

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法

胡申博, 刘俊辰, 余苏, 杨承昱, 曲兴华, 张福民

#### 引用本文:

胡申博, 刘俊辰, 余苏, 等. 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230285.

Hu S B, Liu J C, Yu S, et al. Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230285.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.230285>

收稿日期: 2023-11-22; 修改日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-01-10

## 相关论文

### 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述

李超林, 刘俊辰, 张福民, 曲兴华

光电工程 2022, 49(7): 210438 doi: 10.12086/oe.2022.210438

### 单光子激光雷达技术发展现状与趋势

赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 姜成昊, 蒋衍, 赵政伟, 朱精果

光电工程 2024, 51(3): 240037 doi: 10.12086/oe.2024.240037

### 基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法

郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 赵延鹏, 王元庆, 王蓓

光电工程 2024, 51(3): 240003 doi: 10.12086/oe.2024.240003

### 高精度相位式激光雷达测距系统的设计

李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 张传辉, 李伟, 牟媛慧, 蔡恩林

光电工程 2024, 51(3): 230246 doi: 10.12086/oe.2024.230246

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.230285

## 调频连续波激光多路并行 相干精密长度测量方法

胡申博<sup>1,2</sup>, 刘俊辰<sup>1,2</sup>, 余苏<sup>3</sup>, 杨承昱<sup>1,2</sup>,  
曲兴华<sup>1,2</sup>, 张福民<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300000;

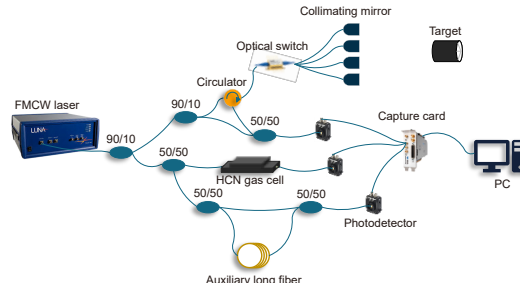
<sup>3</sup>二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 面向航空航天等大型复杂机电系统, 长度测量的需求从单独的一维位移测量发展到多目标、灵活便于拓展的多路并行测量。调频连续波激光雷达长度测量技术具备抗干扰、精度高、无合作等优势。本文基于调频连续波激光雷达技术开展多路并行相干精密长度测量方法研究, 针对传统长度测量系统存在光纤色散、辅助路光纤漂移导致长度测量精度降低问题, 提出一种含有氰化氢气体吸收池的三光路马赫-曾德尔干涉测量系统, 在此基础上, 基于光开关结构实现精密长度多路并行测量。通过精密导轨长度测量实验结果表明, 提出的方法在 3.6 m 长度范围内标准差不超过 25  $\mu\text{m}$ , 实现了四路并行长度测量。与商用激光干涉仪测量结果比较, 多路测量结果的绝对误差不超过 30  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 调频连续波; HCN 气体吸收池; 光开关; 长度测量

**中图分类号:** TN958.98

**文献标志码:** A



胡申博, 刘俊辰, 余苏, 等. 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230285

Hu S B, Liu J C, Yu S, et al. Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230285

## Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave LiDAR

Hu Shenbo<sup>1,2</sup>, Liu Junchen<sup>1,2</sup>, Yu Su<sup>3</sup>, Yang Chengyu<sup>1,2</sup>, Qu Xinghua<sup>1,2</sup>, Zhang Fumin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300000, China;

<sup>3</sup>Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd, Deyang, Sichuan 618000, China

**Abstract:** For large complex electromechanical systems such as aeronautics and astronautics, the demand for length measurement has also evolved from one-dimensional displacement measurement to multi-objective, flexible and extensible multiline parallel measurement. The frequency-modulated continuous-wave lidar length measurement technology has the advantages of anti-interference, high precision and no cooperation. In this paper, a multiline parallel coherent precision length measurement method based on frequency modulation continuous

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52035013)

\*通信作者: 张福民, zhangfumin@tju.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

wave laser lidar is studied. To solve the problem of fiber dispersion and auxiliary fiber drift in the traditional length measurement system, a three-channel Mach-Zehnder interferometry system containing a hydrogen cyanide gas absorption cell is proposed. On this basis, the precision length multiline parallel measurement is realized based on the optical switch structure. The experimental results of precision guide rail length measurement show that the proposed method is less than 25  $\mu\text{m}$  in the length range of 3.6 m. The four-way parallel length measurement is realized. The absolute error of the multi-channel measurement results is not more than 30  $\mu\text{m}$  compared with the measurement results of a commercial laser interferometer.

