), 从而可以被光电探测器响应。外差探测可以获得散粒噪声极限特性, 所以微弱信号也可以被探测到, 并保留载波相位信息。探测器前放置 3 nm 带宽的带通滤波器, 确保进入探测器的光谱带宽小于 $1/(4\Delta T_r)$ 以满足采样的 Nyquist 条件。

对探测到的数字信号 (见图 6) 进行傅里叶变换处理, 得到测量脉冲与参考脉冲之间的相位差:

$$\varphi(\nu) = \frac{4\pi D}{\lambda_c} + \frac{4\pi D}{v_{\text{group}}}(\nu - \nu_c) \quad (10)$$

式中: ν_c 为载波频率, v_{group} 为载波频率对应的群速度, λ_c 为载波波长。对上式做线性拟合 $\varphi = \varphi_0 + b(\nu - \nu_c)$, 可得到 φ_0 和 b 。其中 b 包含时间延迟信息, 可获得飞行时间测量结果 $D_{\text{tof}} = b(v_{\text{group}}/4\pi)$ 。而 φ_0 包含干涉信号的相位信息, 可以得到精确的干涉测距结果 $D_{\text{int}} = (\varphi_0 + 2\pi m) (\lambda_c/4\pi)$ 。不确定项 $2\pi m$ 反映了干涉测量中的模糊距离 $\lambda_c/2$ 。通过合成这两个距离值可最终确定实际的待测距离值 D 。实验中采用的光频梳重复频率约为 100 MHz, 重频差约为 5 kHz。采样周期约为 $T_{\text{update}} = 1/\Delta f_r = 200 \mu\text{s}$, 模糊距离 $R_A = T_r v_{\text{group}}/2 \approx 1.5 \text{ m}$ 。在模糊

距离 1.5 m 内,仅使用飞行时间测距结果,单次采样数据的测量误差为 3 μm。在 1.14 km 光纤中进行测量,结合飞行时间测量和干涉测量的结果,在采样时间 60 ms 条件下实现了 5 nm 的测量精度。基于游标原理提出了扩大模糊距离的方法,测量完成后将信号光与本振光角色互换,完成第 2 次测量,则有:

$$D = mT_r v_{\text{group}}/2 + L_1 = m(T_r - \Delta T_r) v_{\text{group}}/2 + L_2 \quad (11)$$

式中: $L_1, L_2 < R_A$ 。根据式(11)可以求出整数 m ,进而得到待测距离 D 。为确保两次测量的 m 值相等,需满足 $D < v_{\text{group}}/(2\Delta f_r) \approx 30 \text{ km}$,其测量范围扩大到 30 km。

2011 年,该课题组又将测量系统简化,以两台自由运行飞秒激光器作为测量光源,利用激光器自身的稳定度,在单个采样周期 140 μs 内实现了 2 μm 的测距精度^[37]。当采样时间为 20 ms 时,测距精度提高到 200 nm。

2.5 飞行时间法

2004 年,美国国家标准技术研究院的 Ye J 等人^[42]针对空间卫星编队飞行任务的需求,提出基于光频梳重频调节或参考臂长调节的飞行时间法,可在大测量范围内实现高精度任意距离测量。

该方法的基本原理如图 7 所示。光频梳输出的飞秒脉冲序列入射到干涉仪中,经分束器分为两束,分别耦合进参考臂与测量臂。参考臂与测量臂长度分别为 L_1 和 L_2 ,则待测距离为 $D = L_2 - L_1$ 。探测方法包括飞行时间高速光电探测器,可以探测到脉冲之间数 ps 的时间间隔;还有条纹分辨光学互相关器,当两路脉冲重合时可以探测到干涉条纹。当调节重复频率时,两束脉冲之间的时间延迟相应地发生变化。根据图 8(a) 所示,则有 $2D/c = n\tau_1 - \Delta t_1 = n\tau_2 - \Delta t_2$ 。其中, c 为真空中光速, n 为整数。通过测量 $\tau_1, \tau_2, \Delta t_1$ 和 Δt_2 可以推导出整数 n ,进而得到待测距离 D 的粗测值。设高速光电探测器的响应时间为 10 ps,则粗测精度约为 3 mm。为了实现 D 更高精度的测量,则需要连续调节重复频率直到两束脉冲重叠,以产生干涉条纹,如图 8(b) 所示,则有 $2D/c = n\tau_3 - \Delta t_3$,其中 $\Delta t_3 \ll \tau_3$ 且接近脉冲宽度,因此两束脉冲时间延迟的测量精度被提高到了脉冲宽度量级。假设脉冲宽度为 10 fs,则测距精度理论上可达到 3 μm。然而,受限于当时的条件,该方案并未进行实验验证。

