## 对地观测高光谱激光雷达发展及展望

# 龚威<sup>1</sup>, 史硕<sup>1</sup>, 陈必武<sup>1</sup>, 宋沙磊<sup>2</sup>, 牛铮<sup>3</sup>, 王成<sup>3</sup>, 管海燕<sup>4</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 高帅<sup>3</sup>, 林沂<sup>5</sup>, 孙嘉<sup>6</sup>, 杨健<sup>6</sup>, 杜霖<sup>6</sup>

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071;

3. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094;

4. 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京 210044;

5. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

6. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 武汉 430074

**摘 要:**对目标空间三维—光谱信息的高分辨一体化获取与应用,是对地观测技术发展的前沿科学问题。结合 高光谱成像与激光雷达测距的技术优势,对地观测多光谱/高光谱激光雷达遥感技术手段应运而生,并成为遥感 技术未来发展的重要方向。本文分3个阶段详细回顾了对地观测高光谱激光雷达系统的发展历程,并针对其独有 数据类型阐述了数据处理研究方面的探索研究。最后,重点分析了高光谱激光雷达在测绘领域、农林业领域的 重大应用潜力,展望了未来对地观测高光谱激光雷达发展面临的机遇和挑战。

关键词:激光雷达,高光谱,空谱合一,全天时,植被遥感

引用格式: 龚威,史硕,陈必武,宋沙磊,牛铮,王成,管海燕,李伟,高帅,林沂,孙嘉,杨健,杜霖.2021.对地观测高光谱激光雷达发 展及展望.遥感学报,25(1):501-513

Gong W, Shi S, Chen B W, Song S L, Niu Z, Wang C, Guan H Y, Li W, Gao S, Lin Y, Sun J, Yang J and Du L. 2021. Development and prospect of hyperspectral LiDAR for earth observation. National Remote Sensing Bulletin, 25(1):501-513[DOI:10.11834/jrs.20210086]

1 引 言

经过几十年的发展,对地观测技术在环境监 测、林业调查、城市规划、资源探测等诸多应用 中,发挥着越来越重要的作用。遥感技术作为对 地观测的关键核心手段,在信息获取技术方面已 逐步发展为涵盖被动多光谱/高光谱成像、主被动 微波遥感、激光雷达遥感等多种手段较全面的技 术体系,可搭载在航空、航天及地面等多平台上 进行对地观测。而随着应对全球变化、城市建设、 军事应用等诸多难题及挑战,实现全波段、全天 候、全天时、高分辨的对地观测,是遥感技术发 展面临的重要机遇(姜景山,2006),尤其对目标 空间三维—光谱信息的高分辨一体化获取与应用, 是对地观测技术发展的前沿科学问题。 目前主要遥感技术手段中,主动式激光雷达 测距可实现目标全天时高分辨三维信息获取,被 动高光谱成像可获得丰富高分辨光谱信息,都展 现了其独特优势。然而,激光雷达因单波长探测 机制对目标光谱物性信息获取能力有限,应用受 到一定限制(Lim等, 2003);而被动高光谱成像 受天气、光照等因素影响较大,并且空间信息探 测能力稍弱(Puttonen等, 2010)。现有主被动两 种遥感技术手段单方面优势突出,但在高分辨率 空间三维—光谱信息同时获取方面都存在一定不 足。因此,将主被动遥感技术优势结合起来,成 为遥感技术发展的重要目标。

为了实现对目标几何特征与光谱信息一体化 获取的科学目标,基于目前主被动遥感技术手段 特点,国内外开展了大量探索研究。一方面,研

收稿日期: 2020-10-20; 预印本: 2020-12-26

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

**第一作者简介**: 龚威,1970年生,男,教授,研究方向为光学和激光遥感技术与应用。E-mail: weigong@whu.edu.cn 通信作者简介: 中面 1988年生, 里,副教授,研究方向为新刊对地激光需读技术与应用。E-mail: weigong@whu.edu.cn

通信作者简介: 史硕, 1988年生, 男, 副教授, 研究方向为新型对地激光雷达技术与应用。E-mail: shishuo@whu.edu.cn

究学者提出将主被动传感器搭载在同一平台上进 行同步观测,开展激光雷达与高光谱成像主被动 数据后处理融合研究(Alonzo 等, 2014; Beger 等, 2011; Dalponte 等, 2008, 2012; Debes 等, 2014; Dong 等, 2009; Jones 等, 2010; Kereszturi 等, 2018; Khodadadzadeh 等, 2015; Man 等, 2015; Mundt 等, 2006; Ortenberg 等, 2011; Painter 等, 2016; Sankey 等, 2017; Sasaki 等, 2012; Sohn 和 Dowman, 2007; Zhang 和 Lin, 2017; 李光辉等, 2013; 刘丽娟等, 2013; 曹琼等, 2019), 可在一 定程度上提高目标信息获取能力。然而,由于不 同传感器测量基准不统一,导致遥感目标远场一 致性匹配精度差甚至无法匹配。另一方面,国内 外研究机构也尝试在硬件上实现主被动融合三维 成像,如高光谱与激光雷达共光路一体化系统设 计(付成群等, 2016; 王玉诏等, 2015), 可以 在一定程度上解决高光谱成像与激光远场光斑的 一致性匹配问题。然而, 主被动融合技术通过不 同手段在对几何特征与光谱信息同时获取方面取 得了重大进展,但激光雷达点云数据与影像元数 据融合,是"点"与"面"的融合,理论上即无 法实现完全的数据匹配,并且仍然受天气、光照 等因素影响,无法进行全天时探测,应用存在诸 多限制。

除主被动融合技术研究外,另一种探索尝试 即发展新型激光雷达探测机理, 在三维空间探测 优势的基础上增强其光谱探测能力。激光雷达可 通过单点扫描或者采用面阵器件成像方式获取三 维空间信息,可分为激光扫描探测与面阵式非扫 描三维成像探测。国内外机构立足于该两种不同 技术路线开展了探索尝试,其中基于面阵成像探 测方式,美国林肯实验室Johnson等(1999)采用 超连续谱激光作为光源,研制了主动激光高光谱 成像系统,用于近距离目标的空间和光谱信息同 步获取。国内外学者基于该技术方案也开展了同 类相关研究 (Gmachl等, 2002; Nischan等, 2003; Powers 和 Davis, 2012; Guo等, 2019), 并取得了 一定进展。然而,因在同等激光功率下,面阵成 像方式的探测距离远远小于单点扫描探测方式, 所以现有对地观测系统中激光雷达主要采用激光 扫描探测进行三维空间信息获取,本文综述将重 点关注基于扫描式激光雷达的光谱探测能力提升。

因此,对地观测多光谱/高光谱激光雷达探测

技术应运而生,通过针对性增加激光探测波段, 兼具较好的三维空间及光谱同步探测能力。其可 在一个激光脚点同时实现多谱段数据获取,真正 实现空谱合一,还具有全天时探测能力。目前, 对地观测多光谱/高光谱激光雷达研究已成为国内 外研究的热点方向,并且与被动光学遥感"全色— 多光谱—高光谱"发展历程相似,对地观测激光 雷达也正在经历"单波长—多光谱—高光谱"发 展阶段,并展现了其巨大的应用潜力。

## 2 对地观测高光谱激光雷达系统发展历程

对地观测高光谱激光雷达系统的发展可以归 纳为3个阶段,即初期探索、阶段性进展以及逐步 发展,历经了"双波长一多光谱一高光谱"的发 展过程。到目前为止,国内外大部分硬件系统还 处于试验研究阶段,真正意义上的商业化系统尚 未面世。特别地,我国在该领域的研究起步较早, 并且一直保持国际领先地位。