**Keywords:** frequency modulated continuous wave; HCN gas cell; optical switch; length measurement

## 1 引言

随着工业文明的不断发展, 工业技术和工业制造作为科学技术发展的重要支撑作用更加明显, 现如今, 随着深海航母、航空航天、自动驾驶等前沿技术领域的不断深入发展, 对大尺寸空间测量、零部件加工、系统控制等方面的要求更加严格<sup>[1]</sup>。在大型部件的加工、装配和校正过程中, 大范围、高精度、非接触的几何量测量系统具有至关重要的作用<sup>[2]</sup>。

调频连续波 (Frequency modulated continuous wave, FMCW) 激光雷达测量技术通过向待测目标发射调频连续波, 然后将待测目标返回的回波信号与原本的调频连续波信号进行干涉, 从而得到包含待测目标的距离和速度信息的拍频信号<sup>[3]</sup>。调频连续波激光雷达结合了传统雷达和激光干涉测量的优点, 凭借其非接触性、测量范围大、分辨率高和抗干扰能力强等特性, 在大尺寸空间精密测量、微小测量以及生物计量等领域发挥着至关重要的作用<sup>[4]</sup>。与脉冲激光测量法不同, 调频及该功能测量方法具有较大的时宽带宽积, 它的测量精度可以达到微米量级<sup>[5]</sup>, 因此 FMCW 雷达测距技术非常适合于实现多路并行相干精密测量系统。在实际应用中, 扫频激光存在一定的波动, 导致拍频信号的频谱展宽严重, 严重影响了测距结果的分辨率和准确度<sup>[6]</sup>。2008 年, 美国的 Moore 等人通过引入延时光纤来抑制调频非线性误差, 利用辅助路拍频信号对测量路拍频信号进行等光频间隔重采样<sup>[7]</sup>。2015 年, 蒙大拿大学的 Mateo 等人通过氰化氢 (HCN) 气体池对外腔式调谐激光器的调谐误差进行监测, 并通过同步反馈控制实现了调频非线性度不高于 1 ppm<sup>[8]</sup>。2022 年, 哈尔滨工业大学的刘国栋团队提出了一种基于非线性核函数的动态距离提取方法, 该方法无需使用长辅助干涉仪即可提高测量精度<sup>[9]</sup>。传统的基于 FMCW 的测距方法如等光频间隔重采样法等, 根据

测量原理需要提前对延时光纤长度进行标定。同时在测量中, 延时光纤光程在温度、应力和色散作用下会产生变化, 给系统测量不确定度造成较大影响。针对这一问题需经常标定延时光纤, 并采用色散补偿、温度补偿和振动补偿等手段来保持延时光纤的稳定。同时, 不同的待测距离也对延时光纤的长度有着不同的要求, 需要根据不同测量要求进行替换。同时应对现代工业精密测量需求, 实现同步多路长度信息测量, 2007 年, 德国的 Schmalzried 等人首次将白光干涉技术实现三路测量校准工业机床<sup>[10]</sup>。2013 年, 英国国家物理实验室的 Hughe 等人设计了基于光频扫描干涉测距的多路测量系统<sup>[11]</sup>, 实现了至少四路的多路测量, 在 10 m×15 m×12.5 m 的空间内不确定度不高于 40  $\mu\text{m}$ , 然而该方法仍易受到振动、色散等测量环境因素干扰, 且结构复杂。

针对上述问题, 结合现代工业对精密测量提出的要求, 本文以 HCN 气体吸收池作为辅助路提供采样校准点位, 并采用光开关结构进一步对测量系统进行改进, 提出一种 FMCW 并行相干精密长度测量方法及系统, 并开展从单路到多路的长度测量实验, 分析该方法及系统的测量精度。

## 2 多路并行相干长度测量原理

### 2.1 调频连续波测距原理

调频连续波激光雷达测距的基本原理是飞行时间法, 利用激光干涉产生的拍频信号与待测距离之间的关系求解出待测目标的距离信息, 其基本光路为迈克尔逊干涉光路。如图 1 所示, FMCW 扫频激光器发射的激光经分束器分为两路, 一路作为测量光, 一路作为参考光, 测量光经环形器的 1 号端口后, 从环形器 2 号端口进入准直镜入射到被测目标, 被测目标的回光返回到准直镜内, 从环形器 3 号端口进入耦合器,

与参考光发生干涉, 产生包含测量信息的拍频信息。最终利用光电探测器探测拍频信号并采集, 在上位机进行处理。测量光与参考光在测距系统中的光程不同, 将回光(回波信号)和参考光(本振信号)之间的光程差产生的时间延迟记为 $\tau$ 。当待测目标静止并且激光调制保持线性时, 回波信号和本振信号之间存在固定的频率差值, 记为 $\alpha\tau$ ,  $\alpha$ 为扫频激光器的调谐速率。通过解算拍频信号的频率进而求解出待测距离。

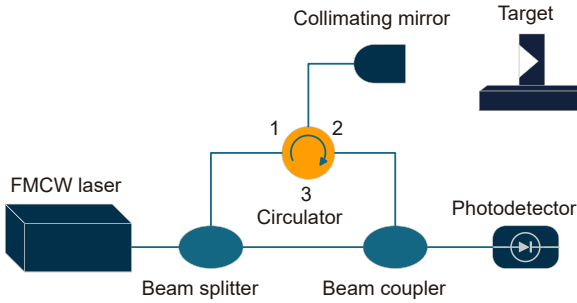


图 1 FMCW 激光测距基本光路图  
Fig. 1 The basic optical diagram of FMCW laser ranging

将扫频激光器初始频率记做 $f_0$ , 扫频激光器采用三角波调制来进行后续的距离解算, 周期记做 $T_m$ , 调制带宽记做 $B$ 。本振信号对应瞬时电场 $E(t)$ 为

$$E(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_i t + \varphi_0), \quad (1)$$

