



动态啁啾脉冲干涉的快速绝对距离测量

徐昕阳 赵海涵 钱治文 刘超 翟京生 吴翰钟

Rapid absolute distance measurement by dynamic chirped pulse interferometry

Xu Xin-Yang Zhao Hai-Han Qian Zhi-Wen Liu Chao Zhai Jing-Sheng Wu Han-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 220601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202149

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202149>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于交替起振光电振荡器的大量程高精度绝对距离测量技术

Long-range, high-precision absolute distance measurement technology based on alternately oscillating optoelectronic oscillator

物理学报. 2019, 68(13): 130601 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190238>

光频梳频域干涉测距主要参数分析及一种改进的数据处理方法

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

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

基于飞秒光梳多路同步锁相的多波长干涉实时绝对测距及其非模糊度量程分析

Real-time absolute distance measurement by multi-wavelength interferometry synchronously multi-channel phase-locked to frequency comb and analysis for the potential non-ambiguity range

物理学报. 2021, 70(4): 040601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201225>

飞秒脉冲非对称互相关绝对测距

Absolute distance measurement based on asymmetric cross-correlation of femtosecond pulse

物理学报. 2018, 67(21): 210601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181274>

一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法

Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb

物理学报. 2020, 69(9): 090601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200081>

双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析

Numerical analyses of key parameters of nonlinear asynchronous optical sampling using dual-comb system

物理学报. 2021, 70(18): 180601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210565>

动态啁啾脉冲干涉的快速绝对距离测量*

徐昕阳¹⁾ 赵海涵¹⁾ 钱治文¹⁾ 刘超¹⁾ 翟京生^{1)†} 吴翰钟^{2)‡}

1) (天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

2) (华中科技大学物理学院, 精密重力测量国家重大科技基础设施, 基本物理量测量教育部重点实验室, 引力与量子物理湖北省重点实验室, 武汉 430074)

(2020年12月17日收到; 2021年6月29日收到修改稿)

提出了一种基于动态光学频率梳啁啾脉冲干涉的绝对距离快速测量方法. 借助于重复频率的线性扫描, 可获得啁啾光谱干涉信号中最宽条纹的动态频率偏移, 从而完成被测距离的高精度测量. 动态重复频率能够延伸光谱仪探测极限, 相应地减小测量盲区, 并且基于合成波长也使得测量非模糊范围得到极大的拓展. 本文测距系统无需重复频率的锁定, 能够摆脱对锁相环等复杂应用模式的依赖, 在简化系统的同时借助铷钟提供精准时钟参考, 从而进一步提高测量精度. 此外, 电荷耦合器件成像帧速以及重复频率扫描速度的提升可实现干涉信号的快速采集, 弥补传统光谱干涉测量以及腔调谐方式在探测速度上的不足. 实验结果表明, 本文方法单点测距数据更新率为 13.5 Hz, 相较于参考数值, 在 20 m 的测量范围内, 测量不确定度优于 27 μm , 相对精度为 1.35×10^{-6} .

关键词: 绝对距离测量, 动态光学频率梳, 啁啾脉冲干涉

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.25.Hz, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.70.20202149

1 引言

光学频率梳自诞生之初, 就在众多应用领域的发展中展现出划时代意义, 并体现重要的研究价值, 也因此受到国内外专家学者的广泛关注^[1-3]. 其中光频梳在频率计量^[4,5]、光谱分析^[6,7]、太空梳^[8,9]和绝对距离测量^[10,11]等领域中, 依据其自身特性, 打破了传统激光应用的技术壁垒, 为各领域的方法革新提供了特有的解决方案. 光学频率梳在时域上表现为锁模脉冲序列, 在频域中具有频率间隔严格相等的频率纵模, 并保持极强的相干性. 光学频率梳其内在从射频到光频的频率纵模可溯源至相同的时钟基准, 这也意味着光频梳自身的稳定

性和精度能够借助外部参考得以提升.

在光学频率梳众多应用领域中, 飞秒光学频率梳的绝对距离测量技术得到了迅猛发展, 并且借助于长度这个基本物理量所衍生出的相关计量技术也成为国内外课题组的热点研究方向. 目前基于光频梳的时频特性已提出多种较为成熟的绝对距离测量技术, 其中飞行时间测量基于脉冲互相关信号, 精确得出测量脉冲与参考脉冲的时间延迟, 将测量精度从 mm 级提升至 nm 级^[12]. 基于长延迟光纤的谐振腔扫描光学采样 (OSCAT) 技术在保证测距精度的同时, 可实现探测范围内的任意距离测量, 从而消除测量盲区^[13,14]. 此外, 光学频率梳的多波长相位探测相较于传统激光相位测量, 在保证亚波长精度的基础上极大地拓展了非模糊范围^[15],

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2016YFC1401203)、国家自然科学基金 (批准号: 61505140, 62075162) 和天津市自然科学基金 (批准号: 18JCYBJC17100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jingsheng@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: wuhanzhong@hust.edu.cn

