

激光与光电子学进展

脉冲激光飞行时间测距误差补偿技术研究进展

赵旭^{1,2}, 苏中^{1,2*}, 李连鹏^{1,2}, 刘福朝^{1,2}, 刘宁^{1,2}, 余浩¹

¹北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100192;

²北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192

摘要 近年来,脉冲激光飞行时间测距(TOFR)是激光测距领域的研究热点,在工业精密测量、机器人自主运动、无人飞行器控制等领域应用广泛。由于背景噪声、测量电路电学环境、回波脉冲上升时间等因素的影响,脉冲激光飞行时间测量通常存在一定的误差,从而引起测距精度降低的问题。首先介绍了脉冲激光 TOFR 技术的基本原理,分析了脉冲激光 TOFR 过程中飞行时间测量误差的形成原因并对误差进行分类。梳理了飞行时间测量误差的各类误差补偿方法及相关最新研究成果,最后总结了现阶段脉冲激光 TOFR 误差补偿面临的挑战。

关键词 激光光学; 脉冲激光; 测距原理; 误差分类; 误差补偿

中图分类号 TN241

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2300001

Research Progress of Error Compensation Technology for Pulsed Laser Time-of-Flight Ranging

Zhao Xu^{1,2}, Su Zhong^{1,2*}, Li Lianpeng^{1,2}, Liu Fuchao^{1,2}, Liu Ning^{1,2}, Yu Hao¹

¹Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technological University, Beijing 100192, China;

²Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science & Technological University, Beijing 100192, China

Abstract In recent years, pulsed laser time-of-flight ranging (TOFR) has become a research hotspot topic in the field of laser ranging, which has been widely used in industrial precision measurement, robot autonomous motion, unmanned aerial vehicle control, and other fields. Due to the influences of background noise, electrical environment of measurement circuits, and rise time of echo pulses, the pulsed laser TOFR usually has certain errors, which causes the problem of distance measurement accuracy degradation. This paper firstly introduces the basic principle of pulsed laser TOFR technology, analyzes the formation causes of time-of-flight measurement errors in the pulsed laser TOFR process, and classifies the errors. Further, the various error compensation methods for time-of-flight measurement errors and the latest research results are sorted out, and finally, the current challenges of pulsed laser TOFR error compensation are summarized.

Key words laser optics; pulsed laser; ranging principle; error classification; error compensation

OCIS codes 140.3538; 270.5530; 280.1910

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-19; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFC1511702)、北京市科技计划课题(Z191100001419012)、北京学者计划资助、高动态导航技术北京市重点实验室资助

通信作者: *sz@bistu.edu.cn

1 引言

脉冲激光飞行时间测距(TOFR)技术是激光测距研究的重要方法之一,具有测程远、功耗低、测量快速、易于实现等优点,对于工业应用与技术研究而言有着重要的意义^[1-3]。例如:TOFR技术可应用于敌我距离测量、战斗目标扫描、空间搜索警戒等场所^[4-5];TOFR技术也在精细加工、遥测感知、场景重构等领域需求巨大^[6-7]。鉴于TOFR技术的广泛应用场景,飞行时间测量误差补偿研究就显得至关重要。

TOFR技术根据发射激光脉冲到目标反射脉冲回到测量电路过程中经过的时间来计算测距距离^[8]。相对于相位法、三角法等激光测距方法,脉冲激光TOFR方法能够实现更加快速的距离测量^[9],测量精度可达毫米级以上。然而,在利用TOFR进行距离测量的过程中,受目标材质、目标姿态、大气环境、背景噪声、光学脉冲测量电路电学环境、回波脉冲上升时间等因素的影响,脉冲飞行时间测量往往会出现一定的误差,最终导致测距准确度降低^[10]。脉冲激光TOFR误差主要源于在对脉冲飞

行时间进行测量的过程中产生的误差。脉冲飞行时间测量误差主要可以分为计时误差、走离误差以及时间抖动^[11-12]。其中,计时误差主要由时钟信号计数误差造成,走离误差主要由回波脉冲畸变等造成,时间抖动主要由噪声造成。目前,研究人员对于脉冲飞行时间测量误差的补偿方法的研究已经有了很多进展^[13-15]。

本文主要围绕脉冲激光TOFR补偿技术开展综述,概述测距过程中飞行时间测量误差的形成原因并对误差进行分类。在此基础上,分析主流的误差补偿方法的原理与补偿结果,介绍TOFR误差补偿方法的最新研究进展,分析了误差补偿相关研究面临的挑战,并对未来发展方向进行展望和建议。

