引文格式:毛庆洲,周昊,吴安磊,等.高精度测绘激光雷达研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2374-2394.DOI:10.13203/j.whugis20260348

Citation:MAO Qingzhou,ZHOU Hao,WU Anlei,et al.Advances in Precision Surveying LiDAR[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(11):2374-2394.DOI:10.13203/j.whugis20260348

高精度测绘激光雷达研究进展

毛庆洲[1,3] 周 昊[1] 吴安磊[1] 周宝定[2] 段志鑫[1] 李清泉[2]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 深圳大学广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳,518060

3 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:高精度测绘激光雷达是以获取目标及场景高精度三维空间信息为核心任务的主动式光电探测系统,在实景三维重建、数字孪生城市和新型基础测绘等重大应用中发挥着不可替代的作用。在概念内涵上,测绘激光雷达与避障激光雷达在任务目标、空间基准和指标侧重上存在本质区别,其性能评价涵盖几何测量、回波探测、时间同步和环境适应性等多个维度。在技术体制上,从探测原理、光源波长、扫描方式和搭载平台4个维度可系统划分其分类体系,各类平台在测程、精度和覆盖范围上呈现明显的分化与互补格局。在关键技术层面,全波形处理、测距模糊与多脉冲解算、扫描机构与精密测角、系统误差标定与动态补偿是决定系统性能的核心环节,国内外在这些领域的研究各有侧重且仍面临若干技术瓶颈。未来,测绘激光雷达将在全波形实时处理、高重频测距模糊解算、扫描机构与精密测角、系统误差标定与动态补偿等本源技术上持续突破,并呈现多体制融合、固态扫描、光子集成以及低成本化等发展趋势。

关键词:测绘激光雷达;全波形处理;测距模糊;系统标定;扫描方式;探测体制

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-01

DOI:10.13203/j.whugis20260348 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2374-21

Advances in Precision Surveying LiDAR

MAO Qingzhou[1,3] *ZHOU Hao*[1] *WU Anlei*[1] *ZHOU Baoding*[2]
DUAN Zhixin[1] *LI Qingquan*[2]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Guangdong Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

3 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: Surveying light detection and ranging (LiDAR) is an active electro-optical detection system whose core mission is to acquire high-precision three-dimensional (3D) spatial information of targets and scenes, playing an irreplaceable role in applications such as 3D real-scene reconstruction, digital twin cities, and new fundamental surveying and mapping. Over the past decades, it has evolved from single-point rangefinders into sophisticated multi-platform, multi-regime systems, driven by breakthroughs including full-waveform digitization, multi-pulse resolving techniques, single-photon sensitive detection, and wavelength diversification from 1 064 nm to eye-safe 1 550 nm, blue-green dual-wavelength, and multispectral sources. Surveying LiDAR is fundamentally distinguished from environment perception LiDAR—widely deployed in autonomous driving and robotics—by its mission objectives, spatial reference framework, and performance metric priorities. While perception LiDAR emphasizes high frame rate and real-time object detection, surveying LiDAR demands millimeter-to-centimeter ranging accuracy, arcsecond-level angular precision, and full-waveform recording capability. A comprehensive performance indicator system is established, covering geometric measurement, echo detection, time synchronization, and environmental adap-

基金项目:国家自然科学基金(42471478);湖北省中央引导地方科技发展资金(2026EKA008)。

第一作者:毛庆洲,博士,教授,主要研究方向为高精度激光雷达核心传感器及精密工程测量应用。qzhmao@whu.edu.cn

通信作者:周昊,博士。zhouhao2015@whu.edu.cn

tability, along with the corresponding metrological infrastructure including laboratory calibration, outdoor baseline fields, and traceability chains. The technical architecture is systematically classified along four dimensions: detection principle (pulsed time-of-flight, amplitude-modulated continuous wave, and frequency-modulated continuous wave), laser wavelength (centered on 1 550 nm, 1 064 nm, and 532 nm with extensions toward multispectral sources), scanning mechanism (rotating mirrors, galvanometer scanners, Risley prism pairs, and wedge mirrors), and carrying platform (space-borne, large airborne, small unmanned aerial vehicle-borne, terrestrial static, mobile mapping, and portable systems). These platforms exhibit distinct differentiation and complementarity in ranging capability, accuracy, and coverage. Four key technology areas are critically reviewed. Full-waveform processing covers preprocessing, single-echo ranging methods, and multi-echo decomposition approaches including mathematical modeling, deconvolution, and deep learning-based methods. Ranging ambiguity and multi-pulse resolving techniques address the fundamental speed-of-light constraint through coding modulation, multiple repetition frequencies, and point cloud-based resolving, with pulse position modulation emerging as a particularly effective approach. Scanning mechanism and precision angle measurement involve the evolution of drive mechanisms, multi-readhead optical encoders with electronic interpolation, and compensation of beam misalignment during high-speed scanning. System error calibration and dynamic compensation encompass ranging error modeling, scan calibration model development from theodolite-like geometric models to ray-tracing-based beam vector models, self-calibration methods for various platforms, and environmental corrections including atmospheric refraction and refractive correction for bathymetric LiDAR. Future development will focus on the continuous advancement of core sensor technologies, including real-time online full-waveform processing, ranging-ambiguity resolution for high-repetition-rate systems, scanning mechanisms with precision angle measurement, and systematic error calibration with dynamic compensation. Multi-regime fusion, solid-state scanning, photonic integration, and cost reduction enabled by mass production will further reshape the technological landscape of surveying LiDAR.

Key words: surveying LiDAR; full-waveform processing; ranging ambiguity; system calibration; scanning mechanism; detection regime

全球数字化转型催生了实景三维重建、数字孪生城市、智慧城市管理以及新型基础测绘体系建设等一系列重大需求,这些应用场景对三维空间信息的精度、密度、覆盖范围和获取效率提出了前所未有的高要求。作为一种主动式遥感手段,测绘激光雷达凭借其在大范围、高精度、高分辨率三维信息获取方面的独特优势,已成为支撑上述任务的核心装备。该系统可灵活搭载于卫星、大型飞机、无人机、地面站点、汽车、船舶乃至背包、手持等多样化平台,能够穿透植被冠层、浅水水体并适应复杂地形,从而在地形测绘、浅水测深、林业资源调查、电力线路巡检、轨道交通监测、海岸带变迁分析、冰川测量以及文化遗产数字化等众多领域发挥着不可替代的作用。

激光雷达测绘技术经历了数十年的技术演进与代际更迭。从系统形态来看,激光雷达最初仅能获取离散的单点距离数据,随后通过引入机械扫描机构或借助搭载平台的运动,分别形成了二维断面扫描和三维点云获取能力,具体实现方式取决于应用场景对覆盖范围和采样密度的需求。在探测器件与探测体制方面,早期系统多采用光电倍增管作为核心光敏元件,随后雪崩光电二极管(avalanche photon diode, APD)凭借体积小、响应快和易于阵列化的优势逐步成为主流,配合高速模数转换器实现了回波波形的全数字化记录。2003 年,冰、云和陆地高程卫星(ice, cloud, and land elevation satellite, ICESat)搭载的地球科学激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)首次将全波形技术引入星载平台,在全球尺度高程测量中展现了波形数据在垂直结构解析方面的独特价值[1];2004 年,RIEGL 公司推出首款商业化机载全波形激光雷达 LMS-Q560,推动了全波形技术从实验室走向工程应用的进程。全波形技术使回波信号从简单的到达时刻扩展为完整的时间剖面,为多目标分辨和物理属性反演提供了数据基础。在提升脉冲重复频率以追求更高点云密度的过程中,高重频与远测程之间的测距模糊矛盾日益突出,多

脉冲解算技术[2]应运而生,有效突破了这一制约,为后续系统在脉冲重频和测程指标上的持续提升奠定了基础。在追求更高灵敏度的驱动下,单光子探测体制逐步走向前台。2018年,ICESat-2搭载的先进地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)采用微脉冲光子计数技术,以10 kHz高重频将沿轨采样间隔缩短至0.7 m[3-4];Leica SPL100等系统[5]则将单光子探测拓展至机载平台,表明单光子探测技术已在部分机载系统中实现业务化应用。在激光光源方面,波长扩展与功能融合的趋势同样显著。从早期灯泵浦的1 064 nm固体激光器,到以1 550 nm为核心波段的光纤激光器逐步成熟,再到满足浅水测深需求的蓝绿双波长系统[6-8]和可同步获取多波段反射信息的多光谱激光雷达[9-10]相继出现,测绘激光雷达的光源体系日益丰富。更为深刻的变化体现在感知维度的跃升上,当代前沿系统已从专注于三维几何坐标的单一测量,逐步融合回波强度、全波形特征、光谱反射率以及基于多普勒效应的瞬时速度场等多重物理属性,使点云从静态的空间描述向多维物理参数的密集载体演进。正是上述理论与技术的持续积累,奠定了当代测绘激光雷达的性能基础。

本文围绕测绘激光雷达传感器本身,首先厘清其概念内涵与性能评价基准,进而从探测原理、光源波长、扫描方式和搭载平台4个维度梳理其技术体制与分类体系,在此基础上系统评述若干关键技术的国内外研究进展与技术瓶颈,最后展望测绘激光雷达的未来发展方向。

1 测绘激光雷达的概念内涵与性能评价基准

1.1 概念界定与基本特征

激光雷达是一类通过发射激光束并接收目标反射或散射回波,进而获取探测对象距离、速度、物理属性等信息的主动式光电探测系统。其中,以获取大范围目标及场景的高精度三维空间信息为核心任务的一类系统通常被称为测绘激光雷达[11]。该系统与高精度位置与姿态测量系统深度耦合,旨在获取目标及场景在大范围覆盖下的高密度、高精度三维空间坐标及丰富的回波物理特征,其硬件架构体系对测距精度、测角精度、最大测程和点云密度等核心指标有着极为严苛的要求。近年来,应用于自动驾驶和智能机器人领域的环境感知激光雷达在多线束集成、高数据点频、芯片化和低成本化方面发展迅猛。尽管两类系统在底层光学探测原理上同宗同源,但在任务目标、设计理念与技术侧重上存在显著区别。表1从多个核心维度对两者进行了系统对比。

测绘激光雷达所指出的“高精度”并非一个绝对统一的精度门槛,而是一个与任务尺度和测量基准相适配的分层概念。其核心要义包含两方面:(1)测量结果具有可量化的测距、测角与点位精度指标,并可通过计量检定装置和标准基线场实现精度溯源;(2)精度水平与任务约束相匹配——星载系统以全球覆盖为首要目标,系统主要评价高程误差,分米级高程精度即属国际先进水平;机载系统面向大面积地形测绘,系统主要评价点云三维坐标精度,通常要求厘米级精度;地面架站式系统则重点关注近距离测距误差和重复精度,通常要求毫米至亚毫米级。上述不同量级的精度在其各自任务场景中均属于“高精度”范畴,共同构成从全球尺度到局部尺度的完整精度谱系,不同指标应注明距离、地表条件和统计口径[4,12]。

1.2 关键性能指标体系与评测方法

测绘激光雷达的性能指标体系是评价系统能力、指导系统设计以及进行产品间横向对比的基础,不同应用场景对指标的要求各有侧重,但核心性能维度可归纳为以下几个方面。

1.2.1 几何测量性能

几何测量性能是测绘激光雷达最根本的指标维度,直接决定了三维点云的质量和可用性。

1)最大测程与最小测程:二者共同定义了系统的有效工作区间。最大测程通常以特定反射率目标和大气能见度为条件,其物理上限受激光雷达方程约束,由发射功率、接收孔径、大气衰减和目标反射特性共同决定。最小测程则主要受限于收发结构引起的近距几何盲区、发射脉冲宽度对回波信号叠加的影响,以及接收器在强回波后的恢复时间。

2)最大测深:专门针对蓝绿测深激光雷达的性能指标,通常以Secchi盘深度为参照基准。Secchi盘深度是水体透明度的经典度量,测深激光雷达的最大探测深度一般表示为数倍Secchi盘深度,具体倍数取决于系统参数和水体光学特性。该指标直接决定了系统在浅水测深应用中的有效作业范围。

