引文格式：郭玉芳,陈浩,巨小文,等. 机载激光雷达的标准化进展分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 13-16. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.02.003

机载激光雷达的标准化进展分析

郭玉芳[1]，陈　浩[1*]，巨小文[2]，任　福[3]
（1. 自然资源部测绘标准化研究所，陕西 西安 710054；2. 自然资源部陕西测绘产品质量监督检验站，陕西 西安 710054；
3. 武汉大学 资源与环境科学学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：在分析美国激光雷达标准化新进展的基础上，以USGS颁布的《激光雷达基础规范》为例，探讨了机载LiDAR标准化的关键技术内容和关键技术指标，剖析了美国激光雷达新技术的标准化特点和优势。研究发现USGS在LiDAR新技术标准的制定、更新以及应用等方面具有一些好的做法，其标准化的模式和思路对于我国测绘地理信息新技术标准的研发和制定具有一定的借鉴和参考价值。

关键词：激光雷达；点云；数据采集；数据处理；数字高程模型；标准化
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）02-0013-04

Standardization Development Analysis of Airborne LiDAR

GUO Yufang[1], CHEN Hao[1], JU Xiaowen[2], REN Fu[3]
(1. Institute of Surveying and Mapping Standardization, MNR, Xi'an 710054, China;
2. Shaanxi Surveying and Mapping Product Quality Supervision and Inspection Station, MNR, Xi'an 710054, China;
3. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Based on the analysis of new developments of American lidar LiDAR standardization, taking LiDAR base specification issued by USGS as an example, we discussed the main technical contents and key technical indicators. Furthermore, we analyzed the characteristics and advantages of new technical standards of LiDAR in the United States. We found some good practices in the establishment, updating and application of new LiDAR technology standards by the USGS, which could provide a reference for the development of new technologies standards for surveying and mapping and geographical information in the future.

Key words: LiDAR, point cloud, data acquisition, data processing, DEM, standardization

激光雷达技术具有高精度、高自动化、高效率等显著优势，同时点云数据蕴含的丰富信息为LiDAR数据的使用提供了更多的可能性[1-6]，但是LiDAR点云数据处理的算法、相关软件以及激光雷达产品的规范性等方面仍制约着LiDAR技术大范围的普及性应用[7-8]。我国在激光雷达技术领域的发展和应用起步较晚，美国等发达国家在激光雷达领域的发展和应用研究已有近二十余年的成功经验，在LiDAR的标准化领域也制定发布了相关标准。本文在梳理美国激光雷达标准化背景和发展历程的基础上，以USGS颁布的《激光雷达基础规范》最新版本为例，从LiDAR数据采集和数据处理两方面分析了机载LiDAR标准化的关键技术内容和技术指标，探讨了美国激光雷达新技术标准化的特点与优势，对于我国测绘地理信息新技术标准的研发和制定具有一定的借鉴和参考价值。

1　LiDAR标准化的背景

2003年美国摄影测量与遥感学会制定发布了《LAS规范》（1.0版本），该标准为用户提供一种开放、通用的数据格式，极大地推动了LiDAR数据的共享和应用[9-10]。2009年，美国地质调查局（USGS）启动了国家空间项目（National Geospatial Program，NGP），进行美国全境范围的激光雷达数据获取。NGP计划管理的一个重要项目是美国三维高程计划（3DEP）项目，其旨在获取三维空间数据，目标是到2023年底获取全面覆盖美国本土、夏威夷及其属地的LiDAR数据和覆盖阿拉斯加地区的干涉合成孔径雷达（InSAR）数据[11]。3DEP项目LiDAR数据采集与全国

收稿日期：2022-09-29。
项目来源：国家自然科学基金资助项目(42071448)。
第一作者简介：郭玉芳（1970—），硕士，正高级工程师，研究方向为测绘地理信息标准研究与制定，E-mail：1601138940@qq.com。
通信作者简介：陈浩（1990—），硕士，工程师，研究方向为测绘地理信息标准研究与制定，E-mail：631472841@qq.com。

范围的众多数据生产商合作，出现了交付成果不统一、数据集难以兼容、整体项目的分析处理异常困难等问题[12]，因而亟需制定一个基础性的标准来规范美国全境激光雷达数据采集的最低技术指标和成果交付的统一格式和要求，以保障NGP整体数据的质量和统一性。

LiDAR技术应用实践的需求推动了LiDAR标准化的发展，USGS于2012年8月正式发布了《激光雷达基础规范》（以下简称LBS规范）1.0版本，系统全面地规范了机载LiDAR从数据采集、数据处理、精度检验到成果交付的具体要求，为LiDAR技术的生产实践和推广应用提供了很好的指导作用。该标准第一个版本发布之后迅速被美国的许多州、县以及行业企业和数据生产商所接受，一些国家还将该标准作为本国制定激光雷达规范的基础，成为了国际地理信息领域影响颇为广泛的一个LiDAR基础性标准[13-14]。

