

精准绘就 方寸尽显

——机载测深激光雷达探测水下奥秘

□ 文图 / 金鼎坚 吴芳 高子弘 于坤 赵政

> 航空遥感飞机进行测绘作业

第一作者简介 金鼎坚，高级工程师，主要从事航空遥感地质技术研究与应用工作。

盖下不为人知的秘密。机载激光雷达测深（Airborne Lidar Bathymetry）即是这样特殊的遥感技术，专门用于从空中探测浅水水下信息。

机载测深激光雷达：遥感家族中的“隐世高手”

机载激光雷达遥感是以机载激光雷达为传感器的一种航空遥感技术，按照功能和应用场景的不同，可分为机载



> 无人机

遥感，顾名思义为遥远的感知，是指不直接接触目标物体，而使用传感器接收物体反射或发射的电磁波信号，揭示物体的几何与物理特性及其变化特征。遥感传感器可以放置在卫星、飞机、地面三脚架等不同平台上，按照遥感平台的不同，一般可以将遥感技术划分为航天遥感、航空遥感和地面遥感三大系统。其中的航空遥感，是指以有人驾驶飞机、无人机、飞艇等各类航空飞行器为平台，从空中对地面进行探测观测监测的遥感技术统称。按照航空平台的不同，航空遥感又可分为有人机遥感和无人机遥感。根据传感器工作原理和所使用的电磁波谱段来划分，航空遥感又可进一步分为航空摄影、倾斜航空摄影、航空多光谱遥感、航空高光谱遥感、机载合成孔径雷达遥感、机载激光雷达遥感等不同类型。



陆地激光雷达和机载测深激光雷达。机载陆地激光雷达主要应用于陆地测量，目前在地形测绘、地质灾害调查、林业调查、电力巡检、建筑物三维建模等领域广泛使用；机载测深激光雷达则具有一定的水体穿透能力，可以探测水下地形、水体光学特性及水下目标等，主要应用于海岸带、海岛礁，以及内陆河流、湖泊的测量。

机载陆地激光雷达近年来发展迅速，声名鹊起；机载测深激光雷达则显得默默无闻。实际上，机载激光雷达测深技术的发展比机载陆地激光雷达更早。1960 年，世界上第一台激光器问世，仅隔 8 年，美国锡拉丘兹大学（Syracuse University）的科研人员就建造了世界

上第一个机载激光水深测量系统。20 世纪 80 年代，业务化运行系统诞生并投入商用。然而，由于机载激光雷达测深技术相对更复杂，只有少数发达国家成功研制商用机载测深激光雷达系统，且造价十分昂贵。国内开展大规模机载测深激光雷达生产应用相对较少，国产机载测深激光雷达系统在近几年才初步实现业务化运行。因此，长期以来，机载测深激光雷达这一先进的航空遥感技术在国内罕为人知，可谓遥感家族中的“隐世高手”。

蓝绿激光：机载激光雷达探测水底的“探照灯”

激光雷达，即光探测与测距。它通过测量激光信号发射与接收的时间差，结合光速计算被测物体相对于探测器的距离。那什么是激光呢？激光，即受激辐射的光放大。激光作为一种光波，属于电磁波。波长是激光的一个重要参数，激光器输出波长覆盖了紫外（10 ~ 400 纳米）、可见光（400 ~ 700 纳米）和红外（700 ~ 1 000 微米）等波段。机载测深激



