



武汉大学遥感信息工程学院

激光遥感

复习整理

胡奕公

目录

第1章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.2 应用现状	1
1.3 LiDAR技术特点	2
1.4 激光成像技术	2
1.4.1 激光	2
1.4.2 激光雷达与激光成像雷达	3
1.4.3 激光雷达的关键技术	5
1.5 激光遥感集成系统	7
1.6 国内常见LiDAR系统的扫描方式	8
1.7 机载激光三维测量系统对比	10
第2章 激光及激光雷达系统	11
2.1 激光	11
2.1.1 辐射与原子	11
2.1.2 受激辐射放大	12
2.1.3 激光的产生	13
2.2 激光器	13
2.2.1 气体激光器	15
2.2.2 固体激光器	16
2.2.3 半导体二极管激光器	17
2.3 激光雷达系统	18
2.3.1 激光雷达系统概述	18
2.3.2 光束整形	19
2.3.3 激光扫描	20
2.3.4 信号接收的探测技术	21
2.4 激光信号的大气衰减	23
2.4.1 大气衰减效应	23
2.4.2 大气折射效应	24
2.5 激光雷达系统能量方程	25

第3章 机载LiDAR数据获取基本原理	27
3.1 激光测距	28
3.1.1 测距方式	28
3.1.2 测距精度和信噪比	30
3.1.3 功率	32
3.1.4 体积	33
3.1.5 波长	33
3.2 全球定位系统技术	33
3.3 惯性测量系统技术	35
3.3.1 惯性导航系统	35
3.3.2 IMU与DGPS组合定位技术	36
3.4 高性能二维扫描技术	36
3.4.1 机载LiDAR系统四种典型的扫描方式	36
3.4.2 扫描线形状	36
3.5 LiDAR数据获取处理	38
3.5.1 离线时间同步方案	38
3.5.2 机载LiDAR系统对地定位方程	39
3.6 机载LiDAR数据获取新技术	39
第4章 机载LiDAR数据获取基本原理	41
4.1 数据获取重要参数	41
4.1.1 LiDAR数据获取重要参数的作用	41
4.1.2 参数类型	41
4.2 常用商业LiDAR系统	45
第5章 LiDAR工程数据获取	47
5.1 LiDAR数据获取流程	47
5.1.1 计划准备阶段	47
5.1.2 航飞实施阶段	52
5.1.3 数据整理阶段	52
5.2 LiDAR技术与同类技术对比	55
5.2.1 摄影测量与LiDAR的主要差异	55
5.2.2 LiDAR技术的优势	59
5.2.3 LiDAR与INSAR的比较	59
第6章 LiDAR数据处理	61
6.1 点云滤波	61
6.1.1 点云滤波概述	61
6.1.2 典型滤波方法	62
6.1.3 DEM生成	65
6.1.4 精度分析	66

6.2 强度数据处理	67
6.2.1 强度数据特点	67
6.2.2 强度数据校正	68
6.2.3 强度图像生成处理	68
6.2.4 应用案例	68
6.3 基于 LiDAR 数据的建筑物提取	68
6.3.1 建筑物检测（分割）	69
6.3.2 建筑物模型的生成（重建）	70
6.3.3 三维重建质量检查	74
6.4 基于 LiDAR 的道路提取	75
6.4.1 道路特征及道路提取	75
6.4.2 基于 LiDAR 点云的道路特征提取	76
6.5 分类、变化检测及波形处理	79
6.5.1 LiDAR 点云分类	79
6.5.2 变化检测	81
6.5.3 数码影像处理	83
6.6 波形处理技术	84
第 7 章 地面及星载激光遥感技术	89
7.1 地面激光扫描系统 (TLS)	89
7.1.1 地面激光扫描系统的工作原理	89
7.1.2 地面激光扫描系统分类	89
7.1.3 地面激光扫描系统的应用	90
7.1.4 案例：基于 TLS 技术的古建筑三维重建	91
7.2 星载 LiDAR 系统	91
第 8 章 LiDAR 数据误差分析及处理	93
8.1 LiDAR 数据误差源	93
8.1.1 量测误差	93
8.1.2 集成误差	94
8.2 误差的分析	96
8.2.1 误差的定性定量分析	96
8.2.2 误差整体分析	98
8.3 误差处理	98
8.3.1 LiDAR 误差检测及消除	98
8.3.2 LiDAR 工程实践中的误差分析及处理	102

第1章 绪论

1.1 基本概念

- 激光成像：Laser Imaging, LI.
- 激光遥感：Laser Remote Sensing, LRS.
- 激光雷达：Light Detection And Ranging, LiDAR.
- 机载激光地形测绘：Airborne Laser Terrain Mapping, ALTM.
- 机载激光制图：Airborne Laser Mapping, ALM.
- 机载激光扫描：Airborne Laser Scanning, ALS.
- 机载激光测高：Airborne laser altimetry, ALA.
- 激光测高：Laser Altimetry, LA.
- 机载激光扫描测高：Airborne Laser Scanning Altimetry, ALSA.
- 空载光达、空载雷射扫描：Light Detection And Ranging, LiDAR.

1.2 应用现状

1. 森林检测与管理。LiDAR 系统的最早商业应用领域之一。

传统技术：以前是借助空中摄影和地面测量进行的。这些方法不仅费时费力，而且只能分析样点，结果还是推断的。

激光雷达的优势：激光扫描法能克服这些缺点，通过激光扫描技术提取得完整的 3D 森林模型。在单个树木分析的基础上，可确定以下的参数：

- 单个树高
- 一片林区的平均树高
- 一片林区的木材体积
- 一片林区的平均密度
- 每片林区的平均生长体积

此外 LiDAR 得到的 DTM 还可以来规划和改善森林运输道路，以及进行倾斜度分析，以便测定危险。

2. 构建数字城市模型：在电信、无线通讯、法律实施和灾难管理等众多领域中都需要准确的数字城市模型（建筑物建模、城市规划、噪声模拟、无线网络规划）

3. 湿地、限制进入地区、危险区域

- 密集的植被覆盖和没有可通行的道路。
- 传统的地面摄像测量技术很难对沼泽、野生动物保护区及森林保护区进行勘测。

- 危险地带的地貌特征获取。
- 4. 油气管道勘测
- 5. 洪水灾情预测（洪水制图、灾害评估）获取流域的数字表面模型和数字高程模型。
- 6. 海岸线监测与制图
- 7. 水深、海岸线、侵蚀状况监测
- 8. 电力线监测
- 9. 考文物保护
- 10. 真正射影像的制作

1.3 LiDAR 技术特点

1. 无需光照条件或专门的太阳高度角。
2. 可在白天、夜晚或相当恶劣的条件下（大雾）作业，全天时全天候获取地面三维数据。
3. 能部分“穿透”植被，同时测量地面和非地面层。
4. 很少需要进入测量现场，不需要大量的地面控制点。
5. 能快速获取数据，24小时内可提取测区的 DEM 数据。
6. 精度较高。
7. 能够接受无穷次回波。
8. 可在地面反射率比较低的区域工作，例如反射率只有约 5% 的地面。
9. 集成 RS 和 GPS 技术，数据可直接作为 GIS 的数据源，有利于提高地理数据的自动化，加快处理速度。
10. 一个飞行日内可采集高达 200 GB 的数据。
11. 高速度、高性能、高精度、长距离的航空测量设备。
12. 全数字化，可直接产生三维坐标 (X, Y, Z)，无需其他额外步骤。
13. 数据密集。基于固定翼机载平台采集时，典型的激光光斑中心间距为 0.5 m 左右。
14. 精度：针对地物建模应用情形，典型精度达 15 cm。
15. 机载平台：便于操作，易于快速获取地表数据。
16. 宽视场角：最大可以达到 75° 的视场角。如果部分视场角范围没有被用到，可以用于飞机倾角稳定补偿。

1.4 激光成像技术

1.4.1 激光

地位 激光是 20 世纪以来，继原子能、计算机、半导体之后，人类的又一重大发明，被称为“最快的刀”、“最准的尺”、“最亮的光”。

激光的亮度 约为太阳光的 100 亿倍。

激光的特点

- 单色性、方向性、相干性
- 具有很高的单光子辐射能量

- 在大气传输中很少发生绕射

激光设备 1960 年发明红宝石激光器，主要在军事上得到了应用。

- 激光测距仪：美国 1969 年测地月距离。
- 激光致盲器：1982 年英阿马岛战争投入实战。
- 激光制导器：1991 年海湾战争，精度高、抗干扰能力强。
- 激光告警设备、激光干扰设备等电子战装备。

激光的应用

- 自然科学
- 加工领域
- 信息处理
- 激光通信
- 医学领域
- 测绘领域
- 环境检测：弥补了微波在绕射和不能探测目标生化特性的不足，有了更加广泛的应用范围。
 - 大气成分探测（气溶胶探测）
 - 污染探测大气和海洋基本参数，如：海水深度、温度等探测。
 - 绿色植物探测

微波雷达的局限性

- 其波长较长，相应能量子的能量很小。
- 一般不足以与目标发生生化作用，无法探测目标的生化特性。
- 在传播过程中，遇到尺寸小于波长的物体时，更易于发生衍射。

1.4.2 激光雷达与激光成像雷达

激光雷达的光源类型

- 可见光波段 He-Ne 和 Ar 激光器
- 短波红外波段 Nd:YAG 激光器。最成熟的激光器。
- 长红外波段的 CO₂ 激光器。正在研制的大多是 CO₂ 激光器，体积大，价格比较高。
- 二极管泵浦固体激光雷达 (DPL)，20 世纪 80 年代后期。是发展重点。

DPL 的优点：

- 无需制冷
- 不像红外热成像系统容易受环境影响
- 对人眼安全，大气消光比低
- 可采用光纤光路和集成光学技术
- 结构小型化，体积小，制作成本低
- 具有高稳频、高功率、高效率和高光束质量等优点
- 可距离成像和强度成像

DPL 与其他激光器的比较：

- 与 Nd:YAG 激光器相比：后者只能测距和测角，不能测速，成像困难，大气传输性较差。
- 与 CO₂ 激光器相比：相干性好，寿命长，可靠性强。

DPL的应用

- 军事的应用
- 大气测污、风场测量、环境监测

激光成像雷达的基本结构 如图1.1所示。

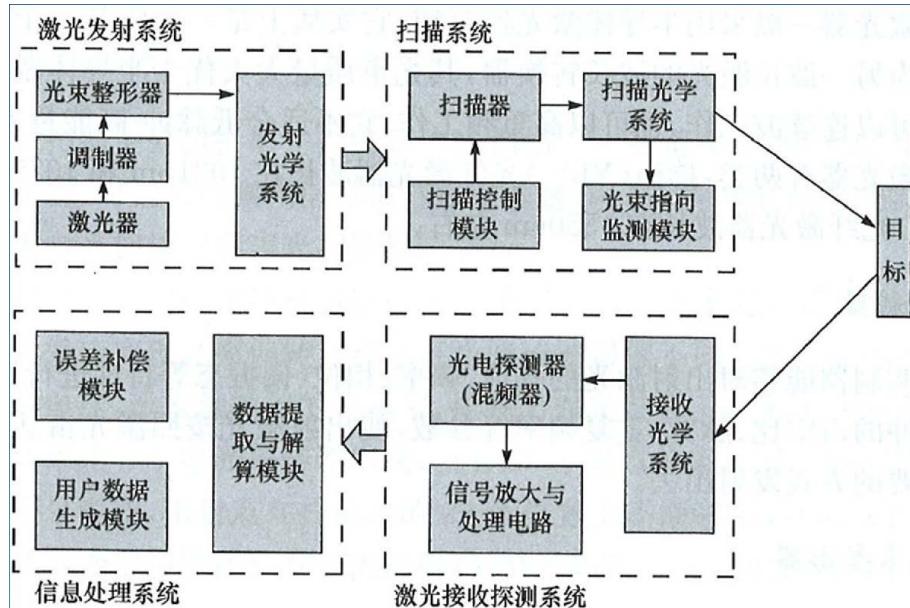


图 1.1 激光成像雷达的基本结构

激光成像雷达的发展

- 20世纪70年代，卫星激光测距（阿波罗登月计划）
- 1980至1988，机载LiDAR可行性研究。
- 1990年，斯图加特大学研制成功首个激光断面测量系统
- 1993年，德国出现首个商用LiDAR系统TopScan(ALTM 1020)
- 1995年，全球有5套商用LiDAR系统
- 1999年，全球约有30几套商用LiDAR系统
- 2001年，全球约有75个公司使用了60几套商用LiDAR系统
- 2002年，全球约有120个公司使用了75几套商用LiDAR系统，年平均增长率为7.1%，市场份额从5%增长到12%。
- 目前国内已引进20余套机载激光雷达系统。

