

纪雪, 董震, 张靖宇, 等. 机载激光测深系统强度数据 AGC 补偿异常区域识别及改正[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 159–167, doi:10.12284/hyxb2023133

Ji Xue, Dong Zhen, Zhang Jingyu, et al. Identification and correction of airborne laser bathymetry intensity data in AGC compensated abnormal zone[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 159–167, doi:10.12284/hyxb2023133

# 机载激光测深系统强度数据 AGC 补偿异常区域识别及改正

纪雪<sup>1,2,3</sup>, 董震<sup>2</sup>, 张靖宇<sup>3</sup>, 王明常<sup>1\*</sup>, 李莹莹<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 机载激光测深系统 (Airborne Laser Bathymetry, ALB) 因集成了具有独特水体穿透能力的绿波段 (532 nm) 而被广泛用于水深测量。除地形数据外, ALB 还记录了地物目标的辐射特性 (后向散射强度), 可用于条带配准、海底底质分类和几何建模。然而, 由于自动增益控制 (Automatic Gain Control, AGC) 设计局限, 增益值调整存在延缓, 对于裸露岩石、水域等高返回、低返回目标较多的海岛海岸带区域, 强度补偿异常问题格外突出。针对该问题本文设计了一种基于双向移动的局部加权强度改正方法, 提出索引共享机制辅以地形信息实现有效强度数据精确提取; 以扫描周期为依据进行扫描线分割, 通过柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验进行强度补偿异常区识别; 通过对邻近扫描线和邻域强度联合加权进行强度改正, 保证强度细节的同时较好地消除与邻域强度偏差, 独特的双向移动策略能有效削弱改正不足积累造成的强度改正精度下降问题。实验证明该方法能有效解决 AGC 补偿异常问题, 相较于改正前, 改正后的强度数据平均绝对百分比误差降低了约 0.27, 均方根误差下降了约 693, 异常区强度与邻域强度偏差控制在 26 DN (Digital Number) 以内, 得到高质量强度图像。

**关键词:** 机载激光雷达测深; 自动增益控制; 强度改正; 扫描线

中图分类号: P715.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)10-0159-09

## 1 引言

机载激光雷达测深系统 (Airborne Laser Bathymetry, ALB) 是一种新型主动遥感测量技术, 凭借高采样率、高灵活性、高安全性和低作业成本等优势被广泛用于地形地貌测量、沿海环境监测和生物栖息地绘制<sup>[1-4]</sup>。相比于传统声学测量技术, ALB 独特的水陆一体化测绘优势, 被誉为海岸带测绘的曙光<sup>[5]</sup>。ALB 系统不仅提供被扫描物体的几何信息, 还提供额外的光谱信息, 即后向散射信号的强度, 通常称为强度<sup>[6]</sup>,

可应用于条带调整、特征提取、海岸环境监测、沉积物分类或分割、表面建模、生物栖息地制图、水质反演以及自然灾害评估<sup>[7-10]</sup>。受发射功率、采集几何参数、系统光学损耗、大气/水体衰减等因素影响<sup>[11-14]</sup>, 强度数据不能直接反映真实目标属性<sup>[15-16]</sup>。目前针对 ALB 强度改正研究主要集中在采集几何参数建模和环境因素衰减补偿<sup>[17-19]</sup>, 其中, 自动增益控制 (Automatic Gain Control, AGC) 导致的强度补偿异常是制约强度产品应用的重要影响因素之一, 需要精确改正处理。

收稿日期: 2023-02-26; 修订日期: 2023-06-01。

基金项目: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目 (22S02); 国家海洋局海洋遥测工程技术研究中心开放基金项目 (2022002); 国家自然科学基金项目 (341871381, 42171407, 42077242)。