式中:  $A(t)$ 为 FMCW 激光器本振信号的振幅,  $\varphi_0$ 为初始相位,  $f_i$ 为本振信号的瞬时频率。拍频信号的振幅一般不会影响后续的距离解算, 将 $A(t)$ 记为 $A$ , 则式(1)可表示为

$$E(t) = A \cdot \exp(j\varphi(t)), \quad (2)$$

式中,  $\varphi(t)$ 为测量路本振信号的相位, 可以表示为

$$\varphi(t) = \int_0^t 2\pi f_i dt + \varphi_0, \quad (3)$$

式中:  $f_i = f_0 + \alpha t$ ,  $\alpha$ 为激光调谐斜率, 所以式(3)可表示为

$$\varphi(t) = 2\pi \cdot \left( f_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \right) + \varphi_0. \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可得本振信号对应的瞬时电场 $E_r(t)$ 为

$$E_r(t) = A_r \exp[j(2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2) + \varphi_0], \quad (5)$$

式中,  $A_r$ 为本振信号的振幅。同理, 回波信号对应的瞬时电场 $E_b(t)$ 如式(6):

$$E_b(t) = A_b \exp[j(2\pi f_0(t - \tau) + \pi \alpha(t - \tau)^2) + \varphi_0], \quad (6)$$

式中,  $A_b$ 为回波信号的振幅。本振信号与回波信号在光电探测器表面发生干涉, 干涉产生的拍频信号的瞬

时电场 $E_m(t)$ 可以表达为

$$E_m(t) = E_r(t) + E_b(t). \quad (7)$$

信号的光强 $I_m$ 为测量光和参考光的瞬时电场复振幅和其共轭的乘积, 于是有

$$I_m = (E_r + E_b) \cdot (E_r^* + E_b^*). \quad (8)$$

将式(5)和式(6)代入可得

$$I_m = I_r + I_b + 2\sqrt{I_r \cdot I_b} \cos \left[ 2\pi \left( \alpha\tau t + f_0\tau + \frac{1}{2}\alpha\tau^2 \right) \right], \quad (9)$$

式中:  $I_r$ 为本振信号的光强,  $I_b$ 为回波信号的光强。对于几十到上百米的待测目标, 时间延迟 $\tau$ 的量级一般为 $10^{-5}$ 以内, 式(9)中的余弦分量 $\alpha\tau^2/2$ 远小于其他两个分量, 因此可以忽略不计, 则拍频信号的瞬时电场强度滤除直流分量后可以表示为

$$I_m = I_0 \cos[2\pi(\alpha\tau \cdot t + f_0\tau)], \quad (10)$$

式中, 电场幅值 $I_0$ 可视为常数。光电探测器采集到的电压强度表现为标准的余弦信号, 在理想情况下, 余弦信号的频率为 $\alpha\tau$ , 因此通过快速傅里叶变换(FFT)求解拍频信号的频率 $f_m$ , 得到时间延迟 $\tau$ , 从而求解出待测距离 $d_m$ 为

$$d_m = \frac{c\tau}{2n_0} = \frac{cf_m}{2n_0\alpha}. \quad (11)$$

式中:  $c$ 为真空中的光速,  $n_0$ 为空气折射率。

## 2.2 基于 HCN 的调频连续波测距原理

已有 FMCW 测距系统实用化仍有困难。针对锁相环这类控制激光器调频非线性的方法, 该方法存在结构复杂、重复性较低、易失锁等问题。对后期处理方法而言, 等光频间隔重采样的距离解算均取决于辅助延时光纤光程。延时光纤易受到环境影响, 光程很难被锁定而带来测量结果起伏。同时, 延时光纤长度针对不同待测距离亦有不同要求, 导致测量系统的延时光纤需经常更换。针对上述系列问题提出一种基于 HCN 气体吸收池的测距方案, 相比等光频间隔重采样法避免了需要对延时光纤进行重复标定和更换等问题。HCN 气体池对特定波长进行吸收, HCN 气体池吸收峰谱线如图 2 所示, 吸收峰对应激光波长可溯源到美国标准技术研究院(NIST)校准, 其重复性和稳定性精度高, 通过查表可得。

基于 HCN 的调频连续波测距系统如图 3 所示。调频连续波激光经过分束器 1 后分别进入测量路和 HCN 气体池。测量光通过分束器 2 将光路分为两个部分, 一路作为本振信号, 另一路通过角锥棱镜反射回来形成回波信号, 回波信号与本振信号在耦合器 1

处发生干涉并产生拍频信号, 经光电探测器 1 探测并采集。另一束激光则进入 HCN 气体池中, 并产生吸收谱线的峰值信号, 由光电探测器 2 采集激光信号并传输到采集卡。

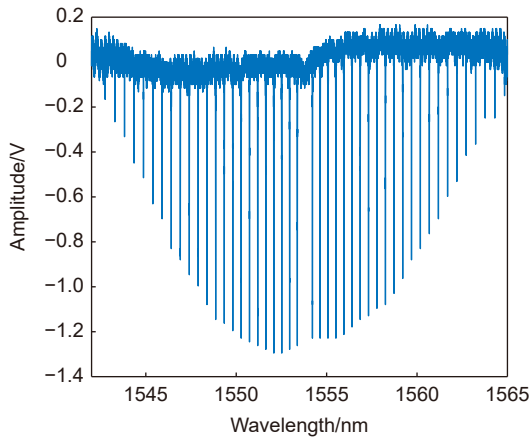


图 2 HCN 气体吸收池信号图  
Fig. 2 HCN gas cell signal diagram

由光电探测器 1 采集到的拍频信号的瞬时相位  $\varphi(t)$  其表达式为

$$\varphi(t) = 2\pi \left( \alpha\tau \cdot t + e_{\text{noi}}(t)\tau + f_0\tau + \frac{1}{2}\alpha\tau^2 \right), \quad (12)$$