＞ 绿色激光

光雷达一般使用波长为 532 纳米的蓝绿激光进行水下信息探测。

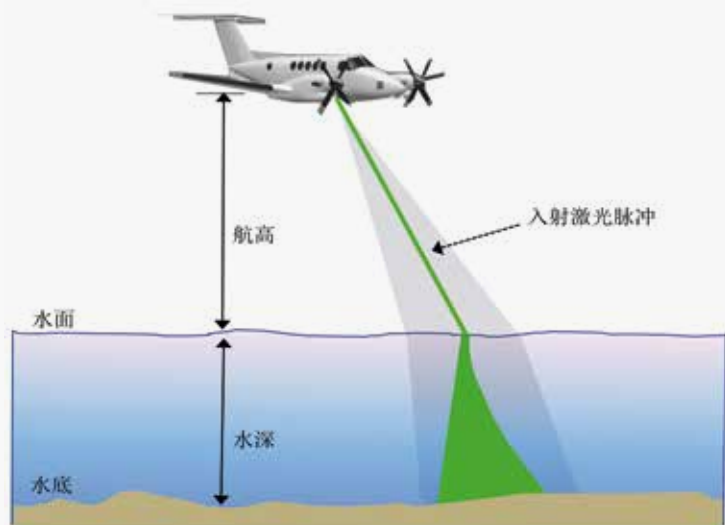
机载测深激光雷达之所以要使用蓝绿激光，是由水体的光学性质决定的。我们的地球被称为“蓝色星球”，当我们从遥远的太空俯瞰地球时，可以看到约 71% 的地球表面被广袤的海洋覆盖，呈现一片蔚蓝。这种蔚蓝色与光线和海水之间的反射和吸收作用有关。太阳光从红光到紫光，波长逐渐变短。波长较长的红光、橙光、黄光穿透能力强，最易被水分子所吸收；波长较短的绿光、蓝光穿透能力相对较弱，容易被水分子散射和反射；波长最短的紫光同样会发生散射和反射，但由于人眼对紫光不敏感，所以我们看到的海洋呈现蓝色。海洋光学科学家们经过长期研究和试验测量找到了电磁波的“海水窗口”，即波长为 470 ~ 580 纳米的蓝绿光，该波段范围内的蓝绿光受海水的吸收和散射最小，衰减程度最弱。机载测深激光

雷达使用这种损耗最小的蓝绿光，可以达到更大的探测深度。因此，蓝绿光是机载激光雷达探测水底的关键。

系统组成： 多单元同步协作打好“配合战”

现代机载测深激光雷达系统一般包括激光发射器单元、扫描单元、探测器单元和辅助系统四个主要单元。激光发射器单元负责发射大功率、高重频、窄脉冲的激光；扫描单元以一定的扫描角度对激光信号以圆形、折线形或多边形等各种形式进行扫描，以实现激光雷达测深信号对测区的全覆盖；探测器单元收集、记录和存储水面、水体和水底等反射回来的激光信号；辅助系统最主要的是定位和定向。

机载测深激光雷达系统的基本工作原理可以描述为：安装在飞机上的机载测深激光雷达系统以一定的入射角和扫描方式向水面发射激光脉冲，精准记录水面反射回波和水底反射回波的时间，结合激光传播速度、水的折射率、飞机的位置和姿态、激光束指向信息等，计算水底三维位置坐标及水深。



＞ 机载测深激光雷达工作原理示意图

水陆一体测量：多传感器强强联合的“多面手”

随着科技的发展，现代机载测深激光雷达不仅限于水深测量，还能实现水陆一体测量。而且，一些先进的机载测深激光雷达系统不仅装备测量水下地形的激光雷达，还集成了测量地物光谱信息的高光谱成像仪和获取地面影像的数字相机等传感器，形成一个强强联合、功能强大的多传感器集成系统，可以生产多种类型的数据产品，满足各种应用。

通过激光雷达传感器生产的主要产品有激光雷达点云、海陆一体数字高程模型、等深线图，等等。此外，从激光雷达全波形数据也可以反演海水光学性质，如海水衰减系数、后向散射系数，等等；利用激光雷达水底反射率影像可以进行海底底质分类。通过高光谱遥感传感器可以反演水体叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度、可溶性有机物浓度等水环境参数，以及海水衰减系数，处理得到水底高光谱遥感反射率数据，用以进行高精度海底底质分类。通过数字相机，可以生产海岸带或海岛礁陆地部分高精度数字正射影像。通过激光雷达、高光谱和数字相机等主、被动遥感的融合，可以开展海底底质分类、珊瑚礁识别、海洋水体要素的反演等多种应用产品的生产，可以制作海陆一体的三维模型。

