

# 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用

崔鹏飞, 杨凌辉, 林嘉睿, 郝继贵\*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 激光测距是现代测距技术中的重要组成部分,在精密测距领域发挥了关键作用。在以先进制造、空间任务等为代表的大尺寸精密测距应用中,测距量程通常为数十米甚至上千米,测距精度要求在亚毫米甚至微米量级,同时,要求测量快速高效,这对激光测距光源的灵活性、稳定性及溯源性都是极大的挑战。飞秒光学频率梳以其丰富的频谱成分、优于  $10^{-11}$  量级的相对稳定性和直接参考到微波频率基准的溯源能力成为激光精密测距研究的有力工具。时域内,飞秒脉冲可提供高精度的时间分辨;频域内,飞秒光学频率梳测距所包含的大量精密稳定的谱线成分使新的测量原理成为可能。介绍了飞秒光学频率梳测距的研究现状,以主要利用飞秒光学频率梳的时频域特性进行分类归纳,概括了各种方法的原理及特点。目前,飞秒光学频率梳测距已在大量程范围内达到微米甚至亚微米量级测量精度,并有潜力实现多目标同时测距。随着测量效率的提升,飞秒光学频率梳测距必将在大尺寸精密测距中广泛应用。

**关键词** 激光技术;绝对距离测量;光学频率梳;飞行时间;激光干涉

中图分类号 TH741.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120011

## Application of Femtosecond Optical Frequency Comb in Precise Absolute Distance Measurement

Cui Pengfei, Yang Linghui, Lin Jiarui, Zhu Jigui\*

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Laser ranging plays an important role in the modern distance measurements, especially in the precise absolute distance measurement. In the applications such as the advanced manufacturing and space mission, an efficient distance measurement is required with a measurement range of tens of meters or up to a thousand meters but with a submillimeter or even micrometer precision. Simultaneously, the fast and efficient measurement is needed. It is a huge challenge to laser source for its flexibility, stability and traceability. A femtosecond optical frequency comb becomes a powerful tool in laser precision ranging due to its abundant modes, its relative stability of  $10^{-11}$  and its traceability to a microwave clock. The high-precision time resolution of a femtosecond pulse in time-domain and the abundant optical modes in frequency-domain make the new measuring principles possible. The study status of femtosecond-frequency-comb-based absolute distance measurements is reviewed. The absolute distance measurement methods are classified according to the time-frequency characteristics of an optical frequency comb, and the principles and features of all kinds of methods are analyzed. Nowadays, the femtosecond-frequency-comb-based ranging possesses a micrometer or even sub-micrometer precision within a large distance range and also has a potential to simultaneously range multiple points. With the increase of measurement efficiency, the femtosecond-optical-frequency-comb-based ranging must and should be widely used in the large-size precision ranging.

**Key words** laser technique; absolute distance measurement; optical frequency comb; time of flight; laser interference

**OCIS codes** 120.3940; 120.3180; 120.4640

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-04; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51705360)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51721003)

\* E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn

# 1 引言

高精度距离测量是现代工业和科学研究的重要基础之一,从全球测量定位系统定位到飞机、船舶等大型装备制造,乃至微纳尺度的芯片加工,距离测量都扮演着至关重要的角色<sup>[1-2]</sup>。基于激光的非接触测量方法一直在距离测量中有着重要应用,特别是1983年,第十七届国际计量大会正式将米定义为光在真空中  $1/299792458$  s 内所行进的距离,从而以光速建立了米到秒的溯源关系<sup>[3]</sup>。经过长期发展,形成了激光三角法、干涉法、相位法以及飞行时间法为代表的激光测距方法,并广泛应用于科学研究和工业测量中。随着大型机械装备基础地位重要性的日益突出,大型数字化制造与装配技术将引领高端装备制造产业的核心竞争力,高性能测距新技术将面临全新挑战<sup>[4]</sup>。以大型飞机的数字化制造为例,在制造过程中,要求在非结构化厂房环境中,实现100 m尺度范围内绝对精度达到微米量级的绝对距离测量,且具备快速高效、稳定可靠的优良性能,故必须探索宽量程、大动态、高效率的距离测量新方法,以匹配不断发展的工程需求。

新型光源飞秒光学频率梳(简称飞秒光梳)的出现,对精密距离测量研究起到了积极的促进作用。飞秒光梳以其优良的时域频域特性、参考到时间基准的溯源能力,成为了目前最具潜力的激光光源之一。2000年,飞秒光梳被首次应用于绝对距离测量,其大量程高精度的测距潜力引起了广泛关注<sup>[5]</sup>。之后,随着飞秒光梳技术的不断发展,光梳光源的不断小型化、集成化、商品化,越来越多的国内外课题组展开了飞秒光梳测距的应用研究,利用其独特的时频特性提升原有测量原理的精度或提出全新的测距方法,目前已经形成了一批日益完善的距离测量方案并逐渐获得应用。本文对现有基于飞秒光梳的绝对距离测量方法进行了系统的归纳,基于测距原理利用飞秒光梳时频域特性分类,并分析关键技术,概括了当前国内外相关研究现状和发展趋势。

## 2 基于飞秒光梳时域特性的绝对距离测量

飞秒光梳在时域上表现为一系列等脉冲间隔的飞秒脉冲序列,它包含两个对距离测量极为有利的性质<sup>[6-7]</sup>。首先,脉冲重复频率可锁定至微波频率基准,为测量的溯源性提供了保证。其次,飞秒脉冲脉宽极短(飞秒量级),峰值功率高,为高精度的飞行时

间计时方法提供了新的可能。从测量方法所需飞秒光梳的数量来看,可将基于飞秒光梳时域特性的绝对距离测量分为单飞秒光梳方法和双飞秒光梳方法。根据对准脉冲精确计时技术的不同,又可分为互相关法<sup>[8-13]</sup>、平衡互相关法<sup>[14-16]</sup>和合成波长脉冲对准法<sup>[17-19]</sup>。常规单飞秒光梳方法利用经典迈克耳孙干涉光路,将待测距离的飞行时间以脉冲周期倍数的形式获取并解算。但在待测距离不满足脉冲周期倍数条件时,需要扫描脉冲重复频率或机械扫描参考臂直至脉冲对准。重复频率的扫描范围通常为其值的百分之几,难以满足需求,而大范围的机械扫描必然会引入额外噪声并限制测量速度。然而,双飞秒光梳方法显著提高了测量效率<sup>[20-27]</sup>。近年来,带有稳定长光纤参考臂的单飞秒光梳光学采样法被提出,该方法只需一个飞秒光梳即可实现大范围的灵活测量,相比于双飞秒光梳方法显著降低了成本和系统复杂度,因此逐渐成为飞秒光梳距离测量研究新热点之一<sup>[28-30]</sup>。

### 2.1 单飞秒光梳时域特性绝对测距

传统飞行时间法是通过测量激光脉冲在待测距离中的传播时间,结合光速来计算距离结果。直接计时的飞行时间法结构简单,测量范围很大,可应用于地月距离测量。但精度受限于计时电路,一般在厘米级或毫米级<sup>[31]</sup>。飞秒光梳的出现,为飞行时间计时提供了新的有力工具。

#### 2.1.1 脉冲互相关法

2004年, Ye<sup>[8]</sup>首次提出利用飞秒脉冲互相关干涉条纹精确对准脉冲的高精度任意绝对测距原理,并理论分析证明了该方法可在兆米量级范围实现优于一个光学波长的测距潜力。飞秒脉冲互相关测距系统结构如图1所示。飞秒光梳发出的脉冲序列通过经典迈克耳孙干涉光路后会合,会合后的光路一分为二,一部分用于快速飞行时间探测,另一部分用于脉冲互相关精确计时。飞秒脉冲互相关测距原理图如图2所示<sup>[8]</sup>,首先利用快速飞行时间探测待测距离的粗测信息,可以获得测量脉冲和参考脉冲之间的时间差  $\Delta t_1$ ,此时待测距离  $\Delta L$  可由公式  $2\Delta L/c = n\tau_1 - \Delta t_1$  表示,其中  $c$  为光速,  $n$  为测量脉冲和参考脉冲间隔周期数,  $\tau_1$  为脉冲间隔。再调整重复频率,获得新的时间差  $\Delta t_2$ ,此时待测距离  $\Delta L$  可表示为  $2\Delta L/c = n\tau_2 - \Delta t_2$ ,  $\tau_2$  为新脉冲间隔。调整重复频率的过程中,测量脉冲和参考脉冲不可发生重叠,以确保相同的脉冲间隔周期。接着,可由两式联立解得  $n = (\Delta t_1 - \Delta t_2)/(\tau_1 - \tau_2)$ ,并进一步计算待测

