

# 光学学报

## 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用

龚威<sup>1</sup>, 史硕<sup>1\*</sup>, 陈博文<sup>1</sup>, 宋沙磊<sup>2</sup>, 吴德成<sup>3</sup>, 刘东<sup>3</sup>, 刘正军<sup>4</sup>, 廖梅松<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

<sup>2</sup> 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;

<sup>3</sup> 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>4</sup> 中国测绘科学研究院摄影测量与遥感研究所, 北京 100830;

<sup>5</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 高光谱激光雷达作为一种新型的主动式对地观测技术手段, 结合了传统激光雷达三维空间信息获取和被动高光谱成像技术的优势, 可实现高空间分辨率和高光谱分辨率的一体化成像探测, 已成为未来遥感技术发展的重要方向。首先, 从激光雷达空谱一体化数据获取技术研究进展出发, 论述了高光谱激光雷达成像技术的发展历程并分析了其独特的优势。随后, 结合机载平台应用发展, 针对机载高光谱激光雷达系统研制中的关键技术难点, 对激光发射单元、接收探测单元和数据处理单元的发展进行了阐述。最后, 面向该新型遥感技术的未来发展前景, 重点分析了机载高光谱激光雷达在地物覆盖分类、植被遥感监测、海洋资源探测和军事目标侦查等领域中的重大应用潜力, 并针对其未来推广应用进行了展望与分析。机载高光谱激光雷达凭借其空谱一体化数据获取优势, 将来有望发展成为一种新型遥感技术门类。

**关键词** 遥感; 对地观测; 机载激光雷达; 高光谱成像; 空谱合一

中图分类号 TP701

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1200002

## Development and Application of Airborne Hyperspectral LiDAR Imaging Technology

Gong Wei<sup>1</sup>, Shi Shuo<sup>1\*</sup>, Chen Bowen<sup>1</sup>, Song Shalei<sup>2</sup>, Wu Decheng<sup>3</sup>,  
Liu Dong<sup>3</sup>, Liu Zhengjun<sup>4</sup>, Liao Meisong<sup>5</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China;

<sup>2</sup> Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

<sup>3</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>4</sup> Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China;

<sup>5</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** As a new type of active earth observation technology, hyperspectral LiDAR combines the advantages of three-dimensional spatial information acquisition of traditional LiDAR and imaging technology of passive hyperspectral sensors. Hyperspectral LiDAR can realize the integrated imaging detection of high spatial resolution and hyperspectral resolution, which has become an important direction of the development of remote sensing

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504500)、国家自然科学基金(41971307)

通信作者: \*shishuo@whu.edu.cn

technology in the future. First, the development process and unique advantages of hyperspectral LiDAR imaging technology are discussed from the research progress of spatial-spectral integrated data acquisition technology for LiDAR. Then, in terms of the application and development of the airborne platform, the technological development of laser transmitting unit, receiving and detecting unit, and data processing unit is introduced from the key technical difficulties in the development of airborne hyperspectral LiDAR system. Finally, in view of the future development prospects, the major application potential of airborne hyperspectral LiDAR in land cover classification, vegetation remote sensing monitoring, marine resource detection and military target detection is analyzed. Meanwhile, the future promotion and application of this technology are prospected and analyzed. Due to its advantages in spatial-spectral integrated data acquisition, airborne hyperspectral LiDAR is expected to develop into a new type of remote sensing technology in the future.

**Key words** remote sensing; earth observation; airborne LiDAR; hyperspectral imaging; spatial-spectral integration

## 1 引言

机载激光雷达技术作为一种重要的对地观测技术手段,通过主动式激光遥感探测,结合全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(IMU)等技术,可实现对地表目标的高精度三维空间获取,在基础测绘<sup>[1-2]</sup>、城市三维建模<sup>[3-4]</sup>和森林管理<sup>[5-6]</sup>等诸多领域应用中发挥着越来越重要的作用。随着全球变化、城市快速发展等诸多应用挑战的出现,未来遥感技术发展对目标高分辨率三维空间-光谱信息一体化获取与应用需求变得较为迫切<sup>[7]</sup>。然而,传统激光雷达仅利用单波长进行激光探测,对目标光谱探测能力不足<sup>[8-10]</sup>,亟需在其三维空间获取优势的基础上,大力发展新型遥感探测技术,增强其光谱获取能力。

相比主动式激光雷达技术,在目前的遥感技术手段中,被动高光谱成像可获得地物目标丰富的光谱信息<sup>[11-13]</sup>,但对目标三维空间信息的获取受限。然而,高光谱多角度立体成像技术的发展,可以改善传统航测遥感影像只能从单一方向拍摄的局限性,为目标三维空间-光谱信息一体化获取提供了一种解决途径。多角度遥感立体成像技术通过多个方向探测可获得更优的三维空间数据,并已被成功应用于城市建设、森林监测和资源调查等领域中<sup>[14]</sup>。然而,与激光雷达探测相比,多角度遥感立体成像技术作为被动遥感探测手段受太阳光照、天气的影响相对较大。此外,多角度遥感立体成像技术不具备激光雷达全天时探测的优势,且对复杂场景空间信息精准提取方面稍显不足,特别是对植被垂直分布信息获取的能力欠缺,在植被参量精细化反演应用中具有一定的局限性。

因此,面向目标高分辨率三维空间-光谱信息一体化获取需求,在保留机载激光雷达空间探测优势的同时,发展新型遥感技术手段来增强激光雷达的光谱探测能力,已成为遥感技术发展的重要方向。

经过 20 多年的技术发展,激光点云与高光谱影像数据融合技术、高光谱激光雷达技术等不同遥感探测手段得到了快速发展,并在目标空谱一体化获取中发挥了重要的作用。其中,高光谱激光雷达技术借鉴了被动光学遥感成像技术“全色-多光谱-高光谱”的发展思路,通过增加激光雷达探测波段数量来提高光谱获取能力<sup>[15]</sup>,进而将主、被动遥感技术手段的优势真正在一台传感器上面合二为一,成功实现了对目标高分辨率三维空间-光谱信息的一体化获取<sup>[16-17]</sup>,成为了国内外的研究热点。

面向对地观测目标空间三维-光谱信息一体化获取的需求,机载高光谱激光雷达作为一种新型的主动式遥感探测技术手段,可实现对目标光谱几十甚至几百个谱段的全波形数据获取,并具有全天时、全谱段和高空间分辨的探测能力。首先,本文从激光雷达空谱一体化数据获取技术发展方面进行讨论分析,论述了高光谱激光雷达技术的应用趋势及其发展历程。然后,结合机载平台应用发展,以机载高光谱激光雷达系统硬件技术发展为目标,重点对激光雷达系统关键单元技术研究面临的关键难点及其进展进行了分析。最后,探讨了机载高光谱激光雷达在土地覆盖分类、植被遥感监测、海洋资源探测和军事目标侦查等诸多领域中的重大应用潜力和未来发展。