作者简介: 纪雪 (1989—), 女, 讲师, 山东省青岛市人, 主要研究方向为海洋测绘。E-mail: jixuesdq@jlu.edu.cn

\* 通信作者: 王明常, 男, 教授, 主要从事测绘工程。E-mail: wangmc@jlu.edu.cn

AGC 是设备为在辐射分辨率范围内控制记录强度范围而采用的程序,例如,浮点型强度(0~1)、8 位强度数据(0~255)和 16 位强度数据(0~65 535)<sup>[15,20]</sup>。由于距离测量与脉冲宽度有关,因此过饱和(或振铃效应)对距离精度有直接影响,AGC 设计的初衷是增加接收回波数,降低过饱和度<sup>[21]</sup>。当传感器连续记录了一定数量低反射物体返回的激光脉冲(低于 AGC 设置的最低值,如水体),AGC 增强功能开启,增益值(Gain Value, GV)将在连续的一定范围内增加,反之,如果连续高于 AGC 最大阈值,则 AGC 降低功能开启<sup>[21]</sup>。目前,国内外针对 AGC 效应的改正研究较少,Korpela<sup>[22]</sup>尝试揭示 AGC 工作黑箱,提出线性经验模型对 AGC 的影响进行建模并使用参照目标解算改正模型参数,并评估了 Optech ALTM 3100 和 Leica ALS50-II 传感器中 AGC 效应的影响,证明 AGC 改正可以有效改善分类精度(6%~9%)<sup>[21]</sup>; Vain 等<sup>[20]</sup>通过对 AGC 开、关不同状态下记录的强度数据进行建模,认为 AGC 的影响由一个比例因子和偏移控制,因此,AGC-on 强度数据与 AGC-off 强度数据之间的转换方程应为分段线性函数形式,进而修正 AGC 对强度造成的干扰。由于 ALB 作业环境为海岛海岸带区域,低反射率(水域)和高反射率(礁石、沙滩)较多,AGC 的 GV 变化频繁且复杂,然而,已有 AGC 改正模型均基于机载地形激光雷达(Airborne Topographic Laser Scanner)构建,并未关注 AGC 由于 GV 开启或调整延迟造成的补偿错误问题,如图 1 所示,由于 AGC 中 GV 对强度的调整具有持续性,并不能精确判断高/低反射率目标的边界,造成 GV 调整延迟,阈值范围内的强度数据因为 GV 的持续性而被不合理“补偿”,部分超过阈值的强度数据因未达到持续时间而未被“补偿”(增强或削弱),这使得调整后的强度数据存在异常(过度/

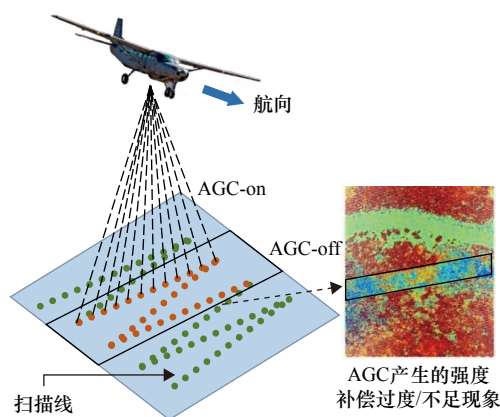


图 1 ALB 强度数据 AGC 补偿异常区示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the AGC compensation abnormal area of ALB intensity data

不足)区域,表现出连续测量时间段内出现强度突变现象,严重制约强度数据的进一步挖掘和使用。

综上所述,针对 AGC 效应产生的补偿异常问题,本文以 ALB 强度数据为研究对象,提出一种基于双向移动的局部加权强度改正方法,综合发射参数和坐标数据进行强度预处理,剔除噪声数据(无效强度、多次回波强度),结合邻近测线差异分析,构建基于阈值的 AGC 补偿异常区域识别,系统分析 AGC 补偿异常区强度数据特点,通过邻近扫描线和邻域强度数据联合加权对强度数据进行改正,保留强度细节信息的同时消除强度偏差,引入双向移动策略保证强度改正精度。这对完善 AGC 改正模型,提高强度改正精度和应用价值具有重要意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

研究数据由 Optech 公司开发的 Aquarius(水瓶座)系统于 2012 年 12 月底在甘泉岛采集得到,试验飞行高度为 300 m,整个测线长约 4 800 m,共计约 244 万个采样点。Aquarius 与双子 ALTM 兼容,是 Optech 2011 年推出的轻量级 ALB 系统,能同时进行陆域和 水下地形测量,最大测深达 13 m。

### 2.2 技术流程

ALB 强度数据 AGC 补偿异常区域识别及改正具体工作流程如图 2 所示,可分为 3 个步骤:强度数据预处理、AGC 补偿异常区识别和 AGC 补偿异常区强度改正。

强度数据预处理:结合坐标数据和地物类别对强度数据中的干扰噪声进行追踪,构建索引共享机制,基于地形数据辅助实现强度噪声定位和剔除。

AGC 补偿异常区识别:结合发射角信息进行扫描线分割,通过邻近扫描线强度柯尔莫洛夫-斯米洛夫检验实现 AGC 补偿错误区域识别。

AGC 补偿异常区强度改正:兼顾补偿异常区强度细节和邻近测线强度,构建基于双向移动的局部加权方法进行强度改正。

### 2.3 强度数据预处理

由于混杂波形干扰,强度数据中通常混杂大量干扰噪声,因此在改正或使用之前必须进行预处理。通过将强度数据与地物类别、地形数据进行联合分析,发现这些噪声强度主要来源于两方面:一方面是仪器噪声导致的无效强度;另一方面是海面回波分量产生的海面强度。为实现干扰强度数据的追踪和定位,本文提出了一种索引共享机制。强度数据、坐标数据、