激光雷达的新类型

1. 扫描激光雷达

- 扫描成像激光雷达在对地观测领域最为成熟的应用是机载LiDAR系统。
- 采用单元探测器，每次测量只获得一个像素的数据，通过平台运动和扫描实现一定探测范围的成像。
- 机载LiDAR系统一般采用脉冲激光体制，要求激光的重复频率高，脉冲宽度窄，单脉冲能量大。
- 由记录的距离数据形成的图像称为距离图像，由记录的回波强度数据形成的图像称为强度图像。

2. 凝视激光雷达（新型）

原理：凝视成像激光雷达需要控制发射激光，使发射光覆盖整个成像区域，然后通过面阵探测器接收回波，通过飞行时间测量或调制解调手段实现并行测距，得到目标三维图像。

优点：凝视成像激光雷达实现了“瞬时”成像，具有结构简单、成像速率高、像素分辨率高等诸多优点，有着广阔的应用前景。

3. 合成孔径激光雷达（新型）

原理：原理与微波合成孔径雷达类似，不同的是辐射源采用了激光波段。在距离向上发射大时宽带宽信号，对回波信号进行脉冲压缩得到距离向高分辨率；方位向上利用雷达平台与目标之间的相对运动，记录平台不同位置的目标回波信号，经相关的数据处理在空间上合成一个虚拟的大孔径，实现方位向聚焦，获得方位向的高分辨率。

优点：合成孔径激光雷达是一种新型的主动式激光成像雷达，它综合了传统的微波合成孔径雷达和激光雷达的优势。突破实孔径的衍射极限，当观测距离达到数百公里甚至更远时，它是唯一能够在有限的光学孔径条件下获得厘米级分辨率的光学成像手段。

1.4.3 激光雷达的关键技术

下列四项技术中，前三项属于硬件技术，均已得到不同程度的解决；第四项技术属于软件技术，目前成为最关键的技术。

1. 激光发射器：高功率和高波束质量的辐射源

(a) 气体激光器

特点：

- 典型的气体激光器为CO₂
- 最早用于激光雷达的激光器之一
- 工作波长为 10.6 μm，处于大气窗口。
- 至今仍广泛用于激光雷达

优点：

- 大气传输性能好，效率高。
- CO₂ 激光雷达易于实现高灵敏度外差探测和三维成像，信息处理技术成熟。

缺点：

- 尺寸比较大
- 需要低温制冷

(b) 固体激光器：应用非常广泛的 Nd:YAG 激光器

- 在典型情况下，脉宽 10-30 ns，单脉冲能量为 100 mJ-1 J，脉冲重复率为 10-100 Hz。
- 波长 1.06 μm 的基频辐射 YAG 激光器可用于研究大气散射。
- 波长 0.532 μm 的 2 倍频光可用于海洋勘探。
- 波长 0.355 μm 和 0.266 μm 的 3 倍频和 4 倍频光可用于测污

(c) 半导体二极管激光器，又称半导体激光器又称激光二极管。

是用半导体材料作为工作物质的激光器。常用工作物质有砷化镓(GaAs)、硫化镉(CdS)、磷化铟(InP)、硫化锌(ZnS)等。

激励方式有电注入、电子束激励和光泵浦三种形式。

特点：半导体二极管激光器是最实用最重要的一类激光器。它体积小、寿命长，并可采用简单的注入电流的方式来泵浦其工作电压和电流与集成电路兼容，因而可与之单片集成。

2. 成像探测器：高灵敏度接收技术。

成像探测器也称光电探测器（或混频器），是指将望远镜接收到的激光信号，直接转换成与之对应的电信号，或者将光信号与本振光混频，实现外差探测并将其转换成电信号。

目前激光雷达采用的主流探测器包括：光电倍增管 (PMT)、雪崩光电二极管 (APD)、PIN 光电二极管、增强型电荷耦合器件 (ICCD)。

激光雷达探测系统所采用的探测器一般有三种类型：

(a) 单元探测器：

- 每次只获得一个像素的数据。
- 激光器每次发出宽度很窄的脉冲（一般以纳秒计）。
- 回波强度反映了目标的反射率特性。
- 使用扫描器控制发射脉冲按一定方式扫描，将光束指向不同目标，或目标上的不同位置。
- 通过接收系统形成图像，距离数据形成的图像称为距离图像，回波强度数据形成的图像称为强度图像。
- 要求激光重复频率高，脉冲宽度窄，单脉冲能量大。
- 激光成像雷达的高成像速率和高分辨率常常不能同时得到满足，采用单元探测器时，这一矛盾更加突出，所以需要折中考虑。

(b) 面阵探测器：

- 需要控制发射激光，使发射光能覆盖较大面积的目标或同时照射许多不同的目标，然后接收回波信号。
- 需要对发射光进行调制，对接收信号进行解调，才能量测出距离。
- 不需要扫描器，但要求发射功率大。
- 无法采用高灵敏度的探测器。
- 在希望成像像素数多，成像速率要求不高的情况下采用。即在成像速率要求不高，成像分辨率要求很高的情况下采取的一种办法。

(c) 阵列探测器：受限于器件技术以及信号处理技术水平，阵列探测器经历了单元模块阵列化、PIN 阵列探测、APD 阵列探测，及从线阵到面阵的发展阶段。

- 线阵探测：需要将发射光分为 N 束，同时照射目标上的 N 点，从这些点上反射回来的信号由 N 个探测元所接收，得到 N 个像素上的距离信息和强度信息；
- 通过扫描器扫描，获得二维信息，对扫描器的要求比较高；
- 可以实现高速高分辨率成像。
- 技术难度较大

3. 扫描系统：高性能二维扫描技术。用于激光成像雷达系统的扫描器目前可分为三种：力学、电学和二元光学扫描。

(a) 力学扫描器：由反射镜转动或摆动使光束偏转进行大角度范围扫描。结构如图1.2所示。

优点：采用转镜可以达到很高的扫描速度，两个转镜可组成二维扫描系统。

缺点：体积较大，笨重，耗电量大。

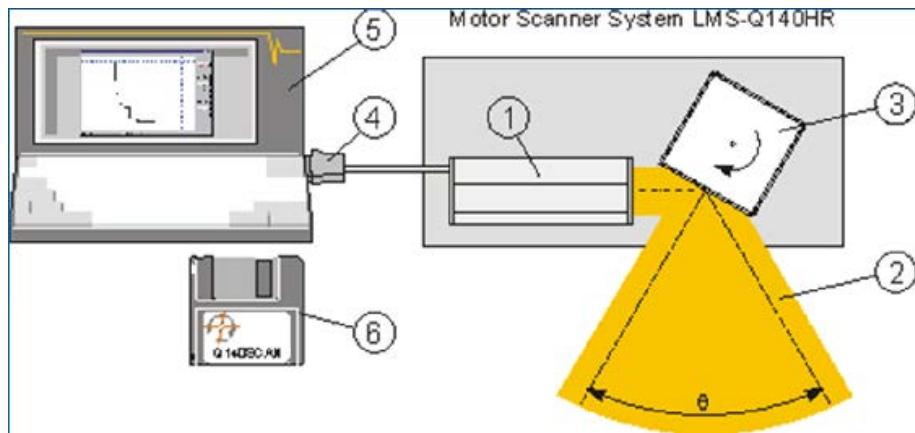


图 1.2 力学扫描器结构

(b) 声光扫描器：

优点：不包含机械运动，扫描速度快。

缺点：

- 扫描角度小，一般为几十分之一毫弧度。
- 光透过率低，光束质量差。
- 耗电量大，光学系统必须作冷却处理。

(c) 二元光学扫描器：利用二元光学技术制造，通过两组透镜的相对移动实现光束方向的偏转。

原理：利用二元光学技术制造出来的微透镜阵列扫描器由间距只有几微米的微透镜阵列组成，分为两组：一组是正透镜，一组是负透镜。准直光经过透镜时会聚光，然后通过负透镜时又变为准直光。正透镜阵列和负透镜阵列之间产生相对移动时，准直光的方向就会发生变化。两个微透镜阵列在水平方向相对移动时，输出光束在水平方向就会发生偏转。透镜之间微小的相对移动可以产生几度的光束偏转。

优点：

- 扫描速度可以达到 1KHz 以上。
- 易于将一束光分为多束光。
- 扫描方式可通过编程任意加以改变。
- 体积小，重量小。

缺点：

- 但扫描角度较小，透过率较低。
- 尚未实用。

4. 数据处理技术：图像处理及目标识别算法

1.5 激光遥感集成系统

激光成像雷达的不足 虽然，激光成像雷达可以获取目标高精度的三维信息（包含高程信息和强度信息），但

- 集成 GPS/INS 方可获取地标目标的绝对位置。
- 光谱、纹理信息缺乏，不利于地物识别。

激光遥感集成系统 随着数码相机等硬件技术的发展，将数码相机、GPS/INS 与激光雷达集成，提高激光雷达的数据获取能力，已成为当前激光雷达系统获取数据的主要方式。（图1.3）



图 1.3 激光成像集成系统

激光遥感观测系统 由以下部分组成

- 飞机
- 激光扫描仪
- 航摄相机
- 导航控制系统
- 高精度位置姿态测量系统 (IMU/DGPS)
- IMU 与相机连接架
- 机载 DGPS 天线
- 地面 DGPS 基站接收机

激光遥感集成系统的发展

1. 美国航空航天局 (NASA) 最早支持开发激光成像三维测量的机载集成系统。
2. 加拿大、瑞典、德国以及中国也相继开发出这类机载集成系统，可用于陆地和浅海水下地形测量。

1.6 国内常见 LiDAR 系统的扫描方式

摆镜扫描 Leica、Optech 采用的扫描方式。如图1.4所示。

旋转棱镜扫描 Toposys Harrier、Riegl、IGS 采用。如图1.5所示。

光线扫描方式 Toposys Falcon 系列。如图1.6所示。

圆锥镜扫描方式 opEye MK 系列、国产三维激光成像仪采用。如图1.7所示。

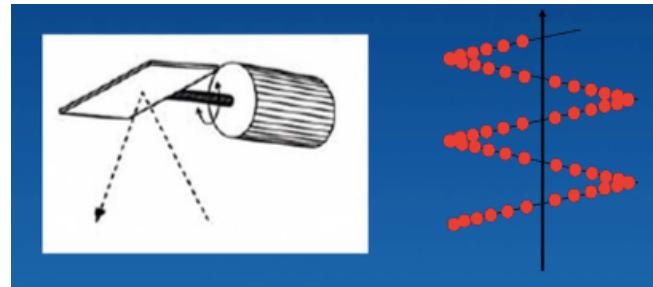


图 1.4 摆镜扫描方式图示

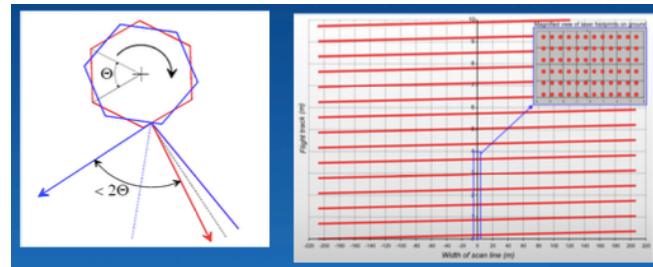


图 1.5 旋转棱镜扫描方式

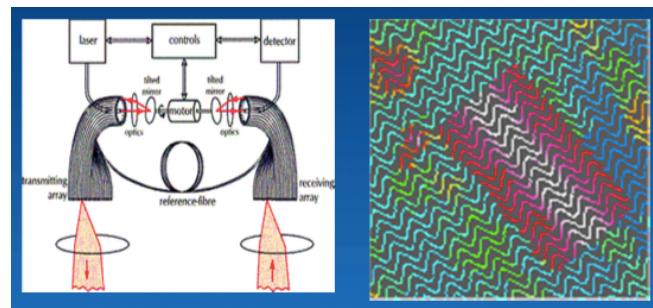
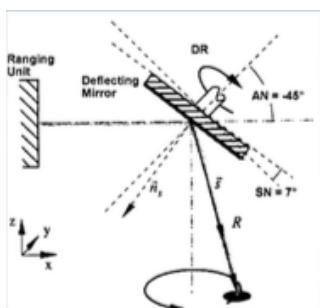
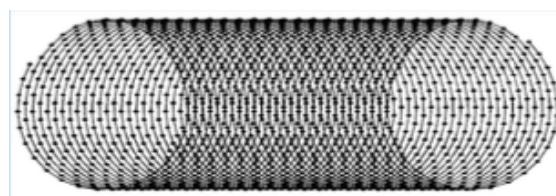