2 LiDAR标准化的历程

测绘新技术的标准化并不是一蹴而就的，通常需要随着技术的发展和应用需求不断发展完善。美国激光雷达的标准化是随着LiDAR技术在NGP应用实践，在近10 a间不断进行更新修改完善的过程。USGS自2012年8月发布LBS规范1.0版本之后，随后不断进行了标准的更新和修订，实现了对标准随技术应用实践和需求的同步动态更新，LBS规范最新版本是2021年6月发布的，各版本的发布时间和主要变化内容具体见表1。

表1 激光雷达基础规范的版本简况

规范版本	发布时间	修订变化
LBS 2021 Rev.A	2021年6月	对检查点、保留点标志、重叠点标志、元数据等内容进行了修改。
LBS 2020 Rev.A	2020年8月	修改了版本命名规则以便于版本控制；更新了大地水准面、高程精度要求、元数据要求、交付条款、参考文献等内容。
LBS 2.1	2019年10月	更新了点分类要求，修改了DME的交付格式，增加了对使用‘-999999’作为单一的、一致的NODATA值的要求。
LBS 2.0	2018年7月	更改了审查和批准程序；改变了交付方式，增加了对桥梁处理过程的要求。
LBS 1.3	2018年2月	做了一系列的修改，包括如删除了交付原始点云数据、增加CRS要求、文件交付要求等。
LBS 1.2	2014年10月	规范内容未作修改，主要对主标题作了修改。
LBS 1.0	2012年8月	对规范的许多章节进行了编辑性修订，对文件进行了轻微重组。

注：自2020年开始，版本标记为“YYYY rev.L”，其中YYYY是发布年份，L是与发布顺序相对应的字母。LBS 2021 Rev.A是LBS在2021发布的第一个版本。如果有一个新的第2版本，它将被命名为“LBS 2021 Rev.B”。

3 LiDAR关键技术环节的标准化分析

数据采集和数据处理是保障LiDAR数据质量的关键，也是关系LiDAR技术应用的重要环节，同时亦是标准化的重点和难点所在。LBS规范对机载LiDAR的数据采集和数据处理进行了较为详细的规定，以下以LBS规范的最新版本2021 Rev.A为例，从数据采集和数据处理两方面对机载LiDAR标准化的关键技术环节和技术指标进行具体分析。

3.1 数据采集

激光雷达的数据采集在很大程度上受项目区的环境及许多其他因素的影响。为了保障3DEP项目全国范围内激光雷达采集数据的一致性，LBS规范主要规定了必须满足的最低采集要求，包括采集区域与天气条件、质量等级、采集标准等作了相关要求，具体内容如下：

1）采集区域和天气条件。LBS规范规定数据采集的区域应覆盖感兴趣区域并外扩100 m的缓冲区域；天气条件要求在无云雾且无雪的情况下进行，且地面尚未发生大面积洪水或其他类型的淹没情况，植被覆盖区应首选在无叶条件下进行数据采集。在植被有叶情况下的数据采集工作在签发任务单或合同之前应得到USGS相关部门的批准。

2）质量等级要求。LBS规范将质量等级（QL）分为4级，规定从QL3到QL0数据质量越来越高，并对不同质量水平级别做了相应的质量要求[15]，规定最低可接受额度质量水平为QL2级别，同时USGS鼓励3DEP项目的数据商采集提供高质量水平的数据。

3）额定点云间距要求：总体额定点云密度（aggregate nominal pulse density, ANPD）和总体额定点云间距（aggregate nominal pulse spacing，ANPS）是衡量激光雷达点云数据采集质量的重要参数。ANPD是指定区域内单位面积点云的典型或平均密度，通常表示为每平方米的点云数；ANPS是激光雷达数据集中点云之间的典型或平均横向距离，通常以米为单位。LBS规范对不同等级下的ANPD和ANPS作了具体的要

求，见表3。其中，在QL2等级下，ANPD应不低于每平方米2个点；ANPS应不大于0.71 m；另外LBS规范特别指出特定的项目要依据当地具体的地形和土地覆盖条件，可能数据采集时需要更高的点云密度。

表3　不同质量水平下总体额定点云间距和密度要求

质量等级	ANPS/m	ANPD/(个/m²)
QL0	≤0.35	≥8.0
QL1	≤0.35	≥8.0
QL2	≤0.71	≥2.0
QL3	≤1.41	≥0.5

3.2　数据处理

机载LiDAR点云数据具有海量、高冗余、点云密度不均、非结构化等特点，点云数据的处理是当前研究的重点和热点问题，也是LiDAR标准化的关键技术环节。LBS规范对点云数据处理的基础性内容如数据基准、精度检验、数据分类等方面的内容进行了具体规定，主要技术要求如下：