式中,  $e_{\text{noi}}(t)$  为调频非线性误差因子, 将调频激光瞬时频率  $f_i$  作为自变量, 式 (12) 可表示为

$$\varphi(f_i) = 2\pi \tau f_i + \alpha\pi \tau^2, \quad (13)$$

式中,  $f_i = f_0 + \alpha t + e_{\text{noi}}(t)$ , 表示激光在  $t$  时刻的频率。显然, 由式 (13) 可知拍频信号相位  $\varphi(t)$  与激光瞬时频率  $f_i$  呈线性关系。由光电探测器 2 采集到的吸收峰信号可以得到峰值对应点的激光频率, 通过一次项拟合激光频率与拍频相位的直线, 得到线性关系的斜率  $k$ , 进而得到时间延迟  $\tau$ 。

最终 HCN 气体吸收池的线性拟合的方式如图 4 所示, 通过斜率  $k$ , 最终得到待测距离  $D$  为

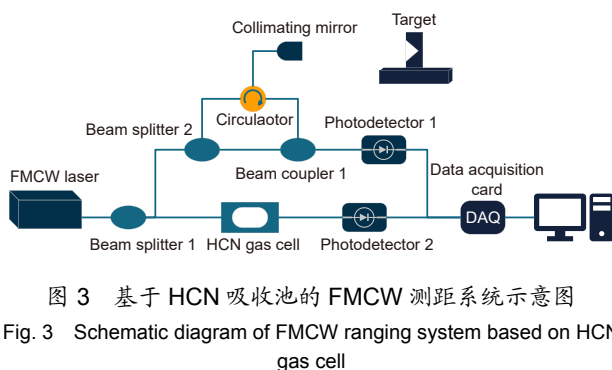


图 3 基于 HCN 吸收池的 FMCW 测距系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FMCW ranging system based on HCN gas cell

$$D = \frac{ck}{2\pi n_0}. \quad (14)$$

### 2.3 多路并行相干长度测量方法及系统

基于 HCN 气体池光频拟合的测距原理, 提出多路测距系统, 结构如图 5 所示。系统大致可以分为三个部分, 第一部分为 FMCW 测距光路, 第二部分为 HCN 标准气体池光路, 第三部分为额外增加了一路马赫曾德辅助干涉光路, 利用辅助长光纤的额外光程产生的拍频信号, 对测量光路的拍频信号进行等频域间隔重采样, 同样对 HCN 气体吸收池的吸收峰谱线信号进行重采样来保证光频拟合。多路测距系统中采用微电子机械 (MEMS) 光开关结构进行测量光路的通道不间断切换, 实现多长度测量目标的并行相干精密测量。

测量路拍频信号的光强  $I_m$  和辅助路拍频信号的光强  $I_a$  可以分别表示为

$$I_m = I_0 \cos \left[ 2\pi \left( \alpha\tau_m \cdot \phi_t + f_0\tau_m + \frac{1}{2}\alpha\tau_m^2 \right) \right], \quad (15)$$

$$I_a = I_0 \cos \left[ 2\pi \left( \alpha\tau_a \cdot \phi_t + f_0\tau_a + \frac{1}{2}\alpha\tau_a^2 \right) \right], \quad (16)$$

式中,  $\tau_m$  和  $\tau_a$  为测量路和辅助路的时间延迟。通过提取辅助路拍频信号的峰谷值点, 对测量路对应的拍频信号点进行重采样, 重采样后测量路光强的表达式为

$$I_m(\phi_t) = I_0 \cos \left[ 2\pi \left( \frac{\tau_m}{2\tau_a} \cdot \phi_t + f_0\tau_m + \frac{1}{2}\alpha\tau_m^2 \right) \right]. \quad (17)$$

由式 (17) 可知, 重采样后测量路的瞬时相位可以表示为

$$\varphi(t) = 2\pi \left( \frac{\tau_m}{2\tau_a} \cdot \phi_t + f_0\tau_m + \frac{1}{2}\alpha\tau_m^2 \right), \quad (18)$$

由式 (13) 可知, 测量路拍频信号相位  $\varphi(t)$  与激光瞬时频率  $f_i$  呈线性关系, 其中  $f_i = f_0 + \alpha\phi_t$ , 则式 (18) 可以表示为

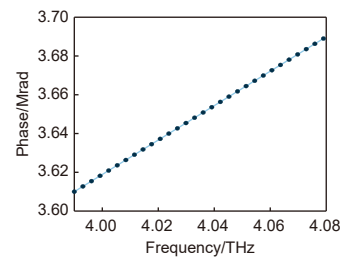


图 4 HCN 吸收峰值相位拟合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of HCN absorption peak phase fitting

$$\varphi(f_i) = \frac{\pi \tau_m}{\alpha \tau_a} f_i + \alpha \pi \tau_m^2. \quad (19)$$

