

激光与光电子学进展

调频连续波激光雷达光源非线性校正技术(特邀)

谈宜东^{*†}, 林晨啸[†]

清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 调频连续波(FMCW)激光雷达具有非接触式测量、抗环境光干扰、高分辨率、能够同时获取速度和距离信息等优势,近年来被广泛应用于航空航天、精密制造、无人驾驶等领域。FMCW 激光雷达的测距能力很大程度依赖于其光源的扫频线性度。在实际应用中,扫频光源会受到诸如应力拉伸不均匀、腔内温度变化、电路噪声等因素的影响,导致扫频非线性的产生,使得测距分辨率和精度下降。针对这一问题,本文从原理出发,分析了FMCW 激光雷达中光源扫频非线性的影响,系统介绍了不同类型扫频非线性校正技术的原理和国内外研究进展,并对这些方法的适用场景、特性和优缺点进行总结,为后续相关研究提供启发。

关键词 调频连续波; 激光雷达; 绝对测距; 扫频光源; 非线性校正

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232667

Nonlinearity Correction Technology for Light Source of Frequency-Modulated Continuous-Wave Light Detection and Ranging (Invited)

Tan Yidong^{*†}, Lin Chenxiao[†]

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Frequency-modulated continuous-wave (FMCW) light detection and ranging (LiDAR) has the advantages of noncontact measurements, resistance to ambient light interference, high resolution, and the ability to simultaneously determine speed and distance information. In recent years, it has been widely used in various fields, including aerospace, precision manufacturing, and autonomous driving. The ranging performance of FMCW LiDAR significantly depends on the sweep linearity of its light source, which is typically influenced by several factors, such as uneven stress stretching, temperature variations, and circuit noise. These factors decrease the ranging resolution and accuracy. The influence of light source nonlinearity in FMCW LiDAR is analyzed theoretically, and research progress in different types of nonlinearity correction techniques is presented. The characteristics, advantages, and disadvantages of each method are summarized to provide a reference for future research.

Key words frequency-modulated continuous-wave; light detection and ranging; absolute distance measurement; swept light source; nonlinearity correction

1 引言

近年来,随着科技水平的不断提高以及工业制造业的蓬勃发展,人们对绝对距离测量的精度、准确度提出了更高的要求。相比于传统的接触式测量手段,激光雷达因其非接触式、高分辨率测距能力脱颖而出。迄今为止,激光雷达(LiDAR)被广泛应用于遥感^[1]、风

速测量^[2]、环境监测^[3]、自动驾驶^[4]等多个领域。现有的激光雷达测距机制主要分为非相干测量和相干测量两类。其中,非相干测量方法本质上是基于对反射光强变化的测量,由于其探测方式直接、简单,被广泛应用于汽车行业。然而这种非相干测量机制使得其很容易受到周围杂散光的干扰,因而其稳定性难以保证。相干测量手段本质上是基于对光学干涉拍频信号的频

收稿日期: 2023-11-05; 修回日期: 2023-12-01; 录用日期: 2023-12-03; 网络首发日期: 2023-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200204, 2020YFC2200101)

通信作者: *tanyd@mail.tsinghua.edu.cn

† 共同第一作者

率解调,目前主流的相干式激光雷达是调频连续波(FMCW)激光雷达,它具有抗环境光干扰、测量分辨率高、测量精度高等优势,并且可以在单次测量中同时实现速度和距离的解调,在近年来成为了绝对测距领域的研究热点^[5-11]。

FMCW 激光雷达的测距性能很大程度依赖于其光源的扫频线性度,在理想情况下,扫频光源需要输出频率被标准锯齿波或三角波调制的光信号。然而在实际应用中,由于应力拉伸不均匀、电路噪声、激光腔内温度变化等因素,扫频光源往往难以输出标准线性调频的激光,这使得本振信号和回波信号干涉产生的拍频信号在单个解调周期内的信噪比下降,最终导致测距精度、分辨率的下降。因此,扫频光源非线性校正技术成为了FMCW激光雷达系统中关键技术之一,引发了国内外科研人员的广泛关注。

本文简要介绍了FMCW激光雷达的应用背景,聚焦其中的扫频光源非线性校正关键技术,结合其工作原理从理论上分析了扫频非线性对FMCW激光雷达系统测距性能的影响,根据国内外研究现状对不同类型的扫频非线性校正技术进行归类划分以及核心原理概括,并总结对比了各类方法的适用场合、特性和优缺点,最后进一步讨论了FMCW激光雷达光源非线性校正技术的未来发展方向。

2 FMCW 激光雷达的基本原理

2.1 FMCW 激光雷达测距原理

FMCW 激光雷达将频率线性调制的本振光与从物体上散射或反射回来的回波光信号干涉产生的拍频信号作为探测信号,通过对其进行频率解调实现距离测量。典型的FMCW激光雷达系统如图1所示。可调谐光源发出的扫频光被分束器分为两部分,一部分作为探测光经过光纤环形器后通过准直镜照射到物体上,另一部分光作为参考干涉信号,二者通过一个5:5光纤耦合器会聚并产生干涉。干涉信号由光电探测器接收,并最终送入计算机进行进一步处理。

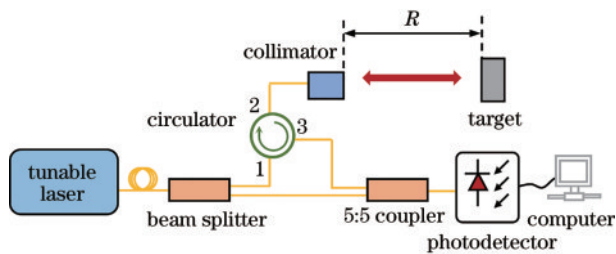


图1 FMCW 激光雷达示意图
Fig. 1 Schematic diagram of FMCW LiDAR

FMCW 激光雷达的光源通常会输出频率三角波或锯齿波调制的光。以三角波为例,其测距原理如图2所示。由于本振光和回波光信号之间存在时延,二者干涉后产生的光信号在单向扫频区域非换相区内