距离。受限于计时电路皮秒量级计时精度,可获得 3 mm 精度的粗测距离。继续调整重复频率,使测量脉冲和参考脉冲重叠,进而由脉冲互相关探测实现待测距离的精确解算。脉冲重叠后,可获得脉冲互相关干涉条纹,基于互相关条纹的距离精测如图 2(b)所示。利用互相关条纹可实现亚波长量级的脉冲精确对准,此时可认为  $2\Delta L/c = n\tau_3$ 。最终测距精度由干涉条纹分辨率决定,因此可实现亚波长量级距离测量。值得注意的是,在调整重复频率使测量脉冲和参考脉冲重叠的过程中,脉冲间隔周期数  $n$  发挥着重要的作用,即  $n$  越大,所需的重复频率调整范围越小。测量短距离时,受限于重复频率调整范围,不能实现脉冲重叠,则测距精度仅为毫米量级。以现有商用飞秒光梳(FC1000-250, MenloSystems)为例,其重复频率和调整范围分别

为 250 MHz 和 2 MHz,对应需要在约 40 m 以上才能实现亚波长精度任意绝对测距。

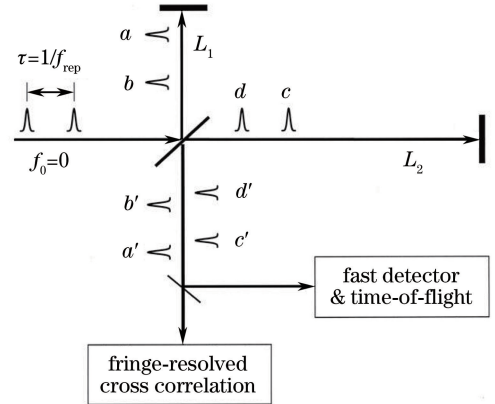


图 1 飞秒脉冲互相关测距系统结构

Fig. 1 Setup for distance measurement based on femtosecond pulse cross-correlation

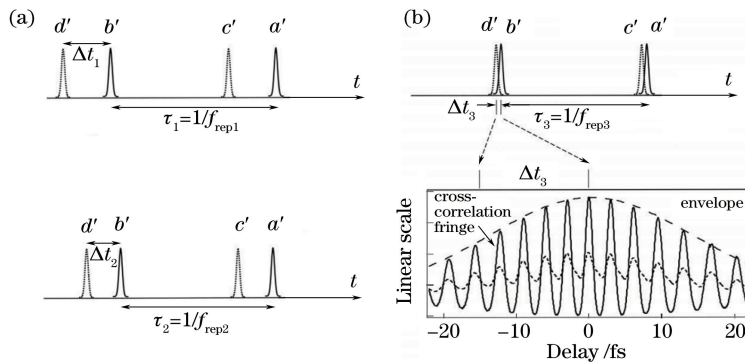


图 2 飞秒脉冲互相关测距原理图。(a) 基于快速飞行时间的距离粗测;(b) 基于互相关条纹的距离精测

Fig. 2 Schematic of distance measurement based on femtosecond pulse cross-correlation.

(a) Coarse measurement based on rapid time of flight; (b) fine measurement based on cross correlation fringes

2009 年, Balling 等<sup>[9]</sup>建立飞秒光梳脉冲在空气中传播的数值模型,重点讨论光源的光谱宽度、不同中心波长、测量光路中群速度色散以及一阶二阶互相关选取对距离测量的影响。研究得出 1550 nm 中心波长的飞秒光梳对空气中长距离测量最为有利的结论,并提出针对光源光谱宽度的优化方法。在实验验证环节中,采取锁定飞秒光梳重复频率、精密扫描参考镜位置的方案,同时以互相关信号特征(包络峰值和强度重心)作为对准脉冲依据。测量范围受到扫描范围限制,因此仅在 0 点,1 倍和 2 倍脉冲间隔位置进行测距实验,并与干涉仪比对。经过基于实际光谱的群折射率补偿之后,测量相对精度可达  $5 \times 10^{-8}$ 。同年, Cui 等<sup>[10]</sup>利用一阶互相关信号包络峰值对准脉冲,搭建量程覆盖 50 m 的测距系统,同样选择锁定飞秒光梳重复频率、精密扫描参考臂获得互相关信号的方案。该工作建立了空气中测距模型,并分析了啁啾对脉冲互相关计时的影响,在

50 m 范围内测距精度优于  $2 \mu\text{m}$ 。但实验中互相关信号由  $80 \mu\text{m}$  行程的压电陶瓷位移台(PZT)扫描获得,因此只能在脉冲间隔整倍数位置实现测距。2014 年,吴翰钟等<sup>[11]</sup>细致分析了一阶互相关信号模型,结合干涉条纹强度分辨提高了脉冲对准的稳定度,在  $10 \mu\text{m}$  范围内得到最大误差为 47 nm 的脉冲对准。2015 年, Zhu 等<sup>[12]</sup>分析了二阶互相关信号模型,并提出了基于干涉条纹的信号补偿方法,有效克服了机械扫描采样不均匀引入的误差,在 0 点比实验中将对准方差提高至 8.5 nm。2018 年, Liu 等<sup>[13]</sup>为长距离测量实验建立考虑色散的一阶互相关理论模型,分析了色散对互相关信号影响,提出了脉冲对准优化方法,并在 9 m 距离上的  $20 \mu\text{m}$  范围内验证了脉冲对准效果,脉冲对准残差优于 200 nm。随着对互相关模型的深入研究,脉冲对准精度也逐渐提高,但如何实现任意采样的问题仍亟待解决。

2.1.2 脉冲平衡互相关法

2010年, Lee等<sup>[14]</sup>首次将平衡互相关方法应用于飞秒脉冲计时, 相比于普通互相关方法, 该方法克服了脉冲信号强度扰动的影响, 将测距精度提升至纳米量级。在室外 0.7 km 的测距实验中, 与商用测距仪比对, 所提系统达到了 ±2 mm 的测量精度, 并在 5 ms 采样时间内达到 117 nm 的测量阿伦方差; 在室内 1.5 m 的干涉仪比对实验中, 偏差优于 20 nm。平衡互相关探测结构与测量原理如图 3 所示<sup>[15]</sup>。测量脉冲与参考脉冲合束后经双色镜耦合至倍频晶体(周期极化磷酸氧钛钾, PPKTP)产生倍频脉冲 A 并由光电探测器 1(PD1)探测, 剩余基频脉冲被双色镜反射再一次倍频产生倍频脉冲 B 并由 PD2 探测。图 3(b)给出了平衡互相关信号的产生过程, 由此可见, S形平衡相关信号的中间 0 点 C 对应测量脉

冲和参考脉冲完全重合的位置, 且该相关信号只由脉冲间时延决定, 不受脉冲强度的影响。在 S 形相关信号的极值点 BD 之间, 信号强度与时延呈线性关系, 从而有利于 0 点探测和反馈控制。文中测距实验采用了扫描重复频率对准脉冲的方案, 实验中所用光源重复频率为 100 MHz, 调节范围为 ±200 kHz, 在 187.5 m 范围外可以实现任意绝对测距, 满足室外 0.7 km 的实验测距需求。此外, 还提出一种新颖的室外长距离测距分辨力评定方法。针对复杂环境多扰动源的测量条件, 在测量过程中对目标镜施加低频位置调制, 之后对距离测量结果进行频谱分析, 通过调制频率处频谱分量验证了测量分辨力。2012年, 秦鹏等<sup>[16]</sup>利用自制的 183.4 MHz 重复频率飞秒激光器, 用脉冲平衡互相关在 52 m 的大气环境中得到了 1 s 平均时间下测距阿伦方差为 12 nm 的结果。