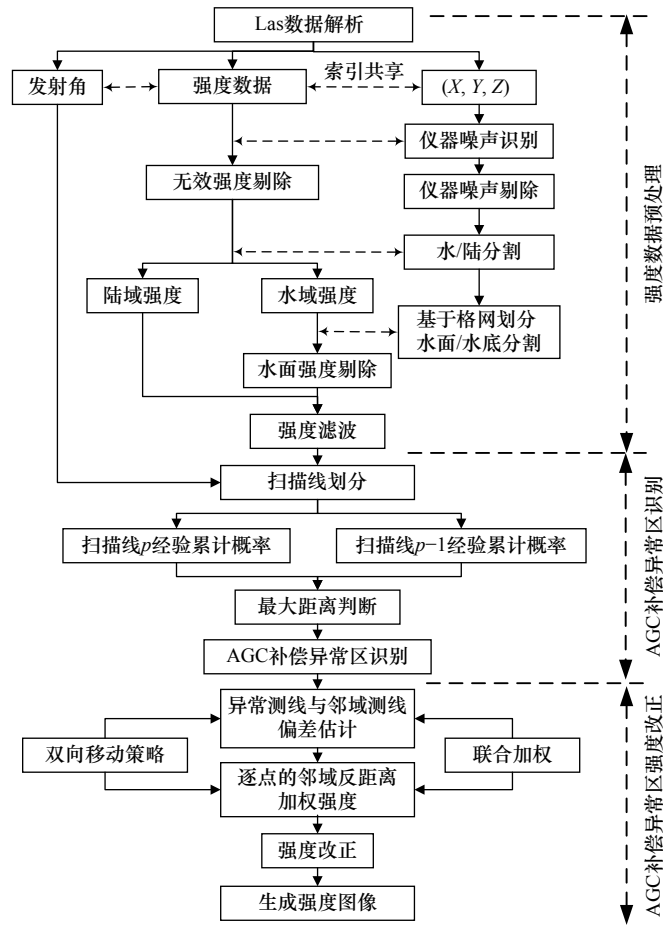


图2 AGC强度补偿异常区识别及改正工作流程图

Fig. 2 Flow chart of identification and correction of AGC correction abnormal area

发射角度数据等参数存在一一对应关系, 因此对相应参数建立相同编号, 在整个操作过程中各点的编号始终保持不变, 索引共享机制可以高效地实现干扰或异常强度及对应参数的一体化操作。通常, 仪器噪声产生的波形并不能记录有效目标强度, 对应的强度数据普遍较低(30~50 DN), 高度偏高(飞行高度附近), 因此通过设置高程阈值(120 m)对无效强度进行定位和剔除。对于水面回波强度, 首先估算水面点云高度范围 $[z_{\min}, z_{\max}]$ , 根据阈值 $z_{\max}$ (1.45 m)进行水陆分割, 进而设计了一种基于格网高程判断的点云分割方法, 对点云坐标数据进行格网分割, 如果第 $i$ 个格网内点云集合高程普遍高于 $z_{\min}$ (-0.48 m), 则该区域点云为水面点; 否则, 计算第 $i$ 个格网内点云集合 $Q_i$ 中最高点与最低点均值 $\bar{z}_i$ ; 高于 $\bar{z}_i$ 的被认为是水面点云, 低于 $\bar{z}_i$ 的则为水底点云; 遍历所有格网实现水面点/水底点云分割, 通过索引共享剔除水面点对应的强度数据。

## 2.4 AGC补偿异常区识别

AGC的启动、关闭或GV调整都是基于连续的激光脉冲进行的, GV调整速度即连续激光脉冲的数

量取决于设备参数设置, 比如, 对于徕卡 ALS50-II 扫描仪, 如果信号超出了出厂设定的限制, 增益将在 256 步内增加或减少, 其中增益的速度可通过两个开关(SW1 和 SW2)进行调节(各 16 个级别)<sup>[20]</sup>。传统基于逐点的强度差异判断运算量大, 鉴于异常区域产生的时间连续性特点, 为简化运算提高数据处理效率, 文中将强度差异判断单位设置为扫描线。基于扫描线的判别模式能更快速地进行强度异常扫描线识别的同时削弱噪声强度对判断的干扰, 提高识别精度。采用索引共享机制, 对发射角度与强度数据进行对应, 基于发射角对一扫描线周期进行划分进而实现强度数据扫描线分割。由于柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S test)<sup>[23]</sup>能有效评估两组数据是否来自同一集合, 即满足同样分布, 因此本文采用 K-S test 进行异常扫描线识别。沿着飞行方向, 判断第 $p$ 条扫描线强度与第 $p-1$ 条扫描线之间的差异性, 在第 $p$ 条扫描线中基于均匀采样选取 $t$ 个强度数据 $I^p = (i_1^p, i_2^p, i_3^p, \dots, i_t^p)$ , 利用距离最近确定第 $p-1$ 条扫描线对应的强度数据 $I^{p-1} = (i_1^{p-1}, i_2^{p-1}, i_3^{p-1}, \dots, i_t^{p-1})$ ,

计算 $I^p$ 和 $I^{p-1}$ 的经验累积概率函数 $F_p(i)$ 和 $F_{p-1}(i)$ :

$$F_p(i) = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \text{card}(i, i_j^p), \quad (1)$$

$$F_{p-1}(i) = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \text{card}(i, i_j^{p-1}), \quad (2)$$

式中,  $\text{card}(\cdot)$ 为一维指示函数, 若输入为真, 则函数值为 1, 否则函数值为 0。计算经验累积分布函数 $F_p(i)$ 和 $F_{p-1}(i)$ 之间的最大距离 $D_{p,p-1}$ 作为判断两个扫描线强度差异大小的标准。

$$D_{p,p-1} = \max |F_p(i) - F_{p-1}(i)|. \quad (3)$$

当 $D \geq \varepsilon$ 时, 认为第 $p$ 条扫描线进入 AGC 补偿异常区域,  $\varepsilon$ 为临界值(显著性水平设置为 0.05)。遍历所有扫描线就可以识别出各 AGC 补偿异常区域的起始位置。