图 1.6 光纤扫描方式



(a) 圆锥镜扫描原理



(b) 圆锥镜扫描脚点

图 1.7 圆锥镜扫描方式

1.7 机载激光三维测量系统对比

如图1.8。

机载激光三维测量系统对比

系统名称	飞行高度 (m)	视场	激光波长 (μm)	激光频率 (Hz)	平台	有无图像	系统类型
美国 AIMS	300	35°	1.064	4000	螺旋桨飞机	无	生成 DEM 的系统
美国 FLI-MAP	12~300	53°		5000	直升机	有(彩色摄像机, UTC 时间来标记, 事后再与摄像数据联系)	测绘系统
加拿大 SHOALS	200~800	40°	0.905	2000	直升机或螺旋桨飞机	有(成像光谱仪, 用 GPS 时间记录同步, 事后再与成像光谱仪数据联系)	测绘 + 遥感系统 (海洋测深)
加拿大 ALTM1020	330~1000	35°	1.047	5000	直升机或螺旋桨飞机	无	生成 DEM 的系统
瑞典 TopEye	500	20°	1.064	7000	直升机	有(摄像机)	测绘系统
德国 TopoSys	<1000	28°	1.540	3000	直升机或螺旋桨飞机	无	生成 DEM 的系统
中国 ALIMS	600(实用化时 500~2000)	45°	1.047	1000	运五飞机	有(单波段扫描仪与激光测距硬件上为组合装置, 不用事后匹配)	遥感 + 测绘系统

图 1.8 机载激光三维测量系统对比

第 2 章 激光及激光雷达系统

2.1 激光

激光 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Laser), 即“光的手机辐射放大”。

2.1.1 辐射与原子

辐射与原子的相互作用的三种过程

1. 自发辐射跃迁：较高能级的粒子，自发地发射一个光子，跃迁到较低能级。其过程如图2.1所示。

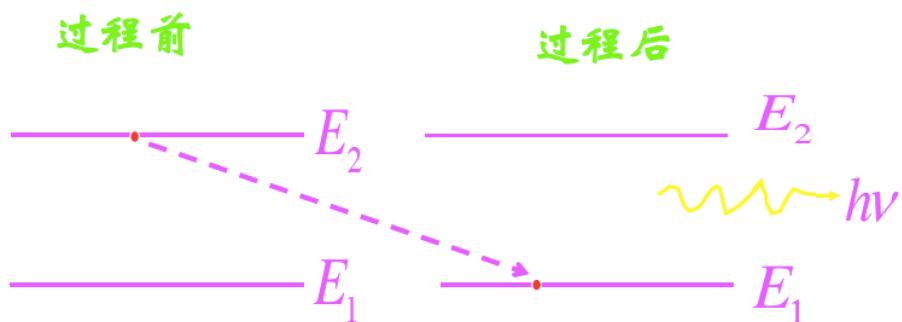


图 2.1 自发辐射跃迁

光子的频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.1)$$

其中， h 是普朗克常量， $h = 6.624 \times 10^{-34}$ μm。

自发辐射的速率为

$$A_{21} = \frac{dn_{21}}{dt} \frac{1}{n_2} \quad (2.2)$$

自发辐射速率的倒数表示由自发辐射所决定的有限寿命

$$\tau = \frac{1}{A_{21}} \quad (2.3)$$

具有两个能级的原子系统在外来辐射的作用下可能产生两种过程：

- 处于低能级 E_1 的原子在外来辐射作用下，吸收一个光子后向高能级 E_2 跃迁（受激吸收过程）；
- 处于高能级 E_2 的原子在外来辐射作用下，发射一个与入射光子属于同一光子态的光子，并向低能 E_1 级跃迁（受激辐射过程）；

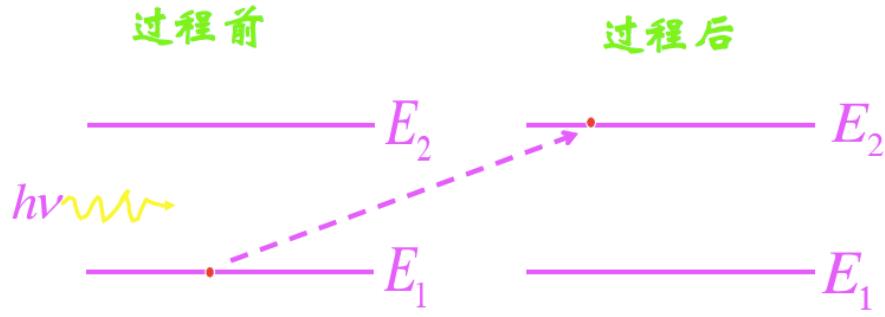


图 2.2 受激吸收跃迁

2. 受激吸收跃迁：较低能级的粒子吸收一个光子，跃迁到较高能级。其过程如图2.2所示。
3. 受激辐射跃迁：较高能级的粒子在光子激励下跃到较低能级，并发射一个同频率光子。其过程如图2.3所示。

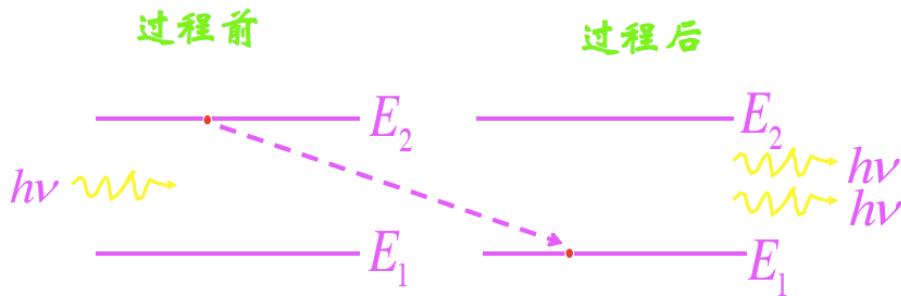


图 2.3 受激辐射跃迁

2.1.2 受激辐射放大

外来辐射场的作用 原子系统会产生受激吸收过程和受激辐射过程。

- 受激吸收过程：具有一定频率的光子消失的过程，表现为能量由外来辐射场向原子转移，导致辐射场的衰减。
- 受激辐射过程：是原子系统不断产生具有一定频率的光子，表现为能量由原子向辐射场的转移，使辐射场增强。

一般说来，这两种过程总是同时存在。

- 如果受激吸收过程占主导地位，最终结果则是辐射场衰减；
- 而如果受激辐射过程起主导作用，最终结果就是辐射场的增强。

辐射场增强的条件 在某一段时间 dt 内，由于受激辐射而从能级 E_1 向能级 E_2 跃迁的原子数为

$$dn_{12} = n_1 W dt \quad (2.4)$$

由于受激辐射作用而从能级 E_2 向能级 E_1 跃迁的原子数为

$$dn_{21} = n_2 W dt \quad (2.5)$$

这里假定 $W_{12} = W_{21} = W$ 。

在两种过程共同作用下，光子的净增量可以表示为

$$\Delta N = (n_2 W - n_1 W) dt = \delta n W dt \quad (2.6)$$

其中 $\Delta n = n_2 - n_1$ 。

入射光经过原子系统后得到增强的条件：处于能级 E_2 上的粒子数多于能级 E_1 上粒子数。

根据玻尔兹曼分布定律，处于热平衡状态时，有

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} < 1 \quad (2.7)$$

即，辐射光通过处于热平衡状态的原子系统时，是辐射场的衰减。

粒子反转分布状态：要使得辐射场得到增强，必须使原子系统的分布为 $n_2 > n_1$ 。以某种方式向原子系统提供能量，将足够多的粒子从能级 E_1 抽运到 E_2 。

2.1.3 激光的产生

工作物质 原子系统在获得能量后，处于粒子数反转分布状态，称之为激光工作物质。工作物质的特点：

- 工作物质自身某些原子的自发辐射产生的光子，在传播过程中会作为入射光引起其它原子受激跃迁。
- 工作物质处于粒子数反转分布状态，若受激辐射跃迁超过受激吸收跃迁，则光在传播中会得到激励和放大。
- 只要工作物质足够长，即使初始信号很小，也会被放大得很强。

激光产生的条件

- 工作物质处于粒子数反转分布状态。
- 受激辐射跃迁超过受激吸收跃迁。
- 传播中的光得到激励和放大。

激光产生的过程 在工作物质两端分别放置一块反射镜，构成一个光学谐振腔。工作物质由抽运系统被抽运到粒子数反转分布状态，因自发辐射而产生的向各个方向传播的光子，在光学谐振腔的作用下，沿着腔轴方向传播的光就会因两端的反射镜往返传播，并很快得到放大。那些传播方向与腔轴方向有一定夹角的光在几次往返后会逸出腔外。由于受激辐射占主导地位，沿腔轴往返传播的光由于受激辐射迅速放大，形成自激振荡，产生了激光。

受激辐射场与激励场具有相同的频率、相位、传播方向和偏振态，即受激辐射光子和激励光子属于同一光子态，所以激光束具有很好的方向性、单色性、相干性。

2.2 激光器

激光器 产生激光的装置称为激光器，激光器虽然多种多样，但其目的都是通过激励和受激辐射放大而获得激光。

激光器的组成

- 工作物质
- 抽运系统
- 光学谐振腔

激光器的分类

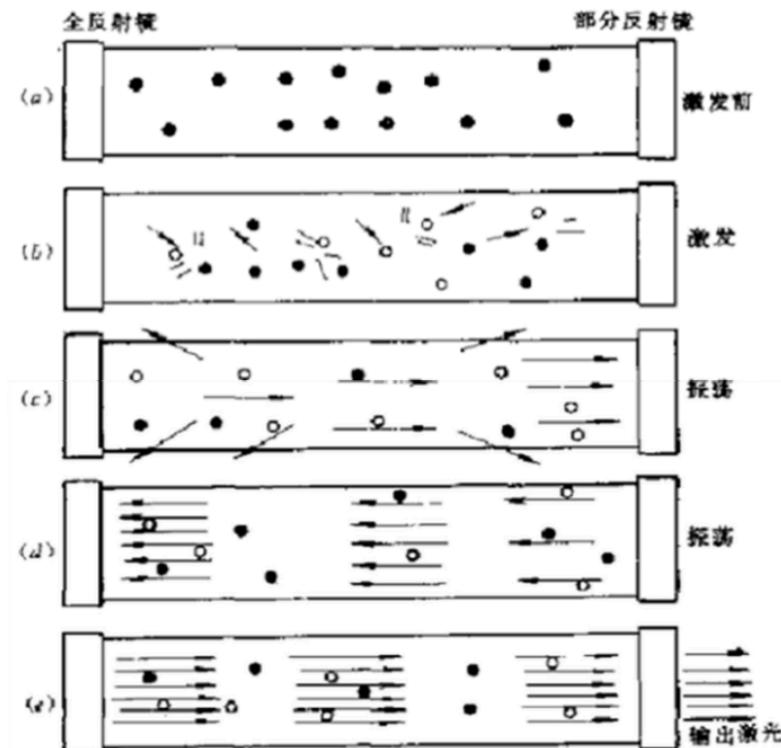


图 2.4 激光产生过程

- 按照工作物质分类
 - 固体激光器
 - 气体激光器
 - 液体激光器
 - 半导体激光器
 - 自由电子激光器
- 按转运方式分类
 - 连续激光器
 - 单次脉冲激光器
 - 重复脉冲激光器
 - 锁模激光器
 - 单模和稳频激光器
 - 可调谐激光器
- 按激励方式分类
 - 光泵式激光器
 - 电激励式激光器
 - 化学激光器
 - 核泵浦激光器
- 按照输出波段范围分类
 - 远红外激光器
 - 中红外激光器
 - 近红外激光器
 - 可见激光器
 - 近紫外激光器
 - 真空紫外激光器
 - X射线激光器