1）数据基准。LBS规范对数据基准主要规定了点云的文件格式、时间基准、空间基准、坐标参考系等内容。

2）精度检验。LBS规范规定在对点云数据进行分类和生成衍生产品之前，应对点云数据的绝对高程精度和相对高程精度进行检验，并提供检验过程的详细报告。

相对高程精度 指在没有地面测量控制点的情况下，激光雷达数据集内部的几何质量。单点的精度计算公式为：

$$\text{Precision} = \text{Range} - (\text{Slope} \times \text{Cellsize} \times 1.414) \quad (1)$$

$$\text{Cellsize} = \text{CEILING}(\text{ANPS}) \times 2 \quad (2)$$

式中，Range为每个像素中最高和最低激光雷达点云数据之间的差异，单位为m；Slope为指该单元相对于其8个相邻单元的最大坡度，以小数表示，由每个单元的最低高程计算；Cellsize为指单元格的边长，单位为米，用ANPS表示，经四舍五入后向上取整，然后再加倍；CEILING是一个将ANPS向上取整的函数；1.414为计算像素对角线尺寸时的系数[13]。

最终精度应以划定样本区域的面Shapefile文件形式进行报告。以每个栅格单元为样本值，计算样本区域Z方向的均方根差（RMSDz）值是否超过规定采集QL等级的限制。QL2级别下，单幅内精度和跨幅重叠一致性的RMSDz限值分别为≤0.06 m和≤0.08 m。

绝对高程精度、激光雷达数据及其衍生DEM的绝对高程精度应根据ASPRS（2014）进行评估和报告。划分为植被和非植被土地覆盖类型分别评估其绝对高程精度。评估应说明4个绝对精度值：点云数据和DEM各自的NVA（nonvegetated vertical accuracy，NVA）和VVA（vegetated vertical accuracy，VVA）。采用ASPRS方法时，不同的质量等级（QL）对数据的最低NVA和VVA要求不同，且需要同时满足NVA和VVA的最低要求值。在QL2质量水平下，NVA和VVA在95%的置信度下的要求值分别为≤0.196 m和≤0.30 m[13,15]。

3）数据分类。LBS规范规定了激光雷达数据必需的、最低的分类方案。在已分类的LAS交付成果中，除非被标记为保留点外，任何点不允许分配为0类。所有属于最低分类方案且未被标记为保留点的点云都应进行正确分类，可以根据特别的要求或目标添加新的分类，但需要特别注意的是，为了保证分类的连续性，整个项目中点的分类要保持一致[13]。

4　LiDAR标准化现状及特点分析

与欧美等发达国家相比，我国在激光雷达技术的发展和应用研究领域的起步较晚，LiDAR的标准化工作也相对滞后。原国家测绘地理信息局也曾颁布了少数激光雷达的相关行业标准，例如CH/T 8024–2011《机载激光雷达数据获取技术规范》、CH/T 8023–2011《机载激光雷达数据处理技术规范》等[14]。受限于我国标准化管理机制，这些标准在实践中未能随LiDAR技术发展应用的变化而及时更新，标准的适用性也非常有限。而在LiDAR数据质量检验和分级、LiDAR数据分类等关键技术方面，目前我国仍缺失相关的标准。

随着我国实景三维建设的推进以及自动驾驶对高精度地图市场需求的增长，LiDAR的标准化需求也愈加迫切。因此，笔者通过对近10年USGS发布的《激光雷达基础规范》7个版本的跟踪和分析研究，认为USGS在LiDAR新技术标准的制定、更新以及应用等方面具有显著特点，其标准化的模式和思路对于我国研制测绘新技术标准具有很好的启示作用，具体特点分析如下：

1）更新快速及时，灵活性好。从上文的分析可以看出，USGS在2012年8月发布了LBS规范1.0版本，之后不断更新修订推出更高级版本，到2021年共发布了7个版本，且2020年之后版本的标识也发生了变化，版本标识按年和字母组合进行标识，意味着该标准的更新将更加及时快速，或实现动态化更新。这既是LiDAR技术迅速发展和应用的需求，也是新技术标准自身不断完善的需求。这种灵活、快速、动态化

的更新模式对于我国测绘新技术标准的发展具有很好的借鉴意义。

2）适用性好，保持与现有相关标准的协调性。LBS规范的相关内容保持了与现有标准的高度协调性，例如点云数据格式采用美国摄影测量与遥感学会（ASPRS）发布的《LAS规范》version 1.4–R15（ASPRS, 2011）中所规定的点云数据记录格式中较为通用的数据格式；成果的精度分级保持了与DEM相关标准的一致；交付成果的元数据保持了与美国联邦地理数据委员会(FGDC)发布的《数字空间元数据内容标准》（1998）的一致，同时还增加了反映LiDAR特色的其他元数据内容。该标准保持与现有相关标准的协调一致性，大大提高了该标准的市场适用性。