### 2.5 基于双向移动的局部加权的 AGC 补偿异常区域强度改正

AGC 补偿异常区强度数据需要进行改正才能进行满足地物分类、分割需要。研究发现 AGC 补偿异常区的强度数据在视觉上表现出过渡不自然, 与邻域强度数据有显著差异, 仍具有保留强度变化细节的能力。如果直接对该区域进行插值会丢失原有的细节信息, 为此本文设计了一种兼顾补偿异常区强度细节和邻近测线强度的改正方法, 改正方向由扫描线两端到中央, 称为双向移动的局部加权强度改正方法, 改正后的强度值由邻近扫描线强度和邻域强度共同决定。如图 3 所示, 假设异常区扫描线区间为 $[p, q]$ , 第 $p$ 条扫描线第 $j$ 个强度值改正公式为

$$I_j^p = \frac{[(\bar{I}^{p-1,p-s} - \bar{I}^p) + i_j^p] + \Gamma_j}{2}, \quad (4)$$

$$\Gamma_j = \sum_{t=1}^k \omega_t \times \Omega(i_t), \quad (5)$$

$$\omega_t = \sum_{t=1}^k \left[ \frac{1}{d_t} \left( \sum_{t=1}^k \frac{1}{d_t} \right)^{-1} \right], \quad (6)$$

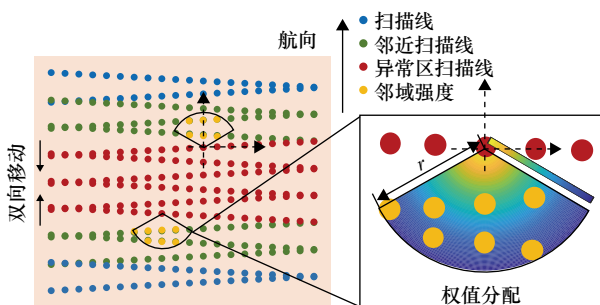


图 3 双向移动的局部加权强度改正示意图

Fig. 3 Bidirectional movement-based local weighted intensity correction diagram

式中,  $I^p = (i_1^p, i_2^p, i_3^p, \dots, i_n^p)$  为第 $p$ 条扫描线强度数据集合;  $n$ 为强度值数量;  $\bar{I}^p$ 为 $I^p$ 的均值;  $\bar{I}^{p-1,p-s}$ 为邻近 $s$ 条完整扫描线, 即第 $p-1$ 至 $p-s$ 条扫描线强度数据集合 $\bar{I}^{p-1,p-s} = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_m)$ 的均值,  $m$ 为邻近 $s$ 条完整扫描线前幅度值数量;  $\Gamma_j$ 为以 $i_j^p$ 为原点, 以 $\theta$ 为圆心角,  $r$ 为半径的扇形区域 $\Omega$ 内强度的反距离加权平均值;  $\Omega(i) = (i_1, i_2, \dots, i_k)$ , 其中 $k$ 为强度值个数; 权值 $\omega$ 与位于圆心的兴趣点的距离成反比, 权值总和为 1;  $d_t$ 为 $i_j^p$ 与 $\Omega(i_t)$ 之间的平面距离。角度朝向平行于航向, 角度中线指向正常强度区域, 遍历 $p$ 条扫描线所有强度数据, 则该条扫描线强度改正完成。从式(4)可以看出, 改正后的强度值由邻近测线强度和邻域强度两部分确定, 权值比重均为 0.5, 前者将原始强度基于平均强度偏差进行调整, 后者则基于对邻域正常强度进行反距离加权平均进而对强度进行修正。为削弱因条带改正不足逐渐传递积累导致的改正效果降低, 文中提出双向移动改正策略, 使得改正方向从补偿异常区域的两端开始, 逐渐向中央移动, 最终实现强度数据改正。

## 3 结果与讨论

### 3.1 有效强度数据精度评估

本文基于自主开发的 Las 数据分析处理软件 Split LAS V1.0 完成采集的 Las 数据文件解析, 提取强度数据、坐标数据和入射角参数并建立索引共享, 其中强度数据展示如图 4a 所示, 通过图 4 局部放大图可以看出, 强度数据产品中混杂了很多干扰噪声, 很难对海底目标强度有很直观的分析判断。按照工作流程依次对强度数据进行无效强度、陆域强度、水面强度和水底强度的识别或分割, 得到强度数据分类结果如图 4b 所示, 由于水底强度高程偏低, 因此被水面强度遮挡。选取 50 个采样点与影像数据进行对比, 实验结果证明强度的水陆分割精度达到 98%, 通过对无效强度和水面返回强度进行剔除得到的最终有效强度数据如图 4c 所示。为了对强度处理结果进行定量分析, 在试验区选取了两块区域, 分布如图 4a 所示, 分别统计改正前后的强度数据的最大强度偏差 (Deviation,  $D$ )、标准差 (Standard Deviation, SD)。通过表 1 的统计分析结果表明被保留的有效强度数据占原始强度数据总量的 55.33%, 这意味着无效和干扰强度数据占比大, 强度数据预处理十分必要, 原始强度数据产品因混杂噪声干扰, 强度的最大强度偏差、标准差普遍较高, 干扰强度剔除后得到了很明显的改善。