表 1　测绘激光雷达与环境感知激光雷达的特征对比

Table 1　Comparison of Characteristics Between Surveying LiDAR and Environment Perception LiDAR

对比维度	测绘激光雷达	环境感知激光雷达
任务目标	构建物理世界的高保真三维几何基准	实时感知与理解周围环境,解析场景中目标的类别、位置与运动状态,为运动规划与决策提供依据
空间基准	与定位定姿系统深度耦合,将数据映射至全球统一坐标系,强调目标间几何拓扑关系的精确还原	以传感器为中心,结合轻小型惯性测量单元和同步定位与建图算法实现局部建图与自我定位
核心指标侧重	毫米至厘米级测距精度、百米至千米有效测程、角度测量高分辨率与高重复性、扫描重现性、回波物理特征的高保真记录	高帧率、高线数、低延迟、高数据吞吐率,紧凑性、成本控制、车规级可靠性及抗干扰能力
数据维度与特征	支持多回波(如5次以上)、全波形记录、多光谱协同及精确的反射率物理标定	提取离散回波(单/双回波)和相对反射强度,以减轻车载端算力负担
实时性与算力	除部分在线波形解算外,大量核心操作(航带平差、波形分解)依赖事后高算力解算	强调实时目标检测、分类与跟踪,在线轻量化处理
标定与误差控制	建立严密的测距、测角误差校准模型,依赖高精度标定装置或标准基线场进行精度溯源	以出厂标定和在线自校准为主,侧重在动态环境中保持感知稳定性

3)最大脉冲重复频率与点频:对于脉冲式系统,最大脉冲重复频率决定了系统单位时间内可发射的激光脉冲数上限,其与最大测程之间存在由光速决定的基本制约关系,过高重频将引入多脉冲测距模糊。对于调幅连续波和调频连续波等非脉冲测距体制,则以点频直接描述系统的测量速率。该指标是衡量采集效率的通用指标,与测距精度、测角精度等计量性能指标相互独立。星载系统赫兹级重频与机载单光子体制兆赫兹级等效点频的差异,主要源于任务尺度与探测体制的不同,并不直接反映测量精度的高低,跨平台比较时应以测距误差、测角误差和点位精度等计量指标为准。例如,高分七号的 3 Hz是发射重频[13];SPL100 的等效 6 MHz由最高 60 kHz发射重频与 100 束并行采样形成[14],并非单束发射重频,也不等于滤波后的有效地面点频。单位面积点密度还取决于扫描方式、平台运动及有效回波比例。采样速率与测量精度属于不同指标,但会通过脉冲能量、信噪比等因素相互制约,不能仅凭频率高低判断精度优劣。

4)测距分辨率、测距精度与测距重复精度:测距分辨率表征系统可分辨的最小距离差异,测距精度表征距离测量值与真值的偏离程度,测距重复精度表征多次测量结果之间的一致程度。三者共同构成评价系统测距性能的完整维度。

5)测角与扫描精度:光束指向控制的空间分辨率及动态重复误差。扫描模块的精度直接决定了目标在远距离下的横向定位水平。其中,测角分辨率、测角精度与测角重复精度的定义同上。

6)扫描频率与扫描视场角:扫描频率决定了扫描机构在单位时间内完成完整扫描周期的次数,扫描视场角则决定了单次扫描的空间覆盖范围,其大小和形状因扫描方式而异。二者与脉冲重复频率及点频共同决定了点云的空间分布密度和均匀性。

1.2.2　回波探测性能

回波探测性能反映了系统对目标物理特征的捕获与表征能力。

1)光斑发散角:直接决定系统对细小目标(如电力线)的有效分辨能力,通常在毫弧度量级。

2)多回波次数与多回波分辨能力:多回波次数决定了系统在单个激光光斑内可区分目标层次的上限,多回波分辨能力则表征系统区分不同高度层目标的最小间距,二者共同构成植被穿透和地形提取的关键性能基础。

3)全波形记录能力:以 GHz级采样率完整记录回波脉冲的时间剖面,为波形分解、目标分类和辐射特征分析提供高时间分辨率的原始数据。

4)回波强度分辨率与反射率定标精度:回波强度分辨率表征系统区分目标反射特性细微差异的能力,反射率定标精度则表征系统对目标反射特性测量的准确程度。

1.2.3　环境适应性

环境适应性描述系统在不同工作条件下的性能保持能力,决定了测绘激光雷达在复杂外场环境中的实际可用性。该类指标通常不直接体现为单一数值,而是通过限定条件下的性能衰减程度加以表征。

1)不同反射率目标的探测能力:决定系统的实际可用场景范围。自然场景中地物反射率差

异显著,低至约5%的沥青路面与高达80%以上的积雪之间存在16倍的反射率跨度,系统需在宽动态范围内保持稳定的测距精度和回波探测能力。

2)背景光抑制能力:反映系统在强日光等环境光干扰条件下的信噪比保持水平。对于单光子探测体制,背景光噪声是制约白天作业效能的核心因素;对于线性探测体制,强背景光也会抬高探测器基底电流,压缩有效动态范围。

3)大气能见度适应性、工作温度范围及防护等级:大气能见度直接影响激光大气传输衰减,决定了特定气象条件下的有效测程。工作温度范围和防护等级则反映系统在极端温度和雨雪、沙尘等复杂工况下的可靠运行能力,对于需要长期野外部署的架站式和移动测量系统尤为重要。

上述各项指标并非彼此独立,而是通过激光雷达方程和系统设计参数相互耦合。以脉冲重频为例,提高重频可有效提升点云密度,但过高的重频将导致单脉冲峰值功率下降,进而压缩最大测程,同时还会引入多脉冲测距模糊问题。理解指标间的制约关系,是正确评价和选用测绘激光雷达的前提。

1.3 评测方法与计量检测体系

测绘激光雷达的性能评测需要依托标准化的测试方法和可溯源的计量基准[13]。根据测试环境的不同,评测方法可分为室内实验室检测、室外基线场检测和动态平台检校3个层次,三者共同构成从器件级到系统级的完整评测链路。

室内实验室检测主要针对测距和测角两个核心环节进行独立标定。测距精度的检定通常采用标准长度基线[15-16]、光学延迟线[17]或激光干涉仪[18]等高精度长度基准,将被测系统的测距值与标准值进行比对。测角精度的检定则借助精密转台[19]、高精度多面棱体结合自准直仪[20-21]、激光干涉仪[22-23]等角度基准装置,对扫描系统的角度编码器进行逐级校准。此外,脉冲波形质量、接收带宽和信噪比等电子学参数也可在实验室环境下进行定量测试。

室外基线场检测是连接实验室标定与实地作业的关键环节。地面固定基线场[24-25]通常布设已知精确坐标的角反射器阵列或靶标阵列,通过将激光雷达测量值与控制网已知坐标进行比对,评定系统的整体三维测量精度。对于机载和星载系统,还需建立专用的航空检校场[26-28],在开阔平坦区域布设大面积控制点,并设计对飞、交叉等特定检校航线,以分离和评定各项系统误差。

动态平台检校方法是针对车载和机载等运动平台的特殊需求。车载系统的精度评定常采用闭合环路径和已知特征点比对[29]的方法。机载系统则在此基础上,进一步利用航带重叠区的一致性作为内符合精度评价依据,以地面控制点作为外符合精度的检核基准,两种约束条件联合解算系统安置参数与扫描误差模型系数。基于航带重叠的自检校方法[30-32]在无控制点场景下展现出了独特的优势,成为动态平台评测的重要补充。

标准溯源体系是保障测绘激光雷达测量结果具有法定效力和跨系统可比性的制度基础。在国际层面,ISO 17123系列标准规定了大地测量与测绘仪器的现场测试程序,美国摄影测量与遥感学会发布的精度标准则针对机载激光雷达提供了系统的精度分级与评价框架。针对地面三维扫描仪,美国材料与试验协会构建了完备的性能评估测试体系,其中,ASTM E2544-11a界定了三维成像系统的专业基础术语,ASTM E2938-15和ASTM E3125-17则分别明确了中等测程下三维成像系统相对距离测量性能以及球面坐标三维成像系统点对点距离测量性能的标准测试方法。中国已形成涵盖数据获取与质量评价的标准体系,机载激光雷达数据获取技术规范(CH/T 8024—2011)和机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法(GB/T 36100—2018)等典型测绘行业与国家标准,结合地面激光扫描仪校准规范(JJF 1406—2013)等国家计量技术规范,共同构成了国产激光雷达产品检验与计量溯源的主要依据。完整的溯源链从国家长度基准和角度基准出发,经由中国计量科学研究院的检定装置传递至厂商的出厂标定系统和第三方检测认证机构,最终延伸至用户的现场核验环节。

当前,测绘激光雷达的标准化与溯源体系仍面临若干挑战。不同厂商的性能指标定义和测试条件尚未完全统一,产品规格书中的参数缺乏严格的可比性。单光子探测、多光谱融合等新体制系统对应的评测标准尚属空白,现有标准体系难以覆盖其全部技术特征。动态条件下的精度评定方法尤其是无控制点场景的可信度验证,仍有待进一步规范。国内计量检测基础设施的覆盖范围与国际化互认程度仍在建设过程中。这些不足正是当前学术界和工业界着力推进的方向,也为测绘激光雷达的大规模行业应用提供了

重要的制度性保障。

2　测绘激光雷达的技术体制与分类

测绘激光雷达的性能极限取决于底层的物理与电子学架构。本节首先从探测原理与电子学体制、激光光源与波长分类、扫描方式3个维度剖析其技术体制,随后从搭载平台的角度对其进行系统分类。

2.1　探测原理与电子学体制

测绘激光雷达的探测原理决定了系统获取目标距离信息的基本方式,电子学体制则规定了信号检测与时间测量的方法。当前,主流测绘激光雷达体制可分为脉冲飞行时间、调幅连续波和调频连续波3类。

2.1.1　脉冲飞行时间体制

脉冲飞行时间体制是目前测绘激光雷达中应用最广泛的技术方案。系统发射纳秒级宽度的激光脉冲,通过精确测量发射脉冲与目标反射回波之间的时间间隔,结合光速恒定的物理前提计算目标距离。该体制的优势在于能够以单个脉冲实现远距离测量,且可通过提高脉冲重复频率来提升点云密度。

在探测器工作模式上,线性探测是传统且成熟的方式。系统采用PIN光电二极管或APD作为接收器件,工作于线性增益区,输出电压或电流信号与入射光功率保持线性关系。通过高速模数转换器对回波脉冲进行全波形数字化采样,可在事后或在线进行精确的波形分析,提取多回波目标并反演目标的反射特性[33]。全波形技术已成为该体制下实现高精度测距和地物分类的核心手段。

单光子探测体制采用工作于盖革模式的APD或单光子雪崩二极管(single photon avalanche diode,SPAD)、硅光电倍增管(silicon photomultiplier,SiPM)阵列作为探测器,通过对激光脉冲周期内的离散回波光子进行时间维度或空间维度的统计累积生成光子计数直方图,进而解算目标的精确空间距离[34]。其根本技术优势在于具备单光子量级的极高探测灵敏度,大幅降低了系统对高功率激光光源和大口径接收光学系统的物理依赖,使得在相同发射功耗下可实现测距量程的大幅延伸或脉冲重复频率的显著跃升,从而兼顾高空宽幅作业能力与高空间分辨率点云获取。凭借在微弱信号提取上的突破,单光子探测体制已成为支撑大尺度、大落差精细化地形测绘的新一代核心技术,其面临的主要挑战在于背景光噪声的抑制和弱信号条件下的距离信息可靠提取。