激光的应用

- 自然科学
- 加工领域
- 信息处理
- 激光通信
- 医学领域
- 军事领域

未来激光器的发展

- 实用角度
- 波长角度
- 输出功率
- 新类型激光器

2.2.1 气体激光器

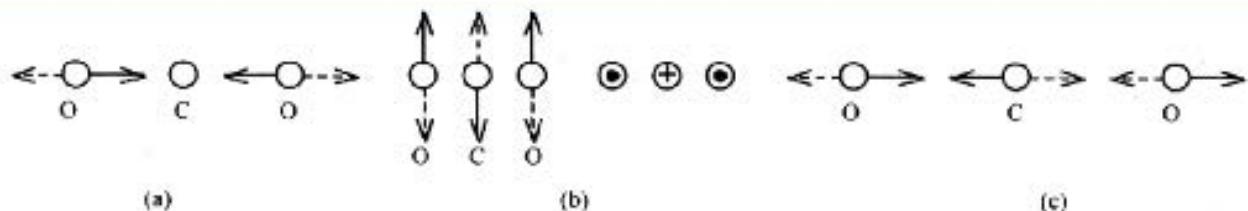
用于激光雷达的气体激光器 主要有：

- CO₂ 激光器
- BrHg 激光器
- N₂ 分子激光器
- 准分子激光器

工作波长从近紫外到红外；以强放电激励为基本能源。

CO₂ 激光器 CO₂ 激光器是最早用于激光雷达的激光器之一，工作波长工作波长为 10.6 μm，处于大气窗口。至今仍广泛用于激光雷达。

CO₂ 分子的震动方式 CO₂ 分子的 3 个原子呈对称排列，震动方式如图2.5所示。



CO₂ 分子中原子的 3 种振动方式
(a)对称振动;(b)弯曲振动;(c)反对称振动

图 2.5 CO₂ 分子的震动方式

CO₂ 激光器的优点

- CO₂ 激光器工作波长工作波长为 10.6 μm，对人眼安全。
- 具有优良的大气传输性能。
- 有较大的输出功率和能量转换效率。
- 易于进行外差探测。

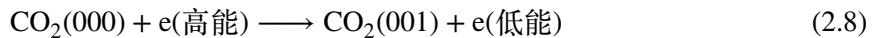
CO₂ 激光器的缺点

- 需要低温制冷。
- 目标对 10.6 μm 的激光反射率低，且CO₂ 激光易被水分子吸收。

CO₂ 激光器的跃迁机理

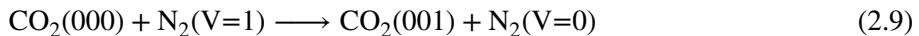
1. 由分子在基态电子能级的振动子能级间跃迁产生。在放电激励情况下，两种跃迁方式：
 - 基态电子能级中 (000) 振动子能级上的分子与激励电子碰撞，被直接激发到激光能级 (001)

上，即：



- 具有较高的振动子能级分子与其它处于 (000) 能级上的分子发生碰撞，跃迁到激光能级 (001)。两种可能的跃迁方式概率都不大。

2. 为了提高跃迁概率，在 CO_2 中掺入少量的 N_2 气体。基态电子能级中 $V=0$ 的振动子能级上的 N_2 分子，被激励电子碰撞后跃迁到 $V=1$ 的振动能级与 CO_2 的 (001) 能级接近，很容易将能量转移到处于 (000) 能级的 CO_2 分子，使它跃迁到 (001) 能级。即



优点： N_2 分子基态电子能级的 $V=1$ 子能级寿命相当长，可以积累大量 N_2 分子，使较多 CO_2 分子从 (000) 能级跃迁到 (001) 能级。

增加输出功率：

- 进一步加入氦气可以使激光输出功率几倍地增大。
- 加进适量氙气 (Xe)，也能使其增加输出功率。
- 加入适量的水蒸汽 (H_2O)，可使激光输出功率显著地增加。

延长激光器的寿命：在 CO_2 激光器里加入氢气 (H_2)、一氧化碳 (CO) 和氧气 (O_2) 将延长激光器的寿命。

2.2.2 固体激光器

常见的固体激光器 Nd:YAG 激光器、钛宝石激光器等。

固体激光器的特点

- 一般体积较小，与气体激光器相比更加可靠。
- 应用十分广泛。

Nd:YAG 激光器

- **化学组成：**是以钇铝石榴石晶体（化学式是 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{15}$ ，简称为 YAG）为基质，掺入约 1% 的激活离子 Nd^{3+} 就成为 Nd:YAG。
- **应用：**用于遥感的 Nd:YAG 激光器，在典型情况下脉宽 10~30 ns，单脉冲能量为 100 mJ~1 J，脉冲重复率为 10~100 Hz。
 - 波长 1.06 μm 的基频辐射 YAG 激光器可用于研究大气散射。
 - 波长 0.532 μm 的 2 倍频光可用于海洋勘探。
 - 波长 0.355 μm 和 0.266 μm 的 3 倍频和 4 倍频光可用于测污。

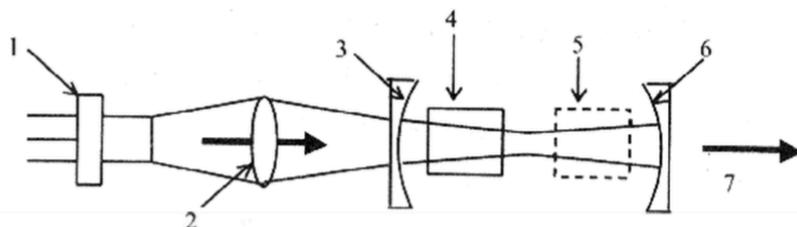
二极管泵浦 YAG 激光器 由于固体激光器在相干性、脉冲重频和输出功率等方面受到局限，遇到 CO_2 激光器的挑战。寻求新的泵浦方法即二极管泵浦 YAG 激光器。

- **优点：**泵浦效率高，输出功率高，寿命长。
- **缺点：**结构复杂，成本较高。

二极管泵浦 Nd:YAG 激光器的结构，如图2.6所示。

固体可调谐激光器

- **作用：**激光雷达探测对象的响应特性与激光波长密切相关，波长可调的激光器十分有用。



激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器

1. 激光二极管, $\lambda = 0.8\mu\text{m}$; 2. 泵浦耦合透镜; 3. 反射镜, 对 $1.06\mu\text{m}$ 高反, $0.8\mu\text{m}$ 高透;
4. Nd:YAG 激光晶体; 5. 非线性晶体(供选); 6. 输出耦合镜; 7. 输出激光

图 2.6 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器的结构

- 类型:

- 1979 年 Walling 等发明翠绿宝石激光器
 - * 早期有较高实用价值的固体可调谐激光器。
 - * 波长调谐范围是 $700 \sim 830 \text{ nm}$ 。
- 1982 年 Moulton 发明钛宝石激光器
 - * 一个重要的进展。
 - * 钛宝石激光晶体的基质是 Al_2O_3 , 其中少量的 Al^{3+} 被 Ti^{3+} 取代 (便于产生激光)。
 - * 钛宝石在 $400 \sim 600 \text{ nm}$ 范围内具有很宽的吸收带, 发射带为 $660 \sim 1160 \text{ nm}$, 波长调谐范围很宽。
 - * 虽然钛宝石具有较大的受激发射截面, 增益较高, 但激光能级的寿命只有 $3.2 \mu\text{s}$, 通常用其它激光器作抽运工作: 氩离子激光器、铜蒸气激光器、2 倍频 Nd:YAG 激光器。

2.2.3 半导体二极管激光器

半导体二极管激光器的特点

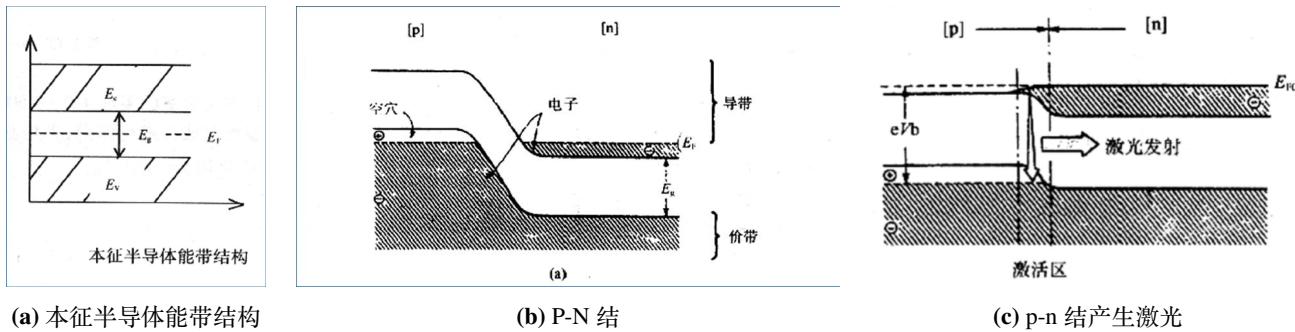
- 完全不同的物理机制。
- 半导体材料中的电子只能存在于两个能带之一, 每个能带所包含的能级数等于晶体中的原子数。根据 Pauli 不相容原理, 每个能级上只能有一个电子。
- 半导体材料多是晶体结构。当大量原子规则而紧密地结合成晶体时, 晶体中那些价电子都处在晶体能带¹上。本征半导体的能带结构如图 2.7a 所示。
- 电子不能再两个能带之间 (禁带) 驻留。
- 没有杂质的纯净半导体, 称为本征半导体。

半导体二极管激光器的工作原理

1. 如果在本征半导体中掺入杂质原子, 则在导带之下和价带之上形成了杂质能级, 分别称为施主能级和受主能级。有施主能级的半导体称为 n -型半导体; 有受主能级的半导体称为 p -型半导体。
2. 由于 p -半导体与 n -半导体所处能级不一致, 高低能级的载流子作扩散运动, 最终形成 $p-n$ 结, 此时处于热平衡状态, 具有统一的 Fermi 能级。该过程如图 2.7b 所示。

¹ 价电子所处的能带称价带 (对应较低能量)。与价带最近的高能带称导带, 能带之间的空域称为禁带

3. 若加偏压, 在结区形成窄区域, 导带(高能级)底部能级被电子占据, 价带(低能级)顶部被空穴占据; 当导带电子回到价带, 与空穴发生受激复合时就产生了激光。该过程如图2.7c所示。



2.3 激光雷达系统

2.3.1 激光雷达系统概述

激光雷达的产生 雷达工程师努力探索更短波长的辐射源, 在微波振荡器的基础上, 发明了激光器, 将其与雷达技术相结合, 产生了激光雷达技术。

激光雷达的特点

- 角分辨率较高
- 距离和速度分辨率高
- 抗干扰能力强
- 能够与一些目标发生生化作用
- 可以对极小的目标进行探测

激光雷达的要求 激光雷达要求具备发射高功率、窄脉宽、窄频带、较小远场发散角光束较高的脉冲频率的激光器。

激光雷达系统的分类

1. 按照使用目的分类

- 探测环境状态
 - 大气: 气溶胶分布、云、气象因素、污染物质……
 - 水体: 浮游生物、水温、海洋污染……
 - 陆地: 植物生长、热岛效应、污染状况……
- 量测距离
 - 太空: 星球间距离、星球地形……
 - 海洋: 水体深度、水下地形……
 - 陆地: 地形图、数字高程模型、植被提取……

2. 按激光和物质的相互作用分类

- 反射: 检测比激光波长大很多的物体。地形测绘。
- 米氏散射: 检测微粒直径与激光波长相等的物质。气溶胶。
- 瑞利散射: 检测微粒直径与激光波长小很多的物质。空气分子。

- **拉曼散射**: 具有震动和旋转能力的分子。空气分子、水蒸气、 SO_2 等污染物质。
- **荧光法**: 具有共振能级的分子和原子。 NO_2 等污染物质。

3. 按使用的激光器分类
4. 按脉冲方式或连续波方式分类
5. 按光波检测的方法分类
6. 按工作台分类
7. 按接收的信号¹分类

- 反射型激光雷达系统: 地形测绘。
- 散射型激光雷达系统: 探测大气中低浓度的尘埃
- 吸收性激光雷达系统: 估计某种成分的平均密度
- 激光荧光系统: 探测大气中的微量元素

双视场米氏散射激光雷达 武汉大学研制的双视场米氏散射激光雷达, 主要由激光发射系统、光学接收系统和信号检测系统组成。

激光雷达系统的结构

- 双稳系统: 发射部分和接收部分分开放置, 目的是为了提高空间分辨率。由于目前脉宽为 ns 级的激光已达到很高空间分辨率, 因此该系统已经很少被采用。双稳系统结构框图如图2.7所示。
- 单稳系统: 发射与接收信号共用一光学子系统, 由发送/接收 (T/R) 开关隔开。单稳系统结构框图如图2.8所示。