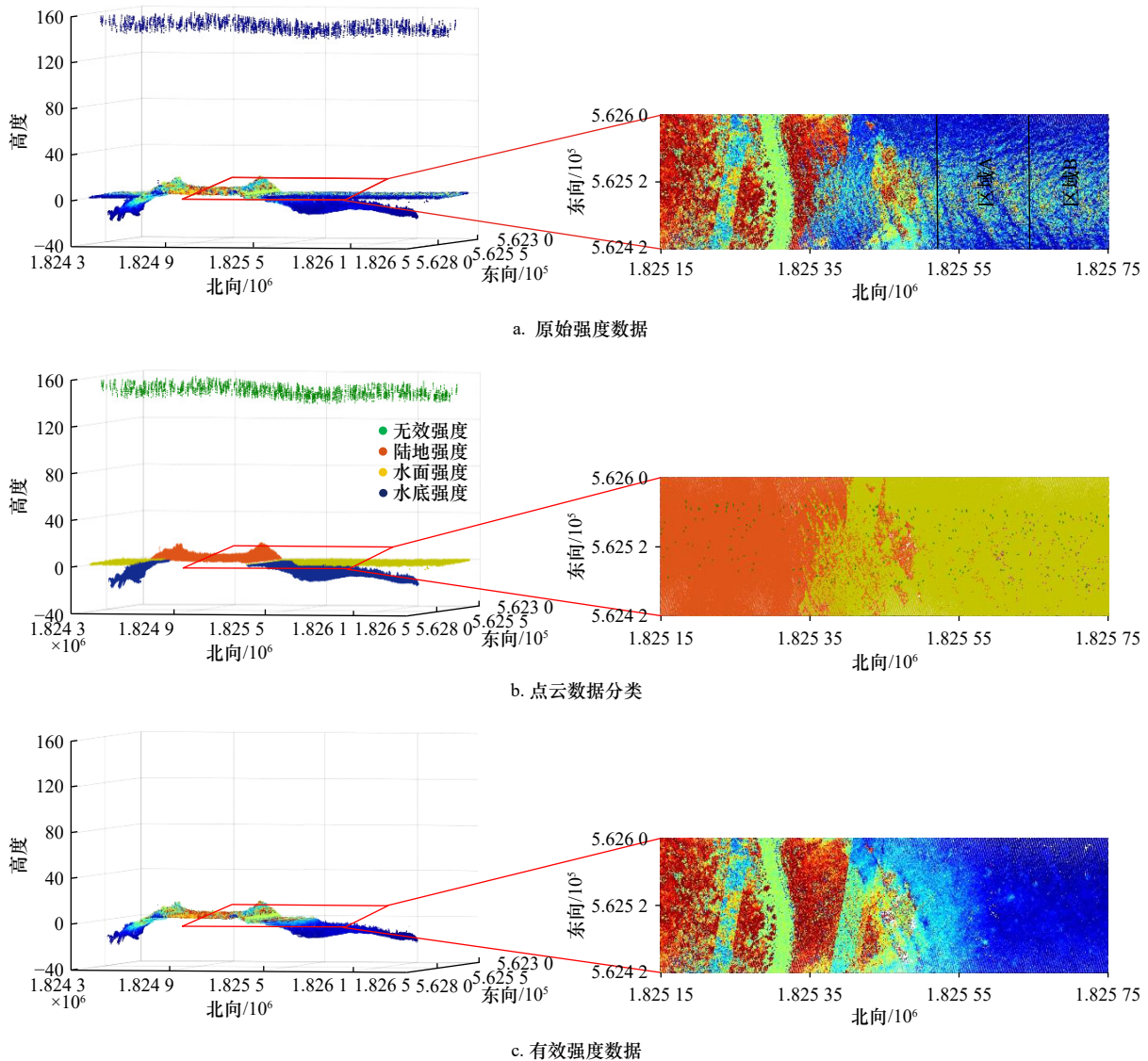


图 4 强度数据预处理前后对比

Fig. 4 Comparison of intensity data before and after preprocessing

表 1 区域 A/B 强度数据处理前后参数统计

Table 1 Parameter statistics of regional A/B intensity data before and after processing

		区域A	区域B
原始强度	数据量	7 812	4 468
	<i>D</i>	3 818	1 277
	SD	527.07	339.31
强度数据预处理后	数据量	8 656	4 643
	<i>D</i>	3 815	912
	SD	510.44	137.18