从实现形态看,单光子探测体制主要为盖革模式APD(Geiger mode-APD,GM-APD)面阵与SiPM两类代表性技术路线。GM-APD面阵将探测器按像素阵列集成,每个像素在超过击穿电压的盖革模式下工作,以时间数字转换器记录光子到达时刻,可进行并行测距,单次发射脉冲即可产生面阵化的多像素测量,数据率显著提升,典型系统如Harris公司的IntelliEarth机载传感器采用32×128阵列,读出速率可达100 kHz以上,但其暗计数率较高,通常需要制冷(如−20 ℃)以维持可用信噪比,且对背景光极为敏感,白天作业须配合窄带滤波与小视场设计[35]。2016年,美国三维高程计划(3 dimensional elevation program,3DEP)对盖革模式与单光子两类机载系统开展系统评估[35],结果显示,此类系统当时尚不能完全满足为线性体制编写的现行规范要求;但评估同时指出,规范的适应性修订以及新一代传感器的改进,有望使其满足3DEP的业务需求。SiPM则由大量并联的微型雪崩单元组成,具备光子数分辨能力与模拟信号输出,对偏压和温度的敏感度相对较低,且与互补金属氧化物半导体工艺兼容、成本可控,近年来其探测效率、暗计数率与阵列规模持续提升,常见模拟SiPM将微单元输出求和,与逐像素独立计时的SPAD阵列有所不同,其增益仍受偏压和温度影响[35]。文献[37]采用SiPM、多脉冲序列及多阈值处理,在日光低信噪比条件下对125 m低反射率目标实现测距,报告的测距重复性小于20 cm。该结果验证了弱信号快速探测能力,但目前不足以证明已满足厘米级测绘要求。

总体上,单光子探测体制的工程化成熟度呈分层推进态势:星载ATLAS自2018年起实现业务化运行,机载SPL100已实现商业化试点,GM-APD面阵机载系统处于工程验证与规范适配阶段,SiPM/SPAD阵列则依托消费与机器人市场快速成熟,未来在测绘激光雷达中的渗透有望进一步加快。

2.1.2　调幅连续波体制

调幅连续波体制通过对发射激光进行正弦强度调制,测量发射信号与接收信号之间的相位差来推算目标距离[38-40]。该体制的核心在于通过调制器件对连续激光进行高频率的强度调制,对

调制器的线性度和带宽有较高要求,同时依赖精密相位检测电路实现高精度相位测量。由于相位差测量的分辨率可达毫度级,该体制能够实现毫米至亚毫米级的测距精度,主要应用于地面架站式扫描仪,在近距离高精度工业测量和文化遗产数字化等场景中占据重要地位。

2.1.3 调频连续波体制

调频连续波体制(frequency-modulated continuous wave, FMCW)[41-43]通过对发射激光的频率进行线性啁啾调制,将目标距离信息转换为回波与本振信号之间的拍频频率,通过测量拍频来反演目标距离。该体制采用相干探测方式,本振增益效应可有效提升接收信噪比,同时具备天然的抗背景光干扰能力。此外,调频连续波相干探测还可从回波的多普勒频移中同步提取目标的径向运动速度,实现距离与速度的联合测量,为点云赋予动态信息维度。这一体制目前仍处于由实验室向工程应用过渡的阶段,在测距综合性能、环境适应性、小型化及成本控制等方面尚有技术挑战,但因其独特的多维探测以及在提升测距范围[44]、测距精度[44]指标方面的潜力,已被视为测绘激光雷达的重要发展方向。尽管潜力显著,FMCW体制的工程化仍主要受制于激光器线宽与频率啁啾线性度、本振相位噪声以及相干探测对目标散射特性的敏感性,远测程条件下大气湍流引起的相位扰动与相干长度限制亦不容忽视。

近年来,光子集成技术的快速发展为突破上述瓶颈提供了重要路径:通过硅光平台将调频激光器、相干接收前端与信号处理电路集成于单一芯片,可显著降低系统的体积、成本与批次一致性风险[43]。2026年,国内研究团队进一步研制出高线性度硅基FMCW光发射芯片,采用铌酸锂电光移相器与自注入锁定技术,首次在单片硅基集成工艺下实现了窄线宽、大扫频带宽与高调频线性度等矛盾指标的协同优化[46],为测绘级FMCW激光雷达的工程化落地提供了新的技术途径。该成果属于光发射模块验证,整机仍需结合扫频校准、相位噪声补偿、收发耦合优化及热稳定封装,检验自然目标上的测距与指向误差。

2.2 激光光源与波长分类

激光光源是测绘激光雷达的核心部件,其波长、脉冲能量、重复频率和光束质量直接决定了系统的测程、精度和适用场景。当前,测绘激光雷达的工作波长主要集中在1 550 nm、1 064 nm和532 nm 3个波段,波长的选择取决于激光器自身在不同波长的技术特性、探测器响应特性、大气传输特性、目标反射特性以及人眼安全性等多重因素。

2.2.1 1 550 nm波段

1 550 nm波段是当前机载和地面测绘系统的主流选择,主要采用掺铒光纤激光器作为光源。该波段具有较高的人眼安全允许发射水平,但实际安全性仍取决于发射功率、脉冲参数和光束条件,不能仅凭波长认定无需防护。同时,1 550 nm在大气窗口内具有较低的散射损耗,适用于从数十米到数千米的广泛测程范围。探测端多采用铟镓砷材料的APD,探测器响应特性与光源波长的匹配已相当成熟。此外,得益于光纤通信产业链的成熟,该波段的光纤放大器、调制器和探测器等核心器件具有完善的供应体系和较低的规模化成本,进一步推动了1 550 nm激光雷达的普及。

2.2.2 1 064 nm波段

1 064 nm波段是最早应用于测绘激光雷达的工作波长,至今仍在星载系统和部分大型机载系统中占据重要地位,常用光源包括Nd:YAG固体激光器和掺镱光纤激光器。该波段的大气透过率高,尤其在高海拔地区表现优异,且对应的硅基探测器工艺成熟、成本低廉。其局限性在于人眼安全性较差,在地面和低空作业时需严格限制发射功率。

2.2.3 532 nm波段

532 nm波段的主要应用场景为机载浅水测深,通常由1 064 nm基频光通过倍频晶体产生。该波段正处于水体的透光窗口,对沿岸和浅水区域具有优异的穿透能力,可获取水下地形信息。在双波长测深系统中,532 nm激光与1064 nm激光同步发射,前者用于水下穿透,后者用于水面定位,二者协同完成水陆交界区域的无缝测量。

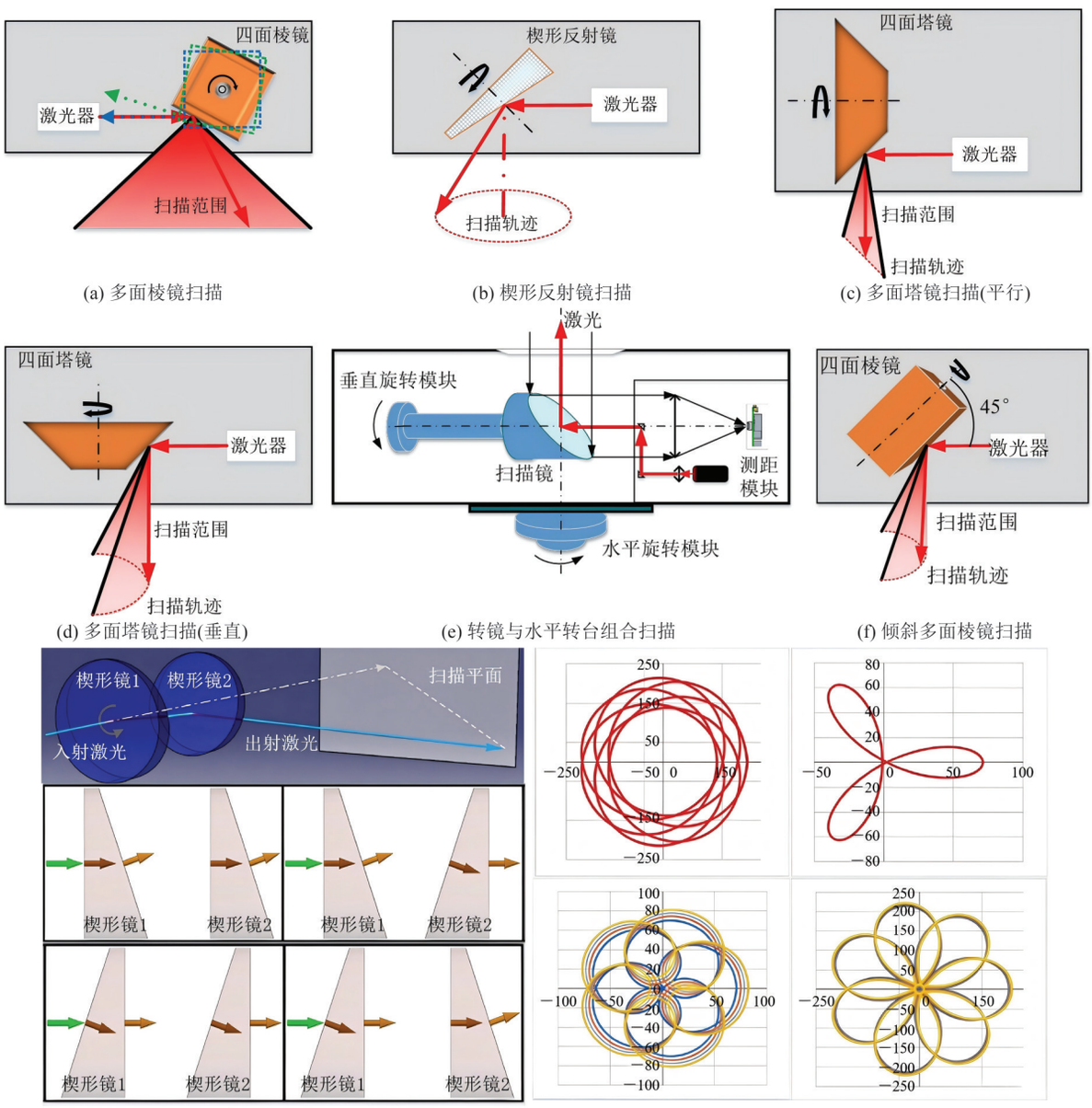
2.2.4 多波长与多光谱光源

为突破单一波长在目标分类能力上的局限,多波长和多光谱激光雷达光源近年来成为重要发展方向。多波长系统通过同时发射3个或以上分立波长的激光,以同时获取不同波段的目标反射信息。典型系统如Optech Titan搭载532 nm、1 064 nm和1 550 nm三波长激光器,能够在单次飞行中同步获取3个独立波段的三维点云,为地物覆盖分类和植被健康评估提供多光谱反射信息。

在此基础上,高光谱激光雷达将波长维度进一步扩展至数十个连续波段。该类系统通常以超连续谱激光器作为宽带光源[47],通过声光可调滤波器或可调谐滤波器进行分光,在获取三维几何信息的同时获得目标在宽波段范围内的准连续反射光谱。目前,高光谱激光雷达仍处于实验室研究和小范围验证阶段,距离工程化应用尚有差距,但其将几何与光谱信息一体化获取的技术思路,为测绘激光雷达的发展提供了新的维度。

2.3　扫描方式

扫描方式决定了激光束在空间中的指向规律和扫描轨迹,直接影响点云的空间分布、覆盖范围和均匀性,是测绘激光雷达系统设计中的关键环节。不同扫描方式在扫描轨迹、视场角利用率和点密度分布上各具特点,适用于不同的作业场景(见图 1)。



(a) 多面棱镜扫描　(b) 楔形反射镜扫描　(c) 多面塔镜扫描(平行)

(d) 多面塔镜扫描(垂直)　(e) 转镜与水平转台组合扫描　(f) 倾斜多面棱镜扫描

(g) Risley棱镜对扫描原理、4种安装方式及其部分扫描轨迹[49-50]