经等光频间隔重采样后的测量路拍频信号, 相位  $\varphi(t)$  与激光瞬时频率  $f_i$  依旧呈线性关系。此时通过辅助干涉光路对 HCN 气体池吸收峰谱线进行重采样, 得到  $t/(2\alpha\tau_a)$  采样间隔的吸收峰谱线, 因此最终能够不计算  $\tau_a$  而得到待测距离。实验中采用的 MEMS 1×4 光开关能够实现四通道的不间断切换来满足多路测量需求。在得到一个被测目标的距离后, 通过上位机控制光开关切换通道, 继续进行扫频, 最后通过采集卡的数据采集以及上位机的数据处理获得其他被测目标的距离。传统多路测量系统为避免干涉相位混叠, 需要成倍增加光学组件和光电探测器件来进行多路拓展。上述方法有效降低了系统光路的复杂度, 仅需一组光路和光开关能够实现多个目标的测量。

### 3 多路并行相干长度测量实验

为验证调频连续波多路并行相干测距系统的可行性, 搭建了如图 5 所示的实验光路, 激光由扫频激光器出射进 90/10 分束器, 激光经过分束器后分别进入测量路、辅助路和 HCN 气体池。其中, 测量路通过分束器将光路分为两个部分, 一路作为本振信号, 另一路通过环形器进入光开关, 后通过准直镜头发射并通过对角锥棱镜反射回来形成回波信号。最终, 在耦合器处与本振信号发生干涉生成相干信号, 并通过光电探测器采集相干信号的电压幅值并利用示波器进行数据采集。激光经过 HCN 标准气体池后产生吸收谱线的峰值信号。在马赫曾德光路中, 激光经过延时光纤

后和参考光产生辅助干涉光路拍频信号, 分别通过光电探测器采集两路辅助路信号的电压幅值并通过示波器采集其交流分量。调频激光器的型号是 Luna 公司的 Phoenix 1400, 设置调频范围为 1542~1565 nm, 扫频速度设置为 100.04 nm/s。延时光纤为普通的单模光纤, HCN 气体池的型号是 Wavelength References 公司的 HCN-13-H(16.5)-25-FC/APC。

首先是基于 HCN 气体池的测距方法的精度验证。使用光开关的一路通道进行距离测量, 实验中将相反的方向两个角锥棱镜作为待测目标, 并固定在同一水平导轨上。其中一个角锥棱镜作为实验系统的待测目标, 另一个则为 XL-80 激光干涉仪的待测目标。将测得的角锥棱镜的相对移动距离作为分析测量系统的精度的基准。在 0.5 m 处移动五次水平导轨, 每次约 10 mm, 每个位置采集记录 10 组数据。实验中通过等频域重采样、HCN 拟合和 HCN 重采样分别对 10 组测量数据进行处理, 最后与激光干涉仪测量距离作对比, 测量结果如图 6 所示。在 0.5 m 处, HCN 拟合、HCN 重采样测量方法的标准差不高于 25  $\mu\text{m}$ , 等频域重采样方法由于延时光纤易受环境、色散等影响, 测量结果的标准差大于基于 HCN 气体池的测量方法。

同时 HCN 重采样方法的准确性如图 7 所示, 通过对比激光干涉仪的相对位移测量值来验证评估方法的准确性, 干涉仪的距离约为 0.5 m, 结果表明, 每组数据测量八次的情况下, 导轨连续六次 10 mm 的位移量, 待测目标的系统测量距离与激光干涉仪相比不超过 30  $\mu\text{m}$ 。

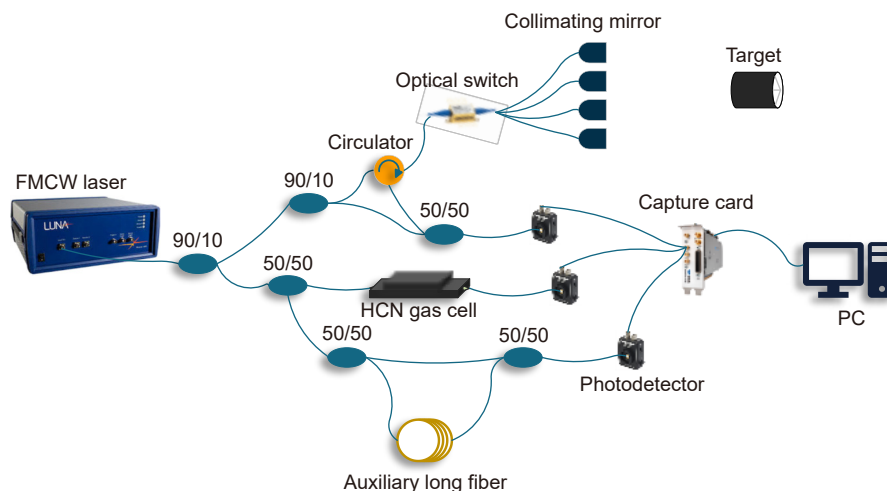


图 5 HCN 结合重采样的多路测距系统

Fig. 5 HCN combined with resampling multiline ranging system

为验证基于 HCN 气体池的测距方法对于环境噪声的稳定性, 针对高噪声环境进行了测量实验。实验选在室外进行, 并选择噪声较大的时间段, 如图 8(a) 所示, 测量路拍频信号 FFT 的频谱图中除了包含距离信息对应的拍频频率外, 还包含了一些光纤端面回光、系统非线性误差和环境噪声造成的较大边带谱峰。同时由于拍频频谱峰展宽严重, 无法通过带通滤波处理来选取包含距离信息的峰值, 因此在使用 HCN 气体池进行光频拟合对测量路进行希尔伯特变换求解相位信息时同样会受到影响。