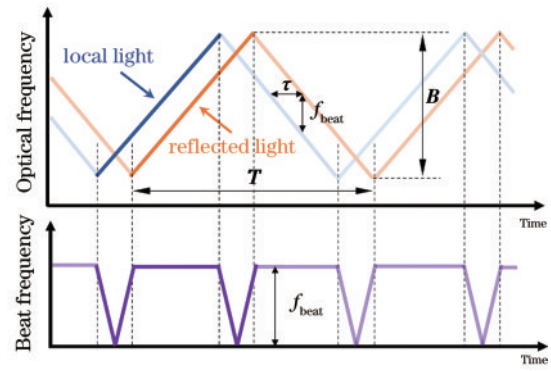


图2 FMCW 激光雷达工作原理图
Fig. 2 Diagram of working principle of FMCW LiDAR

有恒定的拍频频率。通过对该信号进行滤波、频域分析,即可获取相应时间内的拍频频率,从而进一步解调出用于表征物体距离信息的时延量。

以上扫频区域为例,理想情况下激光器输出光的瞬时频率 $f_{ide}(t)$ 可以写为

$$f_{ide}(t) = f_0 + \frac{2B}{T}t, \quad \left(0 \leq t < \frac{T}{2}\right), \quad (1)$$

式中: f_0 为初始扫频频率; B 为扫频带宽; T 为扫频周期。则光电探测器接收到的拍频干涉信号可以表达为

$$I_{ide}(t) = I_0 \cos\left[2\pi\left(f_0\tau + \frac{2B}{T}\tau t - \frac{B}{T}\tau^2\right)\right], \quad (2)$$

式中: I_0 为光强幅度。对该信号进行频谱分析,即可获取相应拍频频率 f_{beat} ,从而进一步解调出待测距离

$$R = \frac{c\tau}{2} = c \cdot f_{beat} \cdot \frac{T}{4B}. \quad (3)$$

2.2 扫频光源非线性的影响

在实际应用中,不同类型的扫频光源因其自身的调频机制会受到诸如应力拉伸不均匀、调制电路噪声、激光腔内温度变化、注入电流非线性等因素,从而导致实际输出光的频率调制存在非线性。如图3所示,光源的扫频非线性使得单向扫频解调区域内干涉信号的拍频频率不再保持恒定,导致理想情况下的拍频频率无法被准确提取,进而影响到了距离解调的准确性。

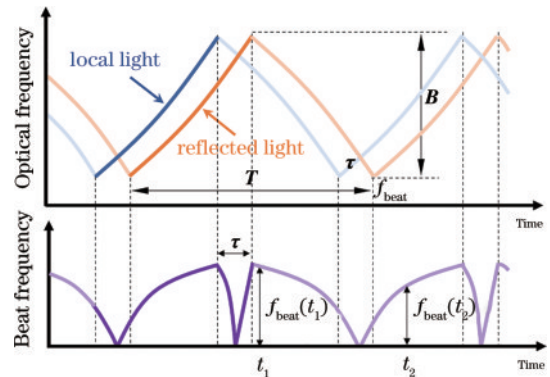


图3 FMCW 激光雷达非线性扫频示意图
Fig. 3 Diagram of swept nonlinearity in FMCW LiDAR

以上扫频区域为例,则考虑光源扫频非线性后激光器输出光的实际瞬时 $f_{\text{act}}(t)$ 频率可以写为

$$f_{\text{act}}(t) = f_0 + \frac{2B}{T}t + f_{\text{non}}(t), \left(0 \leq t < \frac{T}{2}\right), \quad (4)$$

式中: $f_{\text{non}}(t)$ 代表随时间不规则变化的扫频非线性项。则拍频干涉信号可以进一步表达为

$$I_{\text{act}}(t) = I_0 \cos \left\{ 2\pi \left(f_0 \tau + \frac{2B}{T} \tau t - \frac{B}{T} \tau^2 \right) + 2\pi \left[\int_0^t f_{\text{non}}(t) dt - \int_0^{t-\tau} f_{\text{non}}(t) dt \right] \right\}. \quad (5)$$

从式(5)可以看出,此时干涉信号的频率中除了携带时延信息的拍频频率,还包含了不规则的非线性项,使得解调区间内信号的频谱严重展宽,直接影响到了真实拍频信号的提取,进一步导致系统测距分辨率、精度的下降。

3 扫频光源非线性校正技术

FMCW 激光雷达根据不同的光源类型存在多种频率调制方式,包括:周期性应力拉伸或驱动腔镜改变激光腔长、注入电流改变载流子浓度、热调谐改变激光腔内温度等。不同类型调谐光源的扫频非线性主要来源不尽相同,为此国内外研究者开展了大量相关校正技术的研究。

3.1 电流迭代预校正

1994 年,Dieckmann^[12]首次利用了分布式反馈(DFB)激光器实现了厘米级别的基于 FMCW 原理的距离测量。这种利用电流注入实现频率调制的 FMCW 激光雷达具有调谐带宽适中、调频周期短、测量速度快的特点,十分适用于工业测量领域,因而成为了近几十年来绝对测距领域研究热点之一。这类 FMCW 激光雷达通常使用任意波形发生器对光源进行周期性电流注入,通过改变 DFB 激光器的有源区载流子浓度引发等离子效应,进一步改变半导体材料的折射率从而实现频率调制^[13]。由于注入电流与对应频率调制的非线性关系以及该过程引入的腔内温度波动,线性地注入电流必然会导致频率响应的非线性,系统的测距性能难以保证。

为解决这一问题,在 1999 年,Karlsson 等^[14]测量了不同调制频率下激光器的频率响应曲线,通过调制信号的预失真来改善频率响应的线性度,将预校正的思想带入了扫频光源的非线性校正中。然而,该方法需要依赖大量的实验数据来构造准确的频率响应模型,且实时性较差,难以实现高精度的补偿。伴随着人工智能的发展和学科交叉的热潮,在 2019 年,Zhang 等^[15]首次将控制论中的迭代学习控制方法引入 FMCW 激光雷达光源非线性校正中,利用迭代预校正实现了对 4 kHz 扫频频率、45 GHz 扫频带宽的 DFB 激光器的智能化非线性校正,达到了 0.005% 的相对非线性误差、