## 2 激光雷达空谱一体化数据获取技术发展

在对目标空间-光谱一体化获取方面,主动激光雷达扫描与被动高光谱成像两种遥感技术手段的特点是单方面获取能力突出,但在同时获取方面就稍显不足。然而,随着遥感应领域的不断扩展,探测目标也向着复杂化、精细化方向发展,单一遥感探测技术手段已难以完成复杂场景下的高精度探测任务。因此,将主被动遥感技术进行优势融合,进而兼

具激光雷达高精度三维探测能力和高光谱成像丰富光谱获取优势,已成为遥感技术发展的重要方向。为实现对目标高空间分辨率与高光谱分辨率的一体化遥感探测,国内外基于激光雷达三维高精度空间获取优势,开展了大量的技术探索与尝试,并取得了一系列突破性进展。

### 2.1 激光点云与高光谱影像数据融合技术

为实现目标空间-光谱信息一体化获取,国内外研究学者立足传统激光雷达三维空间信息获取和被动高光谱成像技术优势,参照多源遥感数据优势融合的思路,开展了激光雷达与高光谱相机的主被动传感器数据融合技术的研究。为实现更优的遥感目标探测任务,尝试在机载平台上同时搭载激光雷达和高光谱相机两台传感器,同时获取地物目标的点云数据和高光谱影像数据,用于提高对目标的探测能力。基于此研究思路,国内外研究机构开展了大量的研究,并结合主被动遥感多传感器研制了相关的集成系统,如美国斯坦福大学卡耐基航空观测平台 CAO<sup>[18]</sup>与 CAO-2<sup>[19]</sup>、美国宇航局 G-LiHT 系统<sup>[20]</sup>、美国国家生态观测网络机载观测平台 NEON-AOP<sup>[21]</sup>,以及中国林业科学研究院 CAF-LiCHY 系统与 ALHIS 系统<sup>[22]</sup>等。此外,随着激光雷达与高光谱相机主被动传感器集成系统的成熟发展,其在智慧城市、土地覆盖分类和森林监测等方面中已发挥出重要作用。

此外,为了充分挖掘主被动数据融合的技术优势,国内外研究学者开展了大量研究。在地物目标分类方面:Khodadadzadeh 等<sup>[23]</sup>将机载点云数据和高光谱影像融合,利用多特征学习策略对 15 种城市地物进行区分,与原始高光谱影像分类结果相比,通过主被动融合使得总体分类精度提升了 11.17%;Luo 等<sup>[24]</sup>采用分层叠加和主成分分析方法将机载点云和高光谱影像融合,基于融合后的数据集对 7 种不同地物目标进行分类,结果表明主被动融合数据集分类精度均高于单一点云数据集和高光谱数据集的分类精度,总体分类精度分别提高了 19.6%和 9.1%,验证了主被动数据融合技术在地物分类应用中的巨大优势。在森林监测方面:Alonzo 等<sup>[25]</sup>融合了具有高空间分辨率的机载点云数据和高光谱数据对常见树种进行区分,结果表明在融合激光雷达数据后,分类精度比仅使用光谱数据提高了 4.2%;Pang 等<sup>[26]</sup>在林区中将机载激光雷达点云与高光谱影像融合来估测森林生物量,相比单一数据其森林生物量估算结果更优。

激光点云与高光谱影像的数据融合技术通过建立两种不同维度数据间的映射关系,将高光谱影像丰富的光谱信息赋予激光点云,丰富了点云的光谱属性,进而可在各领域应用中发挥更大优势。在实际应用中,激光雷达点云与高光谱影像之间的高精度配准是后续数据处理应用的前提和关键。然而,受两种数据间配准精度、采集时间不匹配等因素制约,主被动数据融合技术在目标空间-光谱信息一体化获取方面还存在一定的限制。

### 2.2 高光谱与激光雷达共光路成像技术

针对激光点云与高光谱影像主被动融合技术,国内外已开展了大量研究工作,并取得了一系列较好的研究结果。然而,受限于两种传感器测量基准不统一,可能会导致探测目标远场一致性匹配精度较差甚至出现无法匹配的现象,并影响探测结果。为此,不同于多传感器数据融合的思路,国内外研究机构尝试研制新型遥感硬件设备,发展高光谱与激光雷达共光路成像技术,通过一台设备探测解决高光谱成像与激光远场光斑的一致性匹配问题,最终实现目标远场位置上的空间-光谱信息一体化获取。

高光谱与激光雷达共光路成像技术采用高光谱信息与激光脉冲信号共光路探测结构设计,获取来自地物目标同一位置处的高光谱辐射信息和激光回波信号,并利用分光片对两种信号进行分离。然后,利用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)在线处理技术实现两种信号的同步探测接收,从而分别实现高光谱成像探测和激光测距。这种新型的高光谱与激光雷达共光路成像技术可有效地在探测时间和探测位置上保证数据的同步获取,实现高光谱影像和激光雷达点云在时空上的精准匹配,有效解决高光谱成像与激光远场光斑的一致性匹配问题,实现目标空间-光谱信息的一体化探测。付成群等<sup>[27]</sup>自主设计搭建了一套高光谱-激光雷达共光路系统,采用全透射式光学系统、单像素雪崩光电二极管(APD)探测器和电荷耦合器件探测器(CCD),利用工控机实现两种信号的探测采集控制。测试实验结果表明,该系统可实现对伪装目标的识别探测,为地物的精准分析和属性识别提供有力手段。此外,王玉诏等<sup>[28]</sup>设计了一种高光谱与激光雷达共光路一体化分光系统,进一步优化了高光谱成像与激光远场光斑的一致性匹配问题。相比激光点云与高光谱影像数据融合技术,高光谱与激光雷达共光路成像技术通过硬件技术解决了空间-光谱信息在时空上的匹配问题,并有望发挥重要作用。然而,面向空间-光谱一体化