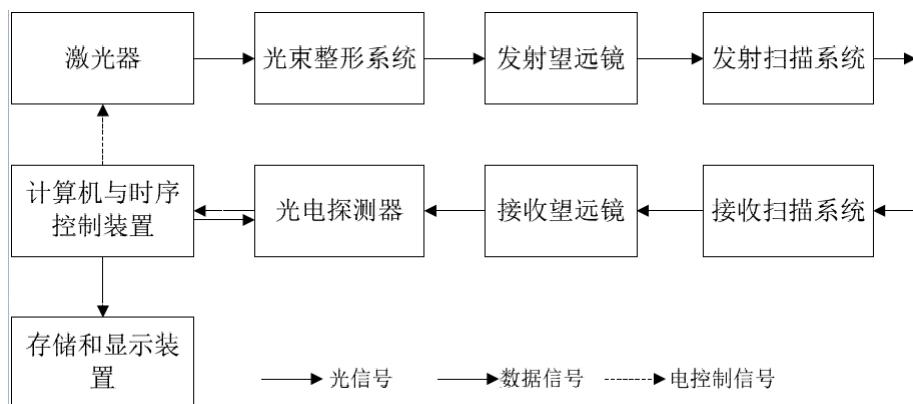


图 2.7 双稳系统的结构框图

2.3.2 光束整形

光束整形 通过整形器控制出射激光的指向、方位信息、光束排布状况、束宽等参数, 使其形成一定的排布规律, 便于检测与分析。

激光器中的光学谐振腔无论是什么形状, 其电磁场均具有一定的振荡频率和一定的空间分布, 被称为腔的模式, 用 TEM_{mn} 表示。其中, $m = n = 0$ 的模称为基模。基模场振幅均满足高斯分布, 这时激光

¹激光雷达接收的信号:

- 可能是反射信号
- 也可能是大气散射信号 (被称为弹性散射)
- 吸收衰减信号、共振散射信号、荧光信号等

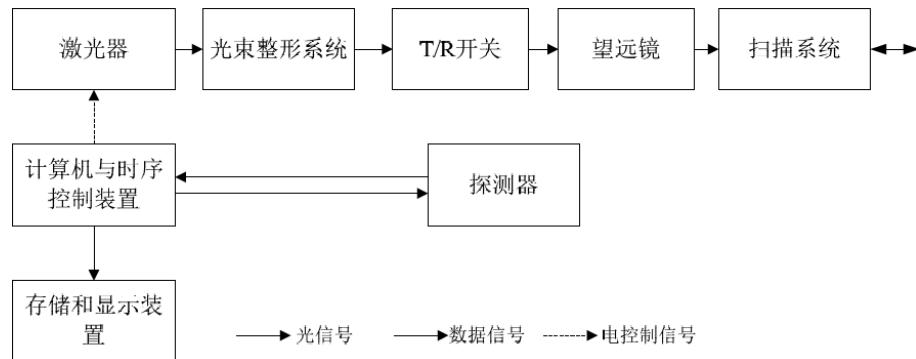


图 2.8 单稳系统的结构框图

光束称为基模高斯光束。很多情况下要求将基模高斯光束整形为柱状对称，具有平顶强度分布的光束。如图2.9所示。

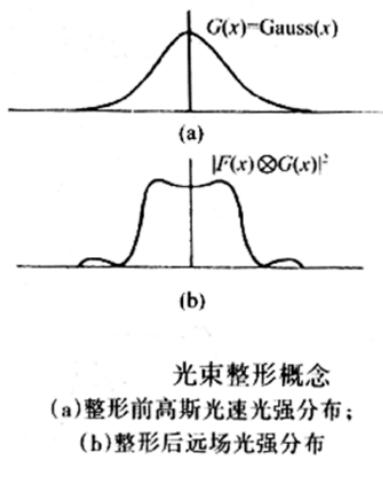


图 2.9 光束整形

光束整形的方法 衍射光栅是光束整形的方法之一。光束整形器的能量色散元件由透明二元衍射光栅构成。选择合适的光栅周期和刻线相位调制深度，就可以达到所要求的整形效果。

2.3.3 激光扫描

激光扫描 在光束整形之后，采用某种技术使激光束发生偏转，实现对某区域的目标进行扫描。

激光扫描技术的分类

- 高惯性扫描
 - 机械技术或反射镜棱镜技术
 - 主要靠反射镜或棱镜的旋转实现扫描
- 低惯性扫描
 - 电光棱镜的梯度扫描
 - 振动反射镜的非梯度扫描
 - 增益控制或损耗控制的内腔式扫描

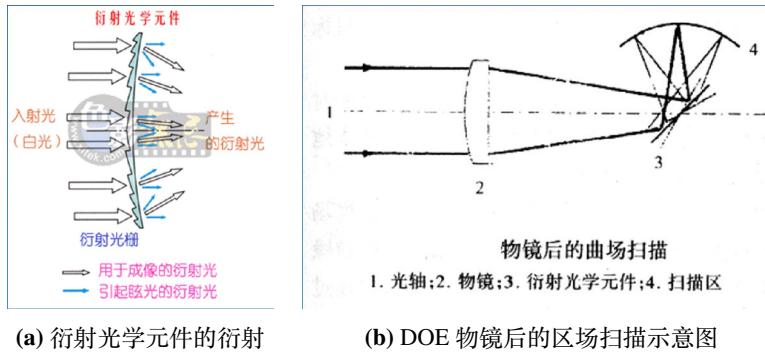


图 2.10 衍射光学元件

衍射光学元件 (DOE) 可替代旋转平面反射镜或棱镜，省去了机械转动部件，减少了折射元件数量，能对任意非球面误差进行校正。如图2.10所示。

2.3.4 信号接收的探测技术

直接探测 将接收到的激光能量聚焦到光敏元件上，产生与入射光功率成正比的电压或电流。与传统的光学接收系统原理基本上相同。

相干探测 探测器接收目标回波信号和某一参考波的相干混合波信号，按照参考波的辐射源及其特性的不同进行探测。分为外差探测，零拍探测和多频外差探测等。

1. 外差探测：一般外差探测激光雷达系统由一台连续工作的激光器作为独立辐射源发出参考波，称为本地振荡器。系统接收到的回波信号与来自本地振荡器的参考信号混合之后，由混频器输出的光束聚焦到探测器上然后再进行信号处理。原理如图2.11所示。

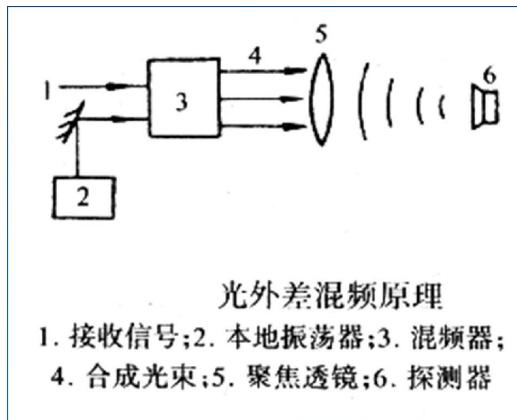
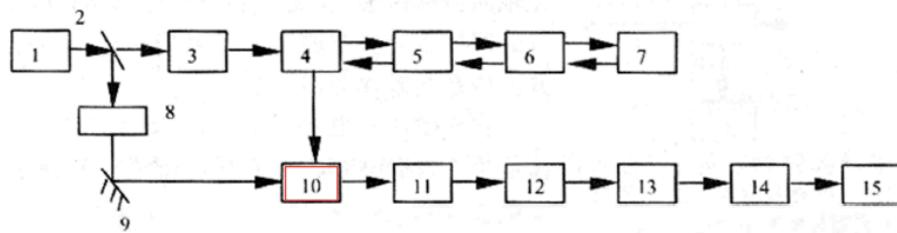


图 2.11 外差探测原理

2. 零拍探测：本地振荡信号是来自激光发射源的部分激光辐射，不需要另一个激光源。零拍激光雷达比普通外差激光雷达结构更简单，可靠性也更好。原理如图所示。
3. 多频外差探测：目标与激光雷达的相对运动产生接收信号的多普勒 (Doppler) 频移，可以提供有关目标的非常精确的信息；这要求外差探测接收器具有很宽的频带，以覆盖回波信号的频率和外差探测信号频率；但增加带宽会提高噪声水平，降低探测概率，解决这一问题的办法是采用三频外差系统。



零拍探测激光雷达原理框图(单稳)
 1. 发射激光器；2. 分束器；3. 光束整形器；4. 发射/接收隔离器；5. 扩束器；
 6. 光学扫描器；7. 目标；8. 半波带片；9. 反射镜；10. 光学混频器；11. 光学成像系统；
 12. 光敏探测器；13. 高通电子滤波器；14. 信号处理器；15. 数字处理器

图 2.12 零拍探测

三频外差探测：激光发射有两个独立辐射源，两束激光沿同一光轴向目标传播，经运动目标产生多普勒频移后返回接收器，两个反射信号与本地振荡器信号混频，成像在光敏探测器上。原理如图2.13所示。

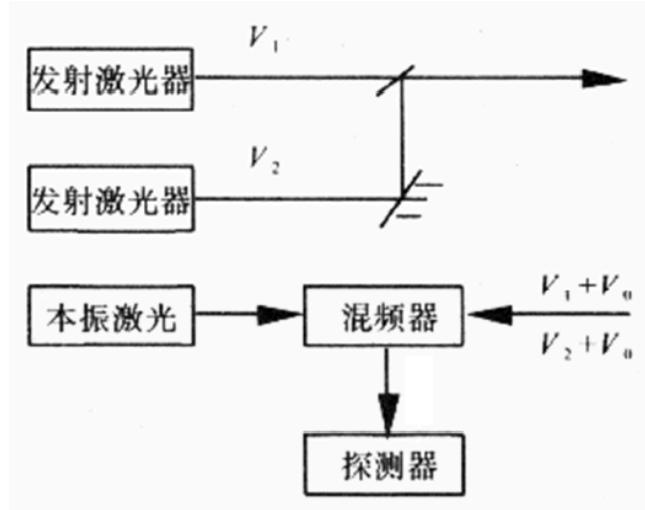


图 2.13 三频外差探测系统示意图

接收孔直径

- 在相干探测激光雷达中，系统的有效接收孔径受散斑现象¹的限制，不能任意扩大。
- 当接收孔径小于和等于散斑瓣的平均直径的情况下，接收功率是随接收孔的面积（孔径平方）线性增加；
- 在接收孔径增大，大于散斑瓣平均直径的情况下，接收功率不再服从与接收孔径面积线性相关的规律，而是与孔径线性相关；这种信号采集效率的下降是接收孔面积增大、反射信号相干性变差的结果；

当接收孔径大于散斑瓣的平均直径时，接收孔有效直径可以表示为

$$D = \sqrt{D_r d_s} \quad (2.10)$$

其中， D_r 表示接收器孔径实际大小， d_s 表示散斑瓣直径。

¹被激光照明的物体，其表面呈现颗粒状结构。

2.4 激光信号的大气衰减

激光的大气干扰 两次通过大气，不可避免受到干扰。由于激光光束波长较短，干扰主要有

- 大气对它的吸收和散射作用较强，因此大气穿透能力较差。
- 大气中雨滴、尘埃、雾、霾等对激光的干扰作用大。

激光大气干扰的表现

- **衰减**：气体分子和气溶胶粒子、尘埃、雾、雨等的吸收和散射。
- **折射**：由于大气密度分布不均匀，导致激光沿光路产生折射。
- **其他**：大气湍流，导致光束扩展和漂移；大气吸收，引起光束相位变化。

激光雷达的性能

- 激光雷达的性能是与激光在大气中的传播特性密切相关的。
- 激光的传播特性主要与大气吸收、散射和折射的效应有关。
- 要充分发挥激光雷达的效能，就应充分了解激光的大气传播特性，寻找避免或克服大气效应的措施，减少大气衰减，并根据对激光在大气中的传播的规律，仔细选择激光工作波长以及激光工作方式，保证激光光束具有较高的透过率。

2.4.1 大气衰减效应

布格埃—朗伯特定律 光束传播路径上大气均匀或分层均匀的情况下，目标处的光强可用布格埃—朗伯特定律描述：

$$I(\lambda, z) = I(\lambda, 0)e^{-\sigma(\lambda)z} \quad (2.11)$$

式中， z 为传播距离， $I(\lambda, 0)$ 、 $I(\lambda, z)$ 分别是波长为 λ 的激光光束的初始光强和在距光源 z 处的光强， $\sigma(\lambda)$ 是与波长有关的衰减系数。

大气透过率 当激光束没有出现非线性效应时，大气透过率可以表示为

$$\tau(\lambda) = \exp \left\{ - \int_0^L \sigma(\lambda) dr \right\} \quad (2.12)$$