低于 3×10^{-8} 的残余非线性,完成了 3 m 范围内的绝对距离测量与三维成像,其工作原理示意图如图 4 所示。其迭代过程可以概括如下:信号发生器向光源输入第 k 次迭代后的电压,相应的扫频输出光进入一个臂长差已知的不等臂马赫-曾德尔干涉仪(MZI),其干涉信号被光电探测器接收。通过对拍频信号进行希尔伯特变换(HT),可以得到其瞬时频率^[16]。进一步将理想输出频率与实际输出频率作差,可以得到非线性误差。根据该误差对电压进行相应修正即可得到新一轮迭代电压。通过反复迭代电压以及进行对应的扫频非线性评估,找到非线性误差最小或者与预计结果最接近的输入电压后即可结束迭代。该方法的核心在于迭代误差的计算,整个过程不需要额外的硬件以及人为信号处理,具有成本低、速度快、智能化的优势。

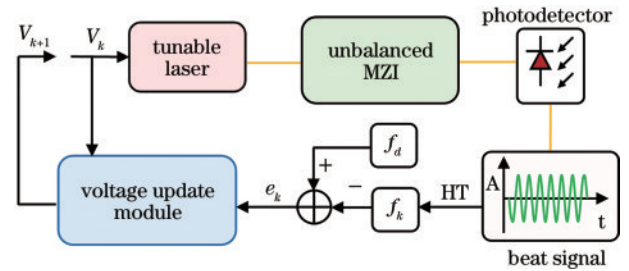


图 4 迭代预校正工作原理示意图
Fig. 4 Diagram of working principle of iterative predistortion

2019 年,Yao 等^[17]引入自训练算法,利用激光器输出的反馈信号来训练激光器电流曲线,对以 THz/ms 级别高速扫频的激光器实现了 1 s 内相位误差小于 $\pi/2$ 的预校正,推进了这一技术的实时性。2021 年,Cao 等^[18]提出了一种高效收敛的迭代预校正算法,通过建立输入电流和频率响应的关系,仅用 6 次迭代便实现了优于 0.005% 的非线性误差以及 5.19×10^{-8} 的残余非线性。2021 年,Tang 等^[19]将迭代预校正与外腔自注入技术相结合,实现了具有大扫频带宽的混合集成低噪声线性啁啾 FMCW 光源,在 11.1 GHz/ms 的扫频速度下其残余非线性低至 5.3×10^{-9} ,在光纤测长实验中,实现了 45 km 光程处 3 m 长度差区分。2022 年,Li 等^[20]结合过零点算法以及线性插值对 FMCW 雷达中光源的瞬时扫频频率进行估计,实现了快速收敛的扫频非线性迭代预校正,仅用 4 次迭代实现了 30.26 GHz 扫频带宽、504 THz/s 扫频速度下均方根低于 5 MHz 的非线性残余。2022 年,Cavedo 等^[21]利用滑动窗口预估调制周期内的干涉条纹数量,以干涉条纹数量保持恒定为依据,结合迭代预校正算法制造了扫频线性度优良的 FMCW 测距样机,在 2 m 处的测距准确度达到 0.1 mm。2023 年,Na 等^[22]将迭代预校正技术运用到移频的 FMCW 激光雷达中,达到了上下扫频均小于 0.02% 的相对非线性误差,实现了对 1.267 m 外 26.43 m/s 转速的转盘的距离、速度去混叠测量,其距离、速度测量

精度分别达到 16 mm 和 0.037 m/s。

3.2 光电锁相环非线性校正

光电锁相环是一种依靠硬件产生的参考信号与待补偿信号进行比相的光学领域常用的补偿手段,相比于用软件算法进行非线性迭代预校正的方式,其响应速度更快、精度更高,因而更适用于实时性要求较高的测量场景。

2009 年, Satyan 等^[23]将光电锁相环技术应用于 FMCW 激光雷达中宽带扫频光源的精密控制,实现了 100 GHz 扫频带宽、1 ms 扫频周期的极高线性度频率调制,且测距的空间分辨率和理论值相吻合,其工作原理如图 5 所示。锁相过程可概述如下:激光器的光经过不等臂 MZI 产生两路存在时延的信号,二者发生干涉并被光电探测器记录。当激光器进行频率调制时,光电探测器输出的光电流频率与激光器扫频速度成正比。将其与一个参考源输出的参考频率依次进行混频、积分后再注入激光器中,当混频信号输出直流时,完成扫频速度与参考源输出信号的锁定,通过调节偏置和改变参考源频率即可产生不同的扫频速度。由于该过程会同时改变激光器的输出光功率,故在其后面加入振幅控制器来保持输出功率的恒定。该方法的核心在于和参考源的混频锁定过程,不涉及过多的软件处理,在设置好参数之后即可以实现高精度的实时校正。

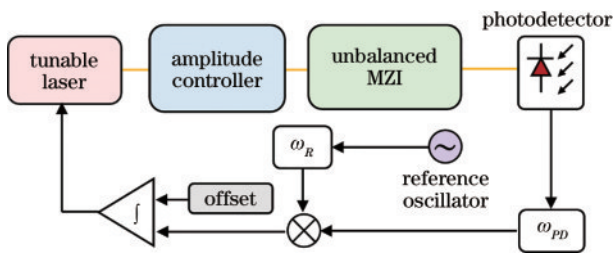


图 5 光电锁相环工作原理示意图

Fig. 5 Diagram of working principle of optoelectronic phase-locked-loop

2009 年, Roos 等^[24]利用快、慢双环路光电锁相环同时对外腔扫频半导体激光器的电流以及压电陶瓷进行校正,在 5 THz 的扫频范围内实现了非线性误差优于 170 kHz 的超大带宽高线性度频率调制,并将其运用于 FMCW 激光雷达,在 1.5 m 范围内测距分辨率高达 31 μm 。2012 年, Satyan 等^[25]在利用光电锁相环校正单个激光器扫频非线性的基础上加入了一个声光移频器,将两个独立的激光器同时锁到同一主信号源上,实现了电控双波长光学相控阵,以及 100 GHz/s 扫频速度的高线性度调频,其距离分辨达到 1 mm。2013 年, 吴映等^[26]在光电锁相环中加入比较器以及频压转换芯片,将探测器输出的扫频干涉信号转化为与频率成正比的电压信号并将其输入光源驱动进行扫频非线性校正,在 30 ms 的扫频周期内实现了 10 GHz 带宽的线性调频。2015 年, Qin 等^[27]搭建了复合光电锁相环用于