获取,激光点云数据与高光谱影像作为两种不同数据类型,是点与面的融合,从原理上来说二者绝对精准的数据匹配融合仍无法实现。

### 2.3 高光谱激光雷达成像技术

传统激光雷达仅利用单一波长进行激光探测,导致对目标光谱探测能力不足。面向目标高空间分辨和高光谱分辨的一体化成像探测需求,与主被动遥感技术融合的思路不同,立足激光雷达技术优势,开展新体制激光雷达成像技术研究是国际研究前沿。借鉴被动光学遥感成像的发展过程,波段数目的增加可以有效提高对地物目标的光谱探测能力。因此,通过针对性地增加激光探测波段数量来发展新体制激光雷达,有望实现对目标高空间分辨和高光谱分辨的一体化成像探测,国内外也先后开展了诸多尝试性探索研究。并且,经过近 20 年的发展,激光雷达技术也经历了“双波长-多光谱-高光谱”的发展历程,而高光谱激光雷达成像技术将成为未来激光雷达技术发展的重要趋势。

为更好地获取地物目标属性,国内外研究学者尝试在激光雷达探测中增加能够较好表征地物光谱特征的波段,如美国宇航局(NASA)<sup>[29]</sup>采用 660 nm 和 780 nm 两个邻近植被“红边”的波长进行植被光谱特性探测,虽然仅能进行定点测量,但是初步验证了增加激光探测波段对提高光谱探测能力的可行性。2007 年,武汉大学龚威等<sup>[30]</sup>采用 670 nm 和 780 nm 两个激光波长发展了植被光谱比探测激光雷达,并通过扫描探测实现了对植被空间信息和两波段光谱信息的同时获取。随后,芬兰大地测量研究所<sup>[31]</sup>、美国波士顿大学<sup>[32]</sup>和英国索尔福德大学<sup>[33]</sup>等也开展了相关研究来研制双波长激光雷达,充分验证了通过增加探测激光波段数量来发展新体制成像激光雷达可以

实现对光谱信息和三维空间信息的同时获取。

为了更好地表征地物属性,武汉大学提出发展多光谱激光雷达,2009 年底成功研制了 4 波长多光谱激光雷达原理样机,可以在尽量少的探测波段情况下实现最佳的物性探测能力,对典型地物分类和植被生长状态监测具有较好效果<sup>[34-35]</sup>。随后,英国爱丁堡大学<sup>[36]</sup>、英国赫瑞瓦特大学<sup>[37]</sup>、芬兰大地测量研究所<sup>[38]</sup>和中国科学院空天信息创新研究院<sup>[39]</sup>也纷纷研制了多光谱激光雷达系统,并验证了多光谱激光雷达在地物分类、植被生化参数反演等领域中的应用潜力。

激光雷达在取得“双波长-多光谱”的阶段性进展后,参考被动光学遥感成像“全色-多光谱-高光谱”的发展历程,进一步发展高光谱激光雷达成像技术,通过几十甚至上百波段的探测实现对可见光到近红外谱段更高光谱分辨的探测具有重要意义。图 1 所示为武汉大学激光雷达系统发展路线图,在原有双波长及多光谱激光雷达基础上,武汉大学于 2013 年底成功研制 32 通道高光谱激光雷达系统,在 450~910 nm 光谱范围内可调,并在地物分类<sup>[40]</sup>、植被遥感监测<sup>[41-43]</sup>和真彩色三维成像<sup>[44]</sup>等应用中取得较好效果。此外,中国科学院空天信息创新研究院 Li 等<sup>[45]</sup>也成功研制了 32 通道全波形激光雷达系统,并将其用于植被生化参数反演中。中国科学院空天信息创新研究院联合芬兰大地测量研究所基于声光可调谐滤波器(AOTF)方案研制了 51 通道和 91 通道高光谱激光雷达系统<sup>[46-47]</sup>,该方案虽然需多次激光脉冲发射才能实现对几十个谱段的测量,不太适用于机载扫描等需要单脉冲快速高光谱成像的应用场景,但是对高光谱激光雷达的应用探索具有一定的借鉴意义。

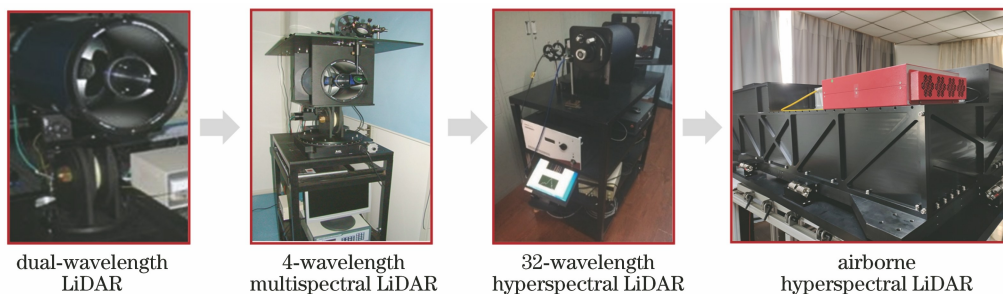


图 1 武汉大学激光雷达系统发展路线图

Fig. 1 LiDAR system development process of Wuhan university

2018 年国家重点研发计划立项支持高光谱激光雷达成像技术发展,旨在研制不少于 50 波段机载高光谱激光雷达原理样机,为航空航天高光谱激光

雷达载荷研制及其推广应用奠定基础,由武汉大学牵头,联合中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院合肥物质科学研究所和中国测绘科学研究

院等单位共同承担,目前已成功研制机载高光谱激光雷达原理样机<sup>[48-50]</sup>,并计划针对测绘、林业等应用开展机载飞行验证。

### 3 机载高光谱激光雷达系统关键单元技术研究进展

针对高光谱激光雷达的技术探索,国内外大部分研究还处在实验室地面原理样机研制阶段。然而,相比地基平台的探索应用,机载高光谱激光雷达成像技术的发展将对该新型技术的实用化和应用推广更有意义。凭借机载平台快速、大范围、高精度的应用优势,未来机载高光谱激光雷达将在对地观测应用中发挥重要作用。目前,加拿大 Optech 公司 Titan 三波长多光谱激光雷达、奥地利 Rigel 公司 VQ-1560i-DW 双波长激光雷达等商用系统,作为高光谱激光雷达发展过程中的阶段性机载系统,虽然已取得很多应用成果,但是在高分辨空间-光谱信息一体化获取方面还存在一定差距。面向未来机载平台应用,仍然亟须发展涵盖可见-近红外谱段,具有更高光谱分辨的高光谱激光雷达系统。结合机载高光谱激光雷达成像技术研制目标和进展情况,对高光谱激光雷达的激光发射、接收探测与采集、数据处理等关键单元技术难点和研究进展进行分析具有重要意义,可为机载高光谱激光雷达系统硬件研制发展提供技术参考。