2 测距原理及测量误差

2.1 测距原理

脉冲激光TOFR技术的基本原理如图1所示,距离测量的主要过程包括脉冲激光发射、目标反射脉冲激光产生回波、回波检测、脉冲飞行时间测量以及距离计算等步骤^[16]。

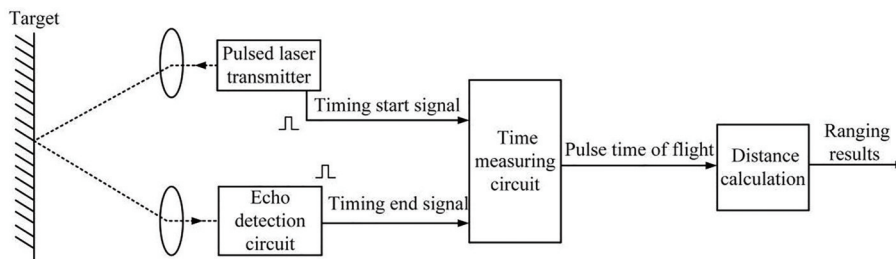


图1 脉冲激光TOFR技术基本原理

Fig. 1 Principle of TOFR using pulsed lasers

首先由激光发射器同时发射两束激光驱动脉冲。其中一束用于产生计时起始信号,时间测量电路接收到起始信号时开始计时;另一束驱动激光器发射激光至目标表面,由目标反射后回到回波检测电路并由回波检测电路产生计时结束信号,时间测量电路接收到计时结束信号时停止计时,最终根据时间测量电路计时结果并结合脉冲飞行速度计算距离^[17-19]。

2.2 测量误差

脉冲激光飞行时间测量值是测距误差的主要来源,主要分为计时误差、走离误差和时间抖动。

2.2.1 计时误差

时间测量电路在计时过程中产生的误差称为

计时误差^[20]。脉冲激光飞行时间测量通常采用脉冲计数法,通过对计时起始与结束信号之间的时钟脉冲进行计数,实现对计时信号时间间隔的测量^[21]。脉冲计数误差来源如图2所示, M 、 N 代表时钟脉冲编号, T_1 代表计时起始信号上升沿到 M 号时钟脉冲上升沿的时间间隔, T_2 代表计时结束信号到 $N+1$ 号时钟脉冲上升沿的时间间隔, T_x 代表脉冲计数法的时间测量结果。

由图2可知,脉冲计数法的时间测量结果为

$$T_x = T_0(N + 1 - M), \quad (1)$$

式中: T_0 代表理想时钟脉冲周期。设脉冲计数法的时间测量误差为 T_w ,则有

$$T_w = T_1 - T_2. \quad (2)$$

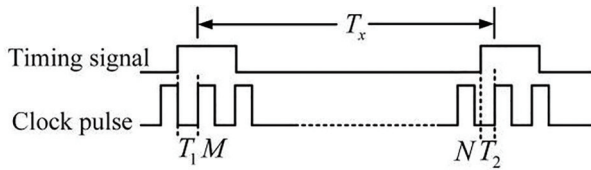


图 2 脉冲计数误差

Fig. 2 Error of pulse counting

对于使用了时间内插技术^[22]的脉冲计数时间测量系统,时钟信号周期误差是影响时间测量精度的关键。在不同时间范围的测量中,时钟信号周期会发生不同程度的漂移,从而使得时间测量产生一定的误差,进而导致计时误差^[23]。

2.2.2 走离误差

在回波检测电路产生计时信号的过程中,回波脉冲波形变化导致计时信号发生位移而产生的时间测量误差称为走离误差^[24]。

前沿定时探测技术作为计时信号生成的基本方法,将回波脉冲上升沿与固定阈值交点作为计时停止信号的发生点^[25]。前沿定时法在提供了计时信号的同时也带来了走离误差。图 3 是走离误差的示意图,其中 V_{th} 代表前沿定时法所预设的固定阈值, t_p 代表几何走离误差, t_{RC} 代表 RC 延时走离误差。走离误差可以看作是几何走离误差与 RC 延时走离误差之和。

图 3 中实线表示每个脉冲的理想波形,虚线表示实际波形。回波检测电路探测到的回波脉冲发生畸变,这使得前沿定时法产生的计时信号相对于理想的回波脉冲上升沿产生一定的位移,时间测量电路根据计时信号得出脉冲激光飞行时间测量误差^[26]。

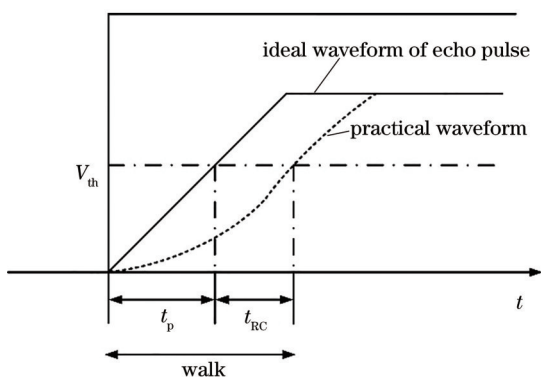


图 3 前沿定时中的走离误差

Fig. 3 Walk error in leading edge timing

走离误差属于系统误差,对脉冲激光测距的影响很大,每 1 ns 的走离误差约会带来 15 cm 的测距

误差。

2.2.3 时间抖动

时间抖动是在距离测量中由噪声等原因造成的误差^[27-29]。

如图 4 所示,各点线和实线代表不同反射率材质下的回波信号。时间抖动主要发生在回波检测电路中,可以表示为

$$\sigma_t = \sigma_N / \left(\partial i_s / \partial t \right) \approx \sigma_N / \left[i_{Smax} t_r / (t_r R_{SN}) \right], \quad (3)$$