FMCW 雷达中半导体激光器扫频过程中的非线性以及宽带随机频率噪声,在 100 ms 扫频周期、50 GHz 扫频带宽下的开环、闭环非线性误差分别为 44 MHz 和 89 kHz,在 50 m 和 750 m 光程处实现了 2 mm 和 17.5 cm 的测距分辨率。2018 年, Stefan^[28]将数模结合的基于 FPGA 的光电锁相环应用到半导体激光器的扫频非线性校正中,实现了 3.6 nm 的大带宽线性调频。2019 年, 黄小帅^[29]提出基于割线迭代算法的光电锁相环,对 FMCW 激光雷达的扫频非线性进行了联合校正,上下扫频的相对非线性误差分别达到了 0.0608% 和 0.0661%。2022 年, 张嘉彤^[30]将迭代开环校正算法和光电锁相环相结合,对 67.8 GHz 的扫频光源进行了非线性校正,并将其运用于 FMCW 测距系统中,在 48 m 测距范围内的最大测距误差为 8.69 mm。

3.3 等频率重采样技术

对于电流注入改变载流子浓度实现调频的 DFB 激光器、分布式布拉格反射 (DBR) 激光器和驱动腔镜改变腔长的外腔半导体激光器而言,迭代预校正和光电锁相环能实现有效的扫频非线性校正。然而,对于非电流注入扫频调制的激光器,如通过应力拉伸改变腔长实现调谐的光纤激光器而言,由于应力拉伸重复性差、干扰因素复杂的特点,其扫频非线性影响因素相对复杂,这两种方法难以适用。因此,一个能够适用于各类激光器的后端处理扫频非线性校正方法十分重要。

1993 年, Glombitza 等^[31]首次将等频率重采样方法引入 FMCW 光频域反射 (OFDR) 系统中,在传统的测距系统中加入了一个用于监测扫频情况的辅助干涉仪,通过对测量信号进行等频率重采样实现了 50 μm 的空间分辨率以及 60 dB 左右的动态测量范围。等频率重采样的工作原理如图 6 所示,相比于传统的 FMCW 激光雷达而言,该方法需要一个额外的臂长差已知的 MZI 作为辅助干涉仪用于产生时钟信号。扫频激光器发出的光被分为两部分,分别进入测量路和辅助路。在测量路,由于扫频非线性的存在,等时间间隔采样下的未校正测量干涉信号相邻采样点之间的频

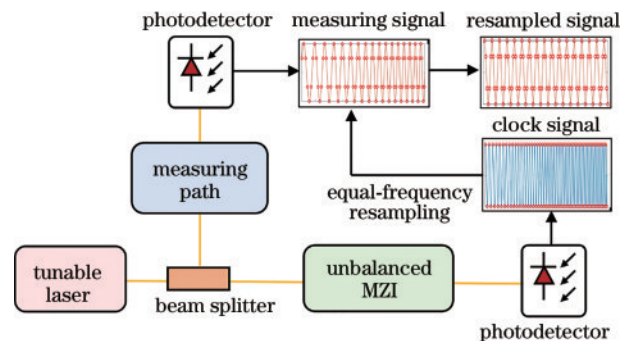


图 6 等频率重采样原理示意图

Fig. 6 Diagram of working principle of equal-frequency resampling

率间隔不同。在辅助路,由于干涉过程在光纤中进行,干涉信号呈现出较好的正弦性。通过提取辅助信号的等相位征点,如过零点和峰-峰值位置,可以获取等频率间隔的时钟信号,利用该信号对测量信号进行重采样即可消除光源的扫频非线性。该方法的核心在于等频率时钟信号的提取,对激光器的扫频调制方式没有要求,因而有较好的泛化性。

2007年 Adler等^[32]将等频率重采样技术运用于基于扫频光学相干层析(OCT)中,利用额外的MZI对系统扫频光源的非线性进行了校正,实现了160 nm调谐范围下5~7 μm的轴向成像分辨率以及50 frame/s的成像速度。2008年,Moore等^[33]进一步分析了等频率重采样技术在FMCW激光雷达系统中的误差来源,通过合理配置测量系统将干涉仪路径不匹配、快速调谐速率高阶近似误差和硬件采样的传输延时误差三者抵消至二阶误差,提升了扫频非线性校正效果。2014年,时光等^[34]利用等频率重采样技术消除了FMCW测距系统中外腔半导体激光器的扫频非线性,达到了10 m的探测范围以及50 μm的测量分辨率。2016年,Lu等^[35]利用两个辅助干涉仪分别进行FMCW测距系统的扫频非线性误差的校正以及单频测振系统的时间同步,实

现了24 m的测量范围以及65.5 μm的测量分辨率。2018年,Pan等^[36]利用气体吸收池对辅助干涉仪的延时光纤进行标定,消除了环境干扰带来的光纤光程抖动问题,进一步提高了重采样技术的精度,实现了60 m范围内μm精度的绝对距离测量。

2022年,清华大学精密仪器系的谈宜东课题组^[37]提出了基于自混合干涉的FMCW激光雷达,利用等频率重采样技术高效消除了应力拉伸调频的光纤激光器的非线性,利用特殊的自混合放大增益以及重采样技术的高鲁棒性,以低于1 mW的输出功率实现了450 m长距离测距,获得了低于0.1 fW的极高探测灵敏度,其系统图如图7所示。2023年,该课题组提出多倍等相位细分重采样技术,进一步解决了等频率重采样方法中辅助延时光纤过长的问题,在保证系统精度的情况下简化了系统结构^[38]。同年,该课题组通过正负扫频结果平均的解调方式简化了自混合激光雷达系统,利用等频率重采样对30 GHz扫频带宽的光纤激光器进行了非线性校正,结合二维扫描振镜,在低至230 μW的输出功率下实现了70 m范围内多种不同非合作物体的三维成像如图8所示,并在此基础上完成了如图9所示的多模块集成的样机^[39]。