### 3.2 AGC 补偿异常区强度差异分析

为量化 AGC 补偿改正异常导致的强度变异情况,通过目视解译我们在研究区内随机选取了 3 处

AGC 补偿异常区域强度数据与邻近正常强度数据进行对比分析,要求两条扫描线编号连续,一条位于 AGC 补偿异常区域,一条位于正常区域。图 5 展示 3 处区域沿扫描线方向的强度剖面,以扫描起始点为原点,以正北、正东为坐标轴建立局部坐标系进行不同扫描线强度展示。其中蓝色为正常强度区域数据,红色表示补偿异常扫描线对应数据,可以看出两条扫描线具有大致相似的变化趋势但又存在明显的强度差异。其中,图 5a 表明同一条扫描线不同强度对应的强度差异不同,这种差异似乎与强度没有明显的线性关系;图 5b 显示了即便是同一测线同一强度,对应的强度偏差也存在明显差异,差值有正有负;对图 5a 至图 5c 选取强度为 1 000 DN 的强度并对分析发现不同测线同一强度对应的强度偏差不同。概括起来,

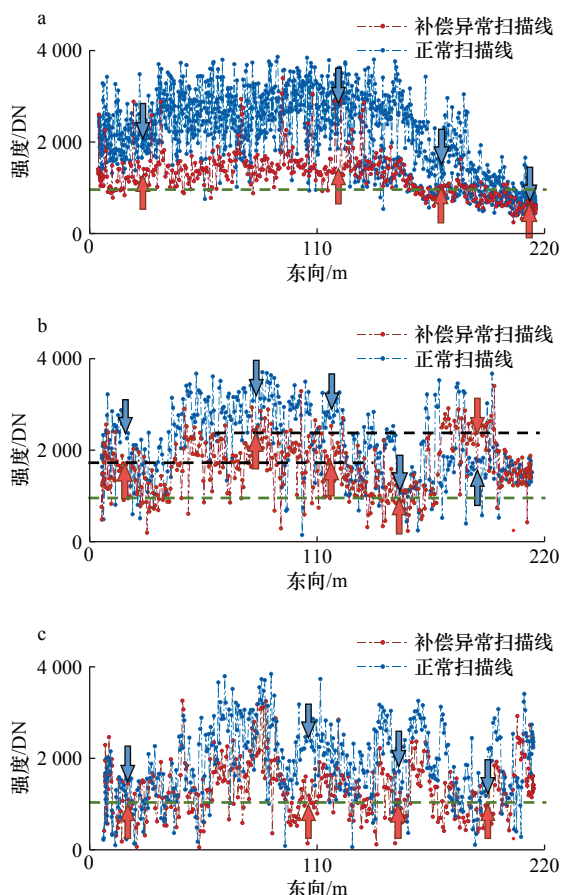


图 5 补偿异常扫描线与邻近正常扫描线的强度对比

Fig. 5 The intensity comparison between abnormal scan lines and adjacent normal scan lines

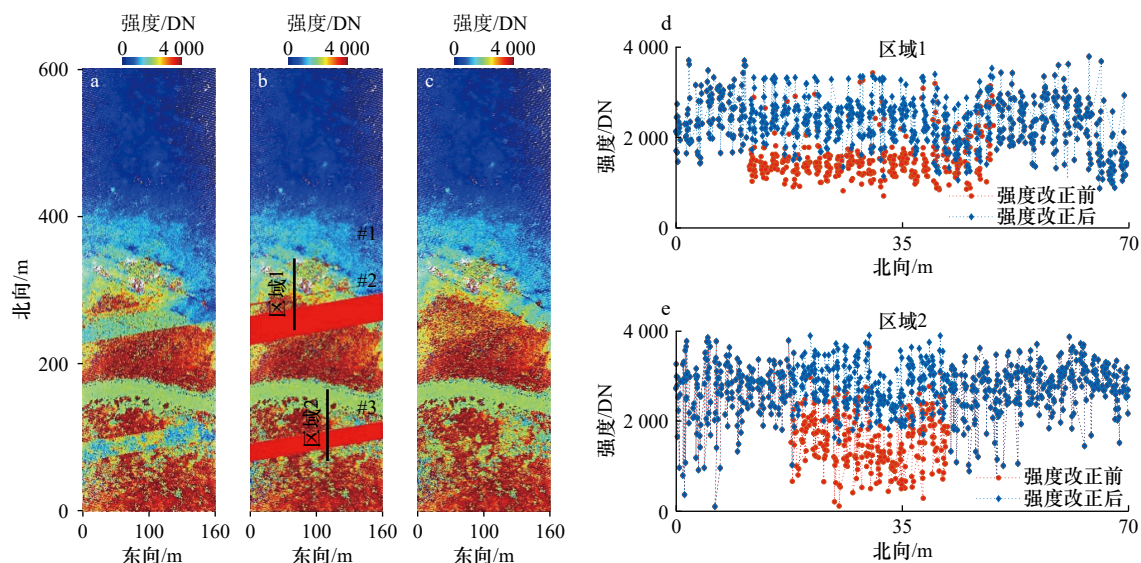


图 6 强度改正前后对比

Fig. 6 Comparison before and after intensity correction

a. 改正前强度图像; b. AGC 补偿异常扫描线分布; c. 改正后强度图像; d. 区域 1 强度改正前后; e. 区域 2 强度改正前后  
a. Intensity image before correction; b. AGC compensation abnormal scan line distribution; c. intensity image after correction; d. Region 1 before and after intensity correction; e. Region 2 before and after intensity correction