另外基于光频梳模间拍频, 通过引入高次谐波可显著提高绝对距离测量精度^[16,17]. 对于依据光频及啁啾信息的色散干涉, 其在光纤色散测量和相干层析成像等领域的应用证明了该方法优秀的计量特性^[18–20]. 借助光学频率梳的频率溯源性, 色散干涉可提取解卷裹的光谱相位斜率^[21], 或探测啁啾脉冲的频率偏移完成绝对距离测量^[22]. 系统中无需运动机械结构即可获取包含距离信息的光谱干涉条纹, 这也使得色散干涉具备实现快速测量的理论可能. 基于异步光学采样的双光梳技术, 通过两台具有微小重频差异的光学频率梳, 获取双光梳干涉条纹以实现绝对距离测量. 双光梳测距系统在保证干涉测量精度的同时, 具备极高的数据更新率, 并且通过重复频率的调整也可得到极大的非模糊范围^[23–25].

应对激光雷达以及光学遥感等大尺寸应用的工程实践需要, 本文提出了基于动态啁啾脉冲干涉的绝对距离测量方法. 在重复频率动态扫描的过程中, 系统实时高速采集对应重频的啁啾脉冲干涉条纹, 从中依据中心频率的动态偏移量实现被测距离的解算. 基于动态重频的合成波长, 该方法极大地拓展了测量非模糊范围, 并且保证了方法的测距精度和测量速度. 此外, 本文方法在一定程度上放宽光谱仪分辨率的限制, 延伸啁啾脉冲干涉的可测范围, 依据动态频率梳参数, 当被测范围大于~250 m, 可实现任意绝对距离测量. 而且动态频率梳包含距离测量结果的动态信息, 其可消除无法直接分辨光谱仪处重合脉冲相对时延的局限性, 从而实现绝对距离的唯一确定. 测量结果以及长时间测距实验表明本文方法能够实现被测距离的高精度快速测量, 并且验证了方法的测量稳定性.

2 动态啁啾脉冲干涉绝对距离测量原理

基于动态啁啾脉冲干涉的实验原理如图 1 所示. 动态光学频率梳的实现基于环形腔长的线性扫描, 环形腔中的精密机械位移台通过高定位精度完成腔长的周期性调制. 此外, 整个光源系统处于隔温隔震的密闭环境, 保证了整体系统的稳定性. 测距干涉仪由图 1 中的分束镜 (BS) 分为两部分, 其中参考路路程固定并且通过一对光栅实现脉冲啁啾, 另外一路行进经过待测距离称为测量路. 两路

光束通过回射系统反射, 回光在分束镜处合束, 随后借助光谱探测系统进行高速采集.

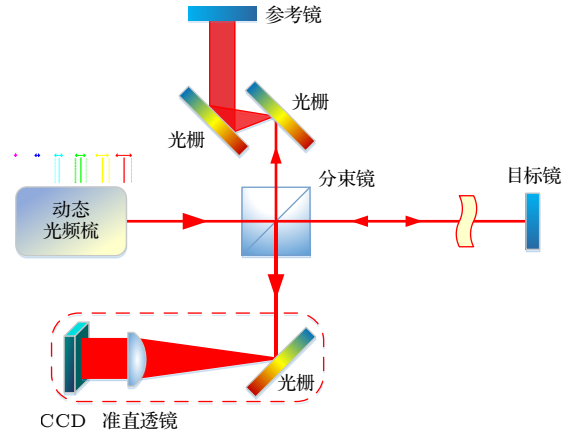


图 1 动态啁啾脉冲干涉实验原理图

Fig. 1. Schematic diagram of dynamic chirped pulse interferometry.

由于重复频率 (f_{rep}) 的快速扫描, 无论是传统的空间色散光谱仪还是傅里叶变换光谱仪均受限于其内部存在的机械组件, 因此无法在高分辨率模式下实现动态啁啾干涉信号的快速获取. 在本文方法中, 干涉信号通过光栅色散, 借助电荷耦合器件 (CCD) 实现高帧速采集, 弥补了传统光谱仪探测速度的不足^[26,27].

假设光频梳发出理想的高斯脉冲, 其光谱为理想高斯光谱, 则系统中引入啁啾的参考脉冲电场可表示为

$$E_{\text{ref}}(t) = \alpha E_0 \exp(-a_1 t^2) \exp[-i(\omega_c + bt)t], \quad (1)$$

相对应的测量脉冲可表示为

$$E_{\text{mea}}(t) = \beta E_0 \exp[-a_2(t - \tau)^2] \exp[-i\omega_c(t - \tau)], \quad (2)$$

其中 α 和 β 为功率因子, $a_1 = 2 \ln(2/t_c^2)$, t_c 为啁啾后的脉冲宽度, b 为啁啾系数, $b \approx \Delta\omega/(2t_c)$, $\Delta\omega$ 为脉冲的带宽, $a_2 = 2 \ln(2/t_0^2)$, t_0 为未产生啁啾的脉冲宽度, 上述各项分别为表征系统光栅、光源自身性能的参数. 此外, ω_c 为中心角频率, τ 为测量脉冲与参考脉冲间的飞行时间延迟, 其指代系统所包含的被测距离信息. 则脉冲光谱干涉结果可表述为

$$\begin{aligned} I(\omega) &= |\Im\{E_{\text{ref}}(t)\} + \Im\{E_{\text{mea}}(t)\}|^2 \\ &= I_0(\omega) + I_1(\omega)\cos(\varphi(\omega)). \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \Im 代表傅里叶变换; I_0 为两脉冲光谱的叠加,