式中: σ_t 代表时间抖动标准差; i_s 代表回波脉冲幅值; t 代表时间; σ_N 代表噪声标准差; i_{Smax} 代表回波脉冲最大幅值; t_r 代表回波脉冲上升时间; R_{SN} 代表回波脉冲信噪比。时间抖动标准差 σ_t 越小,代表在回波检测过程中造成的误差越小,测量的数据更加准确。反之,时间抖动标准差 σ_t 越大,代表在回波检测过程中干扰较多,造成数据偏差较大,测量数据不准确^[30]。

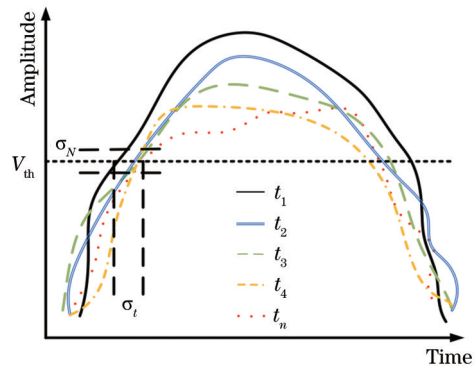


图 4 回波检测中的时间抖动效应

Fig. 4 Effect of time jitter in echo detection

3 脉冲激光测距误差补偿方法

脉冲激光飞行时间测距误差补偿主要通过飞行时间测量误差进行修正,以达到测距误差补偿的效果^[31]。主要从计时误差、走离误差与时间抖动等方面研究时间测量误差补偿方法。

3.1 计时误差补偿

计时误差主要包括脉冲计数误差与时钟信号漂移。时间内插技术是修正脉冲计数法时间测量误差的主要方法^[32]。通过时间内插计数,将时钟信号进一步细分,从而将时间测量过程分为粗时间测量与精时间测量,达到提升时间测量精度的目标。时间内插技术主要包括延迟线内插法和模拟内插法等。

延迟线内插法(TDL)具有测量范围广、稳定性

强以及高测量精度的优势,被应用于大量程、高精度的脉冲激光飞行时间测量中,是目前研究的主流方向^[33-34]。张黎明等^[35]采用专用计时芯片 TDC-GP22 实现高精度、高分辨率的时间间隔测量,并采用大带宽放大电路及恒比定时延迟线插入鉴别方法提高系统测时精度。但是该方法增加了硬件设计的复杂性。Wang 等^[36]提出了一种新的 TDL 体系结构,该方法合并多个常规延迟链,以获得非常精细的固有单元延迟。这些信元延迟的均匀性通过抽取方法得以改善,因此使用 TDL 的时间插值具有最小的非线性误差。中北大学李菠等^[37]在上述基础上提出了一种基于插值采样技术的高精度时间间隔测量方法,以正弦波作为参考信号,将时间间隔测量转化为对参考正弦波的相位测量,将时钟信号进一步细分,从而将时间测量过程分为粗时间测量与精时间测量,达到提升时间测量精度的目标。北京航空航天大学李瑞艳等^[38]使用基于延迟线插入法的高精度专用计时芯片 TDC-GP22,设计了脉冲激光飞行时间测距系统,通过 TDC-GP22 芯片对脉冲激光飞行时间进行高精度测量,实现距离测量,在 km 级量程中得到了 0.15 m 的测量精度。

针对测量性能和功耗问题,米兰理工大学 Lusardi 等^[39]研究了子插值在基于现场可编程门阵列(FPGA)器件的延迟线时间数字转换器中的作用,揭示了获得最佳时间测量性能的设计规则。多伦多大学的 Lee 等^[40]分析了内插器输入的斜率对内插器延迟和线性的影响,并获得了在不牺牲线性度的情况下产生最小等待时间的内插器输入的最大斜率。普罗沃杨百翰大学的 Gammoh 等^[41]分析了延迟锁定环的循环动力学,提出了一种使用延迟锁定环线性化随机相位插值时数转换器(SPI-TDC)的鲁棒解决方案,同时降低了硬件要求和功耗。

延迟线插入法能够对脉冲计数法时间测量中产生的误差进行补偿,其缺点是测量精度最高只能达到最低有效位(LSB)级别。模拟内插法可以提供更高的脉冲激光飞行时间测量理论精度^[42]。长春理工大学王洪喆等^[43]根据模拟插入法设计了脉冲激光飞行时间测量电路并对测量电路进行了测试,发现利用该方法可实现 100 ps 的时间间隔测量,对应 1.5 cm 的测距精度。

针对时钟脉冲周期会随着测距系统测量距离的增加而产生漂移的问题,文献^[44]提出了周期误差补偿的方法,提前对测距系统在不同距离下的测

距误差进行测量,利用所测量的误差数据构造误差补偿曲线,在测距系统工作时使用误差补偿曲线对测距误差进行补偿,最终在测试中得到了小于±3 mm 的测距误差。

针对测量范围小的问题,Szplet 等^[45]将参考时钟的周期计数与时钟信号的单个周期内的两级插值相结合。内插涉及第一内插级中的四相时钟和第二内插级中的等效编码线。创建等效编码线作为独立离散时间编码线的组合。测试结果表明测量范围拓展了 4 倍。