截至目前，机载测深激光雷达技术在海图绘制、航道监测、区域沉积管理、海洋防灾减灾、海底生境调查、珊瑚礁监测、海岸带工

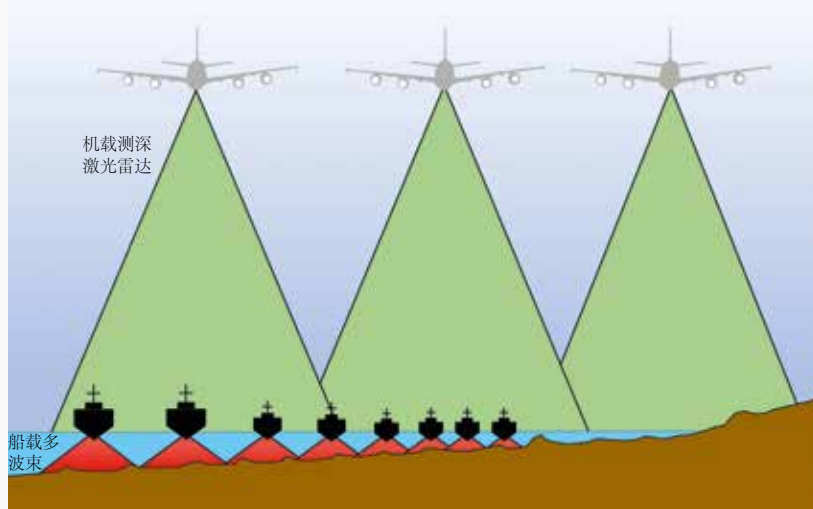
程规划建设、海岸带环境监测、海岸线监测、渔业管理、水下目标探测、水下考古等很多方面得到了广泛应用。

技术特点： 与传统技术互通有无

机载激光雷达测深作为一种新型航空遥感技术，与传统船载多波束测深等技术相比，在海岸带测量中具有显著的技术优势。

一是不受水面通行条件限制，能覆盖测量船难以通行的区域。机载测深激光雷达技术以飞机为测量平台，不受水深、水下障碍物的影响，可以在测量船难以到达的浅水区域、礁石密布海域、人员无法登岛的岛礁与周边海域、滩涂、潮间带等其他作业困难海域开展测量，弥补传统船载测量的不足。

二是作业效率高。一方面，因为飞机平台的速度更快，以运-12 等固定翼飞机为例，常规机载激光雷达测深作业飞行速度约为 220 千米/小时，而测量船在浅水区作业速度一般约为 10 千米/小时；另一方面，测深机载激光雷达航带覆盖宽度更大，如加拿大 Teledyne Optech 公司生产研发的 CZMIL Nova 系统，其航带宽度为航高的 0.73 倍，400 米典型航高时航带宽度约 290 米，船载多波束条带覆盖宽



＞ 机载激光雷达测深与船载多波束测深技术优缺点对比示意图

度一般为水深的 3 ~ 5 倍，在 20 米以浅的浅水水域覆盖宽度一般不足 100 米。综合来看，在浅水区机载测深激光雷达单位时间作业效率是船载测量的 60 倍以上。

三是可实现海陆一体测量。传统的海岸带测量中，陆域和海域分开测量，然后进行海陆成果的集成，作业流程繁琐。机载测深激光雷达技术具备海陆一体测量能力，可以实现陆地和水下地形无缝拼接。

四是综合效费比（即投入费用和产出效益的比值）高。据概算，机载激光雷达测深的单位时间作业费用是船载多波束测深的 3 倍，但综合考虑测量速度、航带覆盖宽度等测量效率因素，机载激光雷达测深综合效费比约为船载多波束测深的 8 倍，是一种更高效更低成本的技术。

当然，机载激光雷达测深与船载多波束测深技术相比也有其缺陷，例如，激光受水体衰减严重，穿透深度有限，一般只适用于较为清澈的浅水水域。因此，机载激光雷达测深技术并不能完全取代船载多波束测深技术，而是与船载多波束测深技术互为补充。



＞ 三亚蜈支洲岛机载激光雷达海陆一体地形与数字正射影像



＞ 基于 CZMIL Nova 机载测深激光雷达数据的三亚蜈支洲岛海陆一体三维模型

最大测深与精度： 多因素影响的技术难点

作为一种浅水水下信息探测设备，人们最关心的是机载测深激光雷达到底能测多深？测量精度是多少？这两个问题看似简单，却又非常复杂。

机载测深激光雷达的最大测深能力主要由设备本身性能决定，但又与外界作业条件密切相关。这就好比人的视力，通过视力表检测值来表征一个人的视力水平，但是具体能看多远又受外界环境的影响。同一套机载测深激光雷达，在水质非常清澈的区域，最大测深可达 50 米，甚至 80 米；而在较浑浊的水域，最大测深可能只有 2 ~ 3 米。