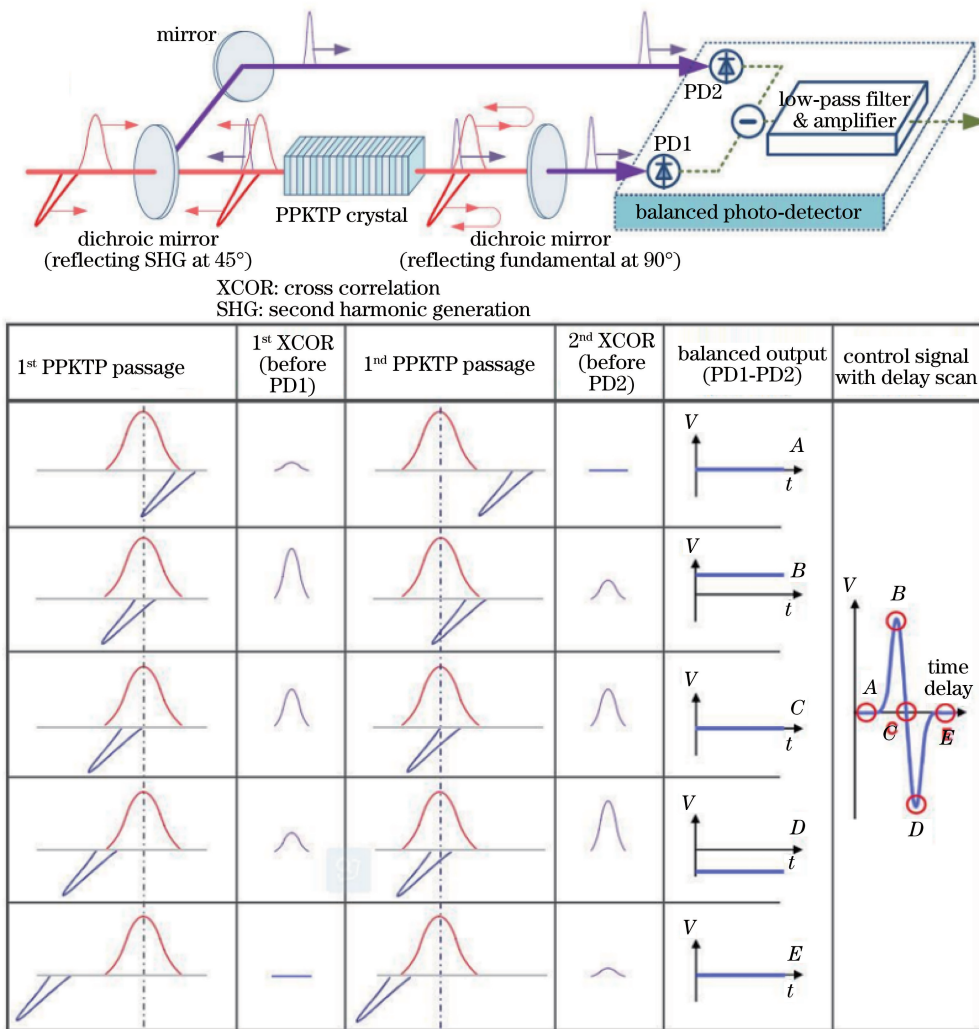


图 3 平衡互相关探测结构与测量原理。(a)探测结构;(b)测量原理

Fig. 3 Detection setup and measuring principle of balanced cross correlation.

(a) Detection setup; (b) measuring principle

### 2.1.3 合成波长对准脉冲法

2013年, Wu等<sup>[17]</sup>提出一种基于合成波长对准脉冲的计时新方法, 合成波长对准脉冲法系统结构如图4所示, 将飞秒光梳 comb1 倍频产生二次谐波光梳 comb2, 利用 comb1 中心波长的一半构建虚拟

谐波光梳 comb3, 最后通过 comb2 和 comb3 中心波长差值构建合成波长。利用合成波长的测量结果, 将基于互相关信号包络峰值的脉冲对准精度提升至纳米量级, 在 1750  $\mu\text{m}$  测量范围内, 实现了精度优于 30 nm 的距离测量。

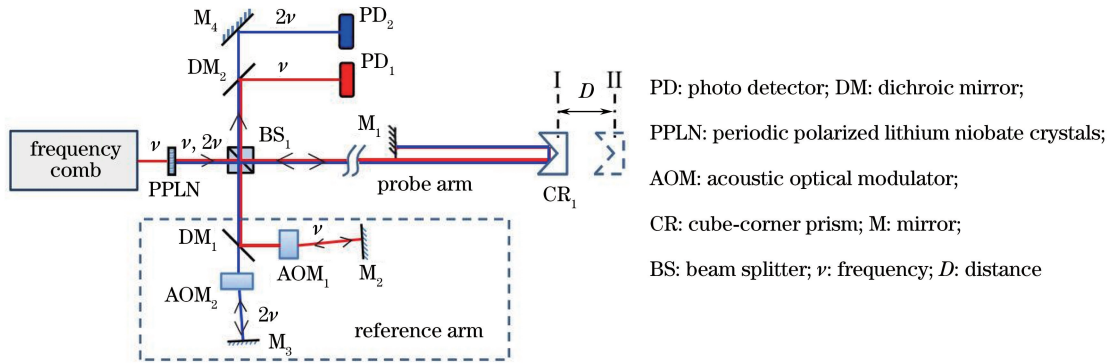


图4 合成波长对准脉冲法系统结构

Fig. 4 Setup of pulse-to-pulse alignment based on synthetic wavelength interferometer

相关实验表明, 长距离测量实验中, 互相关信号包络峰值对准脉冲的方法可以实现优于 2  $\mu\text{m}$  的测量精度, 继续提升精度就需要干涉条纹信息。然而, 干涉相位测量受限于亚微米的非模糊范围, 难以与脉冲对准的结果直接合成, 并且增量式的合成方式限制了测量速度。合成波长对准脉冲法巧妙利用虚拟谐波光梳和倍频光梳中心波长的差值, 构建了基频中心波长 40 倍的合成波长, 将干涉相位测量的非模糊范围扩展至数十微米, 因此可与互相关信号包络峰值的对准结果直接合成, 将测距能力提升至纳米量级, 并保证了测量效率。此后, 廖磊等<sup>[18]</sup>进一步优化方法, 于 2016 年提出采用两个带通滤波器构建合成波长的新方案, 简化了系统结构, 也消除了倍频效率低和信号强度弱对相位测量的影响, 在 40 mm 内实现了 91 nm 精度的距离测量。在此基础上, 又于 2018 年搭建了利用 51 m 长光纤参考臂增加测量脉冲与参考脉冲周期间隔数的新系统, 将连续测量范围提升至 850 mm, 并在 350 mm 范围内将测距精度提高到 75 nm<sup>[19]</sup>。

### 2.1.4 机械扫描与重复频率扫描的比较

对于单光梳飞行时间测距系统, 扩大连续测距范围直至实现任意绝对测距有重要意义。当待测距离不为脉冲间隔整倍数时, 脉冲在空间上不重叠, 需要通过机械扫描或重复频率扫描对准脉冲, 扫描的范围决定了连续测距范围<sup>[32]</sup>。机械扫描一般由大行程运动导轨与压电陶瓷 (PZT) 共同组成, 导轨用于粗调参考镜位置, PZT 用于互相关信号采样。扫

描范围主要由导轨行程确定, 与待测距离无关, 其缺点是: 1) 大范围的机械扫描速度慢, 限制了测量效率, 且容易引入误差; 2) 扫描结构体积大, 使测量系统难以集成, 并限制了应用环境。重复频率扫描实质上是扫描相邻脉冲间隔, 一般调整范围为 1% 左右, 因待测距离以脉冲间隔整倍数获得, 扫描范围也相应地成倍放大。当扫描范围达到相邻脉冲间隔时, 则可实现任意绝对测距。这种扫描方式更适合长距离测量, 以获得较大的放大倍数, 例如空天尺度的卫星编队等空间任务。短距离测量时放大系数小, 扫描范围有限, 难以满足工业应用需求。近年来, 一种基于非平衡迈克耳孙干涉仪的重复频率扫描采样方式被提出, 弥补了这一不足。Nakajima 等<sup>[28]</sup>在 2015 年详细分析了这种结构对重复频率扫描的倍数作用, 并用 342 m 长的光纤作为参考臂搭建了基于重复频率扫描采样 (OSCAT) 的任意绝对测距系统, 提出基于辅助光源干涉相位补偿的长光纤稳定技术, 实现了  $10^{-12}$  量级相对稳定度, 稳定长光纤参考臂的非平衡迈克耳孙干涉测距系统如图 5 所示。

2016 年, Wu 等<sup>[29]</sup>搭建了包含 114 m 长光纤的 OSCAT 系统, 并用干涉相位将长光纤稳定在  $10^{-10}$  量级, 在 60 m 测量范围内实现了精度优于 3  $\mu\text{m}$  的距离测量, 相对测距精度达  $10^{-8}$  量级。2018 年, Cui 等<sup>[30]</sup>搭建了利用光电振荡 (OEO) 原理稳定 1000 m 长光纤的 OSCAT 系统, 可将光纤稳定在  $10^{-10}$  量级, 并在 22 mm 的连续测距范围内实现精度优于