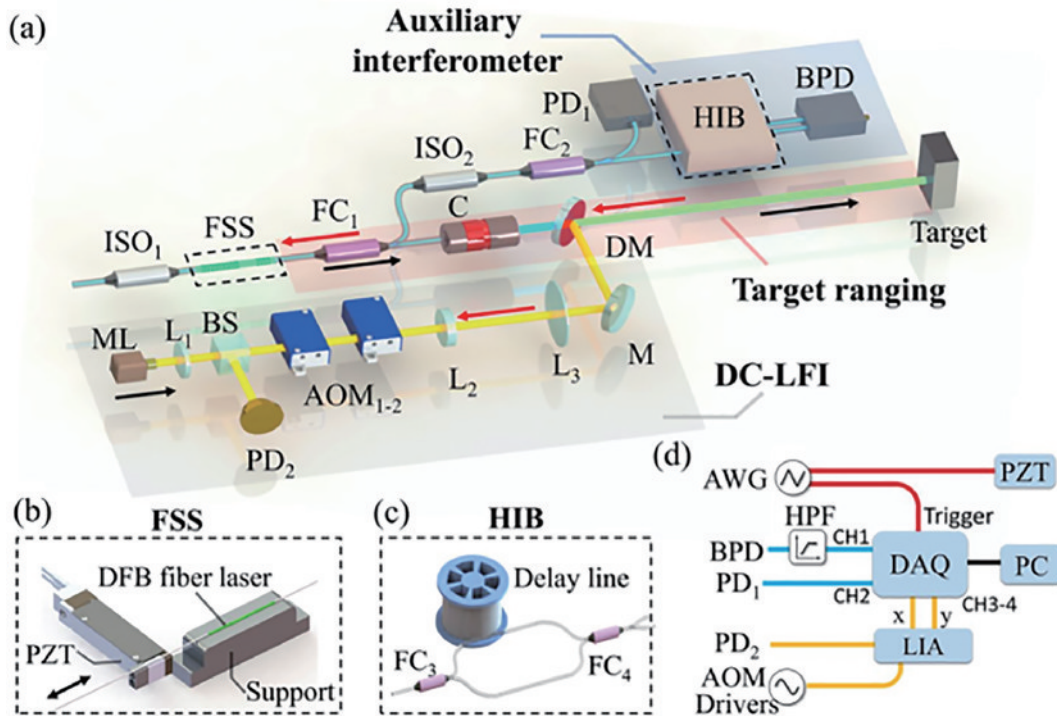


图7 基于重采样的自混合FMCW激光雷达系统图^[34]。(a)系统图;(b)扫频光源;(c)辅助路;(d)数据采集流程图
Fig. 7 Schematic diagram of resampling-based self-mixing FMCW LiDAR^[34]. (a) System configuration; (b) swept light source; (c) auxiliary path; (d) data acquisition flowchart

3.4 光学频率梳非线性校正技术

光学频率梳是一种依靠锁模激光器产生的一系列等间隔分布光学纵模的超短激光脉冲,简称光频梳。光频梳拥有着极大的频谱覆盖范围,可以实现射频领域光纵模频率的溯源与锁定,常被用于充当高精度时

频基准。通过将此技术与光谱色散干涉、光学互相关技术、时间飞行法测距技术、合成波长法等多种技术相融合,可以实现高精度的绝对距离测量。

2013年,Baumann等^[40]提出了基于光学频率梳校正的FMCW激光雷达,对1 kHz扫频频率、1 THz频带

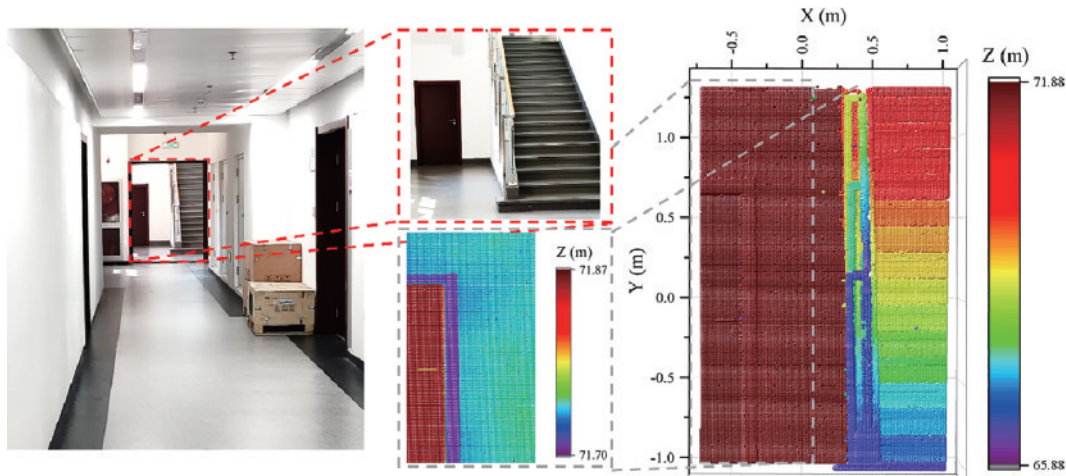


图 8 远距离三维成像结果图^[39]

Fig. 8 Long-distance imaging results^[39]

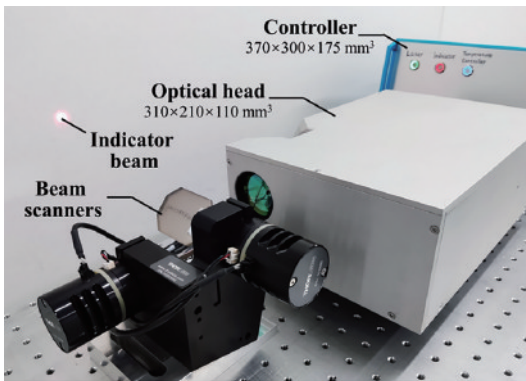


图 9 FMCW 自混合雷达样机^[39]

Fig. 9 Prototype of self-mixing FMCW LiDAR^[39]

宽的正弦扫频外腔半导体激光器进行了高速、高精度的频率锁定,其原理图如图 10 所示。在 FMCW 测距系统中,扫频干涉信号的相位与扫频激光器瞬时输出频率和待测物距离的乘积存在正比关系。由于光频梳的高精度频率,通过将扫频外腔半导体激光器的输出光与光频梳进行干涉,即可实现对扫频光源频率的准确锁定,从而进一步实现高精度的绝对距离测量。这种方法依赖于光频梳频率的高准确性,受到环境影响小,可以达到极高的测距精度,但光频梳系统的存在很大程度增加了系统的复杂度和成本,因而较难应用于实