其中 L 是传播距离。对于水平平均光程，透过率可以写成

$$\tau(\lambda) = \exp \{-\sigma(\lambda)L\} \quad (2.13)$$

总的衰减系数

$$\sigma(\lambda) = \sigma_m + K_m + \sigma_a + k_a \quad (2.14)$$

其中， σ_m 为分子散射系数， K_m 为分子吸收系数， σ_a 为气溶胶散射系数， k_a 为气溶胶吸收系数。

1. 大气分子吸收——吸收系数

(a) 线吸收：与单色光波长相应的大气分子的吸收。吸收系数：

- 高度在 20 km 以内，主要由碰撞压力展宽决定：

$$K_{ml} = \frac{S}{\pi} \frac{r_L}{(v - v_0)^2 + r_L^2} \quad (2.15)$$

式中， v 是激光的波数， v_0 是激光谱线中心的波数， S 为谱线的积分强度， r_L 为洛伦兹线半宽度， $\alpha_D = S \cdot r_D$ 。

- 高度 60 km 以上，主要由多普勒展宽决定：

$$K_{MD} = \frac{S}{\alpha_D} \left[\frac{\ln 2}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\ln 2(v-v_0)^2}{r_D^2}} \quad (2.16)$$

式中， r_D 是多普勒谱线半宽度， $\alpha_D = S \cdot r_D$ ，

$$r_d = \frac{v_0}{c} \left[\frac{2 \ln 2 k_B T}{M} \right]^{\frac{1}{2}} = 3.58 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{M} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

- 在 20~60 km 高度上，两种形式的吸收同时发生作用。

(b) 连续吸收：大气窗口内的大气分子。其吸收特点：

- 是随着光频率连续缓慢变化的分子吸收
- 在没有吸收线或只有很弱吸收的波长上，连续吸收成为主要因素

根据 Kneizys 得出的水汽连续吸收经验公式：

- 对 10.6 μm 的 CO₂ 激光，必须考虑水汽和 CO₂ 的连续吸收。
- 对 10.6 μm 的 YAG 激光，其连续吸收可以不加考虑。

在大气窗口内，水汽的连续吸收必须十分注意。

2. 大气分子的散射

- 瑞利散射——大气分子。在光的波长远远大于大气中粒子之时，大气散射表现为瑞利散射，散射系数的经验公式为

$$\sigma_m = 2.677 \times 10^{-17} P V^4 / T \quad (2.18)$$

其中， v 为波数。

- 米氏散射——雨滴、雾滴、霾等粒子。当大气微粒直径很大，与激光波长可比拟之时大气散射服从米氏散射规律，一般说来，米氏散射是气溶胶散射。气溶胶粒子的总衰减系数近似表示：

$$\sigma_T = \sigma_a \sigma_m = \frac{3.912}{V_M} \left[\frac{0.55}{\gamma_{um}} \right]^b \quad (2.19)$$

- V_M 是能见度，即人眼可以辨别目标的最大距离。

- b 与能见度相关，

* 在一般条件下， V_M 为 6~20 km， $b = 1.3$ 。

* 能见度特别好， $V_M > 20$ km 时， $b = 1.6$ 。

* 能见度小于 6 km 时， $b = 0.585$ 。

总体说来，大气分子和气溶胶的散射系数服从高度的负指数规律：随着高度的增加，散射系数很快减小。

- 在 5 km 以上——气溶胶散射系数与地面相比一般相差一个量级以上。
- 接近地面和低空中——气溶胶散射是主要的。
- 高空——分子散射与气溶胶散射的效果相当。

2.4.2 大气折射效应

大气折射效应 激光通过大气时因不同的折射率造成光程增加，传播路径弯曲。

折射率 大气密度随着高度不同而变化，在不同的高度上大气对光的折射率不相同。大气折射率 n 与激光波长 λ 、空气的温度 T 、湿度 e 、压强 P 有关

$$n = 1 + N(\lambda, T, P, e) \quad (2.20)$$

式中， N 为折射率模数，单位为 10^{-6} ，一般简化写成 $N = 0.79 \times P/T$

2.5 激光雷达系统能量方程

激光雷达方程 激光雷达能量探测的基本数学模型；激光雷达因与目标作用的机理不同，分为不同的类型，不同类型的激光雷达要用不同的激光雷达方程加以描述。

激光雷达方程的一般形式

$$P_r = \frac{\eta_o \rho T_a^2 A_r}{\pi R^2} \cdot \frac{A_i}{A_b} P_t \quad (2.21)$$

式中， P_r 是激光雷达接收到的激光功率； P_t 是光学系统效率； ρ 是目标表面反射率， T_a 是单程大气透过率， A_r 是光学系统有效接触面积， R 是目标与激光雷达的距离； A_i 是目标被照面积（截面积）； A_b 是目标处的光斑面积。式(2.21)适用于发射、接收位于同一处的激光雷达的各种应用情况。

单脉冲稳频激光雷达 探测器所测得的目标，距离探测器 R 到 $R+dR$ ，辐射源产生的波长间隔为 $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ 的微分信号功率为

$$dP(\lambda, R) = I(\lambda, R, r) p(\lambda, R, r) d\lambda dR dA(R, r) \quad (2.22)$$

探测器所接收到的总信号功率则表示为

$$P(\lambda, R) = \int_0^R dR \int_{\Delta\lambda} I(\lambda, R, r) p(\lambda, R, r) dA(R, r) \quad (2.23)$$

其中， $p(\lambda, R, r)$ 取决于

- 大气传输因子；
- 接收系统传输因子 $T_r(\lambda)$ ；
- 接收立体角 $\frac{A_0}{R^2}$ ；
- 接收视场与激光辐射照射面的重叠因子及在距离 R 到 $R + dR$ 内回波到达探测器的概率 $p(R)$ 。

第3章 机载LiDAR数据获取基本原理

机载LiDAR系统工作原理 如图3.1所示。

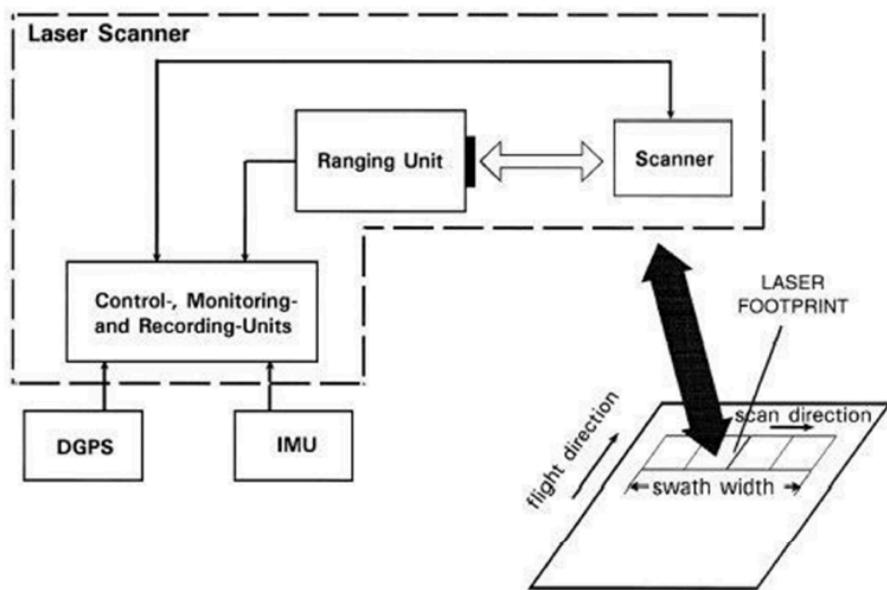


图3.1 机载LiDAR系统工作原理图

图中，

- 激光测距单元包括：激光发射器和接收机。
- 光学机械扫描装置：主动工作方式。
 - 激光发射器产生激光，由扫描装置控制激光束发射出去的方向
 - 扫描方向一般与飞机飞行方向垂直。
 - 扫描宽度由扫描视场 (FOV, field of view) 决定。
- 发射和接收激光束的光孔是同一光孔，孔径一般为8~15 cm，保证发射光路和接收光路是同一光路。
- 发射的激光束是一束很窄的光，发散度很小，形成的瞬时视场 (IFOV, instantaneons field of view) 是由一个很小的角度确定的，一般为0.3毫弧 (mrad) 到0.2毫弧，激光束形成的一个照射角，照射在一小块地面。
- 接收机接收被反射回来的激光束后由记录单元进行记录。

关键技术

- 激光测距技术
- 全球定位系统技术

- 惯性测量系统技术
- 高性能二维扫描技术

3.1 激光测距

机载LiDAR系统对测距仪的要求

- 精度高
- 功率高
- 体积小
- 波长合适

激光测距基本原理 测量激光往返目标所需要时间，然后通过光速 c (299792458 m/s)和大气折射系数计算出距离。如图3.2所示。

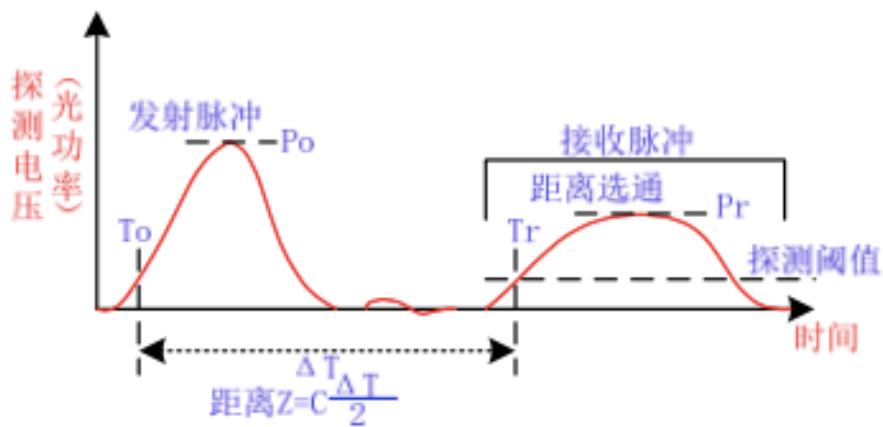


图3.2 激光测距基本原理

3.1.1 测距方式

脉冲测距

1. 测距原理：发射脉冲波，测量脉冲信号往返时间差，如图3.3所示。距离为

$$R = \frac{1}{2}ct_L \quad (3.1)$$

2. 测距分辨率：在光束方向能够区分的两个物体的最小距离。

$$\Delta R = \frac{1}{2}c\Delta t_L \quad (3.2)$$

实际上它是取决于 Δt ，即计时器精度。

3. 最大测量距离：采用激光器发射激光脉冲时要考虑，避免最远目标所反射的激光束还未返回就发射下一束激光。

需要考虑可能的最大量测距离与最远的目标有关。

$$R_{\max} = \frac{1}{2}ct_{L_{\max}} \quad (3.3)$$

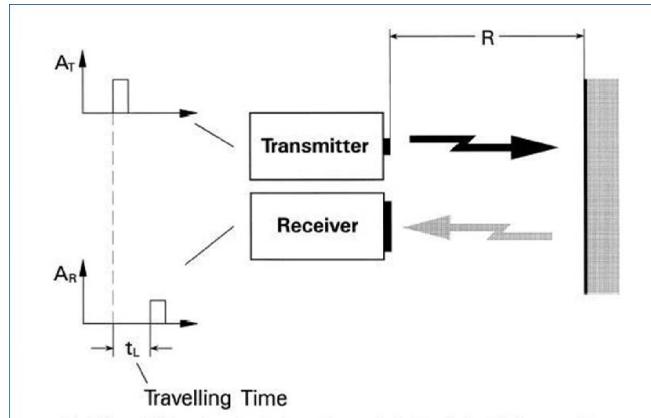


图 3.3 脉冲测距原理

脉冲发射频率是指一秒内能发射多少次激光束，决定了相邻的两束脉冲的时间间隔，由此决定了最大量测距离。

4. 脉冲激光测距仪的误差：对于脉冲激光，计时器主要依脉冲的特殊点进行记录。实际脉冲并非一个完全的矩形波，一般事先确定一个阈值，当信号电压到达这一阈值时，计时器即开始记录，由阈值触发器电路控制，结束记录时也是如此。