#### 3.1 激光发射单元研究进展

高光谱激光雷达作为主动式激光遥感探测技术,激光光源选择是激光雷达系统研制面临的首要问题。高光谱激光雷达以提升地物光谱探测能力为目标,探测波长需能较好地表征地物特征,而传统单波长激光雷达系统大多采用中心波长为 532,1064,1550 nm 的激光器,这三个波段不是表征地物特征的最敏感波段。针对不同地物目标和植被不同生长状态的监测需求,武汉大学龚威等<sup>[35]</sup>对 350~2500 nm 高光谱数据开展波长选择研究,提出 556,670,700,780 nm 4 个波长组合用于激光雷达研制能够更好地表征地物特性。芬兰大地测量研究所采用 8 个波长(540,670,800,990,1064,1100,1225,1460 nm)研制激光雷达系统,实现了对挪威云杉多光谱反射率三维点云数据的获取<sup>[38]</sup>。

然而,随着高光谱激光雷达成像技术的发展,探测任务对波段数的需求越来越大,几十上百甚至更多波段的探测任务对激光发射单元提出了更高的要求。随着超连续谱激光光源技术的发展,超短脉冲

激光耦合高非线性光纤可实现超宽(400~2500 nm)范围内的光谱输出,为高光谱激光雷达系统的激光发射单元提供了一种可行的解决方案。基于超连续谱激光器实现方案,武汉大学、中国科学院空天信息创新研究院分别研制了 32 波段高光谱激光雷达系统。此外,芬兰大地测量研究所、中国科学院空天信息创新研究院还基于 AOTF 方案研制了 51 通道和 91 通道高光谱激光雷达系统。虽然采用 AOTF 方案时不同激光发射波长间存在延迟,在快速同步探测方面存在一定限制,但是以超连续谱激光器作为发射光源已成为高光谱激光雷达系统的发展趋势。

#### 3.2 接收探测单元研究进展

光学接收单元是高光谱激光雷达系统中的重要组成部分,其光学接收效率直接影响激光雷达的探测性能。宽谱激光输出的平均光谱能量非常微弱,必须解决其回波的高光谱分光接收问题。武汉大学采用多通道分光方案研制 4 波长多光谱激光雷达,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、美国波士顿大学和美国爱达荷大学等研制的多光谱激光雷达系统也都采用多通道分光方案实现其多光谱激光雷达光谱的分光。然而,随着光谱通道数量的增多,多通道分光方案会导致系统复杂度增加,并且会造成回波能量大大衰减,亟需更好的分光方案来实现激光雷达光谱的分光。芬兰大地测量研究所 Hakala 等<sup>[38]</sup>利用光栅对 480~2200 nm 混合光谱信号进行分光,获取了 8 个通道的光谱信号。武汉大学和中国科学院空天信息创新研究院等也分别采用光栅分光方案研制 32 波段高光谱激光雷达,并实现了高光谱信息的获取<sup>[41,45]</sup>。

在对激光回波接收分光后,如何实现对几十个谱段回波进行高效光电探测,并保证各个探测通道回波信号的高精度同步获取也是高光谱激光雷达系统研制需要关注的内容。为了实现对不同波段的同步探测,可采用多光敏面探测器阵列方案<sup>[51]</sup>,利用高度集成的多个光敏探测面的线型或面型探测器阵列进行探测,其优点为可以尽可能地减小系统的体积。此外,为了能够最大限度地发挥每个探测器的探测能力,还可采用多探测器独立探测方案<sup>[48]</sup>,进而使每个通道的光电探测性能都可以达到探测器的响应上限。

#### 3.3 数据处理单元研究进展

机载高光谱激光雷达要对几十个乃至上百个探测通道的回波信号进行全波形记录,数据量非常巨

大,这些数据给传输与存储造成了巨大压力。为解决海量高光谱数据在传输和存储上的瓶颈问题,发展波形在线采集与处理技术是非常有必要的<sup>[52]</sup>。Wang 等<sup>[53]</sup>通过矩阵稀疏化表达的方式对波形进行在线波形分解与解算,提升了数据的吞吐量和运行效率。同时,高光谱激光雷达受系统传输效率、地表反射特性等影响,不同波段回波数据质量存在较大差异,对其强度数据进行校正也具有重要的意义。

此外,在进行全波形数据分解和辐射定标后,即可以解算出距离信息和反射率信息。编码器数据可以解译出激光脚点的扫描角度信息,结合 GPS 和 IMU 惯导数据进行匹配后可通过坐标解算生成机载高光谱三维点云数据,其整体流程如图 2 所示。最后,基于赋予地物高光谱反射率属性的三维点云数据,即可针对不同领域开展数据应用。

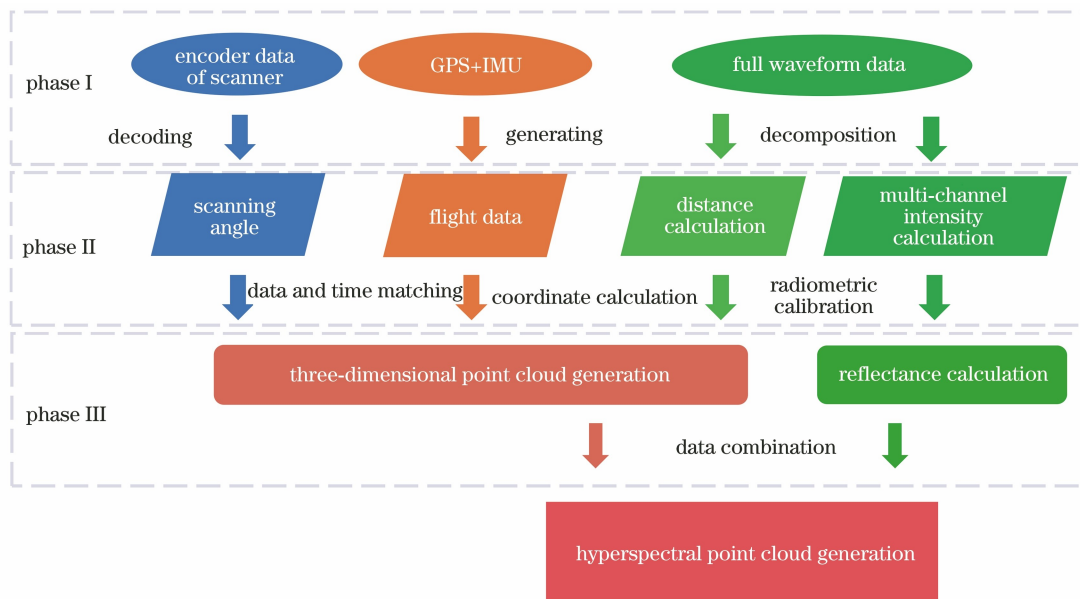


图 2 数据处理整体流程图

Fig. 2 Whole flow chart of data processing

## 4 机载高光谱激光雷达未来应用

机载高光谱激光雷达可实现全天时、全谱段、高精度和高分辨的对地观测任务,相比高光谱多角度遥感立体成像、激光雷达点云与高光谱影像融合等遥感探测技术,其突破了传统探测技术在地物目标空间-光谱同步获取方面的局限性,可实现对目标高空间分辨和高光谱分辨的一体化成像探测,在土地覆盖分类、植被遥感监测、海洋资源探测和军事目标侦查等相关领域中都具有非常大的应用潜力。