图 1　典型扫描原理及其轨迹示意图

Fig. 1　Diagram of Typical Scanning Principles and Their Trajectories

2.3.1　转镜扫描

转镜扫描通过电机驱动反射镜旋转将激光束偏转至不同方向,是测绘激光雷达中应用最广的扫描方案。根据镜面数量可分为单面转镜和多面转镜两种形式。单面转镜结构简单,通常用于地面三维激光扫描仪和断面扫描仪中的45°转镜方案,以固定转速连续旋转形成圆形扫描断面。多面转镜采用多边形棱镜或塔镜作为扫描元件,凭借扫描视场角集中、激光脉冲利用率高以及扫描频率与镜面数和转速成正比的综合优

势,在机载测绘领域得到广泛应用。其局限性在于视场角边缘的目标距离远大于天底点,导致点密度和测距精度存在空间非均匀性。

2.3.2 转镜与水平转台组合扫描

该方式将转镜与水平转台相结合,转镜高速旋转,将激光束反射为垂直方向的扫描断面,再由水平转台同步旋转实现360°全景覆盖,二者协同完成三维点云的获取。该方案结构成熟、扫描轨迹规则,是FARO、Z+F和Leica等地面架站式扫描仪最常见的扫描架构。RIEGL VZ系列则采用多面转镜实现垂直方向的快速扫描,再通过水平转台完成全景覆盖,在扫描机理和点云分布特性上与单面转镜方案有所不同[50]。

2.3.3 振镜扫描

振镜扫描以电机或检流计驱动平面反射镜绕固定轴做往复摆动。早期机载激光雷达曾广泛采用该方案,如Optech ALTM系列和Leica ALS系列的早期型号。尽管摆幅两端的加减速换向对高频扫描带来机械负载挑战,但振镜扫描具有视场角可灵活调整的独特优势,Optech最新的Galaxy Edge即采用该方案,通过精确控制扫描角度和频率来优化不同地形条件下的点云分布。

2.3.4 楔形镜扫描

楔形镜扫描通过旋转倾斜的光学元件使激光束沿特定轨迹偏转,分为楔形反射镜和楔形透射镜两种形式,分别产生近似椭圆和圆形的扫描轨迹。两种方式的激光束指向角在扫描周期内保持相对稳定,避免了多面转镜方案中视场角边缘入射角变化过大的问题[51],有利于在机载蓝绿测深中保持相对固定的入射角,因此常被机载测深激光雷达所采用[52]。

2.3.5 Risley棱镜对扫描

Risley棱镜对由两个独立旋转的楔形棱镜组成,通过控制二者的相对旋转速度和相位关系,可在空间产生圆扫描、椭圆扫描、玫瑰曲线和螺旋线等多种扫描轨迹[50]。该方式结构紧凑,无惯性力矩大的往复运动部件,适合轻量化和小型化平台。Leica TerrainMapper-3即采用该方案,通过可编程控制实现圆扫描与椭圆扫描的灵活切换,极大增强了城市三维建模中对不同建筑朝向的适应性。大疆禅思L3同样采用Risley棱镜对方案,实现了轻小型无人机载雷达的高效扫描。

2.3.6 其他扫描方式

除上述主流方案外,测绘激光雷达领域还涉及若干前瞻性的扫描方式。微机电系统微振镜采用半导体工艺制造,在环境感知激光雷达中已大规模应用,但通光孔径、扫描角与驱动频率之间存在制约,其测绘适用性需结合测程、信噪比和指向稳定性评估。光学相控阵[53]通过调节阵列单元间的相位关系实现光束非机械偏转,具有全固态、无惯性的理论优势,但目前仍面临波束发散角大、扫描范围有限和旁瓣抑制困难等技术瓶颈,在测绘激光雷达中的实际应用尚处于实验室探索阶段。

扫描方式的选择本质上是在视场角、点云均匀性、测程和系统复杂度之间进行综合权衡。当前,测绘激光雷达领域尚未出现一种能够同时满足大视场、高均匀性、远测程和轻量化要求的最优方案,实际系统设计需根据具体测绘任务需求进行针对性选择。

2.4 搭载平台分类

测绘激光雷达的搭载平台决定了系统的工作模式、性能边界和应用场景。根据平台的运动特性、承载能力和作业高度,其可划分为星载、大型机载、小型无人机载、地面架站式、移动测量系统和便携式等多种类型。

2.4.1 星载平台

星载激光雷达运行于数百千米的轨道高度,以卫星为搭载平台,具备全球尺度的覆盖能力和统一的时空基准。其核心任务包括全球高程控制点采集、极地冰盖与海冰监测以及植被冠层高度反演。星载系统受限于轨道动力学和严格的功耗体积约束,通常采用大光斑、低重频的设计策略,并依赖全波形记录或光子计数技术从稀疏采样中提取高精度地形信息。代表性系统包括前文提到的ICESat GLAS、ICESat-2 ATLAS以及中国高分七号卫星搭载的双波束全波形激光测高仪[13]。

2.4.2 大型机载平台

大型机载激光雷达以固定翼飞机或大型直升机为平台,作业高度通常在数百米至数千米,是目前大面积地形测绘和城市三维建模的主力手段。该平台充裕的载荷和供电条件使其能够同时集成高功率激光器、高精度扫描机构和定位定姿系统,实现远测程与高密度的综合性能优势。当前已形成以RIEGL、Leica Geosystems和Teledyne Optech三家为核心的国际厂商格局,主流产品普遍搭载多脉冲解算技术,以突破高重频与长测程之间的矛盾。国内方面,中国科学院团

队研制的Mars-LiDAR在3 000～4 000 m航高完成了工程验证[27],华测导航和珞珈伊云等企业也推出了具备自主多脉冲解算能力的机载系统,逐步打破了高端装备的进口垄断。

2.4.3　小型无人机载平台

小型无人机载激光雷达以多旋翼或垂直起降固定翼无人机为平台,作业高度通常在数十米至百余米。其核心优势在于低空高密度和机动灵活,低作业高度带来远优于大型机载系统的点云密度和局部细节表现能力,轻量化设计则使其能够快速响应应急测绘和分散区域作业需求[54],填补了大型机载系统因成本高昂而难以覆盖的中小区域高精度测绘空白。国内系统凭借强大的研发迭代能力已跻身国际前列,大疆禅思L3、华测AA系列、南方测绘SA/SG系列和珞珈伊云FT/MT系列等在测程、点频和轻量化方面与国际主流产品形成有力竞争,标志着国产小型无人机载激光雷达已从技术追赶进入并行发展的新阶段。

2.4.4　地面架站式平台

地面架站式激光雷达以固定三脚架为基座进行全景式扫描,是精度最高的测绘激光雷达形态之一。其在静止状态下工作,不受运动平台姿态误差的影响,能够实现毫米至亚毫米级的测距精度,广泛用于工业测量、建筑信息模型、文化遗产数字化和变形监测等需要高精度的场景。脉冲全波形体制以RIEGL VZ系列和Leica P系列为代表,具备千米级远测程和多回波能力;调幅连续波体制以FARO Focus系列和Z+F IMAGER系列为代表,在几十米内实现亚毫米级精度。国内方面,远测程脉冲式地面扫描仪已取得突破,但在亚毫米级地面扫描仪领域,国产系统与国际先进水平之间仍存在明显差距,目前尚属空白。

2.4.5　移动测量系统与便携式平台

移动测量系统将激光扫描仪集成于车载或船载平台,通过移动方式实现大范围线性地物的高效三维数据采集,典型系统包括Leica Pegasus系列、RIEGL VMX系列、Z+F PROFILER系列以及国内华测AU系列和珞珈伊云PRO 360/D800系列等。便携式平台包括背包式和手持式两类,依靠同步定位与建图技术实现无外部定位基础设施条件下的室内外三维重建,代表产品如Leica Pegasus Backpack和NavVis VLX。

值得关注的是,依托自动驾驶等大规模应用形成的供应链与量产优势,低成本激光雷达正加速向高精度建模市场渗透。2026年9月,禾赛科技在德国慕尼黑InterGEO 2026上发布了面向高精建模领域的MT系列激光雷达[55]。厂家给出的资料显示该产品在约6.4 cm直径、300 g质量的机身内实现了3.5 mm的测距精度与±7 mm的测距准确度,并借助累计扫描加密与同步定位与建图技术,有望在手持测绘、车载测绘、地面扫描与料堆体积计量等近距离作业场景中持续提升点云密度与建模精度。值得注意的是,这些指标应按厂家测试条件理解,不能直接等同于三维建图成果精度;累计扫描可增加采样密度,成果精度还取决于测角、时间同步、定位定姿与配准误差等多种因素。但此类产品表明,当规模化量产使高精度激光雷达的体积、重量与成本显著下降时,测绘级装备的部署门槛将随之降低。若低成本轻小型雷达能够在精度保持、计量溯源与可靠性方面通过测绘规范检验并得到广泛应用,将有望显著拓展高精度三维空间信息获取的应用边界,重塑测绘装备的格局。

上述各类平台并非彼此孤立,多平台协同作业已成为当前测绘激光雷达应用的重要趋势。典型测绘激光雷达系统综合对比如表2所示,可以看出,各类平台在测程、精度和覆盖范围等核心指标上呈现明显的分化与互补关系:星载平台覆盖范围最大但空间分辨率有限,大型机载平台在测程与脉冲重频上达到最高水平,小型无人机载平台以机动灵活见长,地面架站式平台精度最高但覆盖范围限于单站,移动测量和便携式平台则分别在沿道路高效采集和室内无全球导航卫星系统场景中发挥不可替代的作用。多平台协同正是利用这种性能分化,在统一的空间基准下实现不同精度与覆盖范围数据的无缝融合,从而满足从全球高程控制到局部精细建模的多层次测绘需求。

3　测绘激光雷达的关键技术方向

测绘激光雷达的研制涉及激光技术、扫描技术、光学设计、电子学系统、定位测姿、整机标定以及点云数据处理等多项技术环节,任何一个环节的疏忽都将导致最终测量成果无法满足测量规范的要求。本节将讨论聚焦于测绘激光雷达传感器,围绕以下4项关键技术展开:全波形处理技术、测距模糊与多脉冲解算技术、扫描机构与精密测角技术,以及系统误差标定与动态补偿。

表2 典型测绘激光雷达系统综合对比

Table 2 Comprehensive Comparison of Typical Surveying LiDAR Systems

平台类型	典型系统	波长	探测体制	最大测程/航高	脉冲重频与点频	扫描方式	测距/高程精度
星载	ICESat-2 ATLAS	532 nm	单光子计数	约500 km轨道	10 kHz	固定天底指向	分米级
星载	高分七号	1 064 nm	线性全波形	约500 km轨道	3 Hz	固定天底指向	分米级
大型机载	RIEGL VQ-1560 Ⅲ-S	1 064 nm	线性全波形	7 040 m @ 60%	2×2.2 MHz	多面转镜	厘米级
大型机载	Leica SPL100	532 nm	单光子计数	4 500 m航高	等效6 MHz	楔形镜扫描	厘米级
小型无人机载	RIEGLVUX-240	1 550 nm	线性全波形	2 180 m @ 80%	2.4 MHz	多面转镜	毫米至厘米级
小型无人机载	大疆禅思L3	1 535 nm	线性	950 m @ 10%	2 MHz	Risley棱镜对	毫米至厘米级
小型无人机载	华测AA15	1 550 nm	线性	1 800 m @ 80%	2 MHz	倾斜多面转镜	毫米至厘米级
小型无人机载	珞珈伊云FT-3000	1 550 nm	线性全波形	3 620 m @ 80%	2 MHz	多面转镜	毫米至厘米级
地面架站式	RIEGL VZ-1200i	1 550 nm	线性全波形	6 000 m @ 90%	2.2 MHz	多面转镜+水平转台	毫米级
地面架站式	Leica RTC系列	1 550 nm	线性	270 m	2 MHz	45°转镜+水平转台	亚毫米至毫米级
地面架站式	FARO Focus S350	1 550 nm	调幅连续波	350 m @ 90%	976 kHz	45°转镜+水平转台	亚毫米至毫米级
车载移动式	RIEGL VUX-1HA	1 550 nm	线性全波形	475 m @ 80%	1.8 MHz	45°转镜	毫米级
车载移动式	Z+F PROFILER 9012	近红外	调幅连续波	119 m	1 MHz	45°转镜	亚毫米至毫米级
车载移动式	珞珈伊云D800	1 550 nm	线性	50 m @ 10%	4×2 MHz	多面转镜	毫米级