计时误差：如果所接收的激光幅值很低，电压值未调整到与发射时相同电压值，所记录时间就会过长！解决办法：

- 一般在记时器的前端安置一个放大器进行信号调整。
- 为避免因激光幅值变化造成计时错误，采用分数鉴别器，代替阈值鉴别器：按信号峰值的比例系数作为计时参照常量。

连续波相位差测距

1. 基本原理：发射连续波，测量往返连续波的相位差。基本原理如图3.4所示。

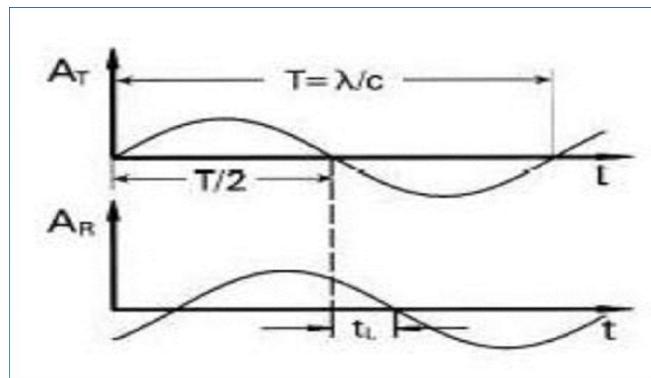


图 3.4 连续波相位差测距原理

若在时间 T 内的被接收的波与被发射波的相位差为 φ ，则从发射到被接收所用时间为

$$t_L = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot T \quad (3.4)$$

测量的距离为

$$R = \frac{1}{2}c \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \cdot T = \frac{\lambda}{4\pi}\varphi \quad (3.5)$$

2. 测距分辨率：相位测距中能够准确测量的是一个周期以内的相位差，测距分辨率为

$$\Delta R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \varphi \quad (3.6)$$

3. 整周模糊度：图中 t_L 与接收信号与发射信号的相位差成正比。 t_L 应表示为

$$t_L = \frac{\varphi}{2\pi} T + nT \quad (3.7)$$

式中， n 为激光从发射到接收所走过的距离中的整周数。由于激光波长以微米计，可见 n 为一个很大的数。由于实际量测的相位差只在之内，实际计算目标到激光器的距离必须计算出整周数 n 。

4. 多测尺频率：若用单一频率测距时是无法确定整周模糊度的值，即测距仪存在多值性问题，要解决这一问题，必须采用几个测尺频率测定同一距离。方法：

- 直接多测尺频率：适用于短距离；
- 间接多测尺频率：适用于中长距离；

5. 最大量测距离：由于相位差的最大量测值为 2π ，有

$$R_{\max} = \frac{1}{4\pi} \lambda \varphi = \frac{\lambda_{\text{long}}}{2} \quad (3.8)$$

- 最大不模糊距离：能够准确测量的最大距离，称为最大不模糊距离。
- 双频观测系统：在采用多频率系统时，由不同频率所对应的波长可兼顾较高的测距分辨率和较大的测量距离。很明显，由最短波长确定了较高的测距分辨率和精度，最长波长确定了最大不模糊距离。

结论

- 无论是脉冲激光还是连续波激光，在其它条件不变的情况下，最大测距与反射率的平方根和激光功率的平方根成正比。
- 要获得较好的测距效果
 - 气候条件：大气条件十分重要，干、冷和透明的大气条件下，效果最好；
 - 时间条件：夜间最好，最坏的情况是白天阳光强烈；
 - 波段选择：选择大气透过率高的波段；

3.1.2 测距精度和信噪比

测距精度和信噪比的关系 激光测距系统的测距精度与测距信号的信噪比的平方根成反比，信噪比愈高，测距精度也越高。

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (3.9)$$

信噪比

- 信噪比取决于很多因素，如：接收信号功率、信号带宽、背景辐射、探测器响应灵敏度、放大器噪声等。如图3.5所示。
- 信噪比简化

$$S/N = \frac{\text{光电二极管电流中的信号功率}}{\text{光电二极管和放大器中的热噪声}} \quad (3.10)$$

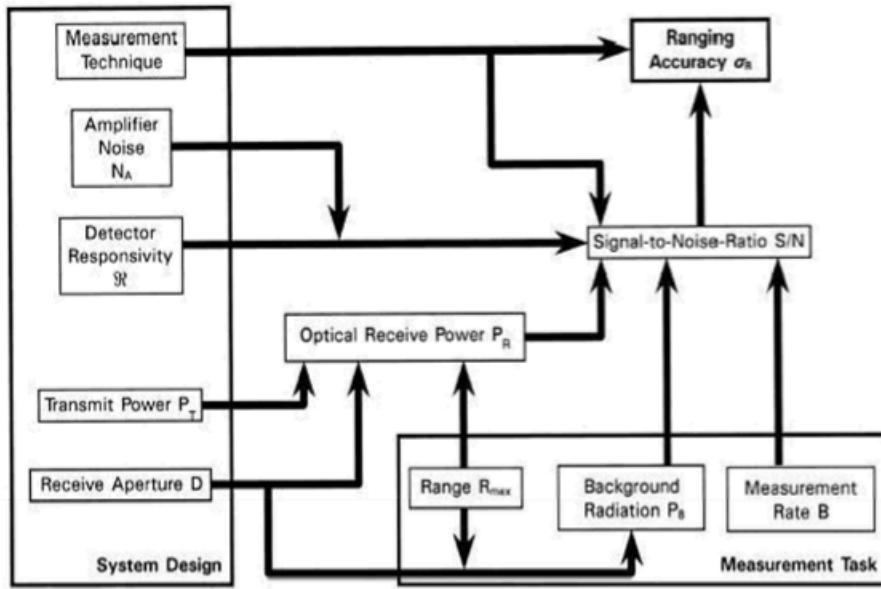


图 3.5 信号参量之间的关系以及对信噪比的影响

两种测距方式的精度 由于测距精度和信噪比成反比, 如果脉冲测距时噪声带宽为 B_{pulse} , 相位差测距时噪声带宽为 B_{cw} , 则下述关系式成立:

$$\sigma_{R_{\text{pulse}}} \sim \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \frac{\sqrt{B_{\text{pulse}}}}{P_{R_{\text{peak}}}} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{R_{\text{cw}}} \sim \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \frac{\sqrt{B_{\text{cw}}}}{P_{R_{\text{av}}}} \quad (3.12)$$

式中, $P_{R_{\text{peak}}}$ 表示脉冲接收功率峰值, $P_{R_{\text{av}}}$ 表示连续波接收功率平均值。

假定对同一目标进行量测, 可以用发射功率代替接收功率, 即以脉冲激光发射功率峰值 $P_{T_{\text{peak}}}$ 代替接收功率峰值 $P_{R_{\text{peak}}}$, 以连续波发射功率平均值 $P_{T_{\text{av}}}$ 代替接收功率平均值 $P_{R_{\text{av}}}$ 。于是有:

$$\frac{\sigma_{R_{\text{pulse}}}}{\sigma_{R_{\text{cw}}}} \sim 2\pi \frac{c}{\lambda} t_{\text{rise}} \frac{P_{T_{\text{av}}}}{P_{T_{\text{peak}}}} \sqrt{\frac{B_{\text{pulse}}}{B_{\text{cw}}}} \quad (3.13)$$

假定

$$t_{\text{rise}} \sim \frac{1}{B_{\text{pulse}}} \quad (3.14)$$

式(3.13)可以写为

$$\frac{\sigma_{R_{\text{pulse}}}}{\sigma_{R_{\text{cw}}}} \sim 2\pi f \sqrt{\frac{t_{\text{rise}}}{B_{\text{cw}}}} \frac{P_{T_{\text{av}}}}{P_{T_{\text{peak}}}} \quad (3.15)$$

现状 脉冲激光系统具有大功率、可远距离测距等特点, 目前市场上绝大多数为脉冲激光系统, 很少有半导体连续波激光系统。不过脉冲系统要达到很高的精度需要非常高的技术手段和复杂的处理方法。

测距误差 测距误差是指测距仪的显示结果与实际距离之差。

1. 测距误差来源: 噪声、脉冲宽度和幅度、电光系统的延迟以及时间测量单元中基准振荡频率的稳定性。
2. 脉冲激光测距仪的误差

- 系统误差: - 计数器误差 - 大气折射误差 - 光电延迟误差

- 随机误差: - 噪声误差 - 距离误差 - 漂移误差

3. 连续波激光测距仪测距误差

- 固定误差: - 数字测相误差 - 幅相误差 - 照准误差

- 比例误差: - 真空光速误差 - 大气折射率误差 - 测尺频率误差

4. 影响LiDAR测距精度的因素还有

- 激光功率
- 光束发散度
- 目标反射特性
- 探测器灵敏度
- 飞行高度
- 飞机姿态

3.1.3 功率

由于LiDAR系统是在空中对地面进行扫描的，它需要有很高的工作功率，这样才能使激光束的能量尽可能大，经过长距离的大气损耗和目标吸收等能量损失后，回到探测器时能够有足够的能量，使得探测器能够对光束进行记录。

峰值功率与平均功率 对于脉冲测距系统，激光能量为：

$$E_{\text{pulse}} = P_{T_{\text{peak}}} t_{\text{pulse}} \quad (3.16)$$

式中， t_{pulse} 为脉冲宽度， $P_{T_{\text{peak}}}$ 为发射功率峰值。

如果脉冲频率为 f_{pulse} ，则平均功率为

$$P_{T_{\text{av}}} = E_{\text{pulse}} f_{\text{pulse}} \quad (3.17)$$

联立求解，得

$$P_{T_{\text{peak}}} = \frac{E_{\text{pulse}}}{t_{\text{pulse}}} = \frac{P_{T_{\text{av}}}}{t_{\text{pulse}} f_{\text{pulse}}} \quad (3.18)$$

尽管平均功率不大，脉冲激光测距能够产生很高的峰值功率。

发射功率与接受功率

$$P_r = \rho \frac{M^2 A_r}{\pi R^2} P_T \quad (3.19)$$

式中， M 为大气透过率， ρ 为目标反射率， R 为目标到激光器的距离， A_r 为接收光孔截面积。

接受功率的特点：

- LiDAR系统接收的功率只是发射功率的很小部分，必须采用非常灵敏的探测器接收信号。
- 接收功率与距离平方成反比

- 激光束刚刚发射出来，由于空中的尘埃或其它的干扰，会有一部分信号返回接收光路，即使这个部分非常小，也会被灵敏的探测器认为是目标的回波。

- 为了避免这种情况，需要采取近距离消除技术 (close-range suppression techniques) 和其它方法。

3.1.4 体积

由于 LiDAR 系统安装在空中平台上，飞机的载重量和体积都是有限的，在有限的空间中需要装载 LiDAR 设备、操作人员等。因此，需要将 LiDAR 设备的体积和重量减小到最小，这也要求测距仪的体积和重量都很小。

3.1.5 波长

选择波长的依据

- 大气窗口
- 背景光的区别
- 目标反射率
- 探测器灵敏度
- 人眼安全

常见 LiDAR 系统的激光波长 如表3.1所示。

系统	激光波长
Leica ALS50II	790~820
	1050~1060
Optech 3100EA	1064
TopoSys FALCON II	1560
Riegl LMS-Q560	1500

表 3.1 常见 LiDAR 系统的激光波长

3.2 全球定位系统技术

全球定位系统 全球定位系统 (GPS, Global Position System) 是一种利用人造地球卫星进行点位测量导航的技术。全称是 NAVSTAR GPS(NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System)。

GPS 定位原理 利用测距交会确定点位。由于用户接收机使用的时钟与卫星星载时钟不可能总是同步，所以除了用户的三维坐标 (x, y, z) 外，还要引入一个关于卫星与接收机之间的时间差作为未知数 δT 。所以如果想知道接收机所处的位置，至少要能接收到 4 个卫星的信号。

GPS 的组成

- **空间部分：** GPS 卫星星座。如图3.6所示。
 - 由 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星组成。
 - 均匀分布在六个相互夹角为 60° 的轨道平面内。
 - GPS 卫星用 L 波段两种频率的无线电波 (1575.42 MHz 和 1227.6 MHz) 向用户发射导航定位信号，同时接收地面发送的导航电文以及调度命令。
- **地面控制部分：** 地面监控系统。包括位于美国科罗拉多的主控站以及分布全球的三个注入站和五个监测站组成，实现对 GPS 卫星运行的监控。主要任务是采集数据（对空中卫星进行连续观测），推算编制各卫星的星历、卫星钟差及大气层的修正参数等，并将这些数据发送到卫星上。