模拟插入法与延迟线插入法相比,虽然有着更高的理论精度,但是因为模拟插入法的量程小、应用难度大,而延迟线插入法的结构简单、稳定性强、量程大,所以目前基于延迟线插入法的脉冲激光飞行时间测量得到了更多的应用。

3.2 走离误差补偿

走离误差补偿采用走离误差估计和回波脉冲信号重构等方法减小走离误差的影响^[46]。

根据回波脉冲特征补偿走离误差的基本原理是脉冲峰值、脉冲宽度、脉冲上升时间等特征与走离误差之间存在唯一的对应关系,通过测量上述几种回波脉冲特征可以估计出走离误差,进而根据估计值对走离误差进行补偿。

Kurtti 等^[47]通过使用一种双通道时间数字转换(TDC)芯片分别对校准前的脉冲激光飞行时间与回波脉冲宽度进行测量,标定出走离误差与回波脉冲宽度的关系曲线,根据脉冲回波宽度,通过查表法对走离误差进行补偿,在实际测试中得到了 1:1000 动态范围内±15 ps 的测量精度。为了增大补偿算法的动态测量范围,韩国大学 Hong 等^[48]通过双阈值检测方法对脉冲激光回波上升时间与走离误差进行检测,验证了回波上升时间与走离误差之间的对应关系,手动标定了回波上升时间与走离误差的关系曲线,利用回波上升时间对走离误差进行了补偿,最终在测试中得到了 1:1000000 动态范围内±30 ps 的测量精度,对应±4.5 mm 的测距精度。

针对手动标定误差曲线的迁移性较差的问题,通过对回波脉冲进行数学建模推导回波脉冲上升时间与走离误差数学模型的方法被提出。南京理工大学 Yang 等^[12]对回波脉冲上升时间与走离误差间的关系进行了建模,通过双阈值法测量回波脉冲上升时间,计算出误差补偿后的脉冲激光飞行时

间,最终在测试中将走离误差降低到 0.337 ns。中国工程物理研究院的谢庚承等^[14]深入分析了复杂三维飞行目标的回波特性,以典型的调 Q 脉冲激光测距为基础,探讨了调 Q 脉冲激光发射脉冲的数学描述,建立了一种通过飞行目标的反射特性、表面形状及姿态信息计算回波功率分布的理论模型。

近年来,随着深度学习技术的发展,使用深度学习技术对回波脉冲波形进行特征提取,再根据回波脉冲特征直接确定计时停止信号位置的方法被提出^[48]。中国科学院大学的胡善江通过深度学习技术设计了脉冲激光测距回波时刻解算方法,采用仿真计算的方法构建训练与测试数据集,对一维卷积神经网络进行训练,得到了 99.85% 的分类精度,并将解算方法应用于机载激光雷达数据处理中,在外场飞行试验中得到了 20 mm 左右的平面拟合残差,所得结果验证了该方法的实用性与发展潜力^[49]。

通过回波脉冲信号重构补偿走离误差,通过对振荡电路对单极性的回波脉冲进行重构,得到新的双极性脉冲信号,进而根据新信号的过零点确定计时停止信号的位置。因为新信号的过零点与原本的回波脉冲波形无关,所以根据新信号过零点确定的计时停止信号可以消除走离误差的影响^[50]。国内众多高校对此进行了大量研究工作。

电子科技大学 Yang 等^[51]针对计算机合成孔径雷达成像应用,提出首先重构距离像,然后根据距离像进行分块重构获取相应观测距离和目标图像的方法。南京理工大学张素玲等^[52]对回波脉冲正交压缩采样系统特性进行分析,将测量矩阵近似成一种具有特殊带状结构的矩阵并采用分段滑动重构思想实现实时重构。西安电子科技大学强晓敏^[53]分析了宽带条件下目标回波的特点,将宽带回波信号划分为一系列的子带,在每一个子带内单独进行相参积累,得到信噪比改善后的回波,仿真实验验证了在子带进行相参积累后回波信号的重构效果。黄明双等^[54]使用高频共振探测电路对回波脉冲进行放大滤波处理,从而得到信噪比更高的双极性脉冲,并利用多脉冲数字相关处理技术构造出的新脉冲函数进一步提升信噪比,消除走离误差的影响,最终在实际测试中实现了 $\pm(3+2 \times 10^{-4})$ mm 的测距精度。北京石油化工学院姜博等^[55]提出了一种基于循环平稳随机序列的脉冲激光测距方案。该方法利用了循环平稳随机过程在时间上呈现为