注:星载条目为高程成果精度,其他条目多为仪器测距性能,统计口径与测试条件不同,不宜直接排序;7 040 m @ 60%表示对于60%漫反射率目标的最大测程/航高为7 040 m,其他类同。

3.1 全波形处理技术

全波形技术通过高速模数转换器对回波脉冲进行完整数字化记录,保留了激光脉冲与目标相互作用全过程的时域信息,是测绘激光雷达实现高精度测距和地物分类的核心技术基础。与仅记录离散回波时刻的传统方式相比,全波形数据蕴含了目标的距离分布、反射率差异和几何结构等多维信息,为后续的精细化处理提供了数据前提。

3.1.1 波形预处理

在波形分解与测距计算之前,需对原始波形进行预处理以提升数据质量。首先,通过滤波降噪抑制背景噪声和电子学噪声,常用算法包括高斯平滑、小波去噪[56]和Savitzky-Golay滤波[57]等。其次,进行有效波形检测,通常统计背景噪声的均方根水平,以3~5倍噪声标准差作为动态阈值判别回波信号的起止区间,从而将有效信号从连续采样的数据流中提取出来。此外,受限于模数转换器的采样率,通过波形插值可有效提升时间分辨率,这对提高测距重复精度具有重要意义[58]。

3.1.2 单回波测距与多回波分解

对于仅含单一目标回波的简单波形,测距值的计算可直接在时域完成,常见方法包括阈值法、峰值法、重心法、高斯拟合法、恒比定时法[59]和波形匹配法[60]等。当激光光斑内存在多个目标层次时,回波波形由若干分量叠加而成,需进行多回波分解以分离各目标信息。当前主流方法可分为数学建模法、反卷积法和神经网络法3类。

数学建模法是最经典和常用的方法,假设回波分量服从特定的解析函数形式,将全波形建模为若干基函数的线性叠加。高斯分解是其中最具代表性的方法,文献[61]较早建立了小光斑全波形激光雷达的高斯分解理论框架,通过Levenberg-Marquardt等非线性最小二乘拟合估计各高斯分量的参数。对于斜坡地形和非垂直入射等场景,研究者进一步引入了广义高斯模型、对数正态模型和威布尔模型等类高斯函数[62],提升了复杂目标的拟合精度。在蓝绿激光测深领域,回波由水面反射、水体后向散射和水底反射3个部分叠加而成,其中水体后向散射呈指数衰减的拖尾形态,研究者将水面和水底回波以高斯函数建模,水体后向散射以指数衰减函数建模,通过联合参数估计实现各分量分离与水深提取[63]。

反卷积法试图从回波波形中消除系统响应的影响,直接恢复目标的真实反射剖面,其核心在于对系统传递函数的精确标定与逆运算。典型算法包括维纳滤波和Richardson-Lucy方法[64]等,对密集分布的多层目标分辨能力优于数学建模法,但对噪声敏感,正则化参数的选取对结果影响显著。

近年来,深度学习方法被引入波形分解领域[65-66]。通过构建卷积神经网络或循环神经网

络,从大量标注或模拟的波形数据中学习分解映射关系。该类方法在复杂波形和低信噪比条件下展现出优于传统方法的稳健性,尤其在重叠回波的分辨和微弱信号检测方面具有潜力,但对训练数据质量和规模有较高依赖,可解释性弱于物理模型方法。

3.1.3　在线波形处理技术

在线波形处理是指在数据采集过程中实时完成波形分解和目标提取,无需后处理即可输出高精度点云。RIEGL公司是该技术方向的先行者,其在线全波形处理技术通过嵌入式硬件和专用算法,在扫描过程中实时检测并处理回波波形,实现了采集即输出的作业模式,大幅提升了外业效率和数据的即时可用性。国内相关团队在在线波形处理算法的轻量化实现方面也开展了深入研究[67-70]。在线处理的核心挑战在于如何在有限的计算资源下保持与离线后处理相当的精度,这涉及算法简化、并行计算架构设计和现场可编程门阵列(field-programmable gate array,FPGA)硬件加速等多个技术层面。

3.2　测距模糊与多脉冲解算技术

高精度测绘激光雷达在追求远测程与高频采样的双重目标时,不可避免地面临由信号发射周期与飞行时间失配导致的测距模糊问题。针对该瓶颈,学术界与工业界在调幅连续波的相位解模糊以及脉冲体制的多脉冲解算领域,形成了多条并行的技术路线。

在调幅连续波体制中,单频相位测量的周期性使得无模糊距离严格受限于一个调制波长。为突破这一物理制约,实现大范围绝对距离测量,多测尺技术成为该体制的标准解决方案[39,71]。该技术通过同时或交替发射多个不同调制频率的连续波信号,利用长波长测尺保证测程、短波长测尺保证精度,最终通过相位组合或差频解算消除整周模糊度,广泛应用于地面架站式扫描仪及精密工业测量中。

相较于相位式体制,脉冲体制在大型机载或无人机载平台高重频作业时,面临更为复杂的多脉冲模糊问题(见图2)。在工业应用领域,全球领先的设备制造商均推出了成熟的多脉冲商业方案以提升大面积测绘效率。Leica、Teledyne Optech等厂商的旗舰系统通过内部专有的时序控制与算法,成功在数千米航高下实现了数百千赫兹至兆赫兹级点云的无模糊获取[2]。RIEGL则是公开其核心技术路径的代表厂商,其采用的脉冲位置调制(pulse position modulation,PPM)技术[72-74]成为行业标杆。PPM方法通过在发射脉冲的固定时间间隔上叠加微小且已知的伪随机时间抖动,使得不同发射周期对应的回波序列在时间轴上产生特定畸变;在事后解算阶段,仅有在正确的模糊区间内,回波时间序列才能通过统计匹配恢复为连续的地形轮廓。该方案避免了复杂的波形幅相调制,环境适应性强,在地形高差剧变区域依然表现出优异的解算稳健性。

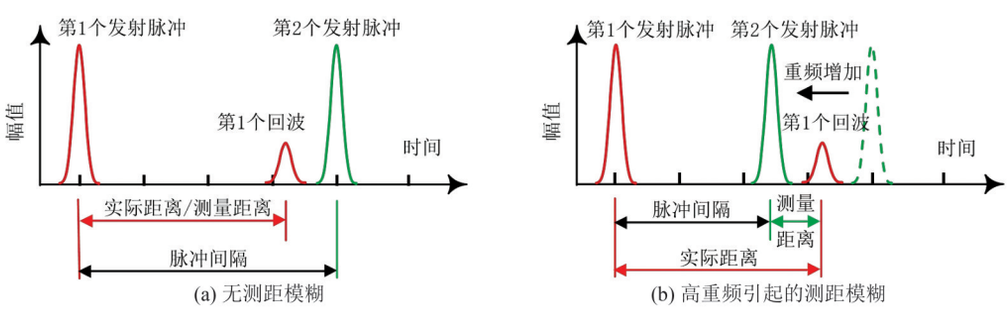


图2　多脉冲测距模糊问题示意图

Fig. 2　Diagram of Multi-pulse Ranging Ambiguity problem

在学术研究领域,多脉冲解算技术呈现出更加多元化的探索,目前主要可归结为编码调制、多重复频率以及点云先验解算3类主要方向。

1)编码调制技术。其理论渊源可追溯至雷达领域的脉冲间调制机制。除工业界采用的PPM方式外,研究者还探索了多样化的编码策略。例如,将伪随机序列与光信号相位调制相结合[75]、采用数字混沌脉冲位置调制[76]以及引入码分多址块编码[77]等方法。这些调制方案旨在通过增强脉冲间的正交性或信号特异性,在有效抑制相邻脉冲串扰的同时实现测距模糊的精确消除。

2)多重复频率技术。借鉴连续波多测尺的思想,该方法通过在发射端快速交替使用两个或多个互为质数或特定比例的脉冲重复频率,利用中国剩余定理或最小公倍数原理,将系统的无模

糊距离大幅度向外推移。多项研究验证了双重频或三重频机制在高频脉冲测距体制中扩展无模糊测距范围的有效性[78-80]。该技术路线无需复杂的波形编码,在系统硬件架构上具有较好的实现便利性,同时多激光器并行工作也会带来系统体积、功耗和结构复杂度的增加。

3)点云先验解算技术。此类方法主要从数据处理算法层面寻找突破口,试图在不改变底层硬件发射时序的前提下,利用地表连续性规律或外部辅助信息完成模糊归位。代表性研究包括利用先验数字高程模型对潜在的回波区间进行预测筛选,或在缺少先验图的区域,依托点云空间几何拓扑关系与航迹预测模型进行联合约束解算[81]。此类纯算法方案有助于降低硬件控制复杂度,但在地物严重遮挡或高程断变区域,算法的解算成功率与计算效率仍面临一定挑战。

3.3 扫描机构与精密测角技术

扫描机构将激光束精确指向目标空间,高精度测角则是将光束指向信息转换为目标三维坐标的核心环节,直接决定点云的空间横向定位水平。随着测距精度的不断提升,测角误差已成为远距离目标定位精度的主要限制因素,秒级的测角精度是高端系统实现毫米至厘米级整体测量精度的前提。

3.3.1 扫描驱动方式

在硬件驱动层面,扫描轴系的电机类型正经历由传统机电向新型直驱技术的演进。高速连续旋转的转镜通常依赖无刷直流电机,以维持高转速与动平衡稳定性,而地面扫描仪的水平转台则多采用步进电机进行离散的角度步进控制。为突破传统传动机制带来的机械磨损与响应迟滞,最新一代高端测绘装备引入了压电驱动[82-83]与电磁悬浮直驱[84]等技术。压电驱动利用逆压电效应实现无物理齿轮间隙的高频微动控制,能够在极短响应时间内提供大扭矩与秒级定位精度。电磁悬浮直驱则通过消除轴承的物理接触摩擦,在保障超高转速平稳运行的同时将轴系非线性晃动降至最低。

3.3.2 角度测量与电子细分

在获取高稳定驱动的前提下,测角精度高度依赖光学码盘的刻划工艺与轴系结构的高刚度设计。由于机械加工与装配不可避免地存在偏心与径向跳动,精密扫描系统在码盘圆周上采用多读头对称分布设计[85],通过差分平均以物理方式抵消偏心误差的一阶分量。在硬件基础上,结合高阶偏心误差补偿模型[86]与编码器信号的电子细分算法[87],可将动态测角分辨率进一步提升至秒量级。上述硬件与算法措施的协同,构成了扫描系统角度测量的精度基础。

3.3.3 高速扫描脱靶补偿

在大测程与高扫描转速的工况下,激光脉冲从发射到接收的飞行往返期间,扫描反射镜已发生明显的角度偏转,导致接收视场偏离回波的实际到达方向,形成所谓脱靶问题[88]。解决该问题需在光学设计层面引入接收视场超前补偿机制,即根据当前扫描角速度和目标距离预判回波到达时刻的镜面角度,设置相应的接收光路提前角[89-90]。部分系统采用动态光路自适应调整技术[91-92],通过快速偏转元件实时修正接收指向。上述补偿策略的实现是远测程扫描系统区别于普通系统的关键技术特征。

3.4 系统误差标定与动态补偿

系统误差标定与动态补偿是保障测绘激光雷达测量精度与可溯源性的必要环节。传感器在制造和装配过程中不可避免地引入各类系统误差,这些误差不能通过多次测量平均消除,必须建立精确的误差模型并通过标定实验或实时补偿进行修正。

3.4.1 测距误差建模与标定

测距误差包含多项系统分量,主要误差与标定方法如下:

1)加常数和乘常数误差是最基本的测距误差分量。加常数源于电子学延迟和光学路径偏差,与距离无关;乘常数与时间基准的频率准确度相关,随距离线性增长。二者的标定通常依托具备高精度溯源基准的室内或室外检定基线场,通过多个已知距离段的测量值与标准值比对,解算加乘常数模型参数。

2)温度漂移[93]主要由电子元器件温漂引起,在温差显著的环境下可导致明显的距离非线性偏移。标定方法一般利用高低温试验箱,在恒定距离下进行温度遍历测试,记录不同温度点的测距偏差,构建温度补偿查表或高阶拟合函数。对于温漂指标要求更高的系统,还需对关键器件增加恒温控制模块,从源头抑制温度波动的影响。

3)幅相误差/行走误差[94]是脉冲飞行时间体制的典型误差,即接收回波幅度变化会导致回波中心时刻偏移。标定方法通常利用不同反射率的标准靶标,或通过调节激光发射功率或接收端衰减片系数,在恒定距离下遍历不同回波幅度,

构建幅相误差补偿查表或高阶拟合函数。

4)周期误差[95]是调幅连续波体制的典型误差,以调制波长为周期出现,源于调制信号的非理想正弦性和相位检测电路的非线性。常用的标定方法是在室内布设精密导轨,使目标在若干调制波长范围内以微小步距移动,通过密集采样测量值与真值的偏差序列,提取周期误差的振幅和相位参数,用于后续测量值的实时修正。

上述各项误差的标定方案需合理设计实验流程,确保不同误差源的分量得到有效分离,避免某一误差源在另一误差源的标定过程中引入干扰。测距误差的标定是系统标定的基础环节,其精度直接影响后续扫描误差检校的可靠性。

3.4.2　扫描校准模型和标定方法

扫描指向精度直接取决于内部光学和机械部件的几何误差大小。出厂校准可确保初始性能,但长期使用中器件老化和环境应力将引入新的系统误差,因此用户侧的自标定方法成为该领域的研究重点,其核心在于校准模型的建立与校准参数的估计[96]。

在地面三维激光扫描仪的校准模型方面,其发展经历了从借鉴到独立、由简至繁的演进过程。早期研究沿用全站仪的视准轴误差、水平轴误差和垂直零位误差3类几何参数来描述扫描仪的系统误差[97],但两者在结构上的本质差异导致该模型无法完整描述地面扫描仪的误差机制。文献[98]建立了包含18个参数的校准模型,美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology,NIST)随后将其发展为评估标准ASTM E3125-17[99],自此全站仪模型被NIST模型取代。然而上述模型主要针对传统地面三维扫描仪的常规扫描方式,对于多面转镜与楔形镜以及复合扫描镜等更为复杂的光学结构,直接套用该模型并不能准确解释其误差来源。近年来,基于严格光线追踪原理的模型[49, 96, 100-105]成为主流方向,此类方法通过模拟激光在扫描器内部的真实传播路径,将光学元件的加工误差、装配误差和运动误差统一纳入计算,能够精确描述复杂扫描器的真实物理过程并逐步成为各类扫描系统的通用建模框架。

在检校方法方面,地面三维激光扫描仪常用的自标定方法主要有网络法[106-107]、长度一致性法[108]和双面法[109-111],面、球、柱等靶标和几何特征[112-115]被用于施加约束,以降低参数间的相关性。对于机载激光雷达,航线检校法是主要手段,通过设计对飞和交叉航线,基于重叠航带内特征点或特征面的几何拓扑约束,实现激光扫描仪与惯性导航系统之间空间安置角误差的高精度自标定。目前,机载检校航线主要用于安置角误差的标定,针对扫描机构内部参数的自标定研究尚不多见,是值得关注的研究方向[105]。

3.4.3　环境误差改正与动态补偿

在复杂外场作业环境中,环境误差的实时改正是保障数据绝对精度的关键。系统需实时接入温度及气压等气象参数进行群折射率修正,以消除大气时延误差[116-119],并依靠高精度倾角或姿态传感器对微小姿态扰动进行动态倾斜补偿[120]。

在蓝绿机载测深激光雷达系统中,光束穿透海气交界面的折射改正是消除水下点云畸变的核心难题。由于激光在空气与水体介质中传播速度骤变且路径发生偏折,加之动态海面波浪导致局部光束入射角实时变化,系统必须建立严密的海水折射与波浪斜率补偿模型[121]。该类模型通常基于斯涅尔定律与瞬态海面模型,采用多介质光线追踪算法对水下测距结果和光束空间指向进行逐脉冲的三维几何重构,从而实现水陆测绘空间基准的精确统一。

4　结　语

测绘激光雷达经过数十年的发展,已从单一的距离测量工具演进为多平台、多体制、多维信息的空间数据获取系统。回顾其技术脉络,全波形数字化与多脉冲解算两大核心突破奠定了当代高性能机载系统的基础,单光子探测则将灵敏度推向物理极限,为星载和机载大范围测绘开辟了新路径。扫描技术与测角精度的持续提升,使得远距离目标的横向定位能力逐步匹配测距精度,系统标定方法从全站仪模型到光束矢量模型的演进,则为复杂扫描体制的误差建模提供了统一的理论框架。在平台维度上,各类平台在空间分辨率和覆盖范围上形成了从全球尺度到室内尺度的完整互补链条。在国产化方面,国产系统在小型无人机载领域已跻身国际前列,在大型机载和蓝绿测深领域正加速追赶,但在亚毫米级地面三维激光扫描仪等细分方向上仍存在空白。展望未来,测绘激光雷达的发展方向可从器件与系统两个层面加以分析。

在器件层面,当前主流器件的持续演进将不断推动系统整体性能的提升。高功率窄脉冲光纤激光器的性能边界继续拓展,高灵敏度光电探

测器的噪声水平进一步降低,码盘刻线工艺和机加工精度的提高、高精度轴承和光学镀膜技术的进步、模数转换器采样速率的提升,以及器件小型化和集成化水平的提升,都将直接转化为测距精度、测角精度和系统可靠性的增益。在此基础上,单光子探测体制的进一步普及将推动高灵敏度、低功耗测绘系统向更多平台渗透,FMCW激光雷达在测绘领域的工程化落地则有望凭借相干探测体制在测距精度和测量范围上的独特优势,为现有脉冲式系统提供新的技术补充。尤其值得关注的是光子集成技术对测绘激光雷达形态的深刻影响。硅光与异质集成平台有望将激光光源、扫描器件、探测阵列乃至信号处理电路集成于单一芯片,从根本上改变测绘激光雷达的尺寸、成本与一致性,但仍需解决光功率、耦合损耗、散热及封装可靠性等问题。相干探测与光子集成的结合(片上FMCW)已被视为突破传统脉冲体制在测程、精度与抗背景光综合瓶颈上的重要方向[40,122]。固态扫描方面,光学相控阵若能在大孔径阵列、增益优化天线与旁瓣抑制等关键技术上取得突破,则有望逐步替代机械扫描,提高系统可靠性并显著降低成本。随着上述器件瓶颈的逐步突破,测绘激光雷达的技术形态有望在未来数年内发生深刻变化。

在系统与体制层面,测绘激光雷达的未来发展将更多聚焦于传感器本源能力的持续提升。全波形处理技术将从离线后处理走向传感器端实时在线处理,通过FPGA、嵌入式硬件与专用算法将波形分解、多回波提取与点云生成内置于仪器内部,实现边采集、边输出的作业模式,同时波形信息本身将向更高维度扩展,直接服务于地物分类、植被结构与水体剖面反演等任务。测距模糊与多脉冲解算技术将在编码调制、多重频与先验解算三条既有路线的基础上进一步融合,并适配单光子高重频、FMCW等新体制,以支撑更高点频与更远测程的持续提升。扫描机构与精密测角将在机械扫描持续演进的同时逐步接纳固态扫描与光子集成扫描等新形态,而秒级测角与高速扫描脱靶补偿仍将是保障远距离横向定位精度的核心环节。系统误差标定与动态补偿将从出厂标定走向覆盖全生命周期的自标定与在线补偿,并推动面向单光子、多光谱与FMCW等新体制的计量评测标准建设。此外,脉冲、单光子与连续波等多体制将在统一空间基准下互补共存,规模化量产带来的低成本化亦将显著降低测绘装备的部署门槛,使高精度三维空间信息获取从专业测绘走向更广泛的应用场景。

参 考 文 献

[1] WANG X,CHENG X,GONG P,et al. Earth Science Applications of ICESat/GLAS: A Review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8837-8864.

[2] ROTH R B, THOMPSON J. Practical Application of Multiple Pulse in Air (MPIA) LiDAR in Large-Area Surveys[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B1): 183-188.

[3] MARTINO A J, NEUMANN T A, KURTZ N T, et al. ICESat-2 Mission Overview and Early Performance [C]//SPIE Remote Sensing, Strasbourg, France, 2019.

[4] NEUMANN T A, MARTINO A J, MARKUS T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 Mission: A Global Geolocated Photon Product Derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111325.

[5] MANDLBURGER G, LEHNER H, PFEIFER N. A Comparison of Single Photon and Full Waveform LiDAR[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, IV-2/W5: 397-404.

[6] 周国清,包恺云,周祥,等. 水深测量激光雷达系统研究进展[J]. 量子电子学报,2025, 43:1-28.
ZHOU Guoqing, BAO Kaiyun, ZHOU Xiang, et al. Research Progress of Bathymetric LiDAR System [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2025, 43:1-28.

[7] 贺岩,陶邦一,俞家勇,等. 机载激光测深技术及应用[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 276-306.
HE Yan,TAO Bangyi, YU Jiayong, et al. Development of Airborne LiDAR Bathymetric Technology and Application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 276-306.

[8] 郑国宪,任明源,李同,等. 单光子激光测深雷达发展现状、关键技术及趋势展望[J]. 红外与激光工程, 2026, 55(5): 202-220.
ZHENG Guoxian, REN Mingyuan, LI Tong, et al. Development Status, Key Technologies and Trend Outlook of Single-Photon Laser Bathymetric LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2026, 55(5): 202-220.

[9] 胡以华,夏宇浩,徐世龙,等. 高光谱激光雷达遥感技术研究现状与发展趋势[J]. 光学学报, 2025, 45

(18): 60-77.
HU Yihua, XIA Yuhao, XU Shilong, et al. Research Progress and Development Trends on Hyperspectral LiDAR Remote Sensing Technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(18): 60-77.

[10] 柳博羽,王一程,马玉凯,等. 高光谱激光雷达发展与展望[J]. 信息对抗技术, 2025, 4(2): 1-17.
LIU Boyu, WANG Yicheng, MA Yukai, et al. Development and Prospects of Hyperspectral LiDAR [J]. *Information Countermeasure Technology*, 2025, 4(2): 1-17.

[11] 李磊,郑永超,彭凤超,等. 地形测绘激光成像雷达技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006(S3): 294-298.
LI Lei, ZHENG Yongchao, PENG Fengchao, et al. Research of Three-Dimension Imaging LiDAR on Land Topography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006(S3): 294-298.

[12] MURALIKRISHNAN B. Performance Evaluation of Terrestrial Laser Scanners: A Review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(7): 72001.

[13] 国爱燕,戴君,赵晨光,等. 高分七号卫星激光测高仪总体设计与在轨验证[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 43-48.
GUO Aiyan, DAI Jun, ZHAO Chenguang, et al. Design and On-Orbit Validation of GF-7 Satellite Laser Altimeter[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(3): 43-48.

[14] Leica Geosystems. Leica SPL100 Single Photon LiDAR Sensor[EB/OL]. (2017-02-13)[2026-10-02]. https://Leica-Geosystems.Com/Products/Airborne-Systems/Topographic-Lidar-Sensors/LeicaSpl100.

[15] 刘红光,蔡青梅,李青,等. 室内200 m虚拟基线测量方法的研究[J]. 计量学报, 2021, 42(11): 1425-1429.
LIU Hongguang, CAI Qingmei, LI Qing, et al. Research on Indoor 200 m Virtual Baseline Measurement Method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(11): 1425-1429.