通过提取辅助路拍频信号的峰谷值点, 对测量路对应的拍频信号进行等光频间隔重采样, 同时对主峰进行带通滤波, 如图 8(b) 所示, 经过频域间隔重采样后的频谱信号, 频谱峰值能量极大, 边带的幅值较低, 能够准确计算出拍频信号的相位, 提高测量的准确性。

最后使用系统在 3.6 m 附近进行测量, 基于

HCN 的两种处理方法和传统等频域重采样方法如图 9 所示。HCN 重采样方法在面对高噪声环境拥有较高的稳定性, 同时拥有着基于 HCN 拟合的调频连续波测距方法的高精度。

最后为验证调频连续波多路并行相干测距系统的可行性, 搭建了如图 5 所示的实验光路, 测量光从环形器 2 口进入一个四通道的光开关, 测量光经不同光通道分别进入不同的准直镜发射, 出射到被测目标后返回, 回波信号经环形器 3 口与本振信号在耦合器处发生干涉, 产生测量拍频信号。实验中在 6 m 范围内设置 4 个被测目标, 最终测量结果如图 10 所示, 四通道测量结果的测量标准差均不超过 25  $\mu\text{m}$ , 测量结果稳定性良好。

同时四路通道测量结果误差棒图如图 11 所示, 四路通道分别通过对比参考 XL-80 的相对位移测量值来验证评估方法的准确性, 导轨分别进行 50 mm 的

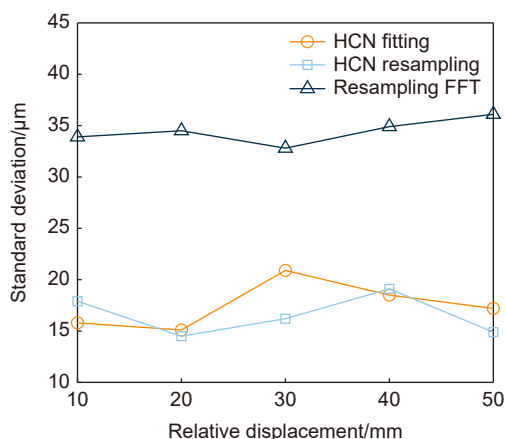


图 6 三种测量方法的误差对比

Fig. 6 Error comparison of three measurement methods

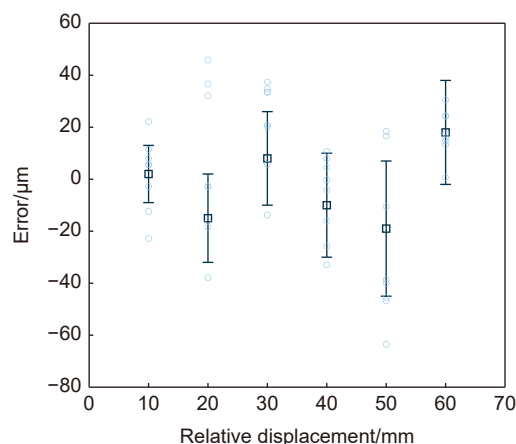


图 7 步进 10 mm 的差值误差棒

Fig. 7 Differential error bar with a step of 10 mm

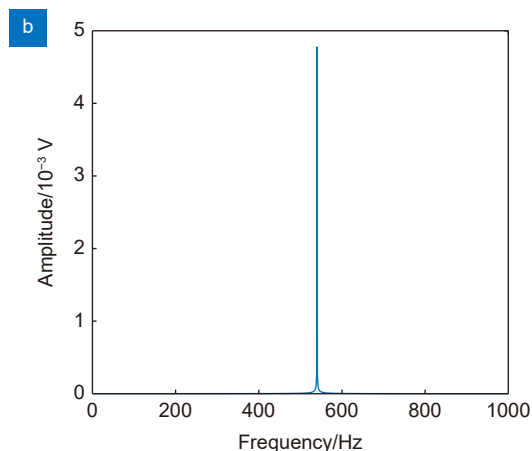
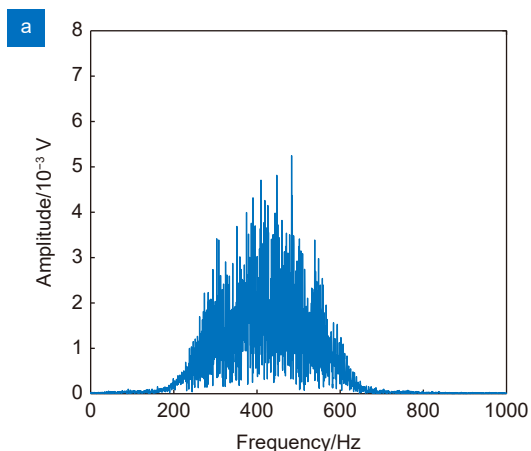


图 8 信号对比图。(a) 重采样和滤波前; (b) 重采样和滤波后

Fig. 8 Signal comparison diagram. (a) Before resampling and filtering; (b) After Resampling and filtering