可看作直流项; 而另一项为交流项, 其中 I_1 为调制幅值. 则啁啾脉冲的光谱干涉信号相位 $\phi(\omega)$ 可表示为

$$\phi(\omega) = \frac{b(\omega - \omega_c)^2}{4(a_1^2 + b^2)} - \tau\omega - \frac{1}{2} \arg(a_1 + ib). \quad (4)$$

(4) 式表明, 引入脉冲啁啾的相位函数与角频率为二次函数关系, 即光谱干涉条纹不再随着角频率的变化形成稳定振荡, 而是伴随着一个变化的调制频率. 当调制频率达到极小值时, 干涉条纹振荡最为缓慢且同时出现最宽振荡条纹. 则对 (4) 式求导可得

$$\frac{\partial \phi(\omega)}{\partial \omega} = \frac{b(\omega - \omega_c)}{2(a_1^2 + b^2)} - \tau = 0, \quad (5)$$

其中飞行时延 τ 为被测距离在光速定义下的时域映射, 本文中定义 c 为真空中光的传播速度, n_g 为脉冲在相应介质中的群折射率, l_d 为动态啁啾脉冲干涉条纹所对应的被测距离. 因此基于对应关系 $\tau = 2n_g l_d / c$, 调制频率极小处对应的频率可表示为

$$\begin{aligned} \omega_L &= \omega_c + 2b\tau + 2a_1^2\tau/b \\ &\approx \omega_c + 4bn_g l_d / c, \quad b \gg a_1. \end{aligned} \quad (6)$$

依据本文的实验条件, 认为 $b(10^{24})$ 远远大于 $a_1(10^{19})$. 基于啁啾脉冲干涉特性, l_d 可理解为距离测量的小数部分. 实际距离 L 为 l_d 与 N 倍脉冲间距 l_{pp} 的累加, 即 $L = (N \cdot l_{pp})/2 + l_d$, 其中 l_{pp} 可表示为 $c/(n_g \cdot f_{\text{rep}})$. 则实际被测距离 L 可表示为

$$L = \frac{N}{2} \cdot \frac{c}{n_g f_{\text{drep}}} + l_d, \quad (7)$$

其中, f_{drep} 为动态光频梳中某一时刻的重复频率. 当系统中引入动态光学频率梳时, 重复频率 f_{drep} 数值实现周期线性扫描. 由 (7) 式可知, 在被测距离 L 一定的前提下, 距离量 l_d 会随之产生动态变化, 并且光谱干涉条纹中最宽条纹的位置会发生往复偏移. 基于 (6) 式表征的啁啾频移关系, 距离量 l_d 可计算为

$$l_d = \frac{c}{4bn_g} (\omega_{\text{dyn}} - \omega_c) = \frac{c\omega_{\text{shift}}}{4n_g b}, \quad b \gg a_1, \quad (8)$$

其中, ω_{dyn} 为动态光频梳在某一重频时最宽条纹对应的频率, 并对应着一个频率偏移量 ω_{shift} . 因此, 通过最宽条纹位置的变化即可解算被测距离 L , 同时基于动态重复频率的合成波长能够拓展测量非模糊范围. 则最终实际被测距离 L 可表示为

$$L = \frac{N}{2} \cdot \frac{c}{n_g f_{\text{drep}}} + \frac{c\omega_{\text{shift}}}{4n_g b}, \quad b \gg a_1. \quad (9)$$

上述理论分析中, 假设光谱仪处测量臂脉冲相较于参考臂脉冲存在一定时延, 然而传统色散干涉对于时延的正负存在模糊性, 而动态啁啾脉冲干涉基于条纹动态信息则可去除该时延模糊, 从而确定计算被测距离 L 时整数倍 l_{pp} 和 l_d 的加减对应关系, 使得绝对距离测量具有唯一性.

3 实验及测量结果

本文依据所提出方法的测量原理搭建相应的实验系统, 并在参考路中引入脉冲啁啾. 为验证原理, 并能够对性能参数做出准确分析, 本文进行了大尺寸的绝对距离测量实验. 测量过程中, 环境参数保持相对稳定, 其中温度为 21.20 °C, 气压为 997.63 hpa, 相对湿度为 45.1%. 依据 Ciddor 公式^[28], 在此环境条件下的群折射率为 1.00026657.

本实验中, 飞秒脉冲激光器基于非线性偏振旋转锁模 (NPR), 重复频率 103.6 MHz, 动态重频可扫描范围 ± 300 kHz, 相应 l_{pp} 调谐范围为 2.8846—2.9014 m, 该范围内扫描周期为 1.16 s. 此外, 光源中心波长为 1030 nm, 光谱宽度约为 15 nm, 其光谱如图 2 所示.