[16] 杨维芳. 光电测距仪室内长基线建立方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009.
YANG Weifang. Establishment Method of Longer Laboratory Baselines for Verificating EDMs[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2009.

[17] 史洁琴,何珂,徐永. 光纤基线标定激光测距仪方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(6): 830-834.
SHI Jieqin, HE Ke, XU Yong. Research on Calibration of Laser Rangefinder Using Optical Fiber Baseline[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 44(6): 830-834.

[18] 严宇超,杨雪峰,刘成龙. 利用激光跟踪仪检测全站仪标准基线长度可行性分析[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(9): 18-21.
YAN Yuchao, YANG Xuefeng, LIU Chenglong. Feasibility Analysis of Using Laser Tracker to Calibrate the Standard Baseline Length of Total Station [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2021, 48(9): 18-21.

[19] 黄明,刘品宽,夏仰球,等. 自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 110-120.
HUANG Ming, LIU Pinkuan, XIA Yangqiu, et al. Calibration of Circular Division Artifacts Using a Self-Developed Angle Comparator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 110-120.

[20] 杨金利,魏晓蓉. 绝对式光电编码器测角误差自动检测系统[J]. 光学与光电技术,2021,19(5):30-35.
YANG Jinli, WEI Xiaorong. Automatic Detection System of Angle Error for Absolute Photoelectric Encoder[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2021, 19(5): 30-35.

[21] GECKELER R D, FRICKE A, ELSTER C. Calibration of Angle Encoders Using Transfer Functions [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(10): 2811-2818.

[22] 赵鑫,迟冬南. 基于激光干涉的大角度高精度在线测角方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(10): 5-8.
ZHAO Xin, CHI Dongnan. Large Range and High Accuracy Online Angle Measurement Based on Laser Interferometer[J]. *Computer Measurement & Control*,. 2018, 26(10): 5-8.

[23] XUE Z, HUANG Y, WANG H, et al. Calibration of Invar Angular Interferometer Optics with Multi-step Method[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2015, 9(5): 502-507.

[24] ABDUL RAHMAN A, BOGUSLAWSKI P, GOLD C, et al. Calibration and Accuracy Assessment of Leica ScanStation C10 Terrestrial Laser Scanner[M]. Germany: Springer Berlin / Heidelberg, 2013.

[25] RESHETYUK Y. A Unified Approach to Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanners[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5): 445-456.

[26] 张建华,石林峰,马勇,等. 星载激光测高系统外场检校测量方法研究[J]. 北京测绘, 2022, 36(6):

816-821.
ZHANG Jianhua, SHI Linfeng, MA Yong, et al. Research on the Outfield Calibration and Measurement Method of Satelite Laser Altimeter[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2022, 36(6): 816-821.

[27] 胡国军,朱精果,刘汝卿. Mars-LiDAR系统误差分析及安置角误差飞行检校[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 324-330.
HU Guojun, ZHU Jingguo, LIU Ruqing. Error Analysis of Mars-LiDAR System and Calibration of Installation Angle Error[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 324-330.

[28] 曹彬才,王建荣,胡燕,等. 高分十四号激光测量系统在轨几何定标与初步精度验证[J]. 光学精密工程, 2023, 31(11): 1631-1640.
CAO Bincai, WANG Jianrong, HU Yan, et al. On-Orbit Geometric Calibration and Preliminary Accuracy Verification of GaoFen-14 (GF-14) Laser Altimetry System[J]. *Optics and Precision Engineering*,. 2023, 31(11): 1631-1640.

[29] 叶泽田,杨勇,赵文吉,等. 车载Gps/Imu/Ls激光成像系统外方位元素的动态标定[J]. 测绘学报, 2011, 40(3): 345-350.
YE Zetian, YANG Yong, ZHAO Wenji, et al. Dynamic Calibration of Exterior Orientations for Vehicle GPS/IMU/LS Laser Imaging System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(3): 345-350.

[30] DAVIDSON L, MILLS J P, HAYNES I, et al. Airborne to UAS LiDAR: An Analysis of UAS LiDAR Ground Control Targets[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-2/W13: 255-262.

[31] JIN Q, HU Q, DUAN X, et al. Airborne Laser Scanning Data Quality Enhancement via Rigorous Calibration and Comprehensive Strip Adjustment Techniques[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2025: 1-34.

[32] SKALOUD J, LICHTI D. Rigorous Approach to Bore-Sight Self-Calibration in Airborne Laser Scanning[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(1): 47-59.

[33] ULLRICH A, HOLLAUS M, BRIESE C, et al. Utilization of Full-Waveform Data in Airborne Laser Scanning Applications[C]. Laser Radar Technology and Applications XII, Orlando, Florida, United States, 2007.

[34] 赵浴阳,周鹏飞,解天鹏,等. 单光子激光雷达技术发展现状与趋势[J]. 光电工程,2024,51(3):5-27.
ZHAO Yuyang, ZHOU Pengfei, XIE Tianpeng, et al. Development Status and Trends of Single-Photon LiDAR Technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(3): 5-27.

[35] STOKER J, ABDULLAH Q, NAYEGANDHI A, et al. Evaluation of Single Photon and Geiger Mode LiDAR for the 3D Elevation Program[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 767.

[36] PIATEK S. How Does Temperature Affect the Gain of an SiPM[EB/OL]. (2016-12-08)[2026-10-02]. https://Hub. Hamamatsu. com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/how-does-temperature-affect-the-gain-of-an-SiPM. Html.

[37] LIU Z, ZENG Y, LI C, Et Al. SiPM-Based LiDAR with Multipulse Sequence Modulation and Multithreshold Signal Processing[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(20): 5727-5730.

[38] LEE S, KWON W, LIM Y, et al. Highly Precise AMCW Time-of-Flight Scanning Sensor Based on Parallel-Phase Demodulation[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111860.

[39] ZHANG C, ZHANG Z, TIAN Y, et al. Comprehensive Ranging Disambiguation for Amplitude-Modulated Continuous-Wave Laser Scanner with Focusing Optics[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2021, 70: 1-11.

[40] 许贤泽,翁名杰,徐逢秋,等. 正交调制降频相位式激光测距[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 1979-1986.
XU Xianze, WENG Mingjie, XU Fengqiu, et al. Phase Laser Ranger Based on Quadrature Modem and Frequency Reduction[J]. *Optics and Precision Engineering*,. 2017, 25(8): 1979-1986.

[41] WANG Y, XU X, DAI Z, et al. Frequency-Swept Feedback Interferometry for Noncooperative-Target Ranging with a Stand-off Distance of Several Hundred Meters[J]. *PhotoniX*, 2022, 3(1): 1-20.

[42] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, et al. Coherent LiDAR with an 8192-Element Optical Phased Array and Driving Laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 1-8.

[43] 朱精果,袁野,姜成昊,等. 片上集成FMCW激光雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(8): 11-27.
ZHU Jingguo, YUAN Ye, JIANG Chenghao, et al. Research Progress of On-Chip Integrated FMCW LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(8): 11-27.

[44] KE J, SONG Z, WANG P, et al. Long Distance High Resolution FMCW Laser Ranging with Phase Noise Compensation and 2D Signal Processing[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(12): 3443-3454.

[45] CAI Z, WANG Z, WEI Z, et al. A Microcomb-Empowered Fourier Domain Mode-Locked LIDAR [J]. *Science Advances*, 2025, 11(6): s9590.

[46] 上海交通大学光子集成与通信研究中心. 面向新一代激光雷达的高线性度硅基调频光发射芯片[EB/OL]. (2026-06-21)[2026-10-02]. https://Pic. Sjtu. Edu. Cn/Show/432.
Center for Photonic Integration and Communication, Shanghai Jiao Tong University. High-Linearity Silicon-Based Frequency-Modulated Optical Transmitter Chip for New-Generation LiDAR[EB/OL]. (2026-06-21)[2026-10-02]. https://Pic. Sjtu. Edu. Cn/Show/432.

[47] ZHOU G, ZHOU X, SONG Y, et al. Design of Supercontinuum Laser Hyperspectral Light Detection and Ranging (LiDAR) (SCLaHS LiDAR)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(10): 3731-3755.

[48] BRAZEAL R G, WILKINSON B E, HOCHMAIR H H. A Rigorous Observation Model for the Risley Prism-Based Livox Mid-40 LiDAR Sensor [J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4722.

[49] DUMA V, DIMB A. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-parameter Analysis and Design[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8451.

[50] GONZALEZ-AGUILERA D, RODRIGUEZ-GONZALVEZ P, ARMESTO J, et al. Trimble GX200 and Riegl LMS-Z390i Sensor Self-Calibration[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2676-2693.

[51] ULLRICH A, PFENNIGBAUER M. Linear LiDAR Versus Geiger-Mode LiDAR: Impact on Data Properties and Data Quality[C]// International Conference of SPIE, Baltimore, MD, USA, 2016.

[52] GUO K, LI Q, WANG C, et al. Development of a Single-Wavelength Airborne Bathymetric LiDAR: System Design and Data Processing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 185(4): 62-84.

[53] CRAWFORD-ENG H, GARCIA COLETO A, MAZUR B M, et al. Reduced-Crosstalk Antennas for Grating-Lobe-Free and Wide-Field-of-View Integrated Optical Phased Arrays[J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 4218.

[54] NEX F, REMONDINO F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review [J]. *Applied Geomatics*, 2014, 6(1): 1-15.

[55] 禾赛科技. 禾赛 MT 系列:超高空间解析力激光雷达[EB/OL]. (2026-09-15)[2026-10-02]. https://www. Hesaitech. Com/Cn/Product/Mt.
Hesai Technology. Hesai MT Series: Ultra-High Spatial Resolution LiDAR[EB/OL]. (2026-09-15)[2026-10-02]. https://www. Hesaitech. Com/Cn/Product/Mt.

[56] 段乙好,张爱武,刘诏,等. 一种用于机载激光雷达波形分解的小波变换与广义高斯模型组合法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 234-244.
DUAN Yihao, ZHANG Aiwu, LIU Zhao, et al. A Combination Method of Wavelet Transform and Generalized Gaussian Model for Airborne Laser Scanning Waveform Decomposition[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 234-244.

[57] 孟志立,徐景中. 机载激光雷达波形数据横向高斯分解方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(1): 81-86.
MENG Zhili, XU Jingzhong. A Lateral Gaussian Decomposition Method for LiDAR Waveform Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,. 2018, 43(1): 81-86.

[58] 周昊,毛庆洲,李清泉. 采样频率和激光脉宽对全波形激光雷达测距精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 243-251.
ZHOU Hao, MAO Qingzhou, LI Qingquan. Influence of Sampling Frequency and Laser Pulse Width on Ranging Accuracy of Full-Waveform LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 243-251.

[59] WAGNER W, ULLRICH A, MELZER T, et al. From Single-Pulse to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges [C]//The 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.

[60] JUTZI B, STILLA U. Range Determination with Waveform Recording Laser Systems Using a Wiener Filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(2): 95-107.

[61] WAGNER W, ULLRICH A, DUCIC V, et al. Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 100-112.

[62] ZHOU G, LONG S, XU J, et al. Comparison Analysis of Five Waveform Decomposition Algorithms for the Airborne LiDAR Echo Signal [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7869-

7880.

[63] PFENNIGBAUER M, ULLRICH A, SCHWARZ R, et al. Waveform-Averaging Airborne Laser Bathymetry Scanner[C]// International Conference of SPIE, Anaheim, CA, USA, 2020.

[64] RICHARDSON W H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55-59.

[65] LIU J, ZHANG X, LV J, et al. Gaussian Decomposition Method for Full Waveform Data of LiDAR Base on Neural Network [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 5612-5639.

[66] XU X, WANG J, WU J, et al. Full-Waveform LiDAR Echo Decomposition Method Based on Deep Learning and Sparrow Search Algorithm[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 130: 104613.

[67] WANG Z, XU L, LI D, et al. Online Multi-Target Laser Ranging Using Waveform Decomposition On FPGA [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(9): 10879-10889.