4  $\mu\text{m}$ 的距离测量。相比于干涉相位稳定长光纤技术, OEO 结构简单, 对辅助光源频率稳定性要求低, 同时动态范围更大。OSCAT 测距原理仅需一个飞

秒光梳光源即可实现测量范围内任意采样, 随着飞秒光梳重复频率扫描性能的提高以及长光纤稳定技术的发展成熟, 将具有更广阔的应用前景。

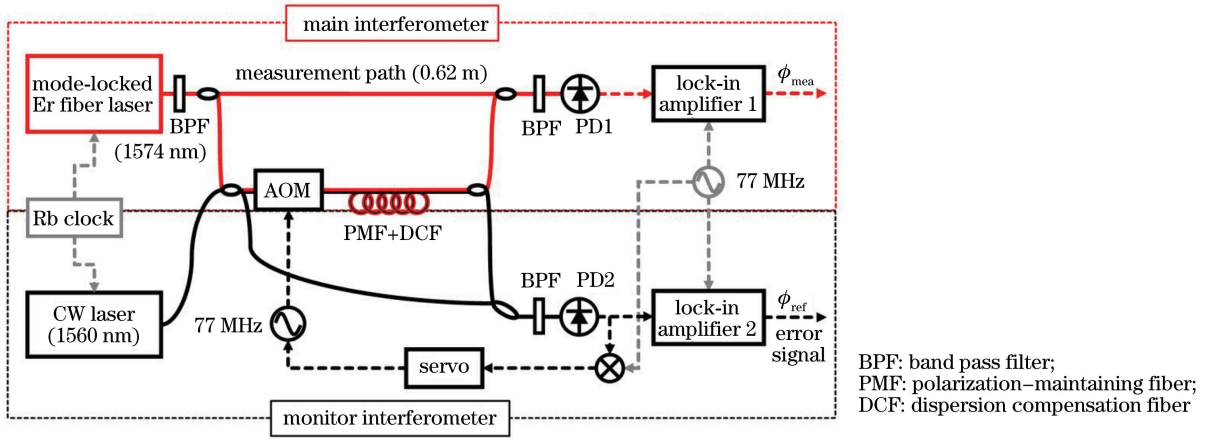


图 5 稳定长光纤参考臂的非平衡迈克尔逊干涉测距系统

Fig. 5 Unbalanced Michelson interferometer with stable long fiber reference arm

## 2.2 双飞秒光梳时域特性绝对测距

单飞秒光梳飞行时间测距原理被提出后, 一直不能灵活高效地解决任意绝对测距问题, 测量范围和测量效率难以兼顾。为解决这一问题, Coddington 等<sup>[20]</sup>于 2009 年提出双飞秒光梳异步光学采样测距原理 (ASOPS), 双飞秒光梳飞行时间测距系统如图 6 所示, 以两个重复频率不同的飞秒光

梳分别作为测量光梳与本振光梳, 由本振光梳对测量光梳线性光学采样获取待测距离信息, 在 1 m 干涉仪比对实验里, 60 ms 采样时间下, 测距精度可达 5 nm。实验中在测量光路加入 1.14 km 长光纤以模拟长距离测量, 获得了与短距离测量相同的测距性能, 该方法有望在长距离范围内实现  $10^{-13}$  量级测量精度。

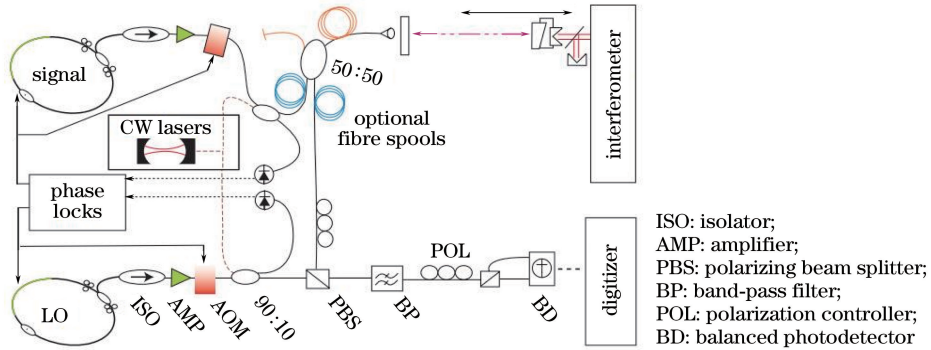


图 6 双飞秒光梳飞行时间测距系统

Fig. 6 Time-of-flight distance measurement system under two femtosecond combs

两个飞秒光梳分别经连续波激光器锁定至相同的频率基准, 一个作为测量光梳 (Signal), 其脉冲周期记为  $T_s$ , 另一个作为本振光梳 (LO), 其脉冲周期记为  $T_L$ ,  $\Delta T$  为两者之间的微小周期差。测量光梳分别经参考镜与目标镜之后与本振光梳会合, 由于两者脉冲周期存在微小差异, 每过一个周期, 本振脉冲都相对测量脉冲滑移  $\Delta T$ , 滑移  $T_s$  后则完成对任意待测距离的一次采样, 因此, 实施一次测量时间为  $T_{\text{update}} = T_s T_L / \Delta T$ 。本实验中测量光梳和本振光梳重复频率分别为 100.021 MHz 和 100.016 MHz, 因

此一次测量时间为 200  $\mu\text{s}$ , 对应 5 kHz 的采样率。解算待测距离时, 飞行时间与干涉相位被傅里叶变换同时提取。考虑到色散的影响, 变换后的相对相位谱可表示为

$$\varphi(\nu) = \frac{4\pi L}{\lambda_c} + \frac{4\pi L}{\nu_{\text{group}}}(\nu - \nu_c), \quad (1)$$

式中:  $L$ ,  $\lambda_c$ ,  $\nu_{\text{group}}$  和  $\nu_c$  分别表示待测距离、中心波长、群速度以及中心频率。(1)式对自变量频率  $\nu$  进行线性拟合, 可分离出由飞行时间决定的斜率  $4\pi L / \nu_{\text{group}}$  和由干涉相位决定的常量  $4\pi L / \lambda_c$ , 结合两者测距结

果即可在测量范围内实现干涉测量精度的绝对测距。由测量原理易知,测量非模糊范围为测量光梳相邻脉冲间隔一半,在本实验中即为 1.5 m。为扩展非模糊范围,提出互换测量光梳与本振光梳后再次测量的方法,利用游标原理可将非模糊范围扩展到 30 km。该方法需要两个精密锁定的飞秒光梳来实施测量,成本较高,同时利用游标原理扩展非模糊范围的方法降低了测量效率,这些都限制了方法的应用范围。但其无须扫描即可实现任意采样,1.5 m 的非模糊范围也易于用其他传统激光测距方法解模糊,因此是目前最具实用潜力的飞秒光梳测距方法之一。

2014 年,Zhang 等<sup>[21]</sup>利用二阶互相关对准脉冲,以 ASOPS 测距原理在 20  $\mu\text{m}$  测量范围内实现精度为 100 nm 的绝对测距,单次测量时间为 0.5 ms。测量过程中,每当测量脉冲与本振脉冲重叠时,利用互相关信号包络峰值对准脉冲,获得脉冲完全重叠的时间点,由参考镜和目标镜之间的时间差求得待测距离。此外,他们还提出了调整测量光梳与本振光梳之间重复频率差之后再次测量,利用合成波长原理扩展非模糊范围的方法。同年,Wu 等<sup>[22]</sup>分析了双光梳之间重复频率差值对 ASOPS 测量的影响,并提出两步法优化重复频率差值。此后,Wu 等<sup>[23]</sup>于 2015 年建立了 ASOPS 飞行时间测量的理论与数值模型,详细分析了两光梳的重复频率、重复频率差值以及载波包络相移对测距精度的影响,并进行了实验验证。同年,Han 等<sup>[24]</sup>利用平衡互相关原理对准脉冲,以 ASOPS 原理实现了多目标同时测距,在 2 kHz 采样率下获得 0.01 ps 的计时分辨力,分析表明合成不确定度为 $[(1.7 \times 10^{-8} d)^2 + (189 \text{ nm})^2]^{1/2}$  ( $d$  为待测距离)。他们利用该方法进行了多自由度姿态传感测量,在 0.5 s 平均时间内获得 0.073" 的测角重复性。2016 年,纪荣祎等<sup>[26]</sup>介绍了该团队利用 ASOPS 测距原理搭建新型激光跟踪仪的最新进展,结合 ASOPS 与传统激光相位测距扩展量程,在 60 m 测量范围内实现了  $1 \mu\text{m} + 0.5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$  的测距精度,对 ASOPS 的实际应用起到积极推动作用。2017 年,于佳禾等<sup>[27]</sup>利用卡尔曼滤波技术提高了 ASOPS 的测量精度,将测量标准差降低了近一个数量级,同时可进行动态测量。