### 4.1 土地覆盖分类应用

土地覆盖分类一直是遥感领域研究的热点,而机载高光谱激光雷达结合了激光雷达与高光谱影像的技术优势,真正实现了地物几何与光谱信息一体化获取,可在土地覆盖分类中发挥重要作用。与高光谱多角度遥感立体成像相比,机载高光谱激光雷达可实现目标在垂直方向上的高精度探测,使得地物的几何信息能被更好地挖掘,应用于分类的空谱特征也更加丰富。与主被动融合技术相比,机载高

光谱激光雷达无需进行数据匹配即可同步获取目标的空间和光谱信息,解决了主被动融合配准精度不高造成的应用局限性问题。特别地,机载高光谱激光雷达在复杂场景地物精细分类应用方面,凭借其高精度的空间-光谱信息一体化获取能力,相较于其他遥感手段效果更优。

国内外研究表明,机载高光谱激光雷达在地物目标分类中数据优势明显。Gong 等<sup>[10]</sup>利用多光谱激光雷达系统对室内复杂场景进行分类研究,结果表明多光谱激光雷达相比单波长点云和多光谱影像分类效果更优,总体分类精度分别提升了 39.2% 和 4.2%,验证了多光谱激光雷达对复杂场景地物精确分类的能力。Fernandez-Diaz 等<sup>[54]</sup>应用 Optech 公司机载多光谱激光雷达 Titan 系统数据,验证了多光谱激光雷达比单波长点云和多光谱影像在地物分类中更具潜力。Teo 等<sup>[55]</sup>研究了机载多光谱激光雷达在复杂场景下的地物区分能力,结果表明相比单波长激光雷达,地物总体分类精度提高了 14%,提取的光谱特征在地物分类方面比空间特征更优,



总体分类精度提高了 29%。Shi 等<sup>[56]</sup> 构建了机载多光谱激光雷达点云的空间光谱特征,并基于空谱特征选择充分发挥了多光谱激光雷达在土地覆盖分

类中的优势,点云分类效果如图 3 所示。Jing 等<sup>[57]</sup> 通过多种深度学习算法对 Titan 数据进行地物分类,并取得了较好的分类效果。

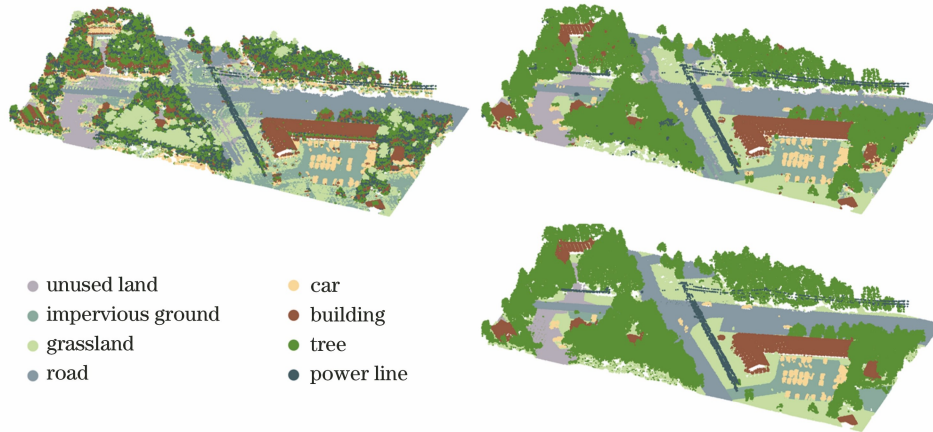


图 3 Titan 数据点云分类效果

Fig. 3 Point cloud classification of Titan data

#### 4.2 植被遥感监测应用

机载高光谱激光雷达可实现几十个通道的全波形数据获取,并能够穿透植被冠层到达地表,用于植被参数垂直分布信息探测。此外,机载高光谱激光雷达还可用于森林灌木、草本等低矮植被信息的监测与提取,在植被遥感监测应用中具有重大的应用潜力。与机载高光谱激光雷达成像技术相比,传统光学遥感技术需要其他辅助手段才能提取森林植被的三维结构参数,如高光谱多角度立体成像和主被动融合遥感技术。然而,两种技术面临的问题是只能获取植被冠层表面的光谱信息,对冠层下植被的空谱信息获取能力不足,并在对植被参量的定量反演中存在一定限制。机载高光谱激光雷达技术凭借其技术优势可精确获取冠层下植被的空谱信息,进而为植被参量的精准监测和反演提供了可靠数据支撑。Sun 等<sup>[58]</sup> 对比了高光谱激光雷达、多光谱激光雷达和被动光谱仪在估算水稻叶片氮浓度方面的效果。结果表明,高光谱激光雷达在植被叶片氮浓度反演中表现最佳,是一种非常有效的探测手段。高帅等<sup>[59]</sup> 利用高光谱激光雷达对室内单株植被不同位置处的生化组分进行测定,展示了植被生化组分在三维空间上的垂直分布,验证了高光谱激光雷达系统在植被生化组分和结构参数一体化提取方面的可行性。Kukkonen 等<sup>[60]</sup> 利用机载多光谱激光雷达数据验证了多光谱点云数据在森林树种监测方面的可行性。实验结果表明,与主被动融合数据相比,机载多光谱激光雷达在树种分类方面更具优势。