AGC 补偿异常区强度数据具有保留强度细节的能力,但补偿过度/不足差异显著,表现出非标准化和非角度/强度依赖,因此通过单一的强度偏差进行改正并不能满足精度需求。

### 3.3 强度改正精度评估

整个强度数据预处理过程始终与入射角进行索引共享,基于入射角对预处理后的强度数据进行扫描线分割,沿着飞行方向对相邻扫描线间强度差异进行计算完成 AGC 补偿异常区识别,如图 6b 所示,在实验数据中存在 3 处补偿异常区(#1~#3),与目视解译结果一致。邻近扫描线参数  $s$  选择 3,均匀采样个数  $t$  设置为 20,邻域扇形圆心角  $\theta$  选择  $120^\circ$ ,半径尺寸为强度数据空间分辨率的 2.5 倍,分别对每块异常区采用基于双向移动的局部加权方法进行强度改正,结果如图 6c 所示。从视觉上看,改正后的强度图像地物强度过渡更加自然,为了定量评估强度改正效果,沿着飞行方向横跨补偿异常区域选取了两处区域(区域 1 和区域 2),其具体位置如图 6b 所示。强度改正前后强度分别对应图 6d 和图 6e,其中红色为改正前强度,蓝色为改正后强度,结果显示补偿异常区强度相较于邻域正常区略低,不同区域强度偏差不同,其中区域 2 强度偏差要普遍高于区域 1 强度偏差。为评价强度改正效果,在区域 1 和 2 中异常区域改正前后强度进行分析,异常改正区及邻近正常区域各选 30 个强度数据,以后者的均值为真值,计算了改正前

后的偏差均值 (Mean of Deviation, MD), 平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 结果如表 2 所示。

表 2 强度改正前后对比分析  
Table 2 Comparative analysis before and after intensity correction

		区域1	区域2
改正前	MD	922.55	1 106.48
	MAPE	0.40	0.38
	RMSE	981.37	1 238.85
改正后	MD	21.51	32.05
	MAPE	0.12	0.13
	RMSE	380.69	452.87

对比实验证明基于双向移动的局部加权强度改正方法能有效改正 AGC 补偿异常造成的强度, 改正后强度要显著优于改正前, 改正后强度数据与邻域强度偏差能有效控制在 26 DN 以内, MAPE 降低了约 0.27, RMSE 下降了约 693。改正后的强度在与邻域强度保持过渡自然的同时很好地保留了地物强度变化细节, 充分验证了所提方法的有效性, 可为后续强度数据特征挖掘和应用提供数据保障和技术支持。

## 4 结论

AGC 根据 GV 的变化改变强度值使得同一类型

目标内的强度不同, AGC 一旦开启, 这些内部过程通常自适应进行, 这导致强度补偿值无法追踪, 呈现非标准化且无显著传感器依赖。本文针对 AGC 中程序设计弊端造成的高/低反射率目标边界探测困难, GV 调节延迟造成的补偿改正异常现象构建了一种兼顾强度数据预处理、AGC 补偿异常区识别和改正的完善强度改正方法, 建立索引共享机制, 基于地形数据和入射角参数辅助实现无效干扰强度的精确剔除和扫描线分割, 以扫描线为判别单位, 通过对邻域扫描线开展 K-S test 对补偿异常区进行精确识别, 这种方式避免了传统逐点判断带来的繁重计算问题和强度噪声带来的干扰, 且更符合 AGC 补偿异常产生存在时间连续性的特点, 最终针对强度数据特点构建了基于双向移动的局部加权强度改正方法, 双向移动模型能够削弱改正不足积累造成的强度改正效果下降, 局部加权能在充分保留强度细节的同时削弱与邻域强度的偏差。实验证明该方法能有效 AGC 补偿异常造成的强度“突变”问题, 相较于改正前, 改正后的强度数据平均绝对百分比误差降低了约 0.27, 均方根误差下降了约 693, 异常区强度与邻域强度偏差控制在 26 DN 以内。

由于目前传感器制造商没有公开 AGC 工作机制, 针对 AGC 的影响还没有得到充分的研究和建模, 消除 AGC 影响的技术仍然存在问题, 因此在后续研究中会更多的关注 AGC 工作“黑匣子”揭示研究, 打破技术壁垒, 从根本上消除 AGC 效应, 完善 ALB 强度改正模型, 得到高精度目标属性参数。