### 3 基于飞秒光梳频域特性的绝对距离测量

飞秒光梳在频域上表现为大量等间隔频率纵模分布,纵模成分数量可达  $10^6$  量级<sup>[6-7]</sup>。并且频率间

隔(重复频率)与偏置频率(载波包络相移)都精密锁定,每一个纵模成分都对应一个准确的光学频率,保证了测量的溯源性,大量的纵模成分为新测距原理提供了有力支持。同样,从测量方法所需飞秒光梳的数量来看,可将基于飞秒光梳频率特性的绝对距离测量分为单飞秒光梳方法和双飞秒光梳方法。根据具体测距原理的不同又可分为模间拍频相位法<sup>[5,33-35]</sup>、光谱分辨干涉法<sup>[36-40]</sup>、频率参考基准法<sup>[41-48]</sup>以及外差多波长法<sup>[49-51]</sup>以及双光梳外差测距法<sup>[52-55]</sup>。

#### 3.1 单飞秒光梳频域特性绝对测距

对于传统的激光测距方法,如干涉法和相位法,飞秒光梳丰富稳定的频谱成分可以同时提高测量精度与效率,而一些全新的测距原理也在飞秒光梳的基础上成为可能。

##### 3.1.1 模间拍频相位法

传统的激光相位法是通过连续波激光进行正弦调制,再通过测量调制频率的相位差进行测距。由于鉴相结果存在  $2\pi$  的非模糊范围限制,因此需要多个调制频率进行组合测量,以兼顾测量范围和精度。高频调制决定了测量的分辨力,然而电学调制等外调制方法受调制带宽限制,并且调制过程中的电光串扰会引起周期误差,需要额外补偿。2000 年,Minoshima 等<sup>[5]</sup>提出模间拍频相位法,以飞秒光梳作为相位法测距光源,通过测量不同纵模间拍频信号的相位并合成测距结果,在 240 m 测量范围内获得了 50  $\mu\text{m}$  的测量分辨率及优于  $8 \times 10^{-6}$  的测距精度,模间拍频相位测距系统结构如图 7 所示。飞秒光梳内大量的纵模成分经光学拍频,可在探测器上形成以重复频率为基频的高次谐波信号,为相位测量提供了丰富的调制频率,且避免了周期误差的影响。但受实验条件限制,实验中最高只选取了第 19 次谐波测量相位,对应的调制频率约为 0.95 GHz,该限制由探测器和相位测量带宽决定。为补偿长距离测量时空气折射率的影响,实验中采用双色法折射率自补偿方案,将光梳倍频产生倍频光梳,之后分别测量两者在 0 m 和 240 m 处的相位差。以此相位差可求得群折射率差值,由群折射率计算公式进而求解出测量波长对应的群折射率值。与 Edlén 公式比较,该方法可实现  $10^{-6}$  量级群折射率测量精度。经补偿后,240 m 范围内测距精度为  $8 \times 10^{-6}$ 。

模间拍频相位法系统结构简单,测距精度潜力很大,但需要足够的硬件条件支撑,1 GHz 的系统

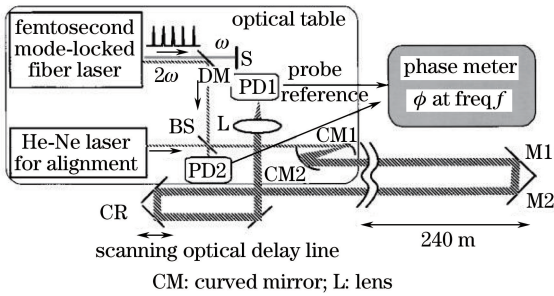


图7 模间拍频相位测距系统结构

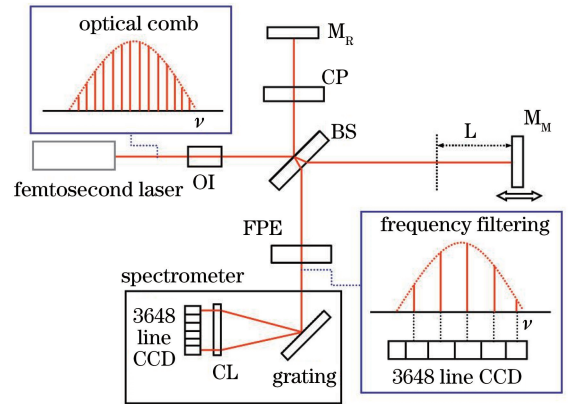
Fig. 7 Distance measurement system based on intermode beats

带宽不能够发挥其测距潜力。2010年, Doloca等<sup>[33]</sup>在 Minoshima 的工作基础上, 提取了 100 MHz 和 11.4 GHz 的模间拍频相位, 并分别进行距离粗测和精测。其中 100 MHz 信号相位由信号经 Heydemann 修正后正交同步解调测得, 11.4 GHz 信号相位由信号混频至千赫兹量级后由锁相放大器测得。针对测量过程中高频信号相位漂移的问题, 设计了一个额外的固定长度光路进行补偿测量, 即距离相关相位取测量相位与补偿相位的差值, 提高了鉴相稳定性。为增大测量范围, 提出通过改变飞秒光梳重复频率构建合成波长的方法, 以 100 MHz 和 100.1 MHz 重复频率构建了 3 km 的合成波长, 在 100 m 测量范围测距精度优于 10 μm。同年, Minoshima<sup>[34]</sup>也提出利用外差测量 40 GHz 模间拍频相位方法, 在 1 m 处 500 s 内测量稳定性为 190 nm, 在 3.75 mm 干涉仪比对实验中精度为 60 nm。2016年, 张晓声等<sup>[35]</sup>分析了改变飞秒光梳重复频率构建合成波长的限制, 并以 1 GHz 带宽探测系统得到 0.022° 的相位测量标准差, 在 1125 mm 测量范围内测距精度优于 50 μm, 重复性优于 3 μm。受到高速光通信发展的推动, 探测器带宽日益提高, 目前商用级的高速光电探测器带宽可达 100 GHz (XPDV412xR, Finisar), 有助于提高模间拍频相位测距系统性能。商用飞秒光梳的重复频率一般在百兆赫兹量级, 其对应的非模糊范围为米量级, 可与传统激光相位测距或脉冲飞行时间测距组合, 从而成为宽量程、高精度、高效率的测距方法, 应用前景广阔。

### 3.1.2 光谱分辨干涉法

基于白光光源的光谱干涉仪是低相干性干涉, 光源的时间相干性低而空间相干性高, 测量范围一般为微米量级, 常被用于色散测量和表面形貌测量。飞秒光梳内相干的纵模成分可确保在大量程范围内

获得光谱干涉信号, 显著提高光谱分辨干涉测距范围。2006年, Joo等<sup>[36]</sup>将飞秒光梳应用于光谱分辨干涉测距, 将测量范围扩展至 0.89 m, 测量分辨力为 7 nm, 光谱分辨干涉测距系统结构如图 8 所示。实验中由光栅和线阵 CCD 组成的光谱探测单元不能分辨 75 MHz 的纵模间隔, 因此一个 Fabry-Perot 标准具(FPE)被用来对飞秒光梳频谱滤波, 以确保每一个 CCD 像素对应一个频率成分。



OI: isolator; CP: dispersion compensation plane; CL: lens

图8 光谱分辨干涉测距系统结构

Fig. 8 Distance measurement system based on spectral-resolved interferometer

待测距离解算方法如图 9 所示<sup>[34]</sup>。首先获取光谱干涉的功率谱密度, 如图 9(a)所示, 可表示为

$$g(\nu) = s(\nu)[1 + \cos \phi(\nu)], \quad (2)$$

式中:  $s(\nu)$  为飞秒光梳功率谱密度;  $\phi(\nu)$  为相位谱, 可用光程差求解, 即  $\phi(\nu) = 2\pi\alpha$ , 光程差  $\alpha = 2n(\nu)L/c$ ,  $n$ 、 $c$ 、 $L$  分别为空气折射率、真空光速和待测距离。对 (2) 式进行傅里叶变换可得

$$G(\tau) = \mathcal{F}\{g(\nu)\} = S(\tau) \otimes \left[ \frac{1}{2} \delta(\tau + \alpha) + \delta(\tau) + \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) \right], \quad (3)$$