3）可操作性强，涵盖了从数据采集、数据处理到成果交付的全过程。LBS规范是一个全面系统的LiDAR技术规范，涵盖了从LiDAR飞行数据采集的要求、天气条件、数据格式等，到数据处理的点云分类、定位精度检验、瓦片要求等，以及最终成果交付的内容都进行了具体详细的规定。与其他一些LiDAR数据处理规范仅仅侧重于从LiDAR点云数据生成DEM不同的是。该标准着重强调了原始激光点云的处理过程，这样可以保障在USGS NGP项目获得完整的数据源包括元数据、特征线、质量信息、描述性文档和其他一些辅助数据，更好地支持LiDAR技术不同使用目的应用。

4）成果按精度分级，内容丰富，保障了LiDAR数据的广泛应用。USGS在LBS规范中规定成果按精度分为4个等级，不同等级的质量和技术指标不同。成果类型丰富多样，包括分类的点云数据、裸地球表面数字高程模型、全部的特征线及其相关元数据，这种多元化丰富的数据成果既凸显了LiDAR技术的优势，兼顾了不同部门对高程数据的不同需求，同时还实现了一次性数据的获取，多部门数据的共享和重复利用，推动了地理信息资源价值的提升[14]，对于我国目前开展的实景三维中国建设具有很好的借鉴意义。

5 结 语

激光雷达作为近年来迅速发展起来的一门新兴测绘技术，具有高精度、高自动化、高效率等传统测绘无法比拟的优势，在当前我国智慧城市建设、资源调查监测、基础测绘等领域的应用越来越广泛。当前随着实景三维、新型基础测绘、自动驾驶高精度地图等研究的开展，随之LiDAR的标准化需求也愈加迫切。本文在梳理分析美国LiDAR标准化背景和标准化历程的基础上，从数据采集和数据处理两方面对机载LiDAR标准化的关键技术环节和技术指标进行具体分析，并探讨了美国激光雷达新技术的标准化特点和优势，对于我国测绘地理信息新技术标准的研发和制定具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 张广波. 机载激光雷达在密林山区地形测绘中的应用与质量分析[J]. 国土资源信息化,2021(4):28-33

[2] 孙薇,任玲,彭子凤,等. 基于倾斜摄影和激光雷达的大规模城市(深圳)三维建模探索[J]. 测绘通报,2021(增刊):10-15

[3] 李真,吕志慧,张浩. 基于车载雷达技术的城市部件普查研究[J]. 地理空间信息,2021,19(9):34-37

[4] 尚海兴,黄文钰,谢谦,等. TerrainMapper机载激光雷达的新能源基地智慧三维GIS工程应用[J].测绘通报,2021(11):165-168

[5] 陈飞,崔健,王郑. 垂起固定翼无人机激光雷达的电力巡检应用[J]. 测绘科学,2020,45(12):77-80

[6] 霍芃芃,侯妙乐,杨溯,等. 机载LiDAR点云建筑物屋顶轮廓线自动提取研究综述[J]. 地理信息世界,2019,26(5):1-13

[7] 张继贤,林祥国,梁欣廉. 点云信息提取研究进展和展望[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 460-1 469

[8] 张振鑫,刘艺博,陈动,等. 激光雷达点云特征表达研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2018,34(4):33-39

[9] ASPRS. LAS Specification Version1.4-R13 [EB/OL]. (2012-05-03) [2022-04-25]. http://www. asprs. org/Press-Releases/LAS-1-4-Draft-Specification-Released-by-ASPRS.html

[10] 张留民,吕宝奇,林蒙恩. LiDAR标准数据格式(LAS)的解析与处理[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(5):131-136

[11] 程晓光,熊彪. 美国三维高程计划(3DEP)实施情况及启示[J]. 地理信息世界,2022,29(1):109-114

[12] 刘春,姚银银,吴杭彬. 机载激光扫描(LiDAR)标准数据格式(LAS)的分析与数据提取[J]. 遥感技术应用,2009,22(8):38-42

[13] USGS LiDAR Base Specification 2021 Rev. A [EB/OL]. (2014-11-13) [2022-04-25]. http://nationalmap. gov/standards/index. html

[14] 郭玉芳. 激光雷达的标准化现状剖析[J]. 地理空间信息,2016,14(11):4-5

[15] ASPRS Vertical Accuracy Reporting for LiDAR, Version 1.0: [EB/OL]. (2004-05-24) [2022-04-25]. http://www.asprs. org/a/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data. pdf