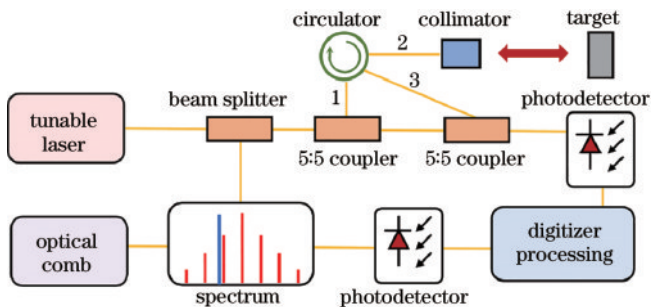


图 10 光频梳校正的 FMCW 激光雷达示意图

Fig. 10 Schematic diagram of comb-calibrated FMCW LiDAR

际工程中。

2014 年, Baumann 等^[41]将提出了基于光频梳校正和实时数字信号处理的 FMCW 激光雷达, 实现了 10.5 m 外非合作目标测距以及多个散射目标的三维成像, 达到了低于 10 μm 的测距精度以及亚微米级别的高准确度。2021 年, Jia 等^[42]提出了基于微谐振腔孤子梳的 FMCW 激光雷达, 通过孤子梳产生的等频率间隔脉冲信号对扫频测量干涉信号进行采样来消除其扫频非线性, 在 2 m 测量范围内达到了小于 20 μm 的测距残差。2021 年, Xie 等^[43]提出了一种基于光频梳的多环锁相线性光学扫频方法并将其运用于 FMCW 激光干涉系统中, 利用复合环路将扫频 DFB 激光器的输出光和光梳的任意模式相锁定, 实现了低于 161 kHz 扫频残差的 10 ms 扫频周期、60 GHz 扫频带宽的高线性度扫频输出, 相比于 DFB 激光器自由运转状态该方法将系统空间分辨率提高了 4 个量级。2022 年, Yang 等^[44]利用电光频率梳注入锁定了在第一周期动态非线性下的半导体激光器, 通过对光梳进行线性频率调谐以及同步强度调制实现了半导体激光器腔模中心波长的线性调谐, 验证了利用光频梳高阶模式进行锁模以扩大扫频范围的可行性。2023 年, He 等^[45]利用散装电光频率梳和集成薄膜铌酸锂电光频率梳分别实现了 31 通道和 19 通道的大规模并行 FMCW 激光雷达, 达到了 1 cm 的测距分辨率以及每秒 12 兆像素的高测量速率, 验证了光频梳校正的 FMCW 激光雷达大规模并行测距的可行性。

3.5 外调制线性扫频技术

通常情况下, 通过改变腔长、载流子浓度或温度的调频方式在没有额外补偿手段下难以输出线性调频的连续光, 这类调制技术都是在激光建立过程中通过控制激光振荡参数来实现频率调制, 也称为内调制。与之相对的, 可以通过激光器外部的调制器件对激光器的输出光进行频率调制, 也称为外调制。

目前大部分外调制 FMCW 激光雷达系统采用电光调制器作为调制器件,其系统原理图如图 11 所示。通过将激光器输出的单频光输入用任意信号发生器驱动的电光调制器中,进一步调整直流(DC)偏置,可以得到载波抑制的单/双边带扫频调制光信号,将该信号作为测量光并与原始单频信号干涉后的拍频信号被探

测器接收。进一步将探测器输出的拍频电信号与加载在电光调制器上的驱动信号进行电混频,即可实现干涉信号的去啁啾,从而得到包含测量时延的拍频信号。在该系统中,扫频光的线性度、带宽由任意信号发生器的驱动能力决定,尽管具有输出光扫频线性度高的特点,但也存在带宽小、设备昂贵的缺点。

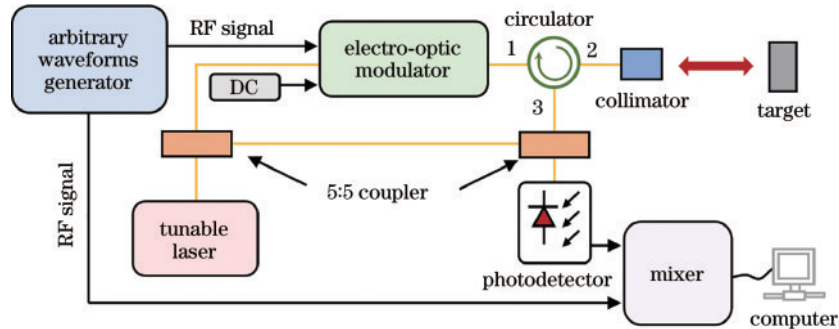


图 11 外调制 FMCW 激光雷达示意图

Fig. 11 Schematic diagram of FMCW LiDAR based on external frequency modulation

2008 年, Pierrottet 等^[46]利用窄线宽光纤激光器和电光调制器搭建了全光纤 FMCW 激光雷达, 实现了 600 MHz 扫频带宽、3.4 ms 扫频周期的线性光输出, 在 250 m 处达到了 1 cm 的测距精度和 1 cm/s 的测速准确度。2012 年, Gao 等^[47]首次提出了基于双 MZI 电光调制器的 FMCW 激光雷达, 实现了 4.3 GHz 扫频带宽的载波抑制的单边带频率调制, 在 20 m 测量光程处讨论了不同带宽的射频驱动对于测距分辨率的影响。同年, Gao 等^[48]提出了基于复杂光场的 FMCW 激光雷达系统, 通过对双 MZI 电光调制器同时不同的射频驱动得到了正负边带独立调制的复杂扫频信号, 实现了绝对距离和速度的独立测量。2017 年, Lü 等^[49]利用电光调制器产生的一阶边带实现了高线性度的 FMCW 光信号, 将激光器的相位噪声保持在最低水平并论证了其扫描速度无关。同年, Xu 等^[50]提出了基于双边带调制的 FMCW 激光雷达, 利用电光调制器输出的正负一级边带进行扫频输出, 实现了距离和速度的同步实时解调, 消除了激光器残余扫频非线性对测速精度的影响。2018 年, Lu 等^[51]利用两个电光调制器分别充当光扫频调制器和光移频调制器搭建了循环外调制 FMCW 光源, 达到了超过 200 GHz 的扫频带宽、36 THz/ms 的扫频速度, 其扫频线性度为 0.99989。2022 年, Fang 等^[52]提出了一种外调制的复合锁相 FMCW 激光雷达, 利用电光调制器产生的正二阶边带得到了 1.2 GHz 扫频带宽、12 THz/s 扫频速率的线性扫频信号, 并结合复合光锁相环消除了系统的随机相位噪声, 实现了优于 4 cm 的分辨率。2023 年, Wang 等^[53]提出了一种偏振复用外调制激光雷达系统, 实现具有不同带宽和扫频速度的双波段线性扫频信号, 得到了 11.8 GHz 的等效带宽以及 1.31 cm 的测距分辨率。