#### 2.1 初期探索

20世纪90年代后,结合全球定位系统及惯性 导航系统的发展,机载激光雷达主要通过单波长 脉冲激光扫描的工作方式进行测距,展现了其对 地表空间三维快速、高精确获取能力,广泛应用 于测绘、林业等领域,成为重要对地观测技术手 段。单波长探测限制了其光谱探测能力,但借鉴 被动多/高光谱遥感探测技术发展,探测波段数量 越多则光谱信息获取能力越强。显然,在保留激 光雷达三维空间探测能力的同时,针对性地增加 探测波长数量,在一定程度上可以达到提高激光 雷达光谱探测能力目的。

实际上,与测距类激光雷达机制不同,多波 长激光主动探测技术在其他领域中的应用与发展 由来已久。20世纪70年代,基于大气散射机制的 双波长(1064 nm、532 nm)激光雷达就已在大气 遥感中得到应用。随后,多波长激光雷达技术 (1064 nm、532 nm、355 nm)又得到进一步发展, 主要用于大气气溶胶探测和污染监测。而在对地 观测中,双波长激光(1064 nm、532 nm)也已在 20世纪90年代得到商业应用,用于机载激光测 深,通过同时完成水深和岸线地形测量实现海陆 地形无缝拼接,而非用于光谱获取能力提升。进 一步地,基于多波长激光(1064 nm、532 nm、 相对于多波长激光雷达在其他领域的应用, 以提高地物光谱特性获取能力为目标的主动激光 雷达技术发展相对较晚。主要是不同于大气等遥 感探测应用对激光波长依赖性不高,采用常规激 光器本征激光波长(如1064 nm、532 nm)探测即 可。而对于地物目标光谱获取需求,要针对性增 加地物特征波长用于探测,这就对激光器的选择 与研制提出了重大挑战。因为作为激光雷达对目 标探测的主动光源,激光器的性能参数决定了系 统的探测性能。输出激光的峰值功率越高,激光 雷达的探测距离就越远;激光重复频率越高,系 统探测点云密度就越高,获取三维空间信息则越 精准。然而,不同参数的高指标兼顾输出对激光 器研制是一个极高挑战,对于特定波长的激光器 研制更是难上加难。

Nd: YAG 固体激光器具有脉宽窄、重复频率 高、功率大等优点,较易满足激光雷达探测需求, 并且输出1064 nm激光经过倍频晶体和3倍频后还 可产生532 nm和355 nm激光。因此,早期作为探 索性的尝试,Tan等(2002)采用1064 nm和532 nm 两个固体激光器本征波长研制了双波长机载偏振 激光雷达系统,通过不同波段反射率对树种的识 别进行探测区分,具有一定可行性。然而,因激 光雷达系统增加波段的为固体激光器本征波长, 而非最能表征地物光谱特征的波长,对地物探测 能力的提升必定有限。

因此,唯有针对典型地物探测应用增加表征 其光谱特性特征波长,发展激光雷达技术用于地 物遥感监测,方可大大提升对地物光谱特性的获 取能力。美国宇航局(NASA)的 Rall 和 Knox (2004)采用660 nm 和780 nm 两个邻近植被"红 边"波长的激光器两个,研制了针对植被光谱特 性探测的双波长激光雷达,初步验证了通过获取 植被指数用于植被生长状态变化监测的可行性。 英国赫瑞瓦特大学 Buller 等(2005)选用630— 975 nm范围内6个不同波长激光器,实现了对远处 角反射器目标6个不同波段反射信息的获取。以上 相关研究已初步展现了增加地物光谱特征波长对 光谱能力探测具有提升的作用,但因不同波长激 间上并不完全一致,而且仅仅进行了单点测试并 未实现扫描探测。

为了能够实现在同一激光点对不同波段光谱 信息的同时获取,并且可以展示扫描三维空间探 测能力,武汉大学龚威等(2006)提出开展植被 光谱比探测激光雷达关键技术研究,通过采用670 nm 和780 nm两个激光器作为激光光源,双波长激光 经光学合束后输出,结合机械扫描可实现对植被 三维信息及双波长反射光谱信息的同时获取。此 外,针对植被探测应用需求,芬兰大地测量研究 所(FGI)Chen等(2010)利用超连续谱激光器 作为光源,研制了双波长(600 nm 和 800 nm)激 光雷达。随后,美国波士顿大学 Douglas等 (2012),英国索尔福德大学 Gaulton等(2013)联 合纽卡斯尔大学,以及美国爱达荷大学 Eitel等 (2014)通过选择不同的波长研制了用于植被或农 作物生长状态监测的双波长激光雷达系统。

相关系统的研制,都充分验证了增加探测波 段对激光雷达光谱信息获取能力提升具有重要意 义,尤其在植被遥感监测方面展现出了巨大应用 潜力。然而针对不同地物目标和同种植被不同生 长状态的探测需求,两个波长对于光谱探测能力 的提升仍然有限,需增加更多的表征物性的特征 波长,从而达到更佳的光谱探测效果。但是,随 着物性特征波长的增加,就需增加对应波长激光 器及探测通道,从而增加系统复杂度及成本。因 此,进一步发展面临的首要关键问题就是需结合 应用探测效果来综合评估增加探测波段,确定最 优波段数量和最佳特征波长。

#### 2.2 阶段性进展——多光谱激光雷达

针对不同地物目标和同种植被不同生长状态的探测需求,为了能够更好地实现对地物三维— 光谱信息的一体化遥感探测,武汉大学提出发展 能够更好表征地物属性的多光谱激光雷达系统, Song等(2008)基于"以尽量少的激光探测波长 获得尽量好的物性探测能力"的准则对350—2500 nm 高光谱数据开展波长选择研究,对比分析了不同 波段数目(2—215个)组合情况下物性反演效果, 确定采用556 nm、670 nm、700 nm和780 nm 4个 波长能够较好表征地物属性,并于2009年底成功 研制对地观测多光谱激光雷达系统(龚威等, 2009)。并且,结合激光雷达三维空间探测优势与 不同波段激光反射光谱,对9种不同典型地物以及 不同生长状态的植被进行遥感分类监测,达到较 好效果(宋沙磊,2010)。四波长多光谱激光雷达 的成功研制,实现了在一台设备上对空间三维— 光谱信息的一体化获取,面向真实场景三维多光 谱扫描成像效果也得到了进一步展示和验证 (Gong等,2012; 史硕等,2014)。

国际上,英国爱丁堡大学 Morsdorf 等 (2009) 基于模型进行了多光谱激光雷达数据模拟,从理 论上分析了多光谱激光雷达相比于单波长激光雷 达在森林结构和生理参数监测方面的潜在优势。 Woodhouse 等 (2011) 研制了一套基于可调谐激 光的四波长 (531 nm, 550 nm, 690 nm, 780 nm) 多光谱激光雷达系统,可用于获取树木的高度信 息及冠层内部NDVI的季节性和垂直变化。但是可 调谐激光器每次仅能输出一个波长激光, 需分多 次测量才能获取四个波段的光谱信息。在此研究 基础上, 赫瑞瓦特大学 Wallace 等(2014) 采用超 连续谱激光与声光可调谐滤波器(AOTF)方案, 进一步分析了多光谱激光雷达在森林结构和生理 参数获取方面的性能。但是因为AOTF方案不同波 长输出需通过多个激光脉冲发射方能实现,不同 波长间存在脉冲延迟,在各波长绝对同步探测方 面存在一定限制。