也就是说，在不同区域所能测得的最大测深因水质条件的不同会有很大的差异，不能用一个绝对值来描述机载测深激光雷达的最大测深。目前机载测深激光雷达系统的最大测深在我国南海海域

大约为 50 多米，在海南岛近岸大约为 30 ~ 40 米，在广西近岸大约为 20 ~ 30 米，在广东近岸大约为 10 ~ 20 米，在其他水质更差的海域则更低。除了水质条件外，水底底质类型对最大测深也有影响，不同底质对激光反射率不同，如泥质海底对激光反射弱，会导致最大测深降低。飞机航高、太阳光照、风浪、赤潮等因素均会对机载激光雷达测深有一定影响。因此，对同一片区域，在不同条件下测量，其最大测深可能都不一样。

机载测深激光雷达的测量精度也是非常复杂的，既包括陆地测量精度，又包括水下测量精度；既包括水平精度，又包括高程精度。人们一般最关心的是水下测量高程精度，即测深精度。机载激光雷达测深精度受设备性能、环境条件、数据处理算法和飞行质量等多种因素影响，不是一个单独的数值，而是随深度变化的量。参照国际海道测量规范（S44 2022 版），现代机载测深激光雷达系统的测深精度普遍达到国际海道测量组织 1a 级标准，满足我国 1:2000 ~ 1:5000 比例尺海道测量规范要求，如 CZMIL Nova 系统标称的测深精度在 30 米以浅水域一般优于 0.3 米。

方兴未艾：机载激光雷达测深技术将大有可为

机载激光雷达测深技术具有作业区域广、测量效率高、海陆一体同步测量等优点，是高效获取高精度近岸海底地形的重要手段，尤其对“人下不去、船上不来”的海岸带海陆地形一体化测量更具优势，是一种非常有应用前景的航空遥感测量技术。

从 20 世纪 60 年代末开始，加拿大、瑞典、澳大利亚、奥地利和美国等发达国家长期开展机载激光雷达测深技术的研究，已研制出多种较为成熟的机载测深激光雷达系统，均在浅水地形测量中得到广泛应用。美国早在 1998 年就由军方和美国地质调查局(USGS)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)等政府机构成立了联合机载激光雷达测深专业技术中心(JALBTCX)，专注于机载激光测深和相关技术的运行、研究、开发，并且基于机载激光雷达测深技术从 2004 年就启动了国家海岸带测图计划。我国从 20 世纪 80 年代末开始机载测深激光雷达系统的研究工作，但直到近几年才有个别系统初步实现业务化运行，与发达国家仍存在较大差距。在生产应用方面，原国家海洋局第一海洋研究所、中国科学院上海光机所等单位使用国外设备和国产设备在我国海域开展过一些机载激光雷

达测深试验工作；中国人民解放军海军海洋测绘研究所利用 CZMIL Nova 系统开展了我国西沙海域的机载激光雷达测深应用；中国自然资源航空物探遥感中心也利用 CZMIL Nova 系统在海南、广东、广西等南海北部海岸带开展了具有一定规模的机载激光雷达测深生产应用。但是，总体上我国机载激光雷达测深应用还非常少，没有充分发挥出机载激光雷达测深技术的优势和应用效能。

随着我国海洋强国战略的推进，海岸带和海岛礁开发利用、保护修复等对高精度、多参量水下信息的需求将越来越强烈，机载测深激光雷达这一从空中探测水下奥秘的遥感“利器”必将越来越受到重视，发挥越来越重要的作用。我们需要借鉴国外发达国家的经验，加强产学研用联合，加快推进我国机载激光雷达测深技术的发展及应用。

本文由中国地质调查局“南海重点岛礁及其周边海域机载激光测量（编号：DD20230406）”项目资助。

第一作者单位 / 中国自然资源航空物探遥感中心

（本文编辑：何陈临秋）