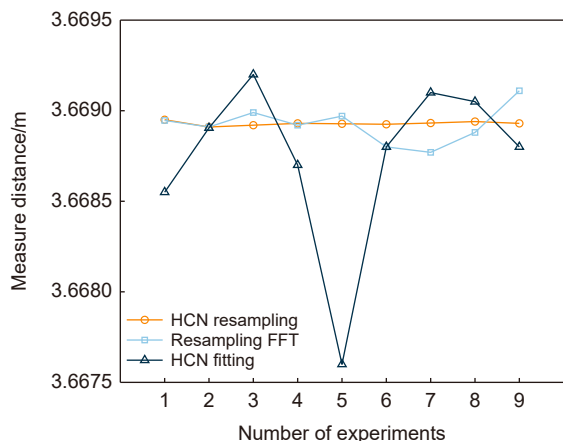


图 9 三种测量方法结果对比图

Fig. 9 Comparison chart of the results of three measurement methods

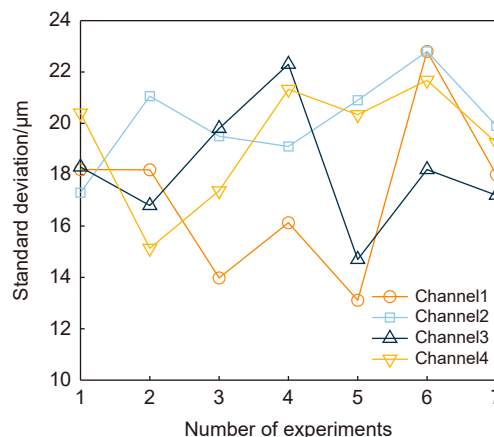


图 10 不同位置处四路测量标准差

Fig. 10 The standard deviation of four-way measurement at different positions

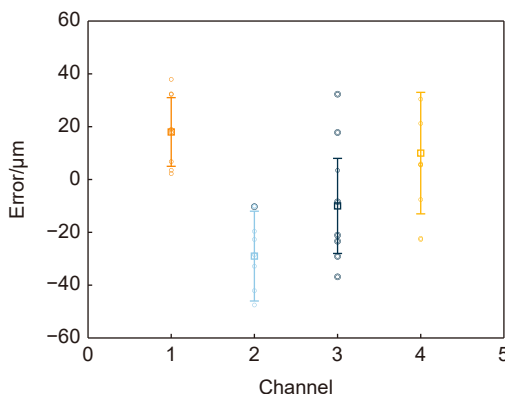


图 11 四通道测量差值误差棒

Fig. 11 Four-channel measurement differential error bar

位移量, 四路通道所测距离与 XL-80 激光干涉仪相比绝对误差均小于  $30\ \mu\text{m}$ 。

## 4 结论

等间隔重采样法是解决调频连续激光精密测量扫描非线性对测量结果干扰问题的主要方法, 基于辅助光纤光程漂移、光纤色散等降低长度测量精度的因素, 提出基于 HCN 气体吸收池的三光路 FMCW 测距方法, 此方法基于调频连续波光频拟合, 稳定性良好。考虑到测量信号相位解算基于拍频信号的信噪比, 进一步提出了 HCN 重采样测距方法, 在高噪声环境等信噪比较低的场合有着较高稳定性, 可实现无合作目标乃至超弱回光探测。同时, 为满足多路同步长度精密测量需求, 提出一种含有 MEMS 光开关结构的 FMCW 激光测量系统, 在多路并行导轨测量实验中表明, 采用该测距方法的测距系统在  $3.6\ \text{m}$  附近的测量标准差不超过  $25\ \mu\text{m}$ , 也解决了传统调频连续波混频测量无

法识别目标的问题, 在四路测距实验中,  $6\ \text{m}$  内四路标准差均不超过  $25\ \mu\text{m}$ , 与激光干涉仪相比绝对误差均小于  $30\ \mu\text{m}$ , 结果有效表明该测距方法可以应用在多目标测距中。

## 参考文献

- [1] Ye S H, Wang Z, Qu X H. Review and prospect of precision inspection[J]. *China Mech Eng*, 2000, 11(3): 262-263. 叶声华, 王仲, 曲兴华. 精密测试技术展望[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(3): 262-263.
- [2] Zhou J. Intelligent manufacturing - main direction of "Made in China 2025"[J]. *China Mech Eng*, 2015, 26(17): 2273-2284. 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] Ye S H, Zhu J G, Zhang Z L, et al. Status and development of large-scale coordinate measurement research[J]. *Acta Metrolog Sin*, 2008, 29(4A): 1-6. 叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. *计量学报*, 2008, 29(4A): 1-6.
- [4] Li C L, Liu J C, Zhang F M, et al. Review of nonlinearity correction of frequency modulated continuous wave LiDAR measurement technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(7):



210438.

李超林, 刘俊辰, 张福民, 等. 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述[J]. *光电工程*, 2022, **49**(7): 210438.