为了进一步获取更好的地物探测性能,芬兰 大地测量研究所(FGI)Hakala等(2012)研制了 8通道(542 nm,606 nm,672 nm,707 nm,740 nm, 775 nm,878 nm,981 nm)全波形激光雷达系统, 并测量展示了挪威云杉的多光谱反射率与光谱指 数三维点云数据。近年来,Wang等(2018)联合 芬兰大地测量研究所通过多次测量实现了用于近 距离矿石分类的8通道(540 nm,670 nm,800 nm, 990 nm,1064 nm,1100 nm,1225 nm,1460 nm) 激光雷达系统,并在此基础上将其拓展为450— 1600 nm光谱范围内17通道激光雷达系统(Chen 等,2018)。

此外,Niu等(2015)也发展了一套四波长 (531 nm,570 nm,670 nm,780 nm)多光谱激光 雷达系统,可用于植被生化组分特征垂直分布提 取。而为了推动多光谱激光雷达系统的实用化发 展,武汉大学联合中国科学院精密测量科学与技 术创新研究院(原武汉物理与数学研究所)在原 有技术基础上又进一步发展了三波长(466 nm, 546 nm, 626 nm) 多光谱激光雷达系统,利用可见光波段进行目标的真彩色三维成像,可取代现 有的点云和被动影像融合的方案,一次生成真彩 色的三维点云成像(Wang等, 2020)。

除国内外各研究机构原理样机研究外, Briese 等(2013)利用Rigel公司的3个不同波长的激光 雷达——RIEGL VO-820-G (532 nm)、RIEGL VO-580 (1064 nm) 和 RIEGLVQ-480i (1550 nm) 对同 一地区实施机载飞行扫描,每个系统单独实施辐 射校正,通过多次测量获得多光谱数据进行农业 遥感监测应用。2014年,加拿大Teledyne Optech 公司发布了商用机载多光谱激光雷达系统-"Titan"(泰坦), 配备搭载了3个独立的激光波长 (532 nm, 1064 nm 和 1550 nm), 目前已经在北美 和欧洲进行多次飞行实验,可用于森林管理、城 市土地利用检测、海岸线变化检测等。随后,奥 地利Rigel公司也发布了产品VQ-1560i-DW,搭载 了两个独立的激光波长(532 nm 和 1064 nm)。虽 然 Optech Titan 和 Rigel VQ-1560i-DW 同时拥有 2-3个波长,但是不同通道的扫描角并不相同, 相应地不同通道在同一目标上所采集的点位置并 不完全一致;而且探测波长多为常规激光器波长 而非地物特征波长,对光谱探测能力的提升有限。 因此,目前商用机载系统对三维一光谱信息一体 化获取仍存在诸多限制,并非真正意义上的商用 多光谱激光雷达系统。

#### 2.3 逐步发展一高光谱激光雷达系统

多光谱激光雷达系统的发展,验证了通过增 加波段数目来增强地物光谱探测能力的可行性, 而发展几十个甚至更多谱段的激光雷达系统来进 一步实现对地物的高光谱分辨、高空间分辨探测, 意义更加深远。相比于多光谱激光雷达,高光谱 激光雷达旨在提供更强的光谱探测能力,通过几 十个波段探测实现对可见一近红外更宽的光谱覆 盖以及更高的光谱分辨能力。

作为主动式的探测方式,高光谱激光雷达发 展面临的首要问题是覆盖可见—近红外宽谱激光 光源的选择。随着超连续谱激光光源技术的不断 发展,通过使用超短脉冲激光耦合进入高非线性 光纤,利用光纤的非线性效应、四波混频及光孤 子效应,可将脉冲光谱进行展宽实现超宽(400— 2500 nm)的光谱输出,为高光谱激光雷达的发展 提供了较好的契机。

基于超连续谱激光光源,武汉大学结合光 栅分光与 APD 阵列探测开展高光谱激光雷达研究,用于实现激光雷达更多谱段光谱探测,并于 2013 年底成功研制光谱分辨率为 12 nm 的 32 通道 高光谱激光雷达样机(杜霖等,2014;祝波,2015; Shi等,2016),并在 450—910 nm 光谱范围内可 调。其中,高光谱激光雷达系统 32 波段中心波 段设置为 538 nm—910 nm,可适用于植被不同施 氮水平监测(Du等,2016,2018; Sun等,2017a,2017b)。

中国科学院空天信息创新研究院(原遥感与数字地球研究所)Sun等(2014)以超连续谱激 光器作为光源,设计了光谱覆盖409—914 nm的 32通道高光谱全波形激光雷达并实验测试了其可 行性。测距精度可满足植被垂直分层探测的需求, 所测叶片 NDVI 与被动式光谱仪测量结果趋势相 同。针对5 GHz 全波形高速采集难度大的特点, 设计了多通道切换转置,并根据应用需求实现了 32个光谱波段数据采集。

中国科学院空天信息创新研究院(原光电研 究院)Li等(2018)联合芬兰大地测量研究所基 于液晶可调滤光器(LCTF)方案通过多次测量实 现了对 550-720 nm 光谱范围内 10 nm 光谱分辨探 测,基于对"红边"效应定量分析用于植被监测。 随后, Chen等(2019)采用声光可调谐滤波器 (AOTF) 通过不同脉冲发射不同波长实现光谱分 辨率10 nm的51通道高光谱激光雷达,光谱覆盖 范围 500—1000 nm, 对4种植物的黄叶和绿叶进行 测量,评估了在农业应用中的可行性。在此基础上, Shao等(2019)设计了光谱分辨率5 nm 的91 通道 高光谱激光雷达系统,用于近距离煤、岩石等矿 物的探测分类。但是,与英国赫瑞瓦特大学方案 类似,采用AOTF方案仍然需要发射多次激光脉冲 才能实现多波长测量,不太适合机载扫描等需求 单脉冲进行一次高光谱快速获取的应用场景。

综上所述,国内外研究机构在对地观测多/高 光谱激光雷达系统的研究方面已取得长足进步, 图1展示了对地观测多/高光谱激光雷达的发展趋势,其发展可以总结为"双波长一多光谱—高光 谱"的发展历程。在高光谱激光雷达技术实现方 面,基于超连续谱激光光源与光栅分光探测方案 在未来一个阶段内将是主要的发展方向,系统也 逐渐由原理样机向实验样机/小试样机发展,并且 逐步拓展由"地面一车载一机载"的多平台应用。 具有重要意义地,2018年,中国国家科技部国家 重点研发计划立项支持机载探索应用,面向航空 航天高光谱激光雷达对地观测技术发展前沿、目 标探测空间三维一光谱信息一体化获取与识别应 用需求,旨在研制不少于50个波段高光谱激光雷 达机载原理样机,未来其成功研制将有利于加快 推动高光谱激光雷达技术的成熟应用,并可为航 天高光谱激光雷达载荷研制奠定技术基础。

## 3 高光谱激光雷达特有数据类型处 理研究进展

高光谱激光雷达作为一种全新对地观测技术, 可在一个激光脚点上获取不同波段的光谱强度信息,其获取数据与被动高光谱影像数据与单波长 激光雷达点云数据都不尽相同,是一种全新的数 据型式——三维高光谱点云数据。因此,传统的 数据处理方法并不完全适用,需针对这种新手段 获取的数据类型开展特有数据处理方法探索研究。

#### 3.1 多通道全波形数据处理进展

高光谱激光雷达可以测量生成具有时间标签 的多波段全波形数据,经波形分解距离解算后可 生成三维点云数据,并兼具多波段光谱强度信息。 然而受系统传输效率、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,部分探测波 段信噪比较低。而针对低信噪比探测波段,由于 受噪声等因素干扰,其回波波形分解难度较大, 难以获取精确的回波脉冲时间、振幅、脉宽以及 多回波分布等波形参数。因此,如何发挥多波段 优势,对不同波段尤其是低信噪比波段全波形数 据进行精确波形预处理与波形分解,是波形参数 高精度提取的重要步骤。