2010 年,韩国科学技术院的 Lee J 等人^[44]采用平衡光学互相关技术探测参考脉冲与测量脉冲重合时的光梳重频信号。测量原理如图 9 所示。测量脉冲序列与参考脉冲序列合束后进入平衡光学互相关系统。两束偏振态相互垂直的飞秒脉冲耦合进非线性晶体中,由于非线性效应产生两束脉冲的和频信号,其强度的数学表达式为式(12)。

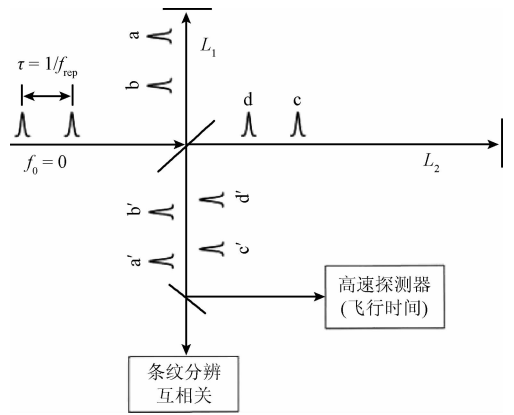


图 7 干涉仪结构^[42]

Fig. 7 Interferometer configuration^[42]

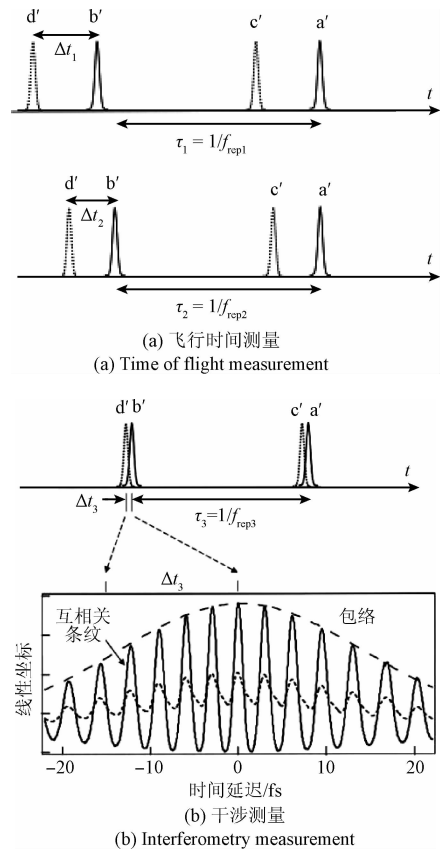


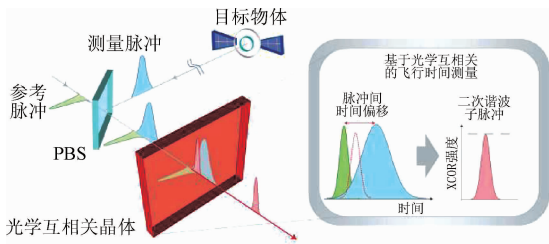
图 8 测量结果^[42]

Fig. 8 Measurement results^[42]

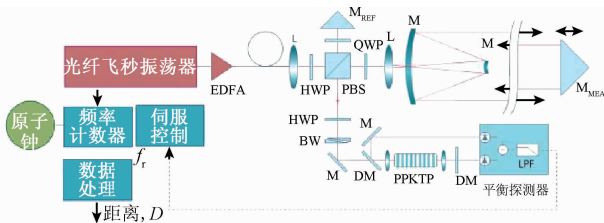
$$R(\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t - \Delta\tau) f_2(t) dt \quad (12)$$

式中: $\Delta\tau$ 为两脉冲信号的相对时延。经过非线性晶体后,残余的初始光被双色镜反射再一次经过非线性晶体,产生另一个和频信号脉冲。两个和频信号脉冲由平衡探测器探测。由于倍频晶体的双折射效应在两束和频信号