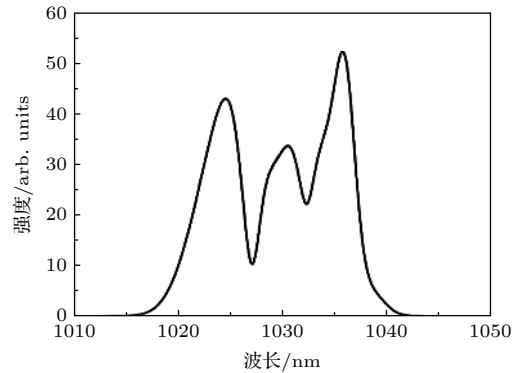


图 2 脉冲激光光谱图
Fig. 2. Pulse laser spectrogram.

3.1 动态啁啾脉冲测距系统标定

由于测量系统中, 频率偏移量、啁啾系数等参数难以做到准确获取, 并且实验条件的不确定性也将提高各项参数的获取难度. 在本文系统中, 基于动态重复频率就可使外部标定系统在无运动组件的情况下完成距离参数标定. 在标定系统中, 当 L 约为 $l_{pp}/2$ 扫描范围内时, 随着重复频率的线性

扫描, 最宽条纹位置会发生往复偏移. 基于重频扫描 CCD 标定原理, 搭建标定系统如图 3 所示.

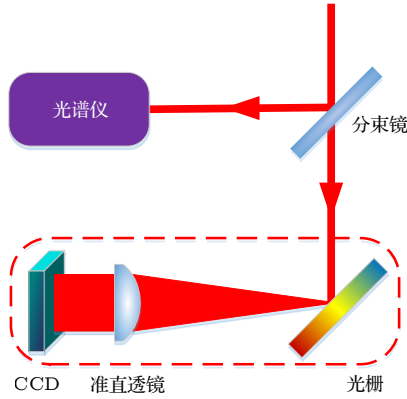


图 3 CCD 标定系统示意图

Fig. 3. Sketch of CCD calibration system.

其中商用光谱仪 (Thorlabs, OSA201C) 用来观察频率偏移量, 另一部分, 激光通过光栅色散, 经准直柱面镜 ($f = 200 \text{ mm}$) 完成线激光准直, 借助 CCD 相机 (PCO.pixelfly usb, 13.5 fps, $1392 \times 1040 \text{ pixels}$) 采集啁啾脉冲干涉条纹. 并且, 基于采集图像的灰度信息, 通过最宽条纹的插值拟合实现像素的光频校正, 从而获取重频变化对应的像素偏移量. 标定过程分别依次选取两个标定重频为 103.631 和 103.710 MHz 时的啁啾脉冲干涉条纹, 实验中使用光阑遮挡降低图像背景亮度, 从而提高

条纹对比度. 相机标定结果如图 4 所示.

实验中受到振动及环境噪声影响, 无法直接获取最宽条纹处对应频率. 因此依据干涉条纹特点, 可获取最宽条纹两侧两个波峰或波谷的像素索引 P_{left} 和 P_{right} , 从而确定两峰值处对应的中值位置, 完成最宽条纹处 P_{widest} 位置的精确测量. 该解算模式可表示为

$$P_{\text{widest}} = (P_{\text{left}} + P_{\text{right}})/2. \quad (10)$$

在此过程中, 可看作脉冲的空间位置实现了线性扫描, 则标定距离可计算为

$$L_{\text{cal}} = \frac{c}{n_g} \left(\frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{drep1}} \cdot f_{\text{drep2}}} \right), \quad (11)$$

其中 Δf_{rep} 为两个标定重频相应的重频差. 由于系统中啁啾量保持不变, 位移量与最宽条纹移动量保持线性关系, 因此对于单位像素的标定距离可以表示为

$$L_{\text{pPix}} = \frac{L_{\text{cal}}}{P_{\text{widest1}} - P_{\text{widest2}}}. \quad (12)$$

基于本系统标定结果, 像素条纹偏移量的标定距离可计算为 $6.9 \times 10^{-6} \text{ m/pixel}$. 则某一重频下绝对距离 L 的计算可重写为

$$L = \frac{1}{2} (N \cdot l_{\text{pp}} + P_{\text{shift}} \cdot L_{\text{pPix}}), \quad (13)$$