目前,高光谱激光雷达多通道全波形数据分 解相关研究已初步展现出其独特优势。一方面, 相较于单波段全波形数据,可通过改进回波分量 初值设定来获取回波脉冲的位置、宽度和强度, 减少部分重叠回波的漏检问题,具有更好的波形 分解能力(王滨辉等,2017)。另一方面,针对弱 回波波段全波形分解,可利用高信噪比波段数据 改善低信噪比波段的波形参数提取。Song等 (2019)基于不同波段间的空间一致性特点,充分 发挥高光谱激光雷达波段数目多的优势,将高信 噪比波段波形分解得到的波形参数作为参考,辅 助低信噪比波段的波形数据分解,从而提高波形 拟合的精度。



注:鉴于国内外探索研究较多,本图中所列系统主要为选用地物特征波长,并已在同一激光点实现对空间信息与光谱信息同时一体化获取 的激光雷达系统。

图 1 对地观测高光谱激光雷达发展趋势图 Fig.1 Illustration of the earth observation hyperspectral lidar development trend

#### 3.2 几何与辐射校正进展

着眼于高光谱激光雷达的未来发展,高精度 的几何信息和光谱信息获取是其成功应用和推广 的决定性前提,由此可见几何校正与辐射校正的 重要性。在几何校正方面,虽然高精度的几何信 息获取能力是激光雷达的传统优势,国内外相关 研究已经较为成熟并达到了比较好的效果 (Reutebuch等,2003; 王成等,2007)。然而,不 同于单波长激光雷达,高光谱激光雷达存在全波 形脉冲回波异步化问题,需对此进行几何校正。 异步化问题主要源于超连续谱激光源不同波长间 并不是严格脉冲同步的,脉冲间最大差分时间为 数百皮秒,最终将导致在频谱通道中引起距离歧 义。Zhang等(2019)基于特定红边通道的几何不 变性,提出了脉冲信号校准方法消除了同一观测 目标的点云重影效应,可有效避免距离歧义问题。

在辐射校正方面,高光谱激光雷达光谱信息

的高精度获取至关重要,因此对不同波段强度数 据进行辐射校正在高光谱激光雷达数据处理中意 义重大。此前,激光雷达回波强度的辐射校正研 究,已经逐渐受到国内外关注(Höfle 等, 2007; Kaasalainen 等, 2009; Wagner, 2010), 而高光谱 激光雷达的发展更是促使其成为国际上的研究热 点(Shi等, 2015)。通过相对辐射校正方法、基 于数据拟合的经验模型校正方法以及基于激光雷 达方程的理论模型方法,在对探测距离、激光入 射角、大气衰减等影响的校正方面取得了一定进 展(覃驭楚等, 2011; Kaasalainen 等, 2011; 谭 凯等, 2015; Kashani 等, 2015; Xi 等, 2015; Yan 等, 2012)。但是, 在目标表面特性影响校正 方面,针对自然目标表面复杂反射特性的影响评 估与模型校正,相关研究(Hermann等, 2010; Ding等, 2013; Yang等, 2019; 林沂等, 2019) 尚处在初步探索阶段,仍有待进一步研究。

4 高光谱激光雷达应用前景与未来 挑战

#### 4.1 高光谱激光雷达应用前景

高光谱激光雷达可获取全新类型的三维空间— 光谱一体化数据,具有显著的信息提取优势,在 测绘、农林业等相关领域可展现其独特的应用潜 力。多/高光谱激光雷达作为一种新型的主动遥感 技术,能够提供高一致性的光谱和空间几何信息, 可广泛用于土地覆盖分类、复杂地形调查等。 Gong 等(2015) 通过对多光谱激光雷达三维场景 开展分类对比实验,初步验证了多光谱激光雷达 地物分类能力优于单波长激光雷达和多光谱影像。 Chen 等(2017)利用支持向量机和空间信息改善 了多光谱点云的椒盐噪声问题,并展示了三维多 谱点云分类效果,如图2所示。类似的, Wichmann 等(2015)研究表明,与单波长激光雷 达数据和光学图像相比,多波长激光雷达数据更 适合常规的土地覆盖分类和制图。Fernandez-Diaz 等(2016)介绍了Titan系统参数,并展示了土地 覆盖分类效果,如图3所示。



图 2 武汉大学三维多光谱点云分类效果(Chen 等, 2017) Fig.2 3D multispectral lidar point cloud classification by Wuhan University(Chen et al., 2017)



图 3 Titan 机载数据用于土地覆盖分类(Fernandez-Diaz等, 2016)



而关于多/高光谱激光雷达数据土地覆盖分类, 可直接进行在三维激光雷达点云分类(Kumar等, 2019; Chen等, 2019)或将三维点云转换为二维 特征图像后分类(Teo和Wu, 2017; Pan等, 2018)。随着点密度的提高和未来探测通道数目的 增加,数据处理计算量大大增加,先转换为二维 特征图像后再分类成为一种较为有效的解决方法。 Pan等(2019)即采用该数据处理方法,再利用成 熟的图像处理算法(如最大似然、支持向量机、 决策树和随机森林)获取土地覆盖图。此外,围 绕关键算法开展 GPU 集群并行框架的海量数据高 性能处理方式也将是未来重要发展方向,包括并 行处理模型、优化并行算法策略等,可大大提高 对于地表覆盖分类的运算效率。

相比于多光谱激光雷达,高光谱激光雷达光 谱探测通道更多,光谱分辨能力更强,可在地物 分类、土地覆盖分类方面展现出更佳的能力。此 外,针对复杂地形调查等,高光谱信息的融入可 提高丘陵、植被覆盖等复杂地区地面点和地物点 区分能力,提高DEM成果精度。而且,激光还可 以穿透树叶缝隙,实现对植被覆盖下的地表测绘 和目标识别,在军事应用当中也将发挥重要作用。

特别地,高光谱激光雷达结合了被动光学的 高光谱观测能力及激光雷达的垂直探测特点,在 探测植被冠层内部或者底部的精细结构和光谱方 面可展现其独立优势。因此,高光谱激光雷达不 仅能通过全波形数据对植被的空间结构信息进行 提取,还可以通过多通道光谱信息提高对植被的 生理生化参数的反演能力,为探测植被生理生化 特征的立体分布提供了新的遥感观测手段。

基于目前已发展国内外高光谱激光雷达系统, 国内外已开展了针对植被生理生化参数的初步应 用探索,图4展示了武汉大学、芬兰大地测量研究 所、中国科学院空天信息创新研究院(原遥感与 数字地球研究所)相关研究结果。此外,研究表 明高光谱激光雷达具有估计叶片尺度氮含量、叶 绿素含量和类胡萝卜素含量等植被生化参数的潜 力(Nevalainen等,2013,2014;Du等,2016;Li 等,2016;Sun等,2018)。此外,Junttila等(2015) 展现了高光谱激光雷达对云杉和松树干旱情况的 监测潜力,林沂(2017)分析了高光谱激光雷达 支撑发展三维生物物理化学生态测量学的可行性。 高帅等(2018)和Bi等(2020)展示了高光谱激 取方面的能力。相对于传统的探测手段,高光谱 激光雷达极大地提高了对森林定性分析和定量反 演的性能,也可为精准农业的发展提供有力的技 术支撑。





#### 4.2 高光谱激光雷达未来挑战与展望

#### 4.2.1 未来发展面临难题及重大挑战

近年来,国内外高光谱激光雷达的研究获得 长足发展,理论与技术探索已初步成熟,并已经 展现了其初步的应用潜力。然而现有系统研制大 都处在原理样机研究阶段,探测距离最大仅为百 米量级,甚至对于可见光短波谱段以及地物低反 射率探测谱段仅能实现近距离探测应用,在一定 程度上限制了其实用化发展。其主要难题与挑战 在于:

(1)现有超连续谱激光脉冲能量低,尚难以 满足遥感探测对激光能量的需求。尤其现有激光 可见光波段功率谱密度低,在400—500 nm可见光 范围内能量更低。因此,高脉冲能量宽谱段激光 光源是高光谱激光雷达未来发展面临的一个重大 挑战。

(2)高光谱激光雷达要实现对几十甚至更多 探测谱段的同步高精度探测,对激光雷达系统接 收探测技术带来了巨大的挑战,需发展高效多波 段分光接收技术、高灵敏度度微弱光探测技术, 解决微弱光条件下高光谱快速成像难题。 (3)高光谱激光雷达作为基于激光主动探测的、地物光谱与测距信息一体化获取的全天时新型成像技术,其探测机理与现有技术必然存在较大区别,因此需不断构建和完善基于宽谱段激光发射与多波段回波探测的高光谱激光雷达成像机理与数据处理体系。

#### 4.2.2 未来展望

(1)为推动对地观测高光谱激光雷达新型遥 感技术的发展,未来应更注重机载系统、车载系统以及地面小型化系统的实用化发展,甚至是未 来面向星载平台技术探索,并逐步提高和验证高 光谱激光雷达系统性能及后处理技术发展。

(2)为更好地发挥高光谱激光雷达全天时高光谱与空间信息一体化获取的技术优势,未来可通过推动其在测绘、林业等领域的示范应用,促进测绘遥感行业领域的技术变革,并不断探索其在更多领域的独特应用潜力。

### 5 结 语

面向全天时空间三维一光谱信息获取的应用 需求,经过十余年的发展,基于激光主动探测的 对地观测高光谱激光雷达技术已逐渐发展成为一 种新型的遥感探测手段。高光谱激光雷达结合了 高光谱成像与激光雷达测距的技术优势,可实现 高空间分辨、高光谱分辨的地物光谱与测距信息 一体化全天时成像探测能力,将成为未来遥感技 术发展的重要方向,并有望促进其发展成为一个 新的遥感学科门类。

高光谱激光雷达已在测绘应用、农林业应用 等领域展现了巨大潜力,然而距离最终实用化发 展,还存在着一些技术瓶颈,如高光谱激光雷达 成像机理、高脉冲能量宽谱段激光光源技术、空 间三维一光谱数据一体化处理技术等。但随着光 电技术的不断发展,相信高光谱激光雷达实用化、 小型化进程会不断加快,尤其是我国在高光谱激 光雷达前沿技术研究方面一直处于国际领先水平, 有望打破传统对地观测技术一直以来跟踪国外发 展的被动局面。

#### 参考文献(References)

- Alonzo M, Bookhagen B, and Roberts D A. 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. Remote Sensing of Environment, 148, 70-83
- Beger R, Gedrange C, Hecht R, and Neubert M. 2011. Data fusion of extremely high resolution aerial imagery and LiDAR data for automated railroad centre line reconstruction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6), S40-S51
- Bi K, Niu Z, Gao S, Xiao S, Pei J, Zhang C, and Huang N. 2020. Simultaneous extraction of plant 3-D biochemical and structural parameters using hyperspectral LiDAR. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters [DOI: 10.1109/LGRS. 2020.3025321]
- Briese C, Pfennigbauer M, Ullrich A, and Doneus M. 2013. Multiwavelength airborne laser scanning for archaeological prospection. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 40, 119-124
- Buller G S, Harkins R D, McCarthy A, Hiskett P A, MacKinnon G, Smith G, Sung R, Wallace A M, Lamb R, Ridley K, and Rarity J. 2005. Multiple wavelength time-of-flight sensor based on timecorrelated single-photo counting. Review of Scientific Instruments. 76, 083112
- Chen B, Shi S, Gong W, Zhang Q, Yang J, Du L, Sun J, Zhang Z, and Song S. 2017. Multispectral LiDAR Point Cloud Classification: A Two-Step Approach. Remote Sensing, 9(4) [DOI: 10.3390/rs9 040373]
- Chen B, Shi S, Sun J, Gong W, Yang J, Du L, Guo K, Wang B, and Chen B. 2019. Hyperspectral lidar point cloud segmentation based on geometric and spectral information. Optics Express, 27 (17), 24043-24059 [DOI: 10.1364/oe.27.024043]

Chen Y, Jiang C, Hyyppä J, Qiu S, Wang Z, Tian M, Li W, Puttonen E,

Zhou H, and Feng Z. 2018. Feasibility study of ore classification using active hyperspectral LiDAR. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(11), 1785-1789

- Chen Y, Li W, Hyyppä J, Wang N, Jiang C, Meng F, Tang L, Puttonen E, and Li C. 2019. A 10-nm spectral resolution hyperspectral LiDAR system based on an acousto-optic tunable filter. Sensors, 19(7), 1620 [DOI: 10.3390/s19071620]
- Chen Y, Raikkonen E, Kaasalainen S, Suomalainen J, Hakala T, Hyyppa J, and Chen R. 2010. Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source. Sensors, 10(7), 7057-7066 [DOI: 1 0.3390/s100707057]
- Dalponte M, Bruzzone L, and Gianelle D. 2008. Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(5), 1416-1427
- Dalponte M, Bruzzone L, and Gianelle D. 2012. Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 123, 258-270
- Debes C, Merentitis A, Heremans R, Hahn J, Frangiadakis N, van Kasteren T, Liao W, Bellens R, Pižurica A, and Gautama S. 2014. Hyperspectral and LiDAR data fusion: Outcome of the 2013 GRSS data fusion contest. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(6), 2405-2418
- Ding Q, Chen W, King B, Liu Y, and Liu G. 2013. Combination of overlap-driven adjustment and Phong model for LiDAR intensity correction. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 75(JAN.), 40-47
- Dong J, Zhuang D, Huang Y, and Fu J. 2009. Advances in multi-sensor data fusion: Algorithms and applications. Sensors, 9(10), 7771-7784
- Douglas E S, Strahler A, Martel J, Cook T, Mendillo C, Marshall R, Chakrabarti S, Schaaf C, Woodcock C, Li Z, Yang X, Culvenor D, Jupp D, Newnham G, and Lovell J. 2012. DWEL: A dualwavelength echidna lidar for ground-based forest scanning. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE: 4998-5001
- Du L, Gong W, Shi S, Yang P, Sun J, Zhu B, and Song S. 2016. Estimation of rice leaf nitrogen contents based on hyperspectral LIDAR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 44, 136-143 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.08.008]
- Du L, Gong W, Yang J. 2018. Application of spectral indices and reflectance spectrum on leaf nitrogen content analysis derived from hyperspectral LiDAR data. Optics and Laser Technology, 107:372-379
- Eitel J U, Magney T S, Vierling L A, and Dittmar G. 2014. Assessment of crop foliar nitrogen using a novel dual-wavelength laser system and implications for conducting laser-based plant physiology. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 97, 229-240
- Fernandez-Diaz J, Carter W, Glennie C, Shrestha R, Pan Z, Ekhtari N, Singhania A, Hauser D, and Sartori M. 2016. Capability assessment and performance metrics for the Titan multispectral mapping

lidar. Remote Sensing, 8(11), 936 [DOI: 10.3390/rs8110936]