## 参考文献:

- [1] Su Dianpeng, Yang Fanlin, Ma Yue, et al. Classification of coral reefs in the South China Sea by combining airborne LiDAR bathymetry bottom waveforms and bathymetric features[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(2): 815–828.
- [2] Narayanan R, Kim H B, Sohn G. Classification of SHOALS 3000 bathymetric LiDAR signals using decision tree and ensemble techniques[C]//2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2009.
- [3] 刘焱雄, 郭锴, 何秀凤, 等. 机载激光测深技术及其研究进展 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42(9): 1185–1194.  
Liu Yanxiong, Guo Kai, He Xiufeng, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1185–1194.
- [4] Ji Xue, Yang Bisheng, Tang Qiuhua, et al. A coarse-to-fine strip mosaicing model for airborne bathymetric LiDAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(10): 8129–8142.
- [5] Ji Xue, Yang Bisheng, Wang Yuan, et al. Full-waveform classification and segmentation-based signal detection of single-wavelength bathymetric LiDAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4208714.
- [6] Abdallah H, Baghdadi N, Bailly J S, et al. Wa-LiD: a new LiDAR simulator for waters[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 744–748.
- [7] Eren F, Pe'eri S, Rzhanov Y, et al. Bottom characterization by using airborne lidar bathymetry (ALB) waveform features obtained from bottom return residual analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 260–274.
- [8] Zavalas R, Ierodiaconou D, Ryan D, et al. Habitat classification of temperate marine macroalgal communities using bathymetric LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 2154–2175.

- [9] Long B F, Aucoin F, Montreuil S, et al. Airborne lidar bathymetry applied to coastal hydrodynamic processes[C]. Coastal Engineering Proceedings. 2011, 1(32): 1–12.
- [10] Ji Xue, Yang Bisheng, Tang Qiuhua, et al. Feature fusion-based registration of satellite images to airborne LiDAR bathymetry in island area[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 109: 102778.
- [11] Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(6): 415–433.
- [12] Oren M, Nayar S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 14(3): 227–251.
- [13] Yoon J S, Shin J I, Lee K S. Land cover characteristics of airborne LiDAR intensity data: a case study[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 801–805.
- [14] Richter K, Maas H G. Radiometric enhancement of full-waveform airborne laser scanner data for volumetric representation in environmental applications[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 183: 510–524.
- [15] Kashani A G, Olsen M J, Parrish C E, et al. A review of LIDAR radiometric processing: from *Ad Hoc* intensity correction to rigorous radiometric calibration[J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 28099–28128.
- [16] Lin Y C. Normalization of echo features derived from full-waveform airborne laser scanning data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 2731–2751.
- [17] Peeri S, Gardner J V, Ward L G, et al. The seafloor: a key factor in Lidar bottom detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 1150–1157.
- [18] Wang C K, Philpot W D. Using airborne bathymetric Lidar to detect bottom type variation in shallow waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 123–135.
- [19] Philips D M, Abbot R H, Penny M F. Remote sensing of sea water turbidity with an airborne laser system[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, 17(8): 1749.
- [20] Vain A, Yu Xiaowei, Kaasalainen S, et al. Correcting airborne laser scanning intensity data for automatic gain control effect[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 511–514.
- [21] Korpela I, Ørka H O, Hyypä J, et al. Range and AGC normalization in airborne discrete-return LiDAR intensity data for forest canopies[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(4): 369–379.
- [22] Korpela I S. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3891–3897.
- [23] 刘健, 陈亮, 王驹, 等. 二维 K-S 检验法在岩体统计均质区划分中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2374–2380.  
Liu Jian, Chen Liang, Wang Ju, et al. Application of 2D K-S tests to evaluating statistical homogeneity of rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2374–2380.

## Identification and correction of airborne laser bathymetry intensity data in AGC compensated abnormal zone

Ji Xue<sup>1,2,3</sup>, Dong Zhen<sup>2</sup>, Zhang Jingyu<sup>3</sup>, Wang Mingchang<sup>1</sup>, Li Yingying<sup>1</sup>

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Airborne Laser Bathymetry (ALB) as an established surveying procedure is certainly operated in blue-green region (532 nm) for penetrating the water column to collect depth. Alongside geometric information accepted widely, ALB typically record the radiometric properties (backscattering intensity) about sensed targets and assist with accurate strips registration, fine ground (sediment) cover classification, and advanced geometric modelling. However, due to the design limitations of Automatic Gain Control (AGC), there is a delay in gain value adjustment, particularly prominent in island and coastal areas with more high-return and low-return targets such as exposed rocks and water, which throws the issue of intensity compensation abnormality into stark relief. In response to this issue, a local weighted intensity correction method based on bidirectional movement is designed. Firstly, effective intensity is extracted by index sharing and elevation information. Then, the emission angles are used to divide the

scan line and serve as the judgment unit, and the Kolmogorov-Smirnov test is used to identify the abnormal area. Finally, intensity correction is performed by joint weighting of adjacent scan lines and neighborhood intensity, where the joint weighting can ensure the intensity details while eliminating the deviation from the neighborhood intensity. In addition, a unique bidirectional moving strategy is introduced to weaken the decline of strength correction accuracy caused by insufficient correction accumulation. Experiments have illustrated that this approach can effectively solve the AGC compensation anomaly problem, and compared to the pre-correction, the average absolute percentage error of the corrected intensity data decreased by about 0.27, the root mean square error decreased by about 693, and the intensity deviation of the abnormal area was controlled within 26 DN (Digital Number), thus obtaining a high-quality intensity image.

**Key words:** airborne laser bathymetry; automatic gain control; intensity correction; scan line