式中 P_{shift} 为该重复频率条件下, 对应实际被测距

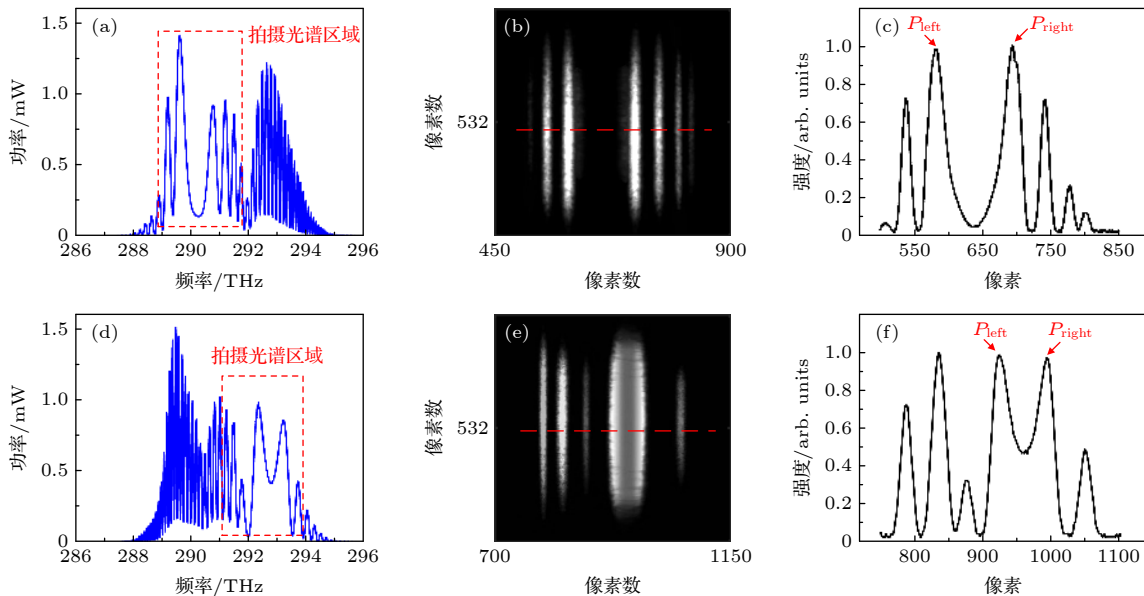


图 4 相机标定实验结果图 (a), (d) 两标定重复频率对应光谱图; (b), (e) 两标定重复频率对应相机采集图像; (c), (f) 图像灰度处理结果

Fig. 4. Experimental results of CCD calibration: (a), (d) Spectrograms for two calibrated repetition rates; (b), (e) captured camera images for two calibrated repetition rates; (c), (f) grayscale images processing results.

离 L 的最宽条纹像素偏移量. 上述标定方法简化了光谱干涉信号相机标定的方式, 在有效地提高标定速度的同时, 摆脱了传统方式中对位移台定位精度的依赖.

3.2 实验结果

如图 5 所示, 基于 Michelson 干涉仪结构, 本文将动态啁啾脉冲干涉应用于大尺寸绝对距离测量当中, 并以增量式干涉仪 (Agilent 5519B) 的测距结果作为参考数值, 其相应的稳定度在 20 m 处, 10 min 的测量时间内优于 $0.3 \mu\text{m}$. 实验中仔细调试了相机及光栅位置, 以确保获取图像的完整和清晰. 此外, 脉冲动态重频的精准获取, 以及对对应时刻相机信号的同步采集是决定探测精度的关键步骤. 因此在信号探测过程中, 铷钟 (Microsemi 8040) 被用作频率计数器 (Keysight 53230A) 的外部时钟参考, 并且借助信号源 (Tektronix AFG 3102C) 提供极为精准的同步触发信号, 为频率计数器门控和相机的同步采集提供统一的时间基准.

为了能够获取包含距离信息的光谱干涉信号,

实验中, 测量参考点以 l_{pp} 为间距均匀分布在光学长导轨上. 其中当动态重复频率为 103.374 MHz, 在 2.9 和 17.4 m 处的光谱干涉条纹如图 6 所示. 随着重复频率的动态扫描, 可直接获得最宽条纹的左右偏移, 从而完成正负时延的确定, 得到唯一确定的被测距离. 由图 6 可知, 长距离实验易受到环境振动及空气扰动等影响, 且光路的准直等高也会随着被测距离的增大而变化, 对干涉条纹的调制深度产生影响.

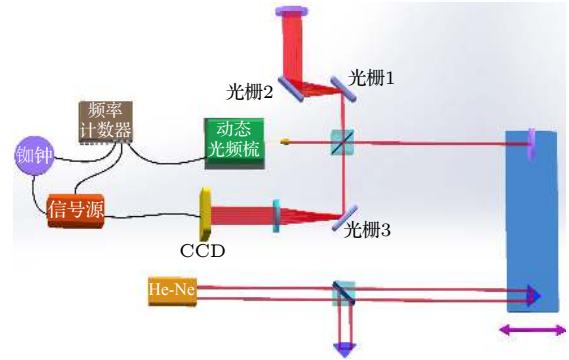


图 5 实验装置图

Fig. 5. Diagram of experimental setups.