此外,在森林监测方面,机载高光谱激光雷达除

了可以获取森林冠层信息外,还可通过全波形探测获取森林垂直方向和林下植被的空谱一体化点云数据,为森林植被碳储量的立体分布监测和高精度估算提供了新的可能,并可在一定程度上解决传统遥感技术在森林植被碳储量估算中存在的低估和不确定性问题,更好地服务“双碳”国家战略,推动碳循环和全球变化科学研究进展。Chen 等<sup>[61]</sup> 通过对机载多光谱点云进行分割处理,获取精确的森林树状参数来估测整个森林区域的碳储量值,与实际单位城市面积的碳储量相近,验证了机载多光谱激光雷达在森林碳储量估算方面的潜力。Yu 等<sup>[62]</sup> 利用机载多光谱激光雷达数据计算地物空谱特征用于树种分类,并且针对不同疏密度的树木都可获得较高的分类精度,表明了机载多光谱激光雷达数据在森林树种分类方面的优势。

#### 4.3 海洋资源探测应用

机载高光谱激光雷达凭借空间-光谱信息的一体化获取能力,在海洋资源探测中也可以发挥重要作用。作为一种海洋资源探测的新型技术手段,机载高光谱激光雷达可用于对海洋地形、浮游植物和海洋物种等进行高精度探测,并且可为全球碳循环、能量流动等监测研究提供重要的技术支持和数据支撑。

基于不同波长激光在水体中的吸收、反射和透射特性,机载高光谱激光雷达在海洋探测中应用潜力巨大。目前,国内外海洋探测激光雷达系统大都搭载绿光波段激光探测水体,因为绿波段激光(470~580 nm)穿透海面时,吸收、散射的能量比其

他波段低,能够实现更深层次的海军探测。例如,中国科学院上海光学精密机械研究所研制了 532 nm 和 486 nm 机载双波长激光雷达系统<sup>[63]</sup>,通过机载实验证明了 486 nm 激光的探测深度比 532 nm 激光更优。由于高光谱激光雷达可见光覆盖能力更好,故其用于深度探测可能效果会更优。此外,海水对近红外波段激光吸收能力强,可联合相关谱段实现对海洋探测能力的进一步提升<sup>[64]</sup>。机载高光谱激光雷达可实现对可见光-近红外几十个波段的激光探测,可为海洋测深、浮游植物探测等海洋探测方面提供更多有用的信息。Shaker 等<sup>[65]</sup>利用多光谱激光雷达数据对陆地和水域进行分割,验证了多光谱激光雷达在近岸和沿海地区地图快速绘制方面的能力。Morsy 等<sup>[66]</sup>利用机载多光谱激光雷达数据,基于区域生长算法实现了土地与水体的分离。结果表明,水陆分界总体精度可达 99% 以上,其分离效果比单波段激光雷达效果更优,进一步表明了高光谱激光雷达在海陆探测应用方面的可行性。

#### 4.4 军事目标侦查应用

现代战场中伪装网或树冠叶片等障碍物增大了军事目标的识别难度,因此对伪装后的阵地、坦克装甲等军事目标进行高效、快速的识别侦查具有十分重要的意义。为弥补主、被动不同探测手段的缺点,国内外研究人员尝试将被动成像系统和激光主动探测系统结合起来,构成双模复合探测系统<sup>[67-68]</sup>,该系统能够分别获取目标的光谱信息和三维空间信息,但不同系统间的数据融合存在数据配准难题,并且数据分时处理对目标快速识别与响应存在一定的影响。高光谱激光雷达成像技术通过对目标空间和光谱信息的一体化获取,可实现对森林覆盖、伪装遮挡下的军事目标进行侦查。

面向森林覆盖或伪装等障碍物下军事伪装目标快速准确侦查的需求,结合高光谱成像与激光雷达测距的技术优势,开展基于多波长激光主动探测的高光谱激光雷达新型成像技术攻关,可利用激光透过树冠或伪装网等的间隙,进行准确快速的目标侦查,进而解决遮挡下原有光学手段无法解决的军事装备无法被侦查的难题。此外,该技术手段可以不受光照条件限制,可进行全天时甚至全天候测量,获得军事伪装目标距离分辨的三维光谱图像,进而同时进行光谱和空间解混,对不同类型的物体进行分类,大大提高判别能力。特别是,在高度杂乱的环境(如森林或城市地区)中,面对伪装网或树冠叶片等障碍物,高光谱激光雷达将发挥其独特的优势,有更

高的识别置信度。

针对未来军事应用需求,高光谱激光雷达技术发展还面临重大挑战,如不同于目前民用领域大功率激光输出,军事侦察的隐蔽性要求对探测波段和激光输出功率都有的一定限制。同时,低功耗激光输出和超快成像也对微弱光信号军事目标识别精确性提出重大挑战。并且,军事侦察的快速实时性也要求在极短时间内实现目标的超快成像。因此,针对隐蔽、快速、精确的军事应用需求,高光谱激光雷达技术势必要攻克超快扫描探测、微弱光彩色三维成像等难题,并发展基于高光谱激光雷达探测机制的微弱光超快成像技术,未来该技术手段的成功实现有望在军事应用中发挥重要作用。

## 5 总结和展望

面向对地观测领域重大发展需求,机载高光谱激光雷达技术结合了激光雷达高精度测距和高光谱成像的技术优势,可实现对地物目标的全天时、全波段、高精度和高分辨的监测,已成为国内外遥感技术发展的热点。通过对激光雷达空谱一体化数据获取技术发展的对比分析,可以看到,开展高光谱激光雷达成像技术研究将成为未来遥感技术发展的必然趋势。并且,未来结合机载平台应用,高光谱激光雷达遥感技术将会得到快速发展,并且可在测绘、农业、林业、地质、海洋、水文和军事等领域中发挥重要作用。

近年来,国内外高光谱激光雷达的发展速度显著加快,在硬件系统和数据处理方面已经日趋完善,其应用潜力也逐步被挖掘。针对机载高光谱激光雷达系统关键技术难点,探讨和明确了激光发射单元、接收探测单元和数据处理单元的研究进展与未来路线,对机载高光谱激光雷达的成熟应用具有较大的参考意义。然而,针对未来技术成熟化发展和示范应用,机载高光谱激光雷达在以下方面尚需开展进一步研究。

### 1) 机载系统和单元技术展望

为推动对地观测机载高光谱激光雷达系统的未来发展,应该更加注重小型化、实用化,降低机载高光谱系统的造价成本,推动其商业化方向的应用,并逐步提高机载高光谱激光雷达系统的性能,为后续应用奠定基础。