3.6 扫频非线性技术总结

在近几年来, 国内外学者根据 FMCW 激光雷达在不同场合的测量需求, 针对不同类型的扫频激光器提出了许多新原理的扫频非线性校正技术, 最终达到的性能指标各有所长, 部分方法的特点、适用场合和优缺点如表 1 所示。其中迭代预校正和等频率重采样非线性校正方法具有较低的系统成本, 只需要一个额外的不等臂 MZI 进行线性度评估或产生时钟信号即可, 前者只适用于通过电流注入改变载流子浓度的扫频激光器, 其速度依赖于迭代算法的收敛速度, 并需要结合当下环境进行不定期校正来保持精度, 因而不适用于环境变化较大的测量场景。等频率重采样是基于后端处理的非线性校正手段, 因此具有很强的泛化性, 但由于等频率特征点的时间间隔是不均匀的, 在存在环境扰动引起的多普勒频移的测量状态下, 重采样后的信号频谱的信噪比下降严重, 因而不适用于测速场景。并且为了满足奈奎斯特采样定理, 在没有插值的情况下, 辅助路的延时光纤的光程至少大于测量距离的两倍, 使得系统体积很大。光电锁相环具有很好的实时性, 其校正效果依赖于参考信号源以及锁相环的稳定性, 但要高稳定性的锁相效果需要大量的调参以及硬件搭配, 增加了实验和系统的复杂性。光频梳校正和线性外调制非线性校正手段拥有着极高的校正精度以及很强的鲁棒性, 但是二者分别需要昂贵的光频梳系统以及高端的微波任意信号发生器, 系统的成本较前几种方法而言更高。外调制手段虽然能够实现几十 kHz 乃至 MHz 级别的极快扫频速率, 但受限于信号源的成本以及本身性质, 其扫频带宽一般在几百 MHz 到几十 GHz 左右, 故不太适用于高分辨率测量场景。

表 1 FMCW 激光雷达扫频非线性校正技术概括

Table 1 Summary of swept nonlinearity calibration methods in FMCW LiDAR

Method	Calibration principle	Applicable laser	Technical characteristics	Limitation
Iterative precorrection	Calculate the nonlinear residual and compensate for the input voltage, and find the optimal solution through cyclic iteration before measurement	Swept DFB/DBR laser through current injection modulation	Low cost, simple system, and algorithm dependent iterative convergence speed	Need for periodic calibration to maintain accuracy, not suitable for situations with significant environmental changes
Photoelectric phase-locked loop	Compare the beat frequency signal with the output signal of the reference source, and use the integration of the mixed DC signal as input electrical signal	Swept DFB/DBR laser through current, external cavity semiconductor laser	Good real time performance, and the correction effect depends on the stability of the phase-locked loop	Construction of phase-locked loop is relatively complex, and the system cost is relatively high
Equal-frequency resampling	Find equal frequency points of auxiliary interferometers, and resample the measurement signal	Any type of swept laser	Low cost, high stability, strong generalization ability.	System has a large volume, and the method is not suitable for ranging jittery targets
Optical frequency comb calibration	Output light interferes with the optical frequency comb to achieving mode locking.	Any type of swept laser	High calibration accuracy and good real-time performance	Expensive and complex optical frequency comb systems with high costs and complexity
Linear external modulation	Using an electro-optic modulator to directly output linearly swept light	Single-frequency laser	Simple implementation, high sweep linearity, good robustness, and fast sweep speed	Need for high-end microwave arbitrary signal generator, which has high system cost and limited swept bandwidth

4 结 论

正如中国工程院副院长吴曼青院士所言,当前世界之变、时代之变、科技之变正以前所未有的速度和规模席卷而来。FMCW 激光雷达作为占据“中国电子信息工程科技十四大挑战(2023)”中“测量计量与仪器”与“光学工程”两大主题的非接触式绝对距离测量技术,对于推进我国高精度计量以及远距离、大尺寸目标成像的重要性不言而喻。对于其扫频光源的非线性校正技术是提升测距精度的最重要的技术之一,需要进一步朝着小型化、低成本、智能化、自动化的方向发展,以提升其工程实用性。本文对现有的 FMCW 激光雷达光源存在的扫频非线性的影响进行了理论分析,结合国内外研究现状,对现存各类主流非线性校正技术的原理、技术特性、适用范围、优缺点进行了介绍与总结,为进一步认识和把握当下 FMCW 激光雷达中扫频非线性校正技术的发展进程和趋势提供了充足的理论依据和技术参考。

参 考 文 献

- [1] Wang R R, Wang B N, Xiang M S, et al. Simultaneous time-varying vibration and nonlinearity compensation for one-period triangular-FMCW lidar signal[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1731.
- [2] Feneyrou P, Leviandier L, Minet J, et al. Frequency-modulated multifunction lidar for anemometry, range finding, and velocimetry-2. Experimental results[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9676-9685.

- [3] Elbakary M I, Abdelghaffar H M, Afrifa K, et al. Aerosol tracking using lidar-based atmospheric profiling and Bayesian estimation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106248.
- [4] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: boss and the urban challenge[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(8): 425-466.
- [5] Mitchell E W, Hoehler M S, Giorgetta F R, et al. Coherent laser ranging for precision imaging through flames[J]. *Optica*, 2018, 5(8): 988-995.
- [6] Agishev R, Gross B, Moshary F, et al. Range-resolved pulsed and CWFM lidars: potential capabilities comparison [J]. *Applied Physics B*, 2006, 85(1): 149-162.
- [7] Ula R K, Noguchi Y, Iiyama K. Three-dimensional object profiling using highly accurate FMCW optical ranging system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3826-3833.
- [8] Martin A, Dodane D, Leviandier L, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [9] 张恒康, 王立, 郭绍刚, 等. 调频连续波激光雷达高速目标测量误差的校正方法[J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 1310003.
Zhang H K, Wang L, Guo S G, et al. Error correction method in measurement of high-speed targets with frequency-modulated continuous-wave lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13): 1310003.
- [10] 张振伟, 赵跃进, 缪寅宵, 等. 基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0411002.