周期性平稳变化的特征,从携带时间抖动等误差的测量数据中高精度地重构参数,从而获得高精度的目标距离。然而上述重构方法对随机跳频和抖动考虑不足。

针对上述问题,Quan 等^[56]提出了一种基于压缩感知的稀疏优化方法,用于对随机跳频和脉冲重复频率(PRF)抖动脉冲进行高分辨率距离多普勒重建。通过与频率固定的脉冲多普勒雷达进行比较,分析了该方法在频率捷变和 PRF 抖动雷达中的运动目标检测性能。仿真和物理系统实验结果均证明了该方法的有效性。文献^[57]提出了一种称为随机正交频分复用(R-OFDM)对的新型波形和一种称为完全极化同时正交匹配追踪(FP-OFDM)的联合回波重建算法。由于拟议波形具有稀疏特性,将压缩感测技术应用于回波脉冲重建,通过随机选择全频带 OFDM 信号的不同子集来利用理想的正交性。数值模拟和无人机数据实验均表明,R-OFDM 和基于 CS 的全极化-同时正交匹配追踪(FP-SOMP)算法的组合是同时极化高分辨率距离像(HRRP)重建的有效路径。文献^[58]提出了一种具有奇异值分解和自适应小波去噪的两级去噪框架。在此基础上,利用连续导数阈值函数和梯度下降法获得了最优阈值,对回波脉冲进行重构。仿真结果证明了在高斯白噪声下奇异值分解与自适应小波去噪有效提升了回波脉冲重构性能。

对于走离误差补偿,随着深度学习技术的发展,使用深度学习技术对回波脉冲波形进行特征提取,再根据回波脉冲特征直接确定计时停止信号位置的方法是今后的研究重点。

3.3 时间抖动误差补偿

时间抖动误差是由噪声等原因造成的定时点处单次距离测量值的统计误差。时间抖动误差的影响可以通过提升回波脉冲信噪比的方法减小。

黄民双等^[59]通过多脉冲数字相关处理的方法对脉冲函数进行了构建,提高了信号信噪比,保证了时间抖动误差能够被控制在一定的范围内,减小了时间抖动误差的影响。

然而,该方法没有从模型的角度去分析时间抖动问题。电子科技大学吴俊璋等^[60]对随机性时间抖动进行了深入分析,建立了采样系统时间抖动模型,并对激光测距系统中时间抖动的测量和补偿算法进行了研究。该团队设计了一种通用的时间抖动测量方法和相应补偿算法,提高了时间抖动影响

下的系统信噪比,改进了常见的三点法以提高补偿性能。马来西亚莫纳什大学的 Chua 等^[61]基于距离选通成像和时间切片重建的工作原理,针对时间抖动引起的激光测距误差,提出了一种新的距离估计模型,以减小时间抖动、目标反射和距离失真的影响。从实验结果来看,所提出的模型优于传统的加权平均模型,从而改善了范围估计,实现了最佳的激光测距。芬兰乌卢大学的 Hallman 等^[62]针对时间抖动误差建立了一个多目标优化模型,以减小多通道合成孔径雷达(SAR)系统信号的方位角模糊度功率和噪声。该多目标优化模型扩展了用于从混叠信号中重建 SAR 信号的多通道信号处理理论。在信号重建中,采用线性标量和多目标优化模型的二次约束方法分别进行了 L_1 范数优化, L_2 范数优化,以及二次约束优化,最终在实际测试中达到 20 m 测距中 ± 0.1 mm 的测距精度。

此外,许多新型的研究方法被提出以补偿时间抖动误差。上海激光等离子体研究所 Cui 等^[63]提出了一种飞秒范围的定时抖动测量与控制技术。上海激光等离子体研究所 Cui 等^[63]基于组合脉冲的调制方式提出了一种飞秒范围的定时抖动测量与控制技术。这种定时抖动检测方法的核心是光学互相关和电能干涉测量的集成技术。为了说明该技术,基于两个 237 fs 脉冲演示了原理验证实验。在 1 h 内,要求组合的两个脉冲的峰谷定时抖动小于 700,并且相干光束组合的平均效率可以达到 91.6%。都柏林大学 Koskin 等^[64]根据全数字锁相环的事件驱动自采样模型研究时间抖动行为,采用离散时间模型进行稳态分析。结果表明,数字抖动是模型的两个控制参数的函数,可以映射到多维集上并通过一个简单函数进行近似。后者可用于在控制参数约束下执行时间抖动误差补偿。多伦多大学的 Mao 等^[65]在不同脉冲重复率的锁模相干梳状激光器中研究了从光学相位噪声测量获得时序抖动的方法。根据从光学相位噪声中测量定时抖动的能力不受所研究激光器的重复频率的限制,该文证明了其在 5.4 Tbit/s 传输速率下的传输能力和时间抖动抑制能力。

4 测距误差补偿面临的挑战

由前文所述可知,脉冲激光飞行时间测距误差补偿方法得到了广泛的研究,也应用在诸多领域,但仍存在诸多不足。其中补偿自适应性和在线实

时智能校准为亟待解决的问题。

补偿自适应性是针对多种系统、多种误差机制或多种补偿需求,完成脉冲激光飞行时间测距误差自主补偿。现有关于补偿自适应性的研究略显不足。针对此问题韩国科学技术研究院 Kwon 等^[66]采用双采样判决反馈均衡器来优化时间误差补偿,并得出最小二乘/自适应滤波器等融合算法可以提高补偿自适应性能的结论。然而该方法在大行程变化时,性能大幅度下降。南京大学 Zhu 等^[67]提出了一种自适应控制方法,该方法使用压电致动的转向镜来主动抵抗抖动并实现精确的指向。基于自适应晶格递归最小二乘滤波器构建自适应控制器,该滤波器利用来自位置感应检测器的传感器数据实时识别干扰信息。同样,对于系统参数变化较大的系统,该方法自适应能力较差。