之间引入固定的时延,因此两束和频信号在平衡探测器中相减,可抵消初始信号强度波动和对频信号的影响,得到和频脉冲强度与脉冲相对延时的曲线。当测量脉冲与参考脉冲时延接近 0 时,平衡互相关信号与时延信号呈现高度线性关系。利用该信号精确控制光频梳的重复频率,可将脉冲间隔的整数倍精确锁定到待测距离上。设脉冲飞行时间为 t_r ,则有 $t_r = mt_s = m/f_r$, m 为整数, t_s 为相邻脉冲之间的时间间隔, f_r 为重复频率,可由频率计数器测得。连续调节光频梳的重复频率,使测量脉冲与参考脉冲先后两次重合。设两次重合时的光频梳的重频差为 Δf_r ,则有 $m = f_r/\Delta f_r$ 。待测距离 D 可表示为 $D = mc/2f_r n_{air} = c/2\Delta f_r n$,其中 c 为真空中光速, n_{air} 为大气折射率。最终实现了 0.7 km 距离的测量,采样时间为 5 ms,阿伦方差为 117 nm。当采样时间为 1 s 时,阿伦方差降到 7 nm。



(a) 光学互相关法测量飞脉冲飞行时间
(a) Time of flight measurement by optical cross-correlation



(b) 飞行时间测距实验装置
(b) Experimental setup for time-of-flight interferometry

图 9 飞行时间法^[44]

Fig. 9 Time-of-flight measurement configuration^[44]

2012 年,该课题组继续优化基于光频梳的飞行时间测距方案,利用平衡光学互相关方法克服了光子探测的带宽限制,最终在 1.5 m、60 m 和 700 m 测量距离条件下都实现了准毫米量级的测量精度^[45]。

3 结论与展望

经过十几年的发展,飞秒激光频率梳绝对测距技术取得了突飞猛进的发展,新技术、新原理不断涌现,为精密计量领域带来了一系列突破。基于光频梳的绝对测距技术能够实现大量程、高精度和快速测量三者的完美统一,是激光测距领域的突破性进展,有望为大型零部件外

形测量、大型设备装配对接,尤其是未来空间任务提供技术支持。但到目前为止,光梳测距系统大多停留在实验室阶段。其中一个重要原因就是测距系统较为庞大,不便于搬运。现在已经有学者尝试摆脱光频梳复杂的稳频稳相系统,利用锁模激光器自身的稳定度完成距离测量^[37,56]。近年来报道的双梳振荡器^[60-61],即一台锁模振荡器输出两束不同参数的脉冲序列,已经实现频率的高精度测量^[62]。若将该振荡器应用于距离测量将大大缩小测量系统的体积。此外,测量系统还必须在各种环境,如加工车间或太空中正常工作,完成测量任务^[63-65]。

我国在光频梳测距领域的研究起步较晚。自 2010 年起,清华大学、天津大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、国家计量院、北京长城计量测试技术研究所、中科院光电研究院等机构陆续开展了光频梳测距技术的研究工作,并取得了显著的成果,但与国际顶级研究机构相比仍存在不小的差距。因此,应继续加大此项研究的力度,为我国精密制造和航空航天事业提供有力的技术支持。

参考文献

[1] JOO K N, KIM Y, KIM S W. Distance measurements by combined method based on a femtosecond pulse laser [J]. Optics Express, 2008, 16 (24): 19799-19806.

[2] HYUN S, KIM Y J, KIM Y, et al. Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(9): 095302.

[3] BALLING P, KREN P, MASIKA P, et al. Femtosecond frequency comb based distance measurement in air [J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9300-9313.

[4] CUI M, ZEITOUNY M G, BHATTACHARYA N, et al. High-accuracy long-distance measurements in air with a frequency comb laser [J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 1982-1984.

[5] ZEITOUNY M G, CUI M, JANSSEN A J, et al. Time-frequency distribution of interferograms from a frequency comb in dispersive media [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3406-3417.

[6] MATSUMOTO H, WANG X, TAKAMASU K, et al. Absolute measurement of baselines up to 403 m using heterodyne temporal coherence interferometer with optical frequency comb [J]. Applied Physics Express, 2012, 5(4): 6601.

[7] KIKUTA H, IWATA K, NAGATA. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light [J]. Applied Optics, 1986, 25(17): 2976-2980.