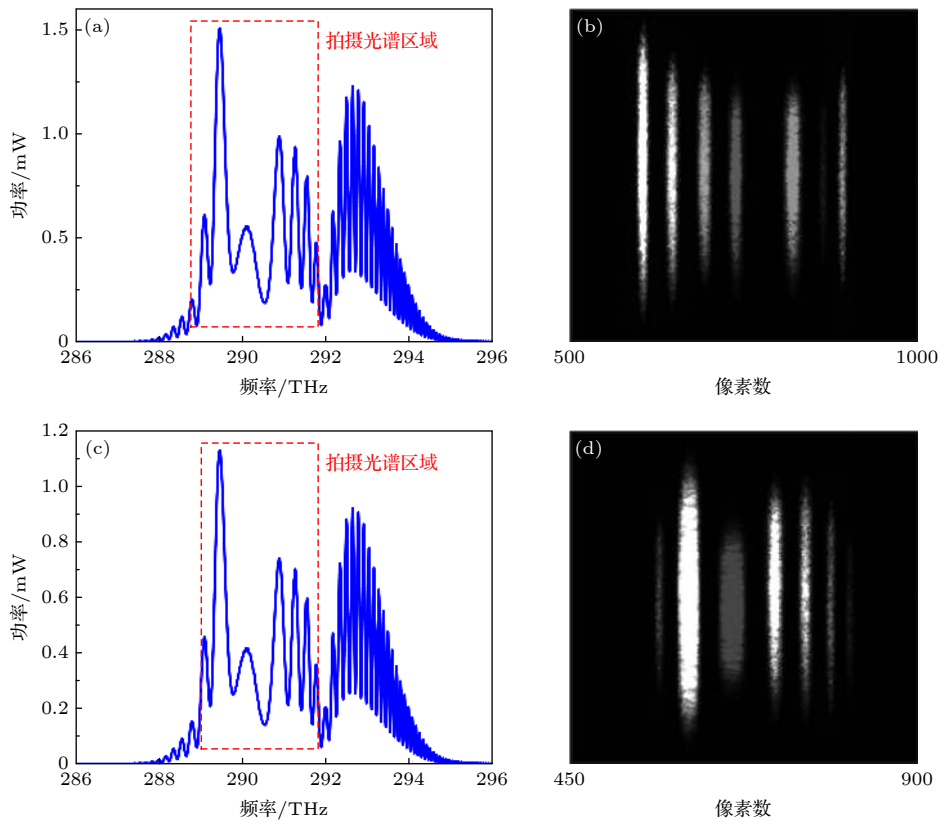


图 6 啁啾脉冲干涉实验结果图 (a) 2.9 m 处光谱图; (b) 2.9 m 处相机采集条纹; (c) 17.4 m 处光谱图; (d) 17.4 m 处相机采集条纹

Fig. 6. Experimental results of chirped pulse interferometry: (a) Spectrogram at 2.9 m; (b) captured camera fringes at 2.9 m; (c) spectrogram at 17.4 m; (d) captured camera fringes at 17.4 m.

在光路调试过程中, 测量光路与 He-Ne 激光干涉仪光路严格对准, 使之平行于光学导轨. 通过步进导轨不断地调试光路, 找出光路的最优状态, 从而抑制系统中阿贝误差和余弦误差对测量结果的影响. 在 20 m 的测量范围内, 每个测量位置完成 8 次重复性测量, 其中选取 2 个重复频率为一组, 共获取 4 组测量数据. 相较于参考干涉仪, 实验结果的残差和标准差如图 7 所示. 实验数据表明, 在 20 m 范围内测量不确定度优于 $27 \mu\text{m}$, 相对精度为 1.35×10^{-6} . 相较于双光梳或模间拍频等测距技术, 本文方法摆脱了系统对锁相环的依赖, 但频率稳定性及光谱分辨率则影响着最终的测距精度. 然而, 本文方法机理上与波长信息相连接, 保证了方法的测量精度, 并且借助最宽条纹的中值解算模式, 可有效地抑制环境噪声对测距结果的影响. 此外, 该方法基于动态啁啾信息可实现非模糊范围的快速拓展.

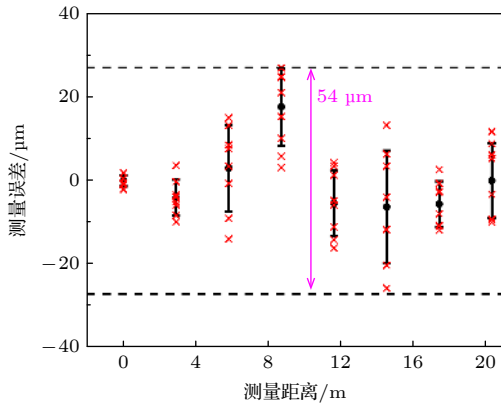


图 7 距离测量结果

Fig. 7. Results of distance measurements.

为验证本文方法长时间测量的稳定性, 实验在 17.4 m 处进行了长时间测量, 实验结果残差散点图及阿伦方差如图 8 所示. 为便于观察, 散点图为 1/10 的系统抽样结果, 数据标准差为 $8.4 \mu\text{m}$, 采集数据更新率为 13.5 Hz, 在 1 和 100 s 的平均时间内阿伦方差分别可达到 $2.3 \mu\text{m}$ 及 265 nm .