- [5] Yang Q, Chen X L, Zeng C, et al. Simulation and analysis of LiDAR based on DPMZM and microwave photonic frequency multiplication[J]. *Laser Technol*, 2023, **47**(6): 729–735.  
阳琴, 陈孝林, 曾诚, 等. 基于DPMZM的微波光子倍频激光雷达仿真分析[J]. *激光技术*, 2023, **47**(6): 729–735.
- [6] Yüksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(7): 5845–5851.
- [7] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(17): 13139–13149.
- [8] Mateo A B, Barber Z W. Precision and accuracy testing of

FMCW lidar-based length metrology[J]. *Appl Opt*, 2015, **54**(19): 6019–6024.

- [9] Yu Z H, Lu C, Liu G D. FMCW LiDAR with an FM nonlinear kernel function for dynamic-distance measurement[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(11): 19582–19596.
- [10] Schmalzried S, Schmitz H, Zimmermann M. A flexible and, robust 3D coordinate measurement system based on white light interferometry for calibration of industrial systems[C]//*Proceedings of the 11th International Symposium on Measurement and Quality Control*, 2013.
- [11] Hughes B, Campbell M A, Lewis A J, et al. Development of a high-accuracy multi-sensor, multi-target coordinate metrology system using frequency scanning interferometry and multilateration[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10332**: 1033202.

## 作者简介



胡申博(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为调频连续波精密测量。

E-mail: 1965943288@qq.com



【通信作者】张福民(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达大尺寸测量、光学频率梳测量方法的研究。

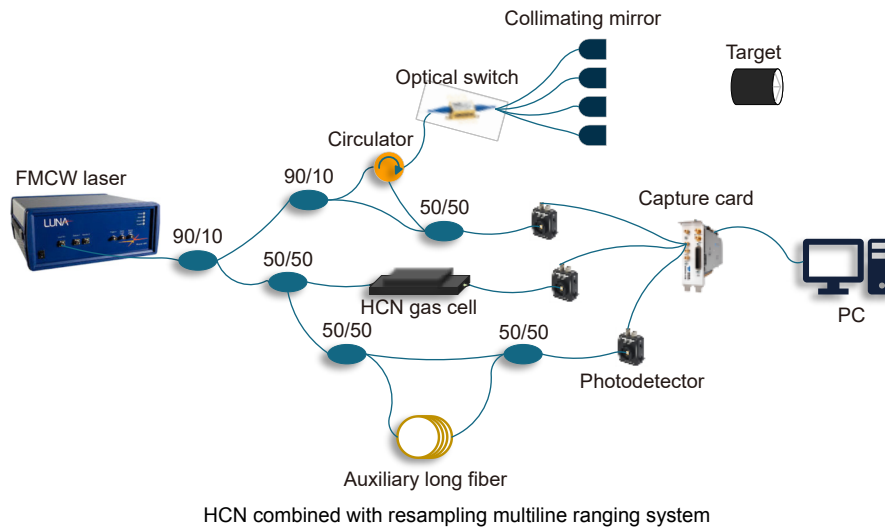
E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave LiDAR

Hu Shenbo<sup>1,2</sup>, Liu Junchen<sup>1,2</sup>, Yu Su<sup>3</sup>, Yang Chengyu<sup>1,2</sup>, Qu Xinghua<sup>1,2</sup>, Zhang Fumin<sup>1,2\*</sup>



**Overview:** For large complex electromechanical systems such as aeronautics and astronautics, the demand for length measurement has also evolved from one-dimensional displacement measurement to multi-objective, flexible and extensible multiline parallel measurement. The demand for large-size measurements in various industries, especially the manufacturing industry, is increasing day by day and tends to be diversified.

Frequency-modulated continuous-wave lidar measurement is an absolute ranging method that modulates the frequency of the laser, generates a beat frequency through the local oscillator signal of the frequency-modulated laser and the echo signal reflected from the target being measured, and extracts the interference beat frequency signal to obtain the measured distance. Frequency-modulated continuous-wave lidar combines the advantages of traditional radar and laser interferometry, with its non-contact, large measurement range, high resolution and strong anti-interference ability. It plays a vital role in the fields of large-scale space precision measurement, micro-measurement, and biometrics. Compared with the pulse ranging method, it has higher ranging accuracy; compared with the interferometric laser ranging, it can achieve absolute distance measurement, and the system measurement structure is simple. As a high-precision spatial large-scale absolute distance measurement method, frequency-modulated continuous-wave laser length measurement technology can meet the needs of a new generation of measurement scenarios and has many advantages such as anti-interference, high accuracy, and no cooperation. This paper researches multiline parallel coherent precision length measurement methods based on frequency-modulated continuous-wave lasers. Because of the problems of fiber dispersion and auxiliary fiber drift in the traditional length measurement system, which lead to reduced length measurement accuracy, a three-optical path containing a hydrogen cyanide gas absorption cell is proposed. The Mach-Zehnder interferometry system, on this basis, realizes precision length multiline parallel measurement based on the optical switch structure. The experimental results of precision guide rail length measurement show that the proposed method is less than 25  $\mu\text{m}$  in the length range of 3.6 m. The four-way parallel length measurement is realized. The absolute error of the multi-channel measurement results is not more than 30  $\mu\text{m}$  compared with the measurement results of a commercial laser interferometer.

Hu S B, Liu J C, Yu S, et al. Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230285; DOI: 10.12086/oe.2024.230285

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (52035013)

<sup>1</sup>School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; <sup>2</sup>National Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300000, China; <sup>3</sup>Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd, Deyang, Sichuan 618000, China

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