[8] FUJIMA I, IWASAKI, SETA K. High-resolution

- distance meter using optical intensity modulation at 28 GHz [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7): 1049-1052.
- [9] GILI J A, COROMINAS J, RIUS J. Using global positioning system techniques in landslide monitoring [J]. *Engineering Geology*, 2000, 55(3): 167-192.
- [10] PELEGRINI S, BULLER G S, SMITH J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 712-716.
- [11] AMANN M C, BOSCH T M, LESCURE M, et al. Laser ranging: A critical review of unusual techniques for distance measurement [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 10-19.
- [12] DIDDAMS S A. The evolving optical frequency comb [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B51-B62.
- [13] 武腾飞, 梁志国, 严家骅, 等. 飞秒光学频率梳测距技术的研究进展 [J]. *计测技术*, 2011, 31(5): 41-44.
WU T F, LIANG ZH G, YAN J H, et al. The progress on distance measuring technique with a femtosecond optical frequency comb [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2011, 31(5): 41-44.
- [14] 华卿, 周维虎, 许艳. 飞秒激光频率梳绝对测距技术综述 [J]. *计测技术*, 2012, 32(1): 1-5.
HUA Q, ZHOU W H, XU Y. Review of absolute distance measurement with femtosecond optical frequency comb [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2012, 32(1): 1-5.
- [15] 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.
- [16] MINOSHIMA K. High-precision absolute length metrology using fiber-based optical frequency combs [C]. *IEEE International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 2010: 800-802.
- [17] MINOSHIMA K, ARAI K, INABA H. High-accuracy self-correction of refractive index of air using two-color interferometry of optical frequency combs [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26095-26105.
- [18] WU G, ARAI K, TAKAHASHI M, et al. High-accuracy correction of air refractive index by using two-color heterodyne interferometry of optical frequency combs [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(1): 111-123.
- [19] WU G, TAKAHASHI M, ARAI K, et al. Extremely high-accuracy correction of air refractive index using two-color optical frequency combs [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(7451): 1894.
- [20] WU G H, TAKAHASHI M, INABA H, et al. Pulse-to-pulse alignment technique based on synthetic-wavelength interferometry of optical frequency combs for distance measurement [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2140-2143.
- [21] JANG Y S, LEE K, HAN S, et al. Absolute distance measurement with extension of nonambiguity range using the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 122403.
- [22] NAKAJIMA Y, MINOSHIMA K. Highly stabilized optical frequency comb interferometer with a long fiber-based reference path towards arbitrary distance measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25979-25987.
- [23] JIN J, KIM Y J, Kim Y, et al. Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5968-5974.
- [24] SCHUHLER N, SALVADE Y, LEVEQUE S, et al. Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(21): 3101-3103.
- [25] SALVADE Y, SCHUHLER N, LEVEQUE S, et al. High-accuracy absolute distance measurement using frequency comb referenced multiwavelength source [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(14): 2715-2720.
- [26] HYUN S, KIM Y J, KIM Y, et al. Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(9): 095302.
- [27] HYUN S, KIM Y J, KIM Y, et al. Absolute distance measurement using the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 555-558.
- [28] 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.
- [29] JOO K N, KIM S W. Refractive index measurement by spectrally resolved interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 647-649.
- [30] GODBOUT M, DESCHENES J D, GENEST J. Spectrally resolved laser ranging with frequency combs [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15981-15989.
- [31] CUI M, ZEITOUNY M G, BHATTACHARYA N, et al. Long distance measurement with femtosecond pulses using