[68] LI X, BI T, XU L. A Module-Level Pipeline Based Gauss-Newton Online Ranging Method for High-Repetition-Frequency Full-Waveform LiDAR [J]. *Measurement*, 2024, 229: 114351.

[69] BI T, LI X, CHEN W, et al. A Gauss - Newton Online Ranging Method Based on Saturated Waveform Compensation of LiDAR[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-12.

[70] 白杨,唐伟,徐诗月,等. 激光成像雷达近程大动态范围实时高精度测距方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 118-123.
BAI Yang, TANG Wei, XU Shiyue, et al. Real-Time and High-Precision Ranging Method for Large Dynamic Range of Imaging LiDAR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 118-123.

[71] 潘映伶,纪荣祎,祁勤,等. 高速高精度实时相位式激光测距系统[J]. 光学精密工程, 2023, 31(16): 2343-2351.
PAN Yingling, JI Rongyi, QI Qin, et al. High-Speed and High-Precision Real-Time Phase Laser Ranging System[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(16): 2343-2351.

[72] RIEGER P, ULLRICH A. Resolving Range Ambiguities in High-Repetition Rate Airborne Light Detection and Ranging Applications[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 63552.

[73] RIEGER P. Range Ambiguity Resolution Technique Applying Pulse-Position Modulation in Time-of-Flight Scanning LiDAR Applications[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 61614.

[74] RIEGER P, ULLRICH A. A Novel Range Ambiguity Resolution Technique Applying Pulse-Position Modulation in Time-of-Flight Ranging Applications [C]// International Conference of SPIE, Baltimore, MD, USA, 2012.

[75] ZANG Y, CHEN H, YANG S, et al. High Accuracy Non-ambiguity ToF LiDAR System Based on Pseudo-Random Noise Code and Phase Detection Method[C]//Optical Fiber Communication Conference , San Diego, CA, USA, 2019.

[76] ZHU G, NAN Z, ZHANG X, et al. High Anti-Interference 3D Imaging LIDAR System Based on Digital Chaotic Pulse Position Modulation[J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 163: 109405.

[77] MARINOV E, MARTINS R J, YOUSSEF M A B, et al. Overcoming the Limitations of 3D Sensors with Wide Field of View Metasurface-Enhanced Scanning LiDAR[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 46005.

[78] LIANG Y, HUANG J, REN M, et al. 1550-Nm Time-of-Flight Ranging System Employing Laser with Multiple Repetition Rates for Reducing the Range Ambiguity [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4662-4670.

[79] Du B, PANG C, WU D, et al. High-Speed Photon-Counting Laser Ranging for Broad Range of Distances[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4198.

[80] HANTO D, PRATOMO H, RIANARIS A, et al. Time of Flight LiDAR Employing Dual-Modulation Frequencies Switching for Optimizing Unambiguous Range Extension and High Resolution [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-8.

[81] LU H, PANG Y, LI Z, et al. An Automatic Range Ambiguity Solution in High-Repetition-Rate Airborne Laser Scanner Using Priori Terrain Prediction [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2232-2236.

[82] RYNDZIONEK R, SIENKIEWICZ L. A Review of Recent Advances in the Single- and Multi-degree-of-Freedom Ultrasonic Piezoelectric Motors[J]. *Ultrasonics*, 2021, 116: 106471.

[83] XIAO Y, YANG Y, LIU C, et al. Design and Analysis of a Wireless Ultrasonic Motor Drive System[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(10): 12309-12314.

[84] SOKOL S,BAJTALA M,JEZKO J, et al. Testing the Accuracy of Determining 3D Cartesian Coordinates Using the Measuring Station S8 Trimble DR

Plus ROBOTIC[J]. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2014, 15(1): 85-90.

[85] JIAO Y, DING Y, DONG Z, et al. Optimal-Arrangement-Based Four-Scanning-Heads Error Separation Technique for Self-Calibration of Angle Encoders [J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(8): 85005.

[86] 宋宇飞,毛庆洲,周昊,等. 圆光栅角度传感器偏心误差的分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 76-86.
SONG Yufei, MAO Qingzhou, ZHOU Hao, et al. Analysis and Compensation of the Eccentricity Error of Circular Grating Angle Sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(12): 76-86.

[87] 陈自然,李钢,赵建,等. 基于组合预测算法的光栅信号新细分方法研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(7): 1061-1066.
CHEN Ziran, LI Gang, ZHAO Jian, et al. A Novel Grating Signal Subdivision Method Based on a Combined Forecasting Algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(7): 1061-1066.

[88] 周昊,毛庆洲,胡雪晴,等. 高转速扫描激光雷达中探测器偏离焦平面的应用[J]. 光学精密工程, 2023, 31(21): 3077-3087.
ZHOU Hao, MAO Qingzhou, HU Xueqing, et al. Application of Detector Deviation from Focal Plane in High Speed Scanning LiDAR[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(21): 3077-3087.

[89] 胡雪晴,金光,毛庆洲,等. 转速调控下的激光雷达探测器位置像移匹配方法[J]. 光学精密工程, 2025, 33(22): 3441-3448.
HU Xueqing, JIN Guang, MAO Qingzhou, et al. Detector Position Matching Method for LiDAR Image Point Deviation via Rotational Speed Control [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(22): 3441-3448.

[90] 胡以华,薛永祺,方抗美,等. 对地观测激光扫描成像探测效果研究[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(5): 335-339.
HU Yihua, XUE Yongqi, FANG Kangmei, et al. Sounding Effect of Laser Scanning Imaging in Earth Observation[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(5): 335-339.

[91] ITO Y, IMAKI M, SAKIMURA T, et al. Evidence of Decreased Heterodyne-Detection Efficiency Caused by Fast Beam Scanning in Wind Sensing Coherent Doppler LiDAR, and Demonstration on Recovery of the Efficiency with Lag-Angle Compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-10.

[92] SHAO F. Correction of Optical Lag-Angle for Monostatic LIDAR Sensors[C]//The 6th Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application , Beijing, China, 2020.

[93] 高远,李松. 温度控制与温度补偿双模式的Apd驱动电路设计[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 869-873.
GAO Yuan, LI Song. APD Drive Circuit Design for Temperature Control and Temperature Compensation Dual Mode[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(6): 869-873.

[94] CHOE K H, CHOE U C, RI I J. Correction Method for Walk Error Based on the Shape of Reflective Surface in LiDAR[J]. *Optik*, 2023, 279: 170527.

[95] DORNINGER P, NOTHEGGER C, PFEIFER N, et al. On-the-Job Detection and Correction of Systematic Cyclic Distance Measurement Errors of Terrestrial Laser Scanners[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2008, 2(4): 191-204.

[96] LI X, LI Y, XIE X, et al. Lab-Built Terrestrial Laser Scanner Self-Calibration Using Mounting Angle Error Correction[J]. *Opt Express*, 2018, 26(11): 14444-14460.

[97] 官云兰,程效军,詹新武,等. 地面三维激光扫描仪系统误差标定[J]. 测绘学报, 2014, 43(7): 731-738.
GUAN Yunlan, CHENG Xiaojun, ZHAN Xinwu, et al. Research on Systematic Errors Calibration of Terrestrial Laser Scanner[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,. 2014, 43(7): 731-738.

[98] MURALIKRISHNAN B, FERRUCCI M, SAWYER D, et al. Volumetric Performance Evaluation of a Laser Scanner Based on Geometric Error Model [J]. *Precision engineering*, 2015, 40: 139-150.

[99] WANG L, MURALIKRISHNAN B, LEE V, et al. A First Realization of ASTM E3125-17 Test Procedures for Laser Scanner Performance Evaluation[J]. *Measurement*, 2020, 153: 107398.

[100] ZHOU H, MAO Q, WU A, et al. Beam Vector Model: A More Applicable Calibration Method for Terrestrial Laser Scanner[J]. *Measurement*, 2025, 254: 117814.

[101] LICHTI D D. Ray-Tracing Method for Deriving Terrestrial Laser Scanner Systematic Errors [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2017, 143(2): 1-5.

[102] WANG Z, LI X, BI T, et al. Line Feature Based Self-Calibration Method for Dual-Axis Scanning LiDAR System[J]. *Measurement*, 2024, 224: 113868.

[103]CHEN X, LIU Y, XU Y, et al. Kinematic Calibration of a Laser Tracker Based on Nonlinear Optimization of a Refined Geometric Error Model[J]. *Measurement*, 2022, 191: 110672.

[104]CHEN K, ZHAN K, YANG X, et al. Accuracy Improvement Method of a 3D Laser Scanner Based on the D-H Model[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(7): 1-9.

[105]ZHOU H, MAO Q, SONG Y, et al. Analysis of Internal Angle Error of UAV LiDAR Based on Rotating Mirror Scanning[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5260.

[106]ABBAS M A, LICHTI D D, CHONG A K, et al. An On-Site Approach for the Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner[J]. *Measurement*, 2014, 52: 111-123.

[107]LICHTI D D. Terrestrial Laser Scanner Self-Calibration: Correlation Sources and their Mitigation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1): 93-102.

[108]MURALIKRISHNAN B, WANG L, RACHAKONDA P, et al. Terrestrial Laser Scanner Geometric Error Model Parameter Correlations in the Two-Face, Length-Consistency, and Network Methods of Self-Calibration [J]. *Precision Engineering*, 2018, 52: 15-29.

[109]QIAO J, MEDIC T, BAUMANN OUYANG A. Automatic Calibration of Terrestrial Laser Scanners Using Intensity Features[J]. *The Photogrammetric Record*, 2023, 38(183): 320-338.

[110]QIAO J, BUTT J A. Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner Using a M3C2-based Planar Patch Algorithm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 197: 335-345.

[111]WANG L, MURALIKRISHNAN B, RACHAKONDA P, et al. Determining Geometric Error Model Parameters of a Terrestrial Laser Scanner through Two-Face, Length-Consistency, and Network Methods[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(6): 65016.

[112]CHAN T O, LICHTI D D, BELTON D. A Rigorous Cylinder-Based Self-Calibration Approach for Terrestrial Laser Scanners[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 99: 84-99.

[113]KREGAR K, GRIGILLO D, KOGOJ D. High Precision Target Center Determination From a Point Cloud[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, II-5/W2: 139-144.

[114]GIELSDORF F, ANDREAS R, LOTHAR G. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners [C]//FIG Working Week, Athens, Greece, 2004.

[115]LIU X, TONG X, LUAN K, et al. Plane-Based Self-Calibration and Improvement of Three-Dimensional Multi-beam Laser Scanning with Two-Axis-Mirror [J]. *Measurement Science & Technology*, 2022, 33(11): 115015.

[116]刘晓东,缪东晶,姚燕,等. 全站仪气象改正公式优化研究[J]. 计量学报, 2024, 45(3): 386-394.
LIU Xiaodong, MIAO Dongchang, YAO Yan, et al. Optimization of Meteorological Correction Formula of Total Station[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2024, 45(3): 386-394.

[117]李国元,么嘉棋,赵一鸣,等. 激光测高卫星大气散射延迟改正现状及展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 65-75.
LI Guoyuan, YAO Jiaqi, ZHAO Yiming, et al. Progress and Prospect of Atmospheric Scattering Correction for Laser Altimetry Satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 65-75.

[118]马跃. 星载激光测高系统数据处理和误差分析[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
MA Yue. The Data Processing and Error Analysis for Satellite Laser Altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.

[119]NABOULSI A, SIZUN H, DE F F. Propagation of Optical and Infrared Waves in the Atmosphere [C]//The 28th URSI General Assembly, New Delhi, 2005.

[120]PUENTE I, GONZÁLEZ-JORGE H, MARTÍNEZ-SÁNCHEZ J, et al. Review of Mobile Mapping and Surveying Technologies[J]. *Measurement*, 2013, 46(7): 2127-2145.

[121]GUO K, LI Q, MAO Q, et al. Errors of Airborne Bathymetry LiDAR Detection Caused by Ocean Waves and Dimension-Based Laser Incidence Correction[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1750.