3.3 测量不确定度分析

为对本文方法测量不确定度做出评价, 研究系统各项参数对测距结果的精度影响, (13) 式可重写为

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n_g} \cdot \left(\frac{N}{f_{\text{drep}}} + \frac{\pi \cdot f_{\text{shift}}}{b} \right), \quad (14)$$

则测量结果的合成不确定度可表示为

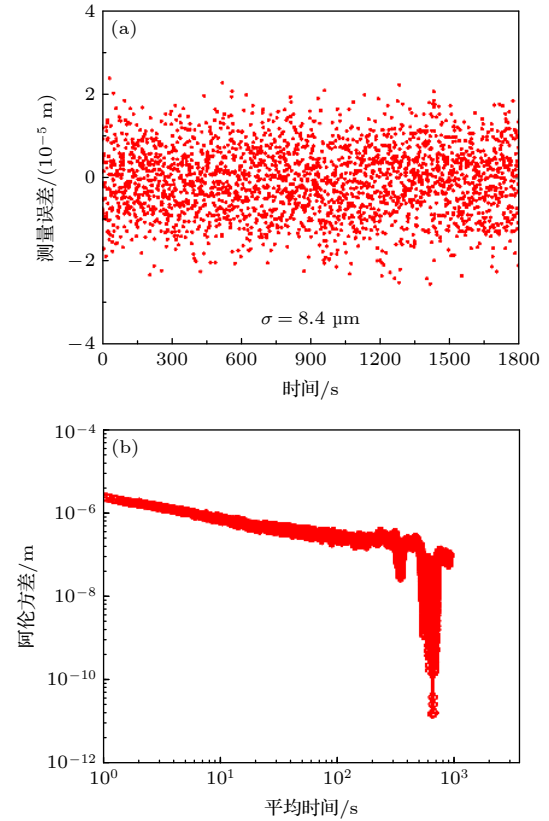


图 8 长时间距离测量实验结果 (a) 数据散点图; (b) 测距结果阿伦方差

Fig. 8. Long-term experimental results of the distance measurement: (a) Data scatter diagram; (b) Allan deviation of ranging results.

$$u_L^2 = \left(\frac{L}{n_g} \cdot u_{n_g} \right)^2 + \left(\frac{c \cdot N}{2n_g \cdot f_{\text{drep}}^2} \cdot u_{f_{\text{drep}}} \right)^2 + \left(\frac{c \cdot \pi}{2n_g \cdot b} \cdot u_{f_{\text{shift}}} \right)^2. \quad (15)$$

本文方法测量不确定度主要包含群折射率 n_g 、动态重复频率 f_{drep} 、频率偏移量 f_{shift} 等影响因素. 首先, 对于群折射率的确定需考虑传感器固有不确定度、环境稳定性以及在测量范围内的环境不均匀性. 基于上述分析, 实验中通过环境传感器进行环境监测和参数采集, 借助 Ciddor 公式对空气折射率进行实时补偿, 其中温度、大气压以及相对湿度等环境参数波动分别为 42.7 mK , 12.9 Pa , 和 3.1% , 对应的测量不确定度分别为 4×10^{-8} , 3.4×10^{-8} 和 2.9×10^{-8} , 则合成不确定度为 $6 \times 10^{-8} \cdot L$. 第二项中, 动态重复频率的采集依靠频率计数器, 并且与 CCD 的采集触发信号严格锁定至同一时间基准上, 其中动态重频不确定度为 5.38 Hz (标准差), 则第二项对应测量不确定度为 $9 \times 10^{-7} \text{ m}$. 第三项与

最宽条纹频率偏移量相关, 在本文系统中也可对应为像素偏移量的测量不确定度. 通常在实验中, 像素分辨率、像素尺寸、干涉条纹调制深度以及最宽条纹定位精度均会对测量不确定度造成一定的贡献. 基于相机标定结果, 光频与像素存在空间映射关系, 依据重复性测量可得频率偏移量不确定度为 0.063 THz, 则该项测量不确定度为 26.9 μm . 基于上述分析, 本文方法合成测量不确定度为 $[(27 \mu\text{m})^2 + (6 \times 10^{-8} \cdot L)^2]^{1/2}$. 此外, 在啁啾系数一定的情况下, 系统光路经过调试和优化始终保持出色的调制深度, 并且所采用的最宽条纹定位提取算法也能实现频率偏移量的准确测量.

4 结 论

本文提出一种快速绝对距离测量方法, 基于重复频率的线性扫描, 实现动态啁啾脉冲干涉. 本文方法突破了光学频率梳重复频率锁定的传统应用模式, 借助于重频的动态变化极大地延伸了测量非模糊范围, 并且能有效拓展光谱仪探测分辨极限. 在简化系统的同时, 光谱干涉信号也能够实现快速采集, 满足了几何量计量的工程实践需求. 基于实验结果, 数据更新率为 13.5 Hz 的长时间测量验证了本文方法的测量稳定性, 并且在 20 m 范围内, 测量不确定度优于 27 μm , 相对精度为 1.35×10^{-6} . 本文系统在参考臂引入脉冲啁啾, 而在今后的研究中也可通过大气或水体色散在测量臂实现脉冲啁啾, 从而将影响因素转变为测量信息, 以提高方法对实际环境的适用性. 并且, 本文工作可为大尺寸绝对距离测量、面型三维重构、以及水体等强色散介质中的目标探测提供相应的技术储备.