式中:  $\mathcal{F}(\cdot)$  表示傅里叶变换运算;  $\otimes$  表示卷积运算;  $S(\tau)$  和  $\tau$  分别为  $s(\nu)$  的傅里叶变换和光程差变量;  $\delta(\cdot)$  为狄拉克函数。如图 9(b)所示, 通过合适的滤波器提取  $G(\tau)$  中  $\alpha$  点处分量, 再经傅里叶逆变换可得图 9(c)中所示相位谱, 解缠后求得相位斜率  $d\phi/d\nu$ , 待测距离为

$$L = \left( \frac{c}{4\pi n_g} \right) \frac{d\phi}{d\nu}, \quad (4)$$

式中:  $n_g$  为空气中的群折射率。由 (3) 式可知, 当  $\alpha$  过小时,  $\delta(\tau)$  和  $\delta(\tau - \alpha)$  重叠, 则无法提取  $\alpha$  点信号分量, 即测量存在死区, 本实验中死区约为 5 μm。同时非模糊范围由  $L_{\text{NAR}} = c/(4\pi n_g p)$  决定,  $p$  为光谱



分辨率,由飞秒光梳的光谱分辨率可获得 2 m 的非模糊范围,但受限于光谱测量时的分辨率,本实验中的非模糊范围仅为 1.458 mm,非模糊范围以外由于混叠的影响,相位测量结果将周期性重复。理论最

大测量范围为光源相干长度,实验中飞秒光梳纵模线宽小于 1 MHz,对应 150 m 的相干长度。但实际测量中,光谱经 FPE 滤波,最大测量范围由滤波后的纵模间隔决定,因此本实验最大测量范围为 0.89 m。

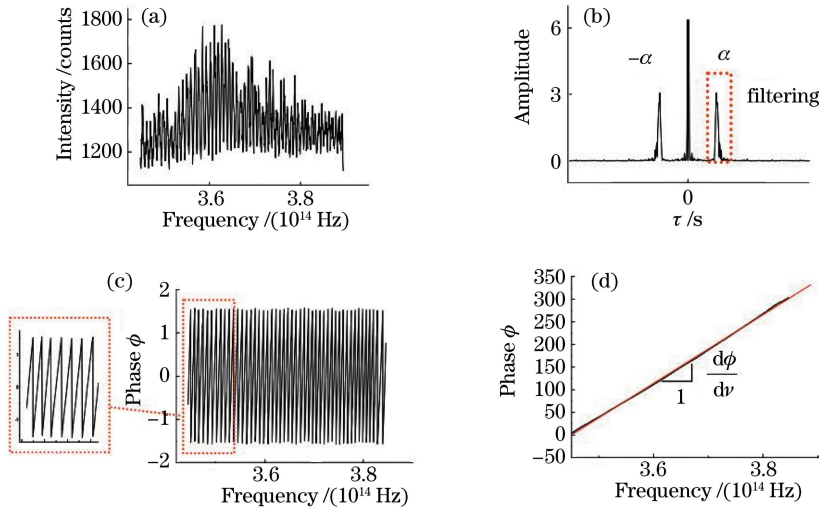


图 9 光谱分辨干涉测距解算方法。(a) 光谱干涉强度;(b) 傅里叶变换后带通滤波;(c) 缠绕相位;(d) 解缠绕相位

Fig. 9 Distance calculation method based on spectral-resolved interference. (a) Spectral interference intensity;

(b) band-pass filtering after Fourier transfer; (c) wrapped phase; (d) unwrapped phase

光谱分辨干涉法理论上可在上百米量程内实现米量级非模糊范围、纳米量级精度的测距,但 FPE 的使用严重限制了其测距性能,解决这一问题成为相关研究的重要目标。2012 年, van den Berg 等<sup>[37]</sup>利用虚像相位阵列(VIPA)、光栅和面阵 CCD 实现了超高精度的光谱分辨,可分辨 1 GHz 的光梳纵模间隔,因此无须使用 FPE 滤波,即可将非模糊范围提高至 15 cm。实验中结合光参量振荡器和波长计精确标定了 CCD 上每一个纵模光点对应的光学波长,再将每一个波长的干涉相位利用光强余弦拟合的方式提取出来,由此组成了零差多波长干涉,并将每个波长的测量结果平均优化,实现了  $\lambda/30$  的测距精度。2015 年,该团队进行了 50 m 长距离测量实验,获得了亚微米级的测量不确定度<sup>[38]</sup>。同年,吴翰钟等<sup>[39-41]</sup>详细分析了光谱分辨干涉原理,并建立了数值仿真模型,同时提出了一种利用啁啾脉冲的光谱干涉测距方法,并选择适宜的时频分析方法。在参考臂中利用光栅对引入线性啁啾,啁啾引发中心频率发生偏移且偏移量与脉冲飞行时间延迟相关,通过光谱干涉中的最宽条纹可读取中心频率偏移量,进而解算得到待测距离,啁啾脉冲光谱干涉测距原理如图 10 所示<sup>[39]</sup>。由测量原理易知,此方法解算过程简单,但连续测量范围受光谱宽度限制,为毫米或厘米量级,只能在脉冲间隔整倍数位置实施

测量。在 65 m 长距离测量实验中,测量合成不确定度为  $[(6.8 \times 10^{-8} d)^2 + (25.2 \mu\text{m})^2]^{1/2}$ 。啁啾脉冲光谱干涉测量精度较低,但系统结构和数据处理简单,上述实验结果由商用光谱仪获得,光路校准方便且抗干扰。2016 年, Kato 等<sup>[42]</sup>利用啁啾脉冲光谱干涉实施三维形貌测量,在 480  $\mu\text{m}$  高度的台阶测量实验中,测量不确定度为 12  $\mu\text{m}$ 。

### 3.1.3 频率参考基准法

飞秒光梳构建了微波频率基准到光频率基准的传递,为计量溯源提供了有力工具。日本国家计量院(NMIJ)已经将米定义复现中的激光光源由碘稳频氦氖激光器变为同步到协调世界时(UTC)的飞秒光梳。以飞秒光梳作为测量的参考基准,可提高测量光源稳定性,确保测量可溯源,又避免了飞秒光梳中单纵模功率过低的限制。常见的两种参考到飞秒光梳的激光测距方法,分别是多波长干涉法(MWI)和扫频干涉法(FSI)。

在 MWI 中,多个连续波激光器被锁定至同一飞秒光梳中不同的纵模成分,以提升合成波长精度<sup>[43]</sup>。2006 年, Schuher 等<sup>[44]</sup>以这种方式构建了 90  $\mu\text{m}$  的合成波长,合成波长相对精度优于  $2 \times 10^{-7}$ ,在 90 cm 测量范围内合成波长测距精度约为 160 nm,足以衔接干涉测量使测距结果达到纳米量级精度。2008 年, Salvadé 等<sup>[45]</sup>结合超外差相位探

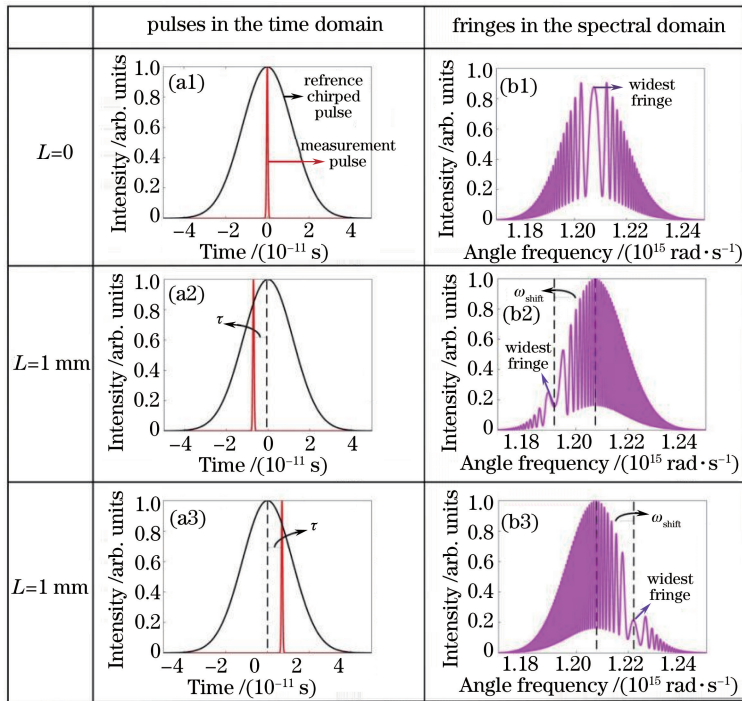


图 10 啁啾脉冲光谱干涉测距原理。(a1)-(a3)时域图;(b1)-(b3)频域图

Fig. 10 Principle of distance measurement based on chirped pulse spectral interferometer.