- Gaulton R, Danson F, Ramirez F, and Gunawan O. 2013. The potential of dual-wavelength laser scanning for estimating vegetation moisture content. Remote Sensing of Environment, 132, 32-39
- Gmachl C, Sivco D, Colombelli R, Capasso F, and Cho A Y. 2002. Ultra-broadband semiconductor laser. Nature, 415, 883-887
- Gong W, Song S, Zhu B, Shi S, Li F, and Cheng X. 2012. Multiwavelength canopy LiDAR for remote sensing of vegetation: Design and system performance. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 69, 1-9 [DOI: 10.1016/j. isprsjprs. 201 2.02.001]
- Gong W, Sun J, Shi S, Yang J, Du L, Zhu B, and Song S. 2015. Investigating the potential of using the spatial and spectral information of multispectral LiDAR for object classification. Sensors, 15(9), 21989-22002 [DOI: 10.3390/s150921989]
- Guo Z, Liu Y, Zheng X, and Yin K. 2019. Active hyperspectral imaging with a supercontinuum laser source in the dark. Chinese Physics B, 028(003), 193-197
- Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, and Chen Y. 2012. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning. Optics Express, 20(7), 7119-7127
- Hermann G, and Boris J. 2010. Investigations on surface reflection models for intensity normalization in airborne laser scanning (ALS) data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76 (9), 1051-1060
- Höfle B, and Pfeifer N. 2007. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62(6), 415-433
- Johnson B, Joseph R, Nischan M L, Newbury A B, Kerekes J P, Barclay H T, Willard B C, and Zayhowski J J. 1999. Compact active hyperspectral imaging system for the detection of concealed targets. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV. 3710, 144-153
- Jones T G, Coops N C, and Sharma T. 2010. Assessing the utility of airborne hyperspectral and LiDAR data for species distribution mapping in the coastal Pacific Northwest, Canada. Remote Sensing of Environment, 114(12), 2841-2852
- Junttila S, Kaasalainen S, Vastaranta M, Hakala T, Nevalainen O, and Holopainen M. 2015. Investigating bi-temporal hyperspectral lidar measurements from declined trees—experiences from laboratory test. Remote Sensing, 7(10), 13863-13877 [DOI: 10.3390/rs710 13863]
- Kaasalainen S, Jaakkola A, Kaasalainen M, Krooks A, and Kukko A. 2011. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. Remote Sensing, 3(10), 2207-2221
- Kaasalainen S, Krooks A, Kukko A, and Kaartinen H. 2009. Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. Remote Sensing, 1(3), 144-158
- Kaasalainen S, Hakala T, Nevalainen O, Puttonen E, and Anttila K. 2014. Hyperspectral lidar in non-destructive 4D monitoring of climate variables. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-7, 109-111

[DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-1 09-2014]

- Kashani A G, Olsen M J, Parrish C E, and Wilson N. 2015. A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. Sensors, 15(11), 28099-28128
- Kereszturi G, Schaefer L N, Schleiffarth W K, Procter J, Pullanagari R R, Mead S, and Kennedy B. 2018. Integrating airborne hyperspectral imagery and LiDAR for volcano mapping and monitoring through image classification. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, 323-339
- Khodadadzadeh M, Li J, Prasad S, and Plaza A. 2015. Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data using multiple feature learning. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(6), 2971-2983
- Kumar B, Pandey G, Lohani B, and Misra S C. 2019. A multi-faceted CNN architecture for automatic classification of mobile LiDAR data and an algorithm to reproduce point cloud samples for enhanced training. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 147, 80-89
- Li W, Niu Z, Sun G, Gao S, and Wu M. 2016. Deriving backscatter reflective factors from 32-channel full-waveform LiDAR data for the estimation of leaf biochemical contents. Optic Express, 24(5), 4771-4785 [DOI: 10.1364/OE.24.004771]
- Li W, Jiang C, Chen Y, Hyyppä J, Tang L, Li C, and Wang S. 2018. A Liquid Crystal Tunable Filter-Based Hyperspectral LiDAR System and Its Application on Vegetation Red Edge Detection. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 16(2), 291-295
- Lim K, Treitz P, Wulder M, St-Onge B, and Flood M. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. Progress in Physical Geography, 27(1), 88-106
- Man Q, Dong P, and Guo H. 2015. Pixel-and feature-level fusion of hyperspectral and lidar data for urban land-use classification. International Journal of Remote Sensing, 36(6), 1618-1644
- Morsdorf F, Nichol C, Malthus T, and Woodhouse I H. 2009. Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modelling. Remote Sensing of Environment, 113(10), 2152-2163 [DOI: 10.1 016/j.rse.2009.05.019]
- Mundt J T, Streutker D R, and Glenn N F. 2006. Mapping sagebrush distribution using fusion of hyperspectral and lidar classifications. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(1), 47-54
- Nevalainen O, Hakala T, Suomalainen J, and Kaasalainen S. 2013. Nitrogen concentration estimation with hyperspectral LiDAR. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W2, 205-210 [DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-205-2013]
- Nevalainen O, Hakala T, Suomalainen J, Mäkipää R, Peltoniemi M, Krooks A, and Kaasalainen S. 2014. Fast and nondestructive method for leaf level chlorophyll estimation using hyperspectral LiDAR. Agricultural and Forest Meteorology, 198-199, 250-258 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.08.018]
- Nischan M L, Joseph R M, Libby J C, and Kerekes J P. 2003. Active spectral imaging. Lincoln Lab. J. 14, 131-144
- Niu Z, Xu Z G, Sun G, Huang W J, Wang L, Feng M B, Li W, He W B

and Gao S. 2015. Design of a new multispectral waveform LiDAR instrument to monitor vegetation. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(7), 1506-1510 [DOI: 10.1109/lgrs.2015.2410788]

- Ortenberg F, Thenkabail P, Lyon J, and Huete A. 2011. Hyperspectral sensor characteristics: airborne, spaceborne, hand-held, and truckmounted; Integration of hyperspectral data with Lidar. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation, 39-68
- Painter T H, Berisford D F, Boardman J W, Bormann K J, Deems J S, Gehrke F, Hedrick A, Joyce M, Laidlaw R, and Marks D. 2016. The airborne snow observatory: Fusion of scanning lidar, imaging spectrometer, and physically-based modeling for mapping snow water equivalent and snow albedo. Remote Sensing of Environment, 184, 139-152
- Pan S, and Guan H. 2018. Object Classification Using Airborne Multispectral LiDAR Data. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 47(2), 198-207 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170512]
- Pan S, Guan H, Yu Y, Li J, and Peng D. 2019. A Comparative Land-Cover Classification Feature Study of Learning Algorithms: DBM, PCA, and RF Using Multispectral LiDAR Data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(4), 1314-1326 [DOI: 10.1109/jstars. 2019. 2899033]
- Powers M A, and Davis C C. 2012. Spectral LADAR: active rangeresolved three-dimensional imaging spectroscopy. Applied Optics, 51 (10), 1468-1478
- Puttonen E, Suomalainen J, Hakala T, Räikkönen E, Kaartinen H, Kaasalainen S, and Litkey P. 2010. Tree species classification from fused active hyperspectral reflectance and LIDAR measurements. Forest Ecology and Management, 260(10), 1843-1852
- Rall J A, and Knox R G. 2004. Spectral ratio biospheric lidar. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE: 3, 1951-1954
- Reutebuch S E, McGaughey R J, Andersen H-E, and Carson W W. 2003. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. Canadian Journal of Remote Sensing, 29 (5), 527-535
- Sankey T, Donager J, McVay J, and Sankey J B. 2017. UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. Remote Sensing of Environment, 195, 30-43
- Sasaki T, Imanishi J, Ioki K, Morimoto Y, and Kitada K. 2012. Objectbased classification of land cover and tree species by integrating airborne LiDAR and high spatial resolution imagery data. Landscape and Ecological Engineering, 8(2), 157-171
- Shao H, Chen Y, Yang Z, Jiang C, Li W, Wu H, Wen Z, Wang S, Puttnon E, and Hyyppä J. 2019. A 91-Channel Hyperspectral LiDAR for Coal/Rock Classification. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters
- Shi S, Gong W, Du L, Sun J, and Yang J. 2016. Potential application of novel hyperspectral lidar for monitoring crops nitrogen stress. XXIII ISPRS Congress, Commission VIII. Vol. 41, pp. 1043-1047
- Shi S, Song S, Gong W, Du L, Zhu B, and Huang X. 2015. Improving backscatter intensity calibration for multispectral LiDAR. IEEE

Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(7), 1421-1425 [DOI: 10.1109/lgrs.2015.2405573]

- Sohn G, and Dowman I. 2007. Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62(1), 43-63
- Song S, Li P, Gong W, Ma Y, and Li J. 2008. Application and key techniques of multi-wavelength lidar. Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Advanced Spatial Data Models and Analyses. 7146, 714610
- Song S, Wang B, Gong W, Chen Z, Lin X, Sun J, and Shi S. 2019. A new waveform decomposition method for multispectral LiDAR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 149, 40-49 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.014]
- Sun G, Niu Z, Gao S, Huang W, Wang L, Li W, and Feng M. 2014. 32channel hyperspectral waveform LiDAR instrument to monitor vegetation: design and initial performance trials. Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications V. 9263, 926331
- Sun J, Yang J, Shi S, Chen B, Du L, Gong W, and Song S. 2017a. Estimating Rice Leaf Nitrogen Concentration: Influence of Regression Algorithms Based on Passive and Active Leaf Reflectance. Remote Sensing, 9(951) [DOI: 10.3390/ rs9090951]
- Sun J, Shi S, Gong W, Yang J, Du L, Song S, Chen B, and Zhang Z. 2017b. Evaluation of hyperspectral LiDAR for monitoring rice leaf nitrogen by comparison with multispectral LiDAR and passive spectrometer. Scientific Reports, 2017, 7 [DOI: 10.1038/ srep40362]
- Sun J, Shi S, Yang J, Chen B, Gong W, Du L, Mao F, and Song S. 2018. Estimating leaf chlorophyll status using hyperspectral lidar measurements by PROSPECT model inversion. Remote Sensing of Environment, 212, 1-7 [DOI: 10.1016/j.rse.201 8.04.024]
- Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, and Chen Y. 2012. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning. Optics Express, 20(7), 7119-7127
- Tan S, and Narayanan R M. 2002. A multiwavelength airborne polarimetric lidar for vegetation remote sensing: instrumentation and preliminary test results. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE: 5, 2675-2677
- Teo T-A, and Wu H-M. 2017. Analysis of land cover classification using multi-wavelength LiDAR system. Applied Sciences, 7(7), 663 [DOI: 10.339 0/app7070663]
- Wagner W. 2010. Radiometric calibration of small-footprint fullwaveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6), 505-513
- Wallace A M, McCarthy A, Nichol C J, Ximing R, Morak S, Martinez-Ramirez D, Woodhouse I H, and Buller G S. 2014. Design and evaluation of multispectral LiDAR for the recovery of arboreal parameters. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(8), 4942-4954 [DOI: 10.1109/tgrs.2013.2285942]
- Wang B, Song S, Gong W, Cao X, He D, Chen Z, Lin X, Li F, and Sun J. 2020. Color restoration for full-waveform multispectral LiDAR

data. Remote Sensing, 12(4), 593

- Wang Z, Chen Y, Li C, Tian M, Zhou M, He W, Wu H, Zhang H, Tang L, Wang Y, Zhou H, Puttonen E, and Hyyppä J. 2018. A hyperspectral LiDAR with eight channels covering from VIS to SWIR. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE: 4293-4296
- Wichmann V, Bremer M, Lindenberger J, Rutzinger M, Georges C, and Petrini-Monteferri F. 2015. Evaluating the potential of multispectral airborne lidar for topographic mapping and land cover classification. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5, 113-119 [DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W 5-113-2015]
- Woodhouse I, H, Nichol C, Sinclair P, Jack J, Morsdorf F, Malthus T J, and Patenaude G. 2011. A Multispectral Canopy LiDAR Demonstrator Project. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 8(5), 839-843
- Xi Z, Wang T, Darvishzadeh R, Skidmore A K, and Niemann K O. 2015. 3D leaf water content mapping using terrestrial laser scanner backscatter intensity with radiometric correction. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 110, 14-23
- Yan W Y, Shaker A, Habib A, and Kersting A P. 2012. Improving classification accuracy of airborne LiDAR intensity data by geometric calibration and radiometric correction. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 67(Jan.), p.35-44
- Yang X, Wang C, Xi X. 2019. Multiple scattering effect on forest physiological parameters of multi-spectral lidar canopy waveforms. 8467-8469. 10.1109/IGARSS.2019.8898303
- Zhang C, Gao S, Niu Z, Pei J, Bi K, and Sun G. 2019. Calibration of the pulse signal decay effect of full-waveform hyperspectral LiDAR. Sensors, 19(23) [DOI: 10.3390/s19235263]
- Zhang J, and Lin X. 2017. Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing. International Journal of Image and Data Fusion, 8(1), 1-31
- Cao Q, Ma A L, Zhong Y F, Zhao J, Zhao B and Zhang L P. 2019.
  Urban classification by multi-feature fusion of hyperspectral image and LiDAR data. Journal of Remote sensing, 23(5): 892-903 (曹琼, 马爱龙, 钟燕飞, 赵济, 赵贝, 张良培. 2019. 高光谱-LiDAR 多级融合城区地表覆盖分类. 遥感学报, 2019, 23(5): 892-903)
- Du Lin, Ma Yingying, Zhu Bo, Shi Shuo, Gong Wei, Song Shalei. A Method to Select Receiving Channels for the Multi-Spectral Earth Observation LiDAR[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0828001 (杜霖, 马盈盈, 祝波, 史硕, 龚威, 宋沙磊. 2014. 多光谱对地观 测激光雷达接收通道选择方法. 光学学报(08), 304-311)
- FU Cheng-qun, FANG Liang, XIE Li-jun, WANG Yong. Joint Survey Design and Test of Common Optical Path of Hyperspectral Lidar[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(11): 2002-2009 (付成群, 方亮, 谢立 军, 王勇. 2016. 高光谱一激光共光路联测设计与试验. 兵工学 报. 37(11), 2002-2009)
- Gao S, Niu Z, Sun G, Qin Y C, Li W and Tian H F. 2018. Vertical distribution inversion of biochemical parameters using hyperspectral

LiDAR.Journal of Remote sensing, 22(5): 737-744 (高帅,牛铮, 孙刚, 覃驭楚, 李旺, 田海峰. 2018. 高光谱激光雷达提取植被生 化组分垂直分布. 遥感学报. 22(5):737-44)