参考文献

[1] Newbury N R 2011 *Nat. Photonics* **5** 186

- [2] Diddams S A, Vahala K, Udem T 2020 *Science* **369** 3676
- [3] Fortier T, Baumann E 2019 *Commun. Phys.* **2** 153
- [4] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [5] Lamb E S, Carlson D R, Hickstein D D, Stone J R, Diddams S A, Papp S B 2018 *Phys. Rev. A* **9** 024030
- [6] Coddington I, Newbury N, Swann W 2016 *Optica* **3** 414
- [7] Picqué N, Hänsch T W 2019 *Nat. Photonics* **13** 146
- [8] McCracken R A, Charsley J M, Reid D T 2017 *Opt. Express* **25** 15058
- [9] Roztocki P, Morandotti R 2019 *Nat. Astron.* **3** 135
- [10] Zhou W H, Shi J K, Ji R Y, Li Y, Liu Y 2017 *J. Sci. Instrum.* **38** 1859 (in Chinese) [周维虎, 石俊凯, 纪荣祚, 黎尧, 刘娅 2017 仪器仪表学报 **38** 1859]
- [11] Jang Y S, Kim S W 2018 *Nanomanuf. Metrol.* **1** 131
- [12] Lee J, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photonics* **4** 716
- [13] Wu H Z, Zhang F M, Liu T Y, Balling P, Li J S, Qu X H 2016 *Opt. Lett.* **41** 2366
- [14] Peng B, Qu X H, Zhang F M, Zhang T Y, Zhang T L, Liu X X, Xie Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 210601 (in Chinese) [彭博, 曲兴华, 张福民, 张天宇, 张铁犁, 刘晓旭, 谢阳 2018 物理学报 **67** 210601]
- [15] Wang G, Jang Y S, Hyun S, Chun B J, Kang H J, Yan S, Kim S W, Kim Y J 2015 *Opt. Express* **23** 9121
- [16] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Opt.* **39** 5512
- [17] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 115302
- [18] Gil-Molina A, Castañeda J A, Londono-Giraldo D F, Gabrielli L H, Cárdenas A M, Fragnito H L 2020 *Opt. Express* **28** 4258
- [19] Uribe-Patarroyo N, Kassani S H, Villiger M, Bouma B E 2018 *Opt. Express* **26** 9081
- [20] Atalar O, Millar D S, Wang P, Koike-Akino T, Kojima K, Orlik P V, Parsons K 2020 *Opt. Express* **28** 37798
- [21] Joo K N, Kim S W 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [22] Wu H Z, Zhang F M, Liu T Y, Meng F, Li J S, Qu X H 2015 *Opt. Express* **23** 31582
- [23] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [24] Liu T A, Newbury N R, Coddington I 2011 *Opt. Express* **19** 18501
- [25] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, Picqué N, Hänsch T W 2014 *Nat. Commun.* **5** 3375
- [26] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, Li J S, Shi Y Q, Qu X H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 020601 (in Chinese) [刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 李建双, 石永强, 曲兴华 2016 物理学报 **65** 020601]
- [27] Wu H Z, Zhang F M, Liu T Y, Li J S, Qu X H 2016 *Opt. Express* **24** 24361
- [28] Ciddor P E 1996 *Appl. Opt.* **35** 1566

Rapid absolute distance measurement by dynamic chirped pulse interferometry*

Xu Xin-Yang¹⁾ Zhao Hai-Han¹⁾ Qian Zhi-Wen¹⁾ Liu Chao¹⁾
 Zhai Jing-Sheng^{1)†} Wu Han-Zhong^{2)‡}

1) (*School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Hubei Key Laboratory of Gravitation and Quantum Physics, Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurements, Ministry of Education, PGMF and School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 17 December 2020; revised manuscript received 29 June 2021)

Abstract

Frequency combs have given rise to revolutionary progress in a variety of applications. The absolute distance measurement by using frequency comb has been developing rapidly in recent years. In this paper, a method of rapid ranging via the dynamic chirped pulse interferometry is proposed. With the sweeping of comb spacing, the dynamic frequency offset of the sparsest stripes can be obtained in the chirped pulse interferometry, which leads to the cues about the measuring distance. The introduction of dynamic comb spacing can effectively reduce the dead zone of the optical spectrum analyzer. Based on the theory of synthetic wavelength, the multiple repetition frequency can also realize a great non-ambiguity range. In the measuring system, there is no need to lock the repetition rate any more, thereby removing the dependency of bulky phase-locking circuits, and simplifying the system. Besides, the rubidium clock brings the accurate clock reference in the system. Hence, the repetition rate and camera can perform strict synchronization. Considering the improvements of imaging frame rate and the scanning speed of repetition rates, the changed spectral interferograms can be obtained rapidly, and thus compensating for the speed deficiency of dispersive interferometry and cavity tuning. The experimental results show that elapsed time is 74.1 ms for the single time, corresponding to a data updating rate of 13.5 Hz. In a range of 20 m, the measurement uncertainty is well within 27 μm , i.e. the relative precision of 1.35×10^{-6} .

Keywords: absolute distance measurement, dynamic optical frequency comb, chirped pulse interferometry

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.25.Hz, 42.62.Eh

DOI: [10.7498/aps.70.20202149](https://doi.org/10.7498/aps.70.20202149)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2016YFC1401203), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61505140, 62075162), and the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 18JCYBJC17100).

† Corresponding author. E-mail: jingsheng@tju.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wuhanzhong@hust.edu.cn