(a1)-(a3) Pulses in time-domain; (b1)-(b3) fringes in spectral-domain

测,在 800 mm 测量范围内获得了 8 nm 的绝对测距精度,达到了实验中比对干涉仪的精度水平。2012 年,张继涛等<sup>[46]</sup>将可调谐激光器锁定至飞秒光梳,锁定后 1 s 采样时间内激光器频率稳定度为  $1.8 \times 10^{-12}$ ,有望将台阶高度测量不确定度改善至 7.9 nm。2016 年,Jang 等<sup>[47]</sup>将 4 个可调谐激光器锁定至飞秒光梳,经过合理选择锁定纵模并逐级构建合成波长,获得 45 mm 的非模糊范围,在 3.8 m 测量范围内,测量合成不确定度为  $[(1.62 \times 10^{-8} d)^2 + (0.64 \text{ nm})^2]^{1/2}$ 。

在 FSI 中,测距分辨率由可调光源扫频范围对应的等效波长决定,测距精度也受到扫频范围精度和扫频线性度等影响<sup>[56]</sup>。利用飞秒光梳校正光源的光频,可准确测量扫频范围,提升测距精度。2013 年,Wu 等<sup>[48]</sup>提出利用飞秒光梳校准光源扫频范围的 FSI 测距,获得了精度为 1.3 kHz 的 200 GHz 扫频范围,在 1 m 测量范围内测距偏差优于 5  $\mu\text{m}$ 。实验中飞秒光梳重复频率为 250 MHz,利用一个精度为 60 MHz 的波长计区分光梳中的不同纵模成分,在扫频起止点,分别将可调光源锁定至光梳中指定的纵模上,完成扫频范围的标定。同年,Baumann 等<sup>[49]</sup>利用飞秒光梳校正扫频线性度,在扫频过程中同步记录可调谐光源与飞秒光梳的拍频信

号,再以拍频频率对测量信号进行线性重采样,实现了对扫频线性度的校准,在 1 m 测量范围内,100 ms 采样时间下,测量精度可达 6 nm。2014 年,Baumann 等<sup>[50]</sup>应用这个原理进行三维形貌测量,在 10 m 距离上的漫反射表面测量不确定度优于 10  $\mu\text{m}$ 。该系统以重复频率作为校准依据,无须锁定载波包络相移,降低了系统成本。2018 年,Wu 等<sup>[51]</sup>利用其 2013 年提出的校准 FSI 原理搭建了三维台阶测量系统,在台阶高度为 1  $\mu\text{m}$  至 1 mm 实验范围内测量不确定度为 45 nm。

### 3.2 双飞秒光梳频域特性绝对测距

2013 年,王国超等<sup>[52]</sup>提出一种双光梳多外差测距理论,建立了结合基于双光梳互相关的多外差测距和模间拍频相位测距的理论模型,理论分析可得该测距方法可在数千米量程实现亚纳米测量精度。但该结果由理论仿真实现,在实际测量中难以达到,并且该方法中多外差干涉仅用于扩展量程,测距精度由单飞秒光梳的模间拍频相位决定。2014 年,Yang 等<sup>[53]</sup>提出基于双光梳的外差多波长干涉测距方法,利用两个中心频率和重复频率都不同的光梳分别作为测量光梳和本振光梳,并把测量光梳的不同纵模成分分别外差到不同的微波频率。再利用数字锁相原理对不同外差信号进行同步鉴相,实现了多尺度合成波长

同步生成,在 10 m 测量范围内测距精度优于  $15 \mu\text{m}$ 。在 2015 年的 20 m 测量实验中,合成不确定度为  $[(1.1 \times 10^{-7} d)^2 + (10.4 \mu\text{m})^2]^{1/2}$ ,双光梳外差多波长测量仪结构和原理图如图 11 所示<sup>[54]</sup>。测量光梳分别经参考臂和测量臂之后与本振光梳合束,由不同探测器分别探测外差信号。测量光梳和本振光梳的重复频率和中心频率分别表示为  $f_{\text{Sr}}$ 、 $\nu_{\text{S}}$ 、 $f_{\text{Lr}}$  和  $\nu_{\text{L}}$ ,则测量光梳和本振光梳的第  $i$  阶纵模可分别表示为  $f_{\text{Si}} = \nu_{\text{S}} + i f_{\text{Sr}}$  和  $f_{\text{Li}} = \nu_{\text{L}} + i f_{\text{Lr}}$ ,进行

外差探测时,可将第  $i$  阶测量纵模相位传递到对应的外差干涉信号  $f_i = (\nu_{\text{S}} - \nu_{\text{L}}) + i(f_{\text{Sr}} - f_{\text{Lr}})$  上,因此形成如图 11(c) 所示的梳状外差信号频谱。同步提取外差信号相位后,可由任意两相同阶数差的外差信号构建同一尺度的合成波长,并利用取平均优化测量结果。2017 年, Wu 等<sup>[55]</sup> 利用该方法进行了长达 1.2 km 的室外基线测量,其测量合成不确定度为  $[(2.4 \times 10^{-7} d)^2 + (180 \mu\text{m})^2]^{1/2}$ ,在 10 s 采样时间内下阿伦方差优于  $20 \mu\text{m}$ 。

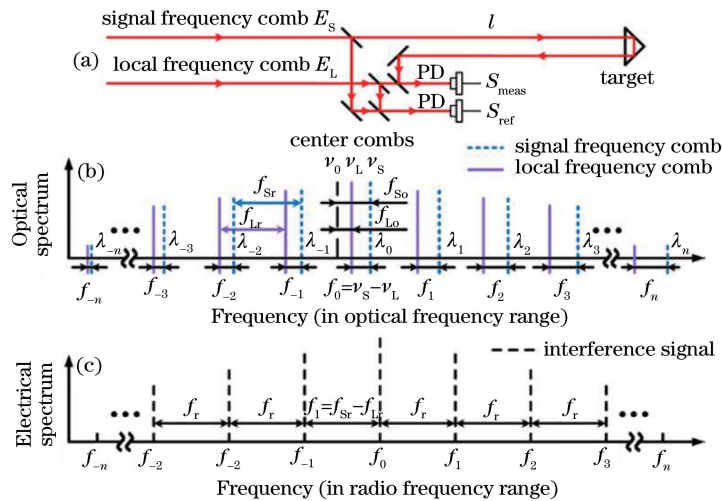


图 11 双光梳外差多波长测量仪结构和原理图。(a)测量结构;(b)双光梳光谱;(c)外差干涉信号频谱图

Fig. 11 Structure and principle of dual-comb heterodyne multi-wavelength interferometer.

(a) Structure of measurement setup; (b) dual-comb spectrum; (b) spectrum of heterodyne interference signals

上述实验中所用光梳并非飞秒光梳,而是电光调制光梳,其纵模数量在数十量级,单纵模功率较高,易于提取干涉信号<sup>[57-58]</sup>。但其光谱宽度较窄,通常为数百吉赫兹,这就限制了所能构建的最短合成波长为毫米量级,因此只能达到微米量级测距结果。若以双飞秒光梳搭建外差多波长干涉测距,光源光谱宽度可达数十甚至上百太赫兹,可构建微米量级合成波长,则有望在上千米测量范围内,实现纳米量级精确测距。但飞秒光梳单纵模功率较低,会给干涉相位提取带来挑战。2015 年, Mildner 等<sup>[59]</sup> 设计了一对 Fabry-Perot 腔的双光梳生成系统,以一个重复频率 250 MHz 的飞秒光梳为基础生成了一对重复频率分别为 3.5 GHz 和 3.75 GHz 的子光梳,光谱宽度为 2.4 THz,可构建百微米量级的合成波长,实现亚微米精度的测距,实验中也验证了幅值为  $-80 \text{ dBm}$  的子光梳外差信号。但外差信号强度过低,难以实现高精度稳定鉴相。

## 4 结 论

飞秒光梳被提出并应用于精密光学频率计量,

建立了光学频率和微波频率的传递关系。飞秒光梳的优异性能使之随后成功应用于光钟、精密光谱测量、时频传递、任意波形合成以及绝对距离测量等领域,而这些不同的应用需求也对飞秒光梳的发展起到推动作用,从传统钛宝石飞秒光梳发展到现在的光纤飞秒光梳、电光调制光频梳以及微谐振腔光频梳等,飞秒光梳系统日趋稳定、紧凑,商用的飞秒光源也逐渐成熟,为测量应用创造了有利条件。