在单元技术方面,应进一步攻克高脉冲能量宽谱段激光光源、高效多波段分光接收技术、高灵敏度微弱光探测技术难题,发展更高能量超连续谱激光,



优化多通道同步探测接收,提高光电探测效率,实现全天时高精度地物光谱获取。

## 2) 数据处理和应用

针对机载高光谱激光雷达海量数据,应研究更加高效的在线全波形解算方法,并基于高性能计算或者云计算技术,提高回波强度精准解算能力,提高海量点云数据的处理速度与可用性,较好实现全天候、全天时、全谱段地物实时三维高光谱显示,扩展机载高光谱激光雷达应用的深度与广度。

此外,凭借机载平台快速、大范围、高精度的应用优势,未来高光谱激光雷达将在对地观测应用中发挥更加重要的作用。特别是,凭借多通道全波形获取能力,高光谱激光雷达可实现植被高精度生理生化参数反演<sup>[69]</sup>、生物量计算<sup>[70]</sup>和森林碳汇监测<sup>[5,71]</sup>,在应对“碳达峰、碳中和”重大挑战中将发挥重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Okyay U, Telling J, Glennie C L, et al. Airborne lidar change detection: an overview of Earth sciences applications[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 198: 102929.
- [2] Hui Z Y, Hu Y J, Jin S G, et al. Road centerline extraction from airborne LiDAR point cloud based on hierarchical fusion and optimization [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 118: 22-36.
- [3] Sun S H, Salvaggio C. Aerial 3D building detection and modeling from airborne LiDAR point clouds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1440-1449.
- [4] Nys G A, Poux F, Billen R. CityJSON building generation from airborne LiDAR 3D point clouds[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(9): 521.
- [5] Mascaro J, Detto M, Asner G P, et al. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3770-3774.
- [6] Gleason C J, Im J. Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 80-91.
- [7] 龚威, 史硕, 陈必武, 等. 对地观测高光谱激光雷达发展及展望[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 501-513. Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and prospect of hyperspectral LiDAR for earth observation[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 501-513.
- [8] Chen B W, Shi S, Gong W, et al. Multispectral LiDAR point cloud classification: a two-step approach [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 373.
- [9] Shi S, Song S L, Gong W, et al. Improving backscatter intensity calibration for multispectral LiDAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1421-1425.
- [10] Gong W, Sun J, Shi S, et al. Investigating the potential of using the spatial and spectral information of multispectral LiDAR for object classification[J]. *Sensors*, 2015, 15(9): 21989-22002.
- [11] 李德仁, 王密. 高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(2): 1-11. Li D R, Wang M. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(2): 1-11.
- [12] Zhou W, Ming D P, Lv X W, et al. SO-CNN based urban functional zone fine division with VHR remote sensing image[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111458.
- [13] Adão T, Hruška J, Pádua L, et al. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1110.
- [14] 赵祖军. 多角度遥感提取地物几何信息的几个关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应应用研究所, 2006. Zhao Z J. Research on several key techniques in extraction of geometric information of ground surface based on multi-angle remote sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [15] Gong W, Song S L, Zhu B, et al. Multi-wavelength canopy LiDAR for remote sensing of vegetation: design and system performance[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 69: 1-9.
- [16] Chen B W, Shi S, Sun J, et al. Hyperspectral lidar point cloud segmentation based on geometric and spectral information[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24043-24059.
- [17] Du L, Jin Z L, Chen B W, et al. Application of hyperspectral LiDAR on 3-D chlorophyll-nitrogen mapping of *rohdea japonica* in laboratory[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 9667-9679.
- [18] Asner G P, Knapp D E, Kennedy-Bowdoin T, et al.

- Carnegie Airborne Observatory: in-flight fusion of hyperspectral imaging and waveform light detection and ranging for three-dimensional studies of ecosystems[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1): 013536.
- [19] Asner G P, Knapp D E, Boardman J, et al. Carnegie Airborne Observatory-2: increasing science data dimensionality via high-fidelity multi-sensor fusion [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 454-465.
- [20] Cook B D, Corp L A, Nelson R F, et al. NASA goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 4045-4066.
- [21] Krause K S, Kuester M A, Johnson B R, et al. Early algorithm development efforts for the National Ecological Observatory Network Airborne Observation Platform imaging spectrometer and waveform lidar instruments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8158: 134-147.
- [22] 刘清旺, 谭炳香, 胡凯龙, 等. 机载激光雷达和高光谱组合系统的亚热带森林估测遥感试验[J]. *高技术通讯*, 2016, 26(3): 264-274.
- Liu Q W, Tan B X, Hu K L, et al. The remote sensing experiment on airborne LiDAR and hyperspectral integrated system for subtropical forest estimation [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2016, 26(3): 264-274.
- [23] Khodadadzadeh M, Li J, Prasad S, et al. Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data using multiple feature learning [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(6): 2971-2983.
- [24] Luo S Z, Wang C, Xi X H, et al. Fusion of airborne discrete-return LiDAR and hyperspectral data for land cover classification [J]. *Remote Sensing*, 2015, 8(1): 3.
- [25] Alonzo M, Bookhagen B, Roberts D A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148: 70-83.
- [26] Pang Y, Li Z Y. Subtropical forest biomass estimation using airborne lidar and hyperspectral data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B8: 747-749.
- [27] 付成群, 方亮, 谢立军, 等. 高光谱-激光共光路联测设计与试验[J]. *兵工学报*, 2016, 37(11): 2002-2009.
- Fu C Q, Fang L, Xie L J, et al. Joint survey design and test of common optical path of hyperspectral lidar [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(11): 2002-2009.
- [28] 王玉诏, 陶宇亮, 荣微, 等. 一种高光谱与激光雷达共光路一体化分光系统: CN204575853U[P]. 2015-08-19.
- Wang Y Z, Tao Y L, Rong W, et al. A common-path integrated optical splitting system of hyperspectral sensor and lidar: CN204575853U[P]. 2015-08-19.
- [29] Rall J A R, Knox R G. Spectral ratio biospheric lidar[C]//*IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, September 20-24, 2004, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2004: 1951-1954.
- [30] 龚威, 朱忠敏, 宋沙磊, 等. 一种植物归一化指数遥感装置: CN1945319A[P]. 2007-04-11.
- Gong W, Zhu Z M, Song S L, et al. A vegetation normalization index remote sensing instrument: CN1945319A[P]. 2007-04-11.
- [31] Chen Y W, Räikkönen E, Kaasalainen S, et al. Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source[J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- [32] Douglas E S, Strahler A, Martel J, et al. DWEL: a Dual-Wavelength Echidna Lidar for ground-based forest scanning [C]// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 22-27, 2012, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2012: 4998-5001.
- [33] Gaulton R, Danson F M, Ramirez F A, et al. The potential of dual-wavelength laser scanning for estimating vegetation moisture content [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 32-39.
- [34] 宋沙磊. 对地观测多光谱激光雷达基本原理及关键技术[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- Song S L. Principles and key techniques of multispectral LiDAR for earth observation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [35] 龚威, 宋沙磊, 祝波, 等. 多光谱对地观测激光雷达系统: CN101738618A[P]. 2010-06-16.
- Gong W, Song S L, Zhu B, et al. Multispectral earth observation lidar system: CN101738618A[P]. 2010-06-16.
- [36] Woodhouse I H, Nichol C, Sinclair P, et al. A multispectral canopy LiDAR demonstrator project [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 839-843.
- [37] Wallace A M, McCarthy A, Nichol C J, et al. Design and evaluation of multispectral lidar for the recovery of arboreal parameters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(8): 4942-4954.
- [38] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full

- waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7119-7127.
- [39] Niu Z, Xu Z G, Sun G, et al. Design of a new multispectral waveform LiDAR instrument to monitor vegetation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1506-1510.
- [40] Chen B W, Shi S, Sun J, et al. Using HSI color space to improve the multispectral lidar classification error caused by measurement geometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(4): 3567-3579.
- [41] Du L, Gong W, Shi S, et al. Estimation of rice leaf nitrogen contents based on hyperspectral LIDAR[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 44: 136-143.
- [42] Sun J, Shi S, Yang J, et al. Estimating leaf chlorophyll status using hyperspectral lidar measurements by PROSPECT model inversion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 212: 1-7.
- [43] Sun J, Shi S, Wang L C, et al. Optimizing LUT-based inversion of leaf chlorophyll from hyperspectral lidar data: role of cost functions and regulation strategies[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 105: 102602.
- [44] Chen B W, Shi S, Gong W, et al. True-color three-dimensional imaging and target classification based on hyperspectral LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1541.
- [45] Li W, Sun G, Niu Z, et al. Estimation of leaf biochemical content using a novel hyperspectral full-waveform LiDAR system [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(8): 693-702.
- [46] Chen Y W, Li W, Hyypä J, et al. A 10-nm spectral resolution hyperspectral LiDAR system based on an acousto-optic tunable filter[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1620.
- [47] Shao H, Chen Y W, Yang Z R, et al. A 91-channel hyperspectral LiDAR for coal/rock classification[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(6): 1052-1056.
- [48] Wang B H, Song S L, Shi S, et al. Multichannel interconnection decomposition for hyperspectral LiDAR waveforms detected from over 500 m[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-14.
- [49] 钱立勇, 吴德成, 周晓军, 等. 高光谱成像激光雷达系统辐射定标和地物信息获取[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1128001.
- Qian L Y, Wu D C, Zhou X J, et al. Radiation calibration and ground object information acquisition based on high spectral imaging lidar system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1128001.
- [50] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0928002.
- Qian L Y, Wu D C, Liu D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928002.
- [51] Sun G, Niu Z, Gao S, et al. 32-channel hyperspectral waveform LiDAR instrument to monitor vegetation: design and initial performance trials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9263: 533-539.
- [52] Xie X H, Li X L, Li D, et al. Real-time *in situ* laser ranging via back propagation neural network on FPGA[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4664-4673.
- [53] Wang Z N, Xu L J, Li D, et al. Online multi-target laser ranging using waveform decomposition on FPGA[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(9): 10879-10889.
- [54] Fernandez-Diaz J C, Carter W E, Glennie C, et al. Capability assessment and performance metrics for the Titan multispectral mapping lidar [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 936.
- [55] Teo T A, Wu H M. Analysis of land cover classification using multi-wavelength LiDAR system [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 663.
- [56] Shi S, Bi S F, Gong W, et al. Land cover classification with multispectral LiDAR based on multi-scale spatial and spectral feature selection[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(20): 4118.
- [57] Jing Z W, Guan H Y, Zhao P R, et al. Multispectral LiDAR point cloud classification using SE-PointNet++ [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2516.
- [58] Sun J, Shi S, Gong W, et al. Evaluation of hyperspectral LiDAR for monitoring rice leaf nitrogen by comparison with multispectral LiDAR and passive spectrometer [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40362.
- [59] 高帅, 牛铮, 孙刚, 等. 高光谱激光雷达提取植被生化组分垂直分布[J]. *遥感学报*, 2018, 22(5): 737-744.
- Gao S, Niu Z, Sun G, et al. Vertical distribution inversion of biochemical parameters using hyperspectral LiDAR [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5): 737-744.
- [60] Kukkonen M, Maltamo M, Korhonen L, et al. Multispectral airborne LiDAR data in the prediction



- of boreal tree species composition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(6): 3462-3471.
- [61] Chen X Q, Ye C M, Li J, et al. Quantifying the carbon storage in urban trees using multispectral ALS data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(9): 3358-3365.
- [62] Yu X W, Hyyppä J, Litkey P, et al. Single-sensor solution to tree species classification using multispectral airborne laser scanning [J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 108.
- [63] Li K P, He Y, Ma J, et al. A dual-wavelength ocean lidar for vertical profiling of oceanic backscatter and attenuation[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2844.
- [64] 王鑫, 潘华志, 罗胜, 等. 机载激光雷达测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 78-82.  
Wang X, Pan H Z, Luo S, et al. Bathymetric technology and research status of airborne lidar[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(5): 78-82.
- [65] Shaker A, Yan W Y, LaRocque P E. Automatic land-water classification using multispectral airborne LiDAR data for near-shore and river environments [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 152: 94-108.
- [66] Morsy S, Shaker A, El-Rabbany A, et al. Airborne multispectral lidar data for land-cover classification and land/water mapping using different spectral indexes [J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, III-3: 217-224.
- [67] Yadav D, Arora M K, Tiwari K C, et al. Detection and identification of camouflaged targets using hyperspectral and LiDAR data [J]. Defence Science Journal, 2018, 68(6): 540.
- [68] Chen X H, Xu Q. Military information grid-based integrated photo-electric detector technology [C] // Ninth International Conference on Grid and Cloud Computing, November 1-5, 2010, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2010: 416-419.
- [69] Liu J, Skidmore A K, Jones S, et al. Large off-nadir scan angle of airborne LiDAR can severely affect the estimates of forest structure metrics [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 136: 13-25.
- [70] Popescu S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(9): 646-655.
- [71] Schreyer J, Tigges J, Lakes T, et al. Using airborne lidar and quickbird data for modelling urban tree carbon storage and its distribution: a case study of Berlin[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 10636.