在线实时智能校准是解决脉冲激光电路测量系统随环境的变化导致参数偏离较大的问题,需要在线修正补偿模型。现有的脉冲激光飞行时间测距误差补偿方法对传统补偿算法与机器学习算法的融合度不高,相关研究较少。美国罗德岛大学的 Yao 等^[68]基于卷积神经网络(CNN)开发了一种移动平均校正机制的激光测距。Fang 等^[69]将 Kalman 滤波器与强化学习相结合,建立在线智能校正模型,以提升测量稳定性,但该方法实时性差,无法完成在线校准任务。

5 结 论

主要介绍了脉冲激光飞行时间测距技术的基本原理,分析了脉冲激光飞行时间测距过程中飞行时间测量误差的形成原因并对误差进行分类。针对计时误差、走离误差和时间抖动等,阐述了针对飞行时间测量误差的各类误差补偿方法及最新相关研究成果。最后总结了现阶段激光 TORF 误差补偿面临的挑战。

目前,脉冲激光飞行时间测距误差的补偿技术发展方向包括:

- 1) 利用数字孪生技术,加速深度学习技术与全数字仿真技术的融合,利用阈值辨识方法,滤除噪声干扰,达到 TOFR 补偿自适应;

- 2) 滤波算法轻量化设计。基于传统模型加速自适应学习模型的收敛速度,以提升在线实时智能校准能力。

参 考 文 献

- [1] Kurtti S, Jansson J P, Kostamovaara J. A CMOS receiver-TDC chip set for accurate pulsed TOF laser ranging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2208-2217.
- [2] Ouyang T C, Dong G P, Qiu J R. Research progress in solid-state lasers based on rare earth ion-doped oxyfluoride glass ceramics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071608.
欧阳天昶, 董国平, 邱建荣. 基于稀土离子掺杂氟氧化物微晶玻璃材料的固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071608.
- [3] Ishizaki Y, Zhang C, Set S Y, et al. A novel software-based optical sampling scheme for high-precision and interference-free time-of-flight LiDAR [C]//CLEO: Applications and Technology 2020, May 10-15, 2020, Washington, DC, United States. Washington, D.C.: OSA, 2020: AF3M.1.
- [4] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1204001.
井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1204001.
- [5] Song Z Q, Zhu J G, Xie T P, et al. Research progress on security LiDAR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100002.
宋启奇, 朱精果, 解天鹏, 等. 安防激光雷达研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0100002.
- [6] Pasquinelli K, Lussana R, Tisa S, et al. Single-photon detectors modeling and selection criteria for high-background LiDAR[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7021-7032.
- [7] Qi R Y, Li K, Yang S H, et al. Elimination of backscatter noise of underwater LiDAR using independent component analysis algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0401004.
齐若伊, 李坤, 杨苏辉, 等. 基于独立元分析的水下激光雷达后向散射噪声去除方法[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0401004.
- [8] Lu T X, Zhang Y R, Zhang Y F, et al. A constant fraction discriminator for laser pulse ranging[J]. Microelectronics, 2019, 49(6): 812-816.
路统霄, 张有润, 章玉飞, 等. 一种用于激光脉冲测距的恒比定时电路[J]. 微电子学, 2019, 49(6): 812-816.
- [9] 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.
- [10] Fang J, She C, Liu J P. A denoising method based on photon counting lidar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(4): 10-15.
方剑, 余忱, 刘金鹏. 一种基于光子计数激光雷达的去噪方法[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(4): 10-15.
- [11] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [12] Yang J Q, Liu X L, Gu G H, et al. A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 100: 28-36.
- [13] Cucerca S, Didyk P, Seidel H P, et al. Computational image marking on metals via laser induced heating[J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(4): 1-11.
- [14] Xie G C, Ye Y D, Luo Z X, et al. Light echo stability of pulsed laser ranging of flight targets[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091207.
谢庚承, 叶一东, 雒仲祥, 等. 飞行目标脉冲激光测距的回光稳定性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091207.
- [15] Cho Y, Yoon Y, Lyu J, et al. Auto gain control method using the current sensing amplifier to compensate the walk error of the TOF LiDAR (ICCAS 2019) [C]//2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), October 15-18, 2019, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 1403-1406.
- [16] Wang X Y, Ma R, Li D, et al. A low walk error analog front-end circuit with intensity compensation for direct ToF LiDAR[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(12): 4309-4321.
- [17] Bai X F, Feng D, Qin C, et al. Design and experimental study of high precision pulsed laser ranging system[J]. Laser Journal, 2019, 40(10): 6-10.
白雪菲, 冯迪, 秦川, 等. 高精度脉冲激光测距系统设计及实验研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(10): 6-10.