- Zhang Z W, Zhao Y J, Miao Y X, et al. Terahertz nondestructive testing imaging technology based on linear frequency modulation mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0411002.
- [11] 董毅, 谢玮霖, 冯宇祥, 等. 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306003.
- Dong Y, Xie W L, Feng Y X, et al. Laser linear sweep frequency technique based on delay self-heterodyne optical phase locking and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306003.
- [12] Dieckmann A. FMCW-LIDAR with tunable twin-guide laser diode[J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(4): 308-309.
- [13] 赵清云. DFB 半导体激光器线性调频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Zhao Q Y. Research on linearization chirp technique of DFB semiconductor laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] Karlsson C J, Olsson F A. Linearization of the frequency sweep of a frequency-modulated continuous-wave semiconductor laser radar and the resulting ranging performance[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3376-3386.
- [15] Zhang X S, Pouls J, Wu M C. Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9965-9974.
- [16] Ahn T J, Lee J Y, Kim D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7630-7634.
- [17] Yao Z Y, Mauldin T, Hefferman G, et al. Digitally integrated self-trained predistortion curve finder for passive sweep linearization of semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 1502605.
- [18] Cao X Y, Wu K, Li C, et al. Highly efficient iteration algorithm for a linear frequency-sweep distributed feedback laser in frequency-modulated continuous wave lidar applications[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): D8-D14.
- [19] Tang L W, Jia H X, Shao S, et al. Hybrid integrated low-noise linear chirp frequency-modulated continuous-wave laser source based on self-injection to an external cavity[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1948-1957.
- [20] Li P, Zhang Y T, Yao J Q. Rapid linear frequency swept frequency-modulated continuous wave laser source using iterative pre-distortion algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3455-3465.
- [21] Cavedo F, Esmaili P, Norgia M. Self-mixing laser distance-sensor enhanced by multiple modulation waveforms[J]. *Sensors*, 2022, 22(21): 8456-8471.
- [22] Na Q X, Xie Q J, Zhang N, et al. Optical frequency shifted FMCW lidar system for unambiguous measurement of distance and velocity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107523.
- [23] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [24] Roos P A, Reibel R R, Berg T, et al. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3692-3694.
- [25] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Phase-locking and coherent power combining of broadband linearly chirped optical waves[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25213-25227.
- [26] 吴映, 陈迪俊, 孙延光, 等. 半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0902001.
- Wu Y, Chen D J, Sun Y G, et al. Research on optical chirp linearization technique of semiconductor lasers by an optoelectronic feedback loop[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0902001.
- [27] Qin J, Zhou Q, Xie W L, et al. Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [28] Stefan K. Digital phase lock loop design for linearization of chirped laser[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2018.
- [29] 黄小帅. 基于 FPGA 的半导体激光器光电锁相非线性校正[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Huang X S. Nonlinear correction of photoelectric phase-locked semiconductor laser based on FPGA[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [30] 张嘉彤. 面向 FMCW 激光测距的光源调频非线性校正研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- Zhang J T. Study on frequency modulation nonlinear correction of light source for FMCW laser range finder [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [31] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [32] Adler D C, Chen Y, Huber R, et al. Three-dimensional endomicroscopy using optical coherence tomography[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 709-716.
- [33] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13139-13149.
- [34] 时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184209.
- Shi G, Zhang F M, Qu X H, et al. Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184209.
- [35] Lu C, Liu G D, Liu B G, et al. Absolute distance measurement system with micron-grade measurement uncertainty and 24 m range using frequency scanning interferometry with compensation of environmental vibration[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30215-30224.
- [36] Pan H, Qu X H, Zhang F M. Micron-precision measurement using a combined frequency-modulated

- continuous wave lidar autofocus system at 60 meters standoff distance[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15186-15198.
- [37] Wang Y F, Xu X, Dai Z R, et al. Frequency-swept feedback interferometry for noncooperative-target ranging with a stand-off distance of several hundred meters[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 21.
- [38] Lin C X, Wang Y F, Tan Y D. Laser feedback FMCW ranging system based on multiple-equal-phase-subdivision resampling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(9): 2846-2854.
- [39] Wang Y F, Hua Z Y, Shi J C, et al. Laser feedback frequency-modulated continuous-wave LiDAR and 3-D imaging[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 7002309.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Jia L H, Wang Y, Wang X Y, et al. Nonlinear calibration of frequency modulated continuous wave LIDAR based on a microresonator soliton comb[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1025-1028.
- [43] Xie W L, Meng Y X, Feng Y X, et al. Optical linear frequency sweep based on a mode-spacing swept comb and multi-loop phase-locking for FMCW interferometry [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 604-614.
- [44] Yang J, Xie W L, Wang T, et al. Enhanced frequency-modulated continuous-wave generation by injection-locking period-one oscillation in a semiconductor laser with an intensity modulated comb[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14886-14896.
- [45] He B B, Zhang C B, Yang J C, et al. Massively parallel FMCW lidar with cm range resolution using an electro-optic frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(13): 3621-3624.
- [46] Pierrottet D F, Amzajerdian F, Petway L, et al. Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2008, 1076(1): 10760406.
- [47] Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2022-2024.
- [48] Gao S, O'Sullivan M, Hui R Q. Complex-optical-field lidar system for range and vector velocity measurement [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25867-25875.
- [49] Lü Y K, Yang T X, Lu Z Y, et al. External modulation method for generating accurate linear optical FMCW[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(18): 1560-1563.
- [50] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [51] Lu Z Y, Yang T X, Li Z Y, et al. Broadband linearly chirped light source with narrow linewidth based on external modulation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4144-4147.
- [52] Fang F P, Hu H, Yan P P, et al. Composite optical phase locking technology of chirp synthetic aperture lidar [J]. *Optics Communications*, 2022, 509: 127793.
- [53] Wang X C, Cao F T, Ma C, et al. Dual-band coherent microwave photonic radar using linear frequency modulated signals with arbitrary chirp rates[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(6): 7700609.