自飞秒光梳被应用于测距研究以来,一直是研究领域中的热点,也为测距研究带来了突破性进展。以主要利用时频域特性以及所需光源数量分类,介绍了当前基于飞秒光梳的测距原理,并分析其优缺点。双飞秒光梳测距方法性能优良,但需要两台飞秒光梳,显著增加了系统的复杂性和成本,限制了其应用范围。单飞秒光梳测距方法中, OSCAT 法、模间拍频相位法、利用 VIPA 的光谱分辨干涉法以及频率参考基准法在实现大量程、高精度以及高效率的任意绝对测距中有很大的潜力。 OSCAT 法可以很好地与脉冲对准技术结合,利用长光纤对重复频率扫描的放大作用,在所需测量范围内实现高精度

任意测距。但需要精确测量重复频率扫描变化,频率计数器的测量方式带宽较低,限制了测量速度。模间拍频相位法受到测量系统带宽的限制,需要数十吉赫兹的系统带宽满足高精度测距需求,而高频信号对环境敏感,易引入噪声。利用 VIPA 的光谱分辨干涉法需要使用精密标定采样相机,同时还需要高定位精度的 VIPA 和光栅,相机的采样时间和复杂的数据处理也限制了测量速度。频率参考基准法中飞秒光梳仅提供参考基准,测距性能由被参考的方法决定,而 MWI 中的多个连续波激光器或 FSI 中的大范围可调谐激光器都会增加测量成本和系统复杂度。除实验室条件下的基础研究外,目前已有基于模间拍频相位法的测距原理样机和利用双飞秒光梳异步光学采样测距的激光跟踪仪样机问世。随着测量原理和光源技术的发展,飞秒光梳测距方法必将进一步成熟并被逐步应用于实际测量。

### 参 考 文 献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, *et al.* Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] Fleming A J. A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 190: 106-126.
- [3] Quinn T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) [J]. Metrologia, 2003, 40(2): 103-133.
- [4] Jeschke S, Brecher C, Meisen T, *et al.* Industrial internet of things and cyber manufacturing systems [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 3-19.
- [5] 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.
- [6] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, *et al.* Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. Science, 2000, 288(5466): 635-639.
- [7] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T. Femtosecond optical frequency combs [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 172(1): 69-79.
- [8] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [9] Balling P, Křen P, Mašika P, *et al.* Femtosecond frequency comb based distance measurement in air [J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9300-9313.
- [10] 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.
- [11] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, *et al.* A new method of measuring absolute distance by using optical frequency comb [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 100601.  
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 一种光学频率梳绝对测距的新方法 [J]. 物理学报, 2014, 63(10): 100601.
- [12] 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.
- [13] Liu Y, Yang L H, Guo Y, *et al.* Optimization methods of pulse-to-pulse alignment using femtosecond pulse laser based on temporal coherence function for practical distance measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 35-43.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.  
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.
- [17] 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.
- [18] Liao L, Yi W M, Yang Z H, *et al.* Synthetic-wavelength based absolute distance measurement using heterodyne interferometry of a femtosecond laser [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14):

140601.  
廖磊, 易旺民, 杨再华, 等. 基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 140601.
- [19] 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(1): 4362.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Zhang H Y, Wei H Y, Yang H L, *et al.* Active laser ranging with frequency transfer using frequency comb[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(18): 181101.
- [26] Ji R W, Zhou W H, Li Y, *et al.* High absolute distance measurement system of laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10s): 148-155.  
纪荣祎, 周维虎, 黎尧, 等. 激光跟踪仪高精度绝对测距系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 148-155.
- [27] Yu J H, Shi H S, Song Y J, *et al.* Study on Kalman filtering in high-precision absolute distance measurement based on dual femtosecond lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610001.  
于佳禾, 师浩森, 宋有建, 等. 用于双飞秒激光高精度绝对测距的卡尔曼滤波算法研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610001.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Cui P F, Yang L H, Guo Y, *et al.* Absolute distance measurement using an optical comb and an optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(8): 744-747.
- [31] Huang M S. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 120007.  
黄民双. 单发脉冲飞行时间激光测距技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120007.
- [32] Zhuge J C, Xing S J, Gao J S. Theoretical analysis of arbitrary and absolute length measurement by using femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0112004.  
诸葛晶昌, 邢书剑, 高建树. 飞秒光频梳的任意长绝对测距理论分析[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0112004.
- [33] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M, *et al.* Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(11): 115302.
- [34] Minoshima K. High-precision absolute length metrology using fiber-based optical frequency combs [C]//International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, September 20-24, 2010, Sydney, Australia. New York: IEEE, 2010: 800-802.
- [35] Zhang X S, Yi W M, Hu M H, *et al.* Large-scale absolute distance measurement using inter-mode beat of a femtosecond laser [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(8): 080602.  
张晓声, 易旺民, 胡明皓, 等. 基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 080602.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, *et al.* Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 020601.  
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 020601.
- [40] 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.
- [41] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, *et al.* Time-frequency analysis in absolute distance measurement using chirped pulse interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904005.  
刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 等. 脉冲啾啾干涉绝对距离测量中的时频分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904005.
- [42] Kato T, Uchida M, Minoshima K. No-scanning 3D measurement method using ultrafast dimensional conversion with a chirped optical frequency comb[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3670.
- [43] Wang G C, Tan L L, Yan S H, *et al.* Synchronous phase demodulation for real-time absolute distance measurement based on optical comb multi-wavelength interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112003.  
王国超, 谭立龙, 颜树华, 等. 基于光梳多波长干涉实时绝对测距的同步相位解调[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112003.
- [44] 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.
- [45] Salvadé Y, Schuhler N, Lévêque S, *et al.* High-accuracy absolute distance measurement using frequency comb referenced multiwavelength source [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(14): 2715-2720.
- [46] Zhang J T, Wu X J, Li Y, *et al.* Method for improving the accuracy of step height measurement based on optical frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 100601.  
张继涛, 吴学健, 李岩, 等. 利用光频梳提高台阶高度测量准确度的方法[J]. *物理学报*, 2012, 61(10): 100601.
- [47] Jang Y S, Wang G C, Hyun S, *et al.* Comb-referenced laser distance interferometer for industrial nanotechnology [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31770.
- [48] Wu X J, Wei H Y, Zhang H Y, *et al.* Absolute distance measurement using frequency-sweeping heterodyne interferometer calibrated by an optical frequency comb[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): 2042-2048.
- [49] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, *et al.* Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2026-2028.
- [50] Baumann E, Giorgetta F R, Deschênes J D, *et al.* Comb-calibrated laser ranging for three-dimensional surface profiling with micrometer-level precision at a distance[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 24914-24928.
- [51] Zhang W P, Wei H Y, Yang H L, *et al.* Comb-referenced frequency-sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1247-1253.
- [52] Wang G C, Yan S H, Yang J, *et al.* Analysis of an innovative method for large-scale high-precision absolute distance measurement based on multi-heterodyne interference of dual optical frequency combs [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 070601.  
王国超, 颜树华, 杨俊, 等. 一种双光梳多外差大尺寸高精度绝对测距新方法的理论分析[J]. *物理学报*, 2013, 62(7): 070601.
- [53] Yang R T, Pollinger F, Meiners-Hagen K, *et al.* Heterodyne multi-wavelength absolute interferometry based on a cavity-enhanced electro-optic frequency comb pair[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5834-5837.
- [54] Yang R T, Pollinger F, Meiners-Hagen K, *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.
- [55] Wu H Z, Zhao T, Wang Z Y, *et al.* Long distance measurement up to 1.2 km by electro-optic dual-comb interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(25): 251901.
- [56] Meng X S, Zhang F M, Qu X H. High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave

- laser ranging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 230601.
- 孟祥松, 张福民, 曲兴华. 基于重采样技术的调频连续波激光绝对测距高精度及快速测量方法研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(23): 230601.
- [57] Xiao S J, Hollberg L, Newbury N R, *et al.* Toward a low-jitter 10 GHz pulsed source with an optical frequency comb generator [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8498-8508.
- [58] Metcalf A J, Torres-Company V, Leaird D E, *et al.* High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(6): 231-236.
- [59] Mildner J, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Dual-frequency comb generation with differing GHz repetition rates by parallel Fabry-Perot cavity filtering of a single broadband frequency comb source [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(7): 074011.