- [18] Won J Y, Lee J S. Time-to-digital converter using a tuned-delay line evaluated in 28-, 40-, and 45-nm FPGAs[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(7): 1678-1689.
- [19] Xiao J, Lopez M, Hu X G, et al. A continuous wavelet transform-based modulus maxima approach for the walk error compensation of pulsed time-of-flight laser rangefinders[J]. *Optik*, 2016, 127(4): 1980-1987.
- [20] Kontorov S M, Cherepenin V A, Kulagin V V, et al. Signal spectral-interval estimation in fast photonic analog-to-digital converters[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), August 1-4, 2018, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2018: 967-972.
- [21] Rostami M S, Saberi M, Maymandi-Nejad M, et al. A low-power time-to-digital converter for sensor interface circuits[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 67(12): 2853-2857.
- [22] Yan P H, Chen D R, Li X G, et al. High precision time interval measurement method applied to laser radar[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017 (11): 104-107.
严培辉, 陈殿仁, 李兴广, 等. 应用于激光雷达的高精度时间间隔测量方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2017 (11): 104-107.
- [23] Xu X B, Zhang H, Luo M Z, et al. Research on target echo characteristics and ranging accuracy for laser radar[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 330-339.
- [24] Huang M S, Liu X C, Ma P. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (3): 0317004.
黄民双, 刘晓晨, 马鹏. 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0317004.
- [25] Zheng H, Ma R, Liu M L, et al. A linear dynamic range receiver with timing discrimination for pulsed TOF imaging LADAR application[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(11): 2684-2691.
- [26] Pi Y H, Wang C Z, Song Y J, et al. Ultra-low timing jitter femtosecond laser technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201058.
皮一涵, 王春泽, 宋有建, 等. 极低时间抖动的飞秒激光技术(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201058.
- [27] Jansson J P, Koskinen V, Mantyniemi A, et al. A multichannel high-precision CMOS time-to-digital converter for laser-scanner-based perception systems [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(9): 2581-2590.
- [28] Chen L Y, Yang C K K. A 19-GHz pulsed-coherent ToF receiver with 40- μm precision for laser ranging systems[C]//ESSCIRC 2019 - IEEE 45th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC), September 23-26, 2019, Cracow, Poland. New York: IEEE Press, 2019: 191-194.
- [29] Tancock S, Arabul E, Dahnoun N. A review of new time-to-digital conversion techniques[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(10): 3406-3417.
- [30] Machado R, Cabral J, Alves F S. Recent developments and challenges in FPGA-based time-to-digital converters[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(11): 4205-4221.
- [31] Kim J, Kim Y H, Kim K, et al. A hybrid-domain two-step time-to-digital converter using a switch-based time-to-voltage converter and SAR ADC[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2015, 62(7): 631-635.
- [32] Jansson J P, Keränen P, Jahromi S, et al. Enhancing nutt-based time-to-digital converter performance with internal systematic averaging[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 69(6): 3928-3935.
- [33] Razmdideh R, Saneei M. All-digital delay line-based time difference amplifier in 65 nm CMOS technology [J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2019, 13(4): 421-427.
- [34] Khalatpour A, Paulsen A K, Deimert C, et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1): 16-20.
- [35] Zhang L M, Zhang Y, Zhao X. Study on flight time measurement laser ranging sensor based on TDC[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(12): 71-74.
张黎明, 张毅, 赵欣. 基于 TDC 的激光测距传感器飞行时间测量研究[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30 (12): 71-74.
- [36] Wang Y G, Cao Q, Liu C. A multi-chain merged tapped delay line for high precision time-to-digital