- Gong W, Song S L, Zhu B, Lv L L, Zhang D X and Shi S. 2009. Multispectral earth observation LiDAR system. CN, No. ZL200910266255.1 (龚威, 宋沙磊, 祝波, 吕丽蕾, 张道熙, 史硕. 2009. 多光谱对地 观测激光雷达系统. 中国, No. ZL 200910266255.1)
- Gong W, Zhu Z M, Song S L, Ma Y Y, Hao Z Y, Liu M Y and Li J. 2006. A vegetation normalization index remote sensing instrument CN, No. ZL 200610124713.4. (龚威, 朱忠敏, 宋沙磊, 马盈盈, 郝 中豫, 刘梦雨, 李俊. 2006. 一种植物归一化指数遥感装置. 中 国, No. ZL 200610124713.4)
- Jang J S. 2006. consideration on China's Earth observation technology current situation and future directions. Chinese Engineering Science. 8(11), 19-24 (姜景山. 2006. 中国对地观测技术发展现 状及未来发展的若干思考. 中国工程科学. 8(11), 19-24)
- LI G H, WANG C, XI X H, ZHENG Z J, LUO S Z and YUE C R. Extraction of glacier snowline based on airborne LiDAR and hyperspectral data fusion. REMOTE SENSING FOR LAND & RESOURCES, 2013, 25(3): 79-84 (李光辉, 王成, 习晓环, 郑照 军, 骆社周, 岳彩荣. 2013. 机载 LiDAR 和高光谱数据融合提取 冰川雪线. 国土资源遥感, 25(3), 79-84)
- LIN Y, Eetu P and Juha H. 2017. Hyperspectral LiDAR: A New Era of 3D Biophysichemical Ecometrics. Remote Sensing Information. 2017,32(01):5-9 (林沂, Eetu PUTTONEN, Juha HYYPPA.2017. 高光 谱激光雷达:三维生物物理化学生态测量学[J]. 遥感信息, 32 (01):5-9)
- Lin Y, Zhang M D, Zhang L F and Jiang M. Exploration of the Angular Effect in Hyperspectral LiDAR Spectrum-Location-Synchronous Data Collection. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2): 225-231 (林沂, 张萌丹, 张立福,江森. 2019. 高光谱 激光雷达谱位合一的角度效应分析. 遥感技术与应用, 34(2), 225-231)
- Liu L J, Pang Y, Fan W Y, Li Z Y, Zhang D R, Li M Z. 2013. Fused airborne LiDAR and hyperspectral data for tree species identification in a natural temperate forest.journal of remote sensing,17(3), 679-695 (刘丽娟, 庞勇, 范文义, 李增元, 张登荣, 李明泽. 2013. 机 载 LiDAR 和高光谱融合实现温带天然林树种识别. 遥感学报, 17(3), 679-695)
- Shi S, Gong W, Zhu B and Song S L. 2013. A novel multi-Spectral LiDAR for earth observation and implementation of Control System Geomatics and Information Science of Wuhan University, 38(11): 1294-1297 (史硕, 龚威, 祝波, 宋沙磊. 2013. 新型对地观 测多光谱激光雷达及其控制实现. 武汉大学学报(信息科学版), 38(11), 1294-1297)
- Song S L. 2010. Principles and key techniques of multispectral LiDAR for Earth observation. Wuhan: Wuhan University (宋沙磊. 2010. 对地观测多光谱激光雷达基本原理及关键技术. 武汉:武汉 大学)
- Qin Y C, Li B, Niu Z, et al. Stepwise decomposition and relative radiometric normalization for small footprint LiDAR waveform. Sci China Earth Sci,2010 (覃驭楚, 李斌, 牛铮, 黄文江, 王长耀. 2011. 小光斑激光雷达全波形数据递进分解与相对辐射校正.

中国科学:地球科学, 41(1), 103-109) [DOI: 10.1007/s11430-01 0-4120-y]

- Tan K and Cheng X J.2015. TLS Laser Intensity Correction Based on Polynomial Mode, Chinese Journal of Lasers, 42(3), 0314002
  (谭凯, 程效军. 2015. 基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正. 中国激光, 42(3), 0314002)
- Wang B H, Song S L, Gong W, Chen Z W, Lin X, Cheng X W, Li F Q, Shi S. 2017. Optimization decomposition method of full-waveform LiDAR. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1859-1867 (王滨辉, 宋沙磊, 龚威, 陈振威, 林鑫, 程学武, 李发 泉, 史硕. 2017. 全波形激光雷达的波形优化分解算法. 测绘 学报, 46(11), 1859-1867) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170045]

Wang C, Menenti M, StollM P, Li C R, Tang L L.2007. Error Analysis

& Correction of Airborne LiDAR Data.journal of remote sensing, 11(3), 390-397 (王成, Menenti M, StollM P, 李传荣, 唐伶俐. 2007. 机载激光雷达数据的误差分析及校正. 遥感学报, 11(3), 390-397)

- Wang Y Z, Tao Y L, Rong W and Luo P P. 2015. A hyperspectral spectral optical path integration system with LiDAR. CN, No. ZL 201520173212.X (王玉诏,陶宇亮, 荣微, 罗萍萍. 2015. 一种高光谱与激光雷达共光路一体化分光系统.中国, No. ZL 201520173212.X)
- Zhu B. 2015. Principles and Key Techniques of Hyperspectral-LIF Joint Observation LiDAR. Wuhan: Wuhan University (祝波. 2015. 高光谱与诱导荧光联合观测激光雷达原理及关键技术. 武汉:武汉大学)

### Development and prospect of hyperspectral LiDAR for earth observation

## GONG Wei<sup>1</sup>, SHI Shuo<sup>1</sup>, CHEN Biwu<sup>1</sup>, SONG Shalei<sup>2</sup>, NIU Zheng<sup>3</sup>, WANG Cheng<sup>3</sup>, GUAN Haiyan<sup>4</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, GAO Shuai<sup>3</sup>, LIN Yi<sup>5</sup>, SUN Jia<sup>6</sup>, YANG Jian<sup>6</sup>, DU Lin<sup>6</sup>

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

Innovation Academy for precision Mearsurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology,

Nanjing 210044, China;

5. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

6. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In the development of earth observation technology, the integrated acquisition and application for high-resolution 3D-spectral information of targets is one of the frontier scientific issues. In order to achieve the integrated acquisition of geometric characteristics and spectral information for targets, a lot of exploration studies have been carried out at home and abroad based on the current active and passive remote sensing technology. Combining the technical advantages of hyperspectral imaging and lidar ranging, multispectral/hyperspectral lidar for earth observation came into being and has become an important direction for the future development of remote sensing. This article reviews the development of the hyperspectral lidar system for earth observation in three stages. In the initial exploration stage, the research mainly focused on dual-wavelength lidar, mainly using specific wavelength lasers for specific applications. Then, in the progressive development stage, multispectral lidar was proposed to achieve spectral information acquisition of multi-wavelengths, including prototype systems with multiple single-wavelength lasers and supercontinuum lasers. Finally, in the gradual development stage, hyperspectral lidar was developed to obtain spectral information by more wavelengths. Which can achieve wider spectrum coverage and higher spectral resolution in visible-near infrared bands. Subsequently, the exploratory research for data processing of hyperspectral lidar was expounded. It mainly involves two aspects: processing of full-waveform data in multi-bands; geometric correction and radiometric correction. In terms of full-waveform data processing, hyperspectral lidar has better capability of full-waveform decomposition for weak echo bands and low signalto-noise bands. In terms of geometric correction, the asynchronization caused by full-waveform pulse echo in different bands needs to be solved. And radiometric correction should be mainly focused on the influence of distance, angle of incidence and roughness of the target. In addition, this paper analyzes the potential application of hyperspectral lidar in the field of surveying and mapping, agriculture and forestry. In the field of surveying and mapping, hyperspectral lidar can be widely used for classification of targets and land cover. In the field of agriculture and forestry, hyperspectral lidar can simultaneously obtain the spatial structure and spectral information of vegetation. Thus, it provides a new method for detecting the three-dimensional distribution of vegetation physiological and biochemical characteristics. Finally, we look forward to the challenges for the future development of hyperspectral lidar for earth observation. And the direction for future development is also putted forward: miniaturization, practicality and demonstration applications.

Key words: liDAR, hyperspectral, spatial-spectral integration, all day and night, vegetation remote sensing

Supported by National key Research and Development Program of China (No.2018YFB0504500); National Natural Science Foundation of China (No.41971307)