- a dispersive interferometer [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6549-6562.
- [32] VAN DEN BERG S A, PERSIJN S T, KOK G J P, et al. Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(18): 183901.
- [33] XU Y, ZHOU W H, LIU D M, et al. Absolute distance measurement by spectrally resolved interferometry based on a femtosecond pulse laser [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 081509.
- [34] LI Y, HU K, JI R Y, et al. Absolute distance measurement based on femtosecond frequency comb with wavelet transform [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 122409.
- [35] VAN DEN BERG S A, VAN ELDIK S, BHATTACHARYA N. Mode-resolved frequency comb interferometry for high-accuracy long distance measurement [J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 14661.
- [36] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photonics*, 2009(3): 351-356.
- [37] 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.
- [38] 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): 045201.
- [39] 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.
- [40] ZHANG H Y, WEI H Y, WU X J, et al. Reliable non-ambiguity range extension with dual-comb simultaneous operation in absolute distance measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014(25): 125201.
- [41] WU G H, ZHOU Q, SHEN L F, et al. Experimental optimization of the repetition rate difference in dual-comb ranging system [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(10): 106602.
- [42] YE J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [43] YOKOYAMA S, YOKOYAMA T, HAGIHARA Y, et al. A distance meter using a terahertz intermode beat in an optical frequency comb [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17324-17337.
- [44] LEE J, KIM Y J, LEE K, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 716-720.
- [45] LEE J, LEE K, LEE S, et al. High precision laser ranging by time-of-flight measurement of femtosecond pulses [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(6): 065203.
- [46] CUI M, SCHOUTEN R N, BHATTACHARYA N, et al. Experimental demonstration of distance measurement with a femtosecond frequency comb laser [J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2008, 3: 08003.
- [47] JIAN P, PINEL O, FABRE C, et al. Real-time displacement measurement immune from atmospheric parameters using optical frequency combs [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 27133-27146.
- [48] WU H Z, ZHANG F M, CAO S Y, et al. Absolute distance measurement by intensity detection using a mode-locked femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10380-10397.
- [49] ZHU J G, CUI P F, GUO Y, et al. Pulse-to-pulse alignment based on interference fringes and the second-order temporal coherence function of optical frequency combs for distance measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13069-13081.
- [50] WU H Z, ZHANG F M, LI J S, et al. Intensity evaluation using a femtosecond pulse laser for absolute distance measurement [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5581-5590.
- [51] KANG H J, CHUN B J, JANG Y S, et al. Real-time compensation of the refractive index of air in distance measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26377-26385.
- [52] WU H Z, ZHANG F M, LIU T Y, et al. Absolute distance measurement by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31582-31593.
- [53] YANG R T, POLLINGER F, HAGEN K M, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with multi-channel digital lock-in phase detection [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 084001.
- [54] WU H Z, ZHANG F M, LIU T Y, et al. Long distance measurement using optical sampling by cavity tuning [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2366-2369.
- [55] WU H Z, ZHANG F M, LIU T Y, et al. Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry

- using a frequency comb and a cavity-stabilized tunable laser [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4210-4218.
- [56] 秦鹏,陈伟,宋有建,等. 基于飞秒激光平衡光学互相关的任意长绝对距离测量[J]. *物理学报*, 2012, 61(24):240601.
QIN P, CHEN W, SONG Y J, et al. Long range absolute distance measurement based on femtosecond laser balanced optical cross-correlation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 240601.
- [57] 安慰宁,张福民,吴翰钟,等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11):2458-2465.
AN W N, ZHANG F M, WU H ZH, et al. Absolute distance measurement method based on frequency-domain interference using a femtosecond optical frequency comb [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2458-2465.
- [58] NEWBURY N R. Searching for applications with a fine-tooth comb [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 186-188.
- [59] ECKSTEIN J N, FERGUSON A I, HASCH T W. High-resolution two-photon spectroscopy with picoseconds light pulses [J]. *Physical Review Letters*, 1978, 40(13): 847-850.
- [60] ZHAO X, ZHENG Z, LIU L, et al. Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [61] LIU Y, ZHAO X, HU G, et al. Unidirectional, dual-comb lasing under multiple pulse formation mechanisms in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21392-21398.
- [62] ZHAO X, HU G, ZHAO B, et al. Picometer-resolution dual-comb spectroscopy with a free-running fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21833-21845.
- [63] FENG Y, XU X, HU X H, et al. Environmental-adaptability analysis of an all polarization-maintaining fiber-based optical frequency comb [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17549-17559.
- [64] LEE J, LEE K, JANG Y S, et al. Testing of a femtosecond pulse laser in outer space [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(6187): 05134.
- [65] LEZIUS M, WILKEN T, DEUTSCH C, et al. Spaceborne frequency comb metrology [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1381-1387.

作者简介



周维虎,分别在1983年和2000年于合肥工业大学获得学士学位和博士学位,现为中国科学院光电研究院研究员,中国科学院大学教授、博士生导师,主要研究方向为精密仪器与几何量计量。

E-mail:zhouweihu@aoe.ac.cn

Zhou Weihu received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from HeFei University of Technology in 1983 and 2000, respectively. Now he is a professor of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences as well as professor and Ph. D. supervisor of University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include precision instrument and geometrical metrology.



石俊凯(通讯作者),分别在2009年和2015年于天津大学获得学士学位和博士学位,现为中国科学院光电研究院助理研究员,主要研究方向为飞秒激光技术及其应用。

E-mail:shijunkai@aoe.ac.cn

Shi Junkai (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Tianjin University in 2009 and 2015, respectively. Now he is a research assistant of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include femtosecond laser technology and its applications.