- converters in FPGAs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(1): 96-100.
- [37] Li B, Meng L F, Li J, et al. High precision time interval measurement method of detecting LSS-UAV [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 248-253.
李波, 孟立凡, 李晶, 等. 探测低慢小目标的高精度时间间隔测量方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 248-253.
- [38] Li R Y, Zhang C X, Wang P, et al. Design of pulsed laser ranging system based on TDC-GP22[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(6): 848-852.
李瑞艳, 张春熹, 王鹏, 等. 基于 TDC-GP22 的脉冲激光测距系统设计[J]. 半导体光电, 2018, 39(6): 848-852.
- [39] Lusardi N, Garzetti F, Geraci A. The role of sub-interpolation for delay-line time-to-digital converters in FPGA devices[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 916: 204-214.
- [40] Lee D J, Yuan F, Khan G. Digitally interpolated pre-skewed delay-line digital-to-time converter with minimum nonlinearity and latency[C]//2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), August 4-7, 2019, Dallas, TX, USA. New York: IEEE Press, 2019: 892-895.
- [41] Gammoh K, Peterson C K, Penry D A, et al. Linearity theory of stochastic phase-interpolation time-to-digital converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(12): 4348-4359.
- [42] Zhao X, Wang D, Zhang H, et al. Research progress on key technologies of pulsed semiconductor laser ranging[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(6): 9-15.
赵鑫, 王丹, 张贺, 等. 脉冲型半导体激光测距关键技术研究进展[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(6): 9-15.
- [43] Wang H Z, Xin D S, Zhang J J, et al. Pulsed laser ranging time-interval measuring technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1751-1754.
王洪喆, 辛德胜, 张剑家, 等. 脉冲激光测距时间间隔测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1751-1754.
- [44] Baharmast A, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A low noise, wide dynamic range TOF laser radar receiver based on pulse shaping techniques[C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 27-30, 2018, Florence, Italy. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [45] Szplet R, Jachna Z, Kwiatkowski P, et al. A 2.9 ps equivalent resolution interpolating time counter based on multiple independent coding lines[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(3): 035904.
- [46] Li K Y, Zheng H X, Mo B, et al. A new circuit topology for high-performance pulsed time-of-flight laser radar receivers[C]//2018 31st IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), September 4-7, 2018, Arlington, VA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 78-83.
- [47] Kurtti S, Kostamovaara J. An integrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 146-157.
- [48] Hong C, Kim S H, Kim J H, et al. A linear-mode LiDAR sensor using a multi-channel CMOS transimpedance amplifier array[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(17): 7032-7040.
- [49] Wang J, Zheng T, Lei P, et al. Study on deep learning in radar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(4): 395-411.
王俊, 郑彤, 雷鹏, 等. 深度学习在雷达中的研究综述[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 395-411.
- [50] Hu S J, He Y, Yu J Y, et al. Method for solving echo time of pulse laser ranging based on deep learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1010001.
胡善江, 贺岩, 俞家勇, 等. 基于深度学习的脉冲激光测距回波时刻解算方法[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1010001.
- [51] Yang J G, Thompson J, Huang X T, et al. Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4214-4225.
- [52] Zhang S L, Chen S Y, Xi F, et al. Fast reconstruction of moving target echoes based on sub-Nyquist radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(10): 2098-2107.
张素玲, 陈胜垚, 席峰, 等. 亚奈奎斯特采样雷达的运动目标回波信号的快速重构[J]. 电子学报, 2019,

- 47(10): 2098-2107.
- [53] Qiang X M. Targets detection and tracking in wideband radar[D]. Xi'an; Xi'an University of Electronic Science and technology, 2018 .
强晓敏. 宽带雷达目标检测与跟踪[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [54] Huang M S, Li J, Tian F. Timing detection based on resonance for a pulsed time-of-flight laser range finder[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(8): 874-876, 899.
黄民双, 李剑, 田丰. 基于共振的激光脉冲飞行时间测距时刻探测技术[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(8): 874-876, 899.
- [55] Jiang B, Huang M S, Guan Z H. Pulsed laser ranging method using cyclostationary random sequences [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101004.
姜博, 黄民双, 关在辉. 基于循环平稳随机序列的脉冲激光测距方法 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101004.
- [56] Quan Y H, Wu Y J, Li Y C, et al. Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(3): 348-352.
- [57] Wu Q H, Zhao F, Ai X, et al. Compressive-sensing-based simultaneous polarimetric HRRP reconstruction with random OFDM pair radar signal[J]. IEEE Access, 2018, 6: 37837-37849.
- [58] Jiang Y S, Karpf S, Jalali B. Time-stretch LiDAR as a spectrally scanned time-of-flight ranging camera [J]. Nature Photonics, 2020, 14(1): 14-18.
- [59] Huang M S, Ma P, Liu X C. Multi-pulse laser ranging method for pre-detection with high frequency resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(7): 20172079.
黄民双, 马鹏, 刘晓晨. 高频共振探测多脉冲激光测距方法[J]. 物理学报, 2018, 67(7): 20172079.
- [60] Wu J Z. Research on time jitter processing in high speed real-time sampling[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
吴俊璋. 高速实时采样中时间抖动的处理方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [61] Chua S, Guo N Q, Tan C, et al. Improved range estimation model for three-dimensional (3D) range gated reconstruction[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2031.
- [62] Hallman L W, Jahromi S, Jansson J P, et al. On two-dimensional range finding using a ~ 1 nJ/ ~ 100 ps laser diode transmitter and a CMOS SPAD matrix [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-12.
- [63] Cui Y, Gao Y Q, Zhao Z X, et al. High precision and large range timing jitter measurement and control of ultrashort laser pulses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2215-2217.
- [64] Koskin E, Bisiaux P, Galayko D, et al. Jitter optimisation in a generalised all-digital phase-locked loop model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(1): 77-81.
- [65] Mao Y X, Lu Z G, Liu J R, et al. Pulse timing jitter estimated from optical phase noise in mode-locked semiconductor quantum dash lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4787-4793.
- [66] Kwon K, Yoon J H, Jeon Y, et al. An electronic dispersion compensation transceiver for 10-and 28-Gb/s directly modulated lasers-based optical links [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(1): 55-64.
- [67] Zhu W, Rui X T. Adaptive control of a piezo-actuated steering mirror to restrain laser-beam jitter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7873-7881.
- [68] Yao Z Y, Mauldin T, Xu Z Y, et al. An integrated OFDR system using combined swept-laser linearization and phase error compensation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [69] Fang B, Zhong S C, Zhang Q K, et al. Full-range line-field optical coherence tomography for high-accuracy measurements of optical lens[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7180-7190.