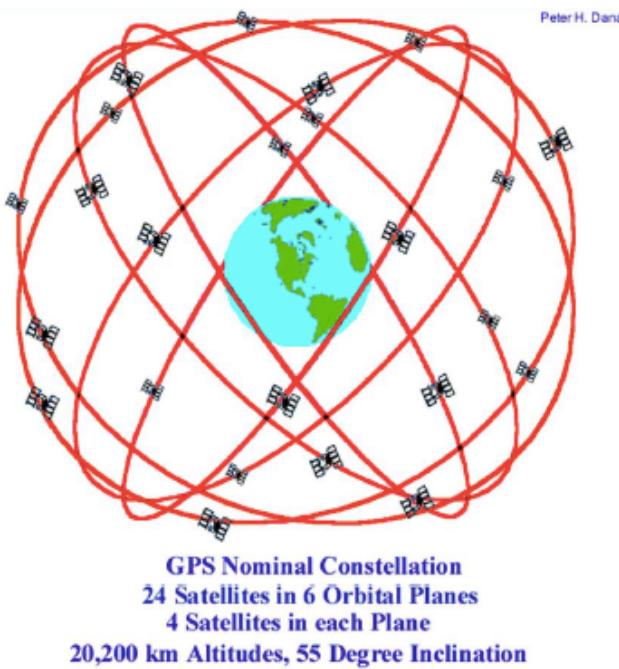


图 3.6 GPS 星座

- 用户设备部分：GPS 信号接收机。用来捕获 GPS 卫星发射的信号，并进行处理，根据信号到达接收机的时间，确定接收机到卫星的距离，并最终确定接收机的精确位置。

GPS 的优点

- 观测站之间无需通视
- 定位精度高
- 操作简便
- 全天候作业
- 实时定位速度快
- 抗干扰性能好，保密性强

GPS 定位分类

1. 按定位方式

- 单点定位（绝对定位）：采用一台接收机进行定位的模式。只能采用伪距观测量进行概略导航定位，定位精度较差。
- 差分定位（相对定位）：差分 GPS(Differential Global Position System, DGPS) 在用户接收机附近设置一个坐标已知的差分基准站，连续接收 GPS 导航信号，将测得的位置或距离数据与已知的位置、距离数据进行比较，确定误差，得出改正值，然后将改正数发播给覆盖区域内的用户，用以改正用户的定位结果。

2. 根据定位所采用的观测值 • 测距码伪距 GPS 定位 • 载波相位 GPS 定位
3. 根据获取定位结果的时间 • 实时 GPS 定位 • 非实时 GPS 定位
4. 根据定位时接收机的运动状态 • 动态 GPS 定位 • 静态 GPS 定位

GPS 精度影响因素

- 接收机公有的误差
- 传播延迟误差

- 接收机固有的误差

DGPS 技术可以完全消除第一部分误差，大部分消除第二部分误差（取决于基准站和流动站之间的距离）。

LiDAR 系统的 GPS 技术 LiDAR 系统要求很高的定位精度，采取的是载波相位差分 GPS 技术，又称为 RTK(Real Time Kinematic) 技术，建立在实时处理两个测站的载波相位观测值的基础上，它能实时提供观测点的三维坐标，可以达到厘米级的高精度。

由于涉及到测定遥感器投影中心的位置方位元素，在机载激光雷达系统中，GPS 动态定位的精度成为影响系统精度的主要因素。一般而言，LiDAR 系统上使用的载波相位差分 GPS 定位精度在 5 cm~10 cm。

LiDAR 系统中 GPS 的作用

- 确定成像时刻系统中心的地理坐标
- 提供相关数据给姿态测量装置，提高测定姿态角的测角精度
- 提供导航控制数据

3.3 惯性测量系统技术

3.3.1 惯性导航系统

基本原理 惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS)，利用陀螺和加速度计等惯性元件测量运行体在运动过程中的旋转角速度和加速度，计算得到运动体的相对位置、速度和姿态等导航参数。结构如图3.7所示。

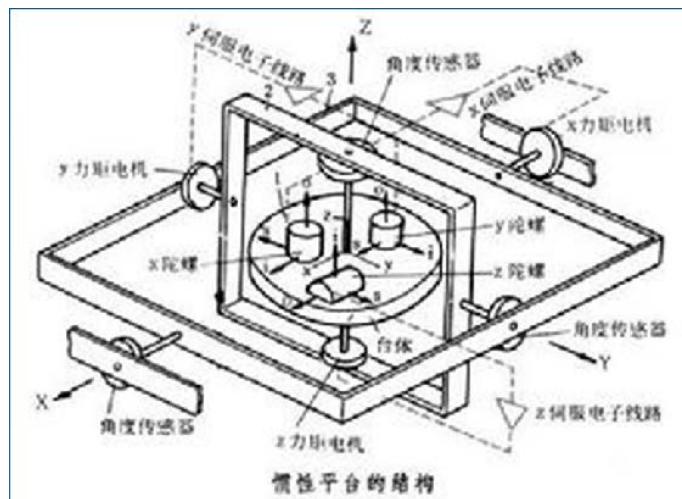


图 3.7 惯性导航系统结构

作用 可以用于定位、测速、输出姿态信息，以及测定重力异常和垂线偏差、相对大地水准面起伏等。

惯性测量单元 惯性导航系统中负责姿态测定的陀螺和加速度计等惯性元件总称为惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU)，它是 INS 的核心部件。IMU 通常由三个加速度计和三个陀螺、数字电路和 CPU 组成的。

3.3.2 IMU与DGPS组合定位技术

DGPS技术的特点

- 优点：使用方便、成本低廉，可量测传感器的位置和速率，高精度、误差不随时间积累。
- 缺点：动态性能差、数据输出频率低（易受到干扰而失锁），无法量测瞬间的快速变化，没有姿态量测功能等。

IMU技术的特点

- 优点：姿态量测功能，具有完全自主、无信号传播，既能定位、测速，又可快速量测传感器瞬间的移动，输出姿态信息。
- 缺点：位误差随着时间迅速积累增长，每次使用前初始对准时间长，不能长时间单独工作，必须不断加以校准。

POS系统 GPS技术+IMU技术

- 提高了定位精度
- 增强了系统可靠性
- 部分解决了采样频率低的问题

3.4 高性能二维扫描技术

3.4.1 机载LiDAR系统四种典型的扫描方式

1. 摆镜扫描：通过电机带动反射镜反复摆动一定的角度，实现激光束在地面的扫描。扫描原理和脚点形状如图3.8所示。

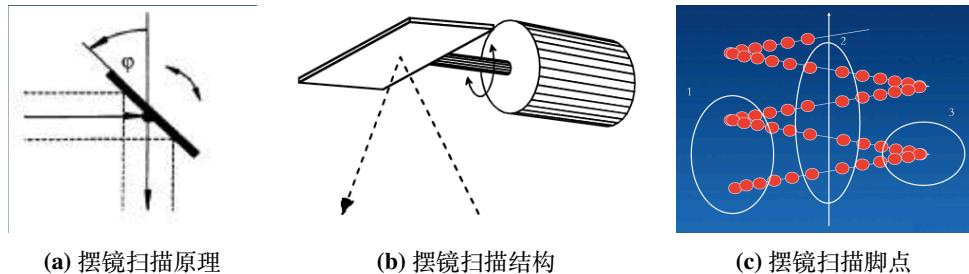


图 3.8 摆镜扫描

2. 旋转棱镜扫描：通过电机带动多面棱镜旋转，由于镜面的位置在不断变化，导致反射光束的方向在一定的范围内往复变化，从而实现激光束在地面的扫描。如图3.9所示。
3. 椭圆扫描：旋转一周后在地面形成椭圆扫线。如图3.10所示。
4. 光纤扫描：如图3.11所示。目前仅TopoSys激光系统采用光纤扫描仪。目前已有128根光纤组，256根光纤组将可以实现。

3.4.2 扫描线形状

扫描线在地面形成的形状不仅取决于激光扫描装置及其工作方式，也取决于飞行方向、飞行速度和地形。

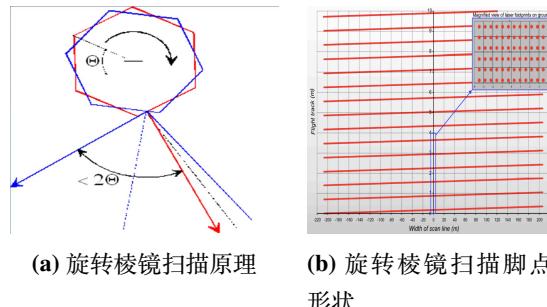


图 3.9 旋转棱镜扫描

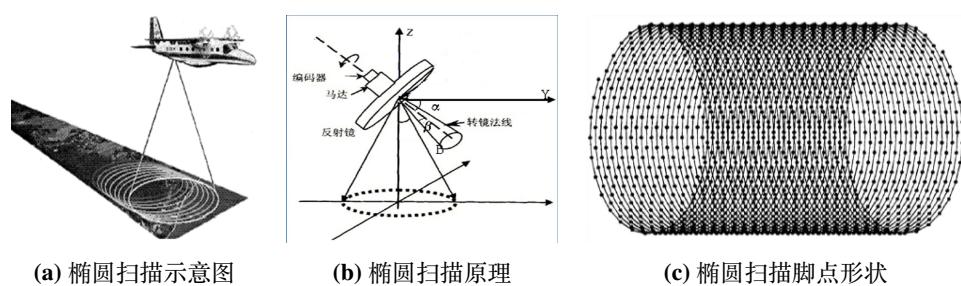


图 3.10 椭圆扫描

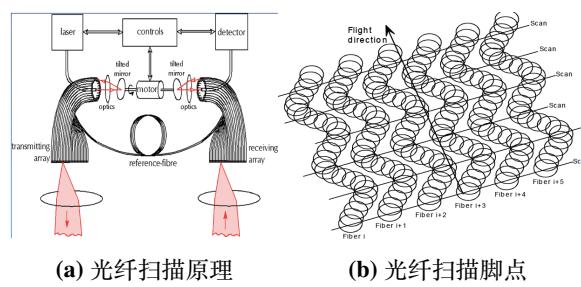


图 3.11 光纤扫描

沿着扫描方向对地面目标的连续扫描，是一种等角度步进扫，激光所照射的那些点并不是等间距的。由于有时扫速度不平衡，或加快或减慢，造成扫线边上的点出现异样，表现出不同的特征，有时就需要从所采集的数据集合中去除这些点。

分类

1. 按扫描方式：摆镜扫描；旋转棱镜扫描；椭圆扫描；光纤扫描。
2. 按激光扫描方向：单向扫描；双向扫描。
3. 按扫描轨迹：线扫描；椭圆扫描。

3.5 LiDAR 数据获取处理

机载LiDAR获取的数据

- 距离数据、强度信息、CCD等遥感数据
- DGPS系统及INS系统等定位定姿数据、航迹文件
- 激光点分布模式与技术数据等辅助数据

这些信息数据必须通过同步信号，保持相互关联、匹配，才能使用！

3.5.1 离线时间同步方案

如图3.12所示。

- POS数据和激光扫描数据存储在不同PC机硬盘中。
- POS数据与GPS时间相关，激光扫描数据与PC1的计算机内部时间相关。
- PC1与PC2借助GPS的PPS信号关联。

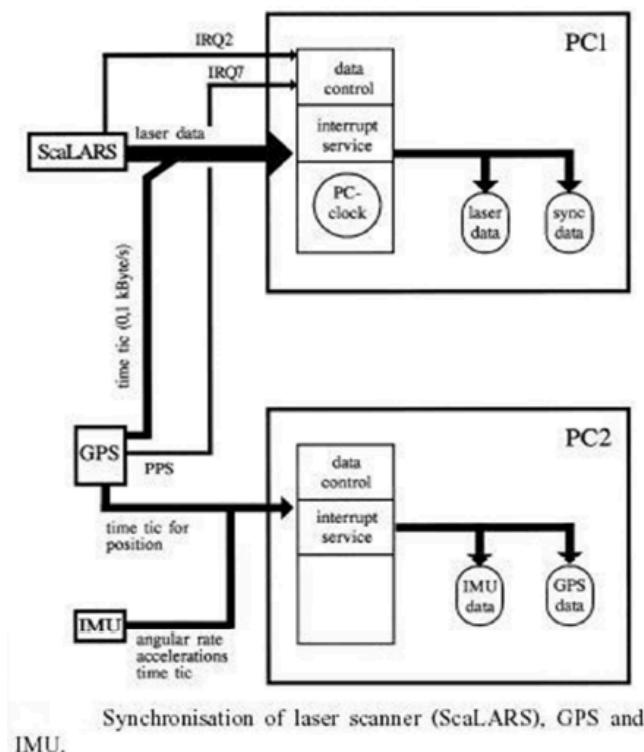


图 3.12 离线时间同步方案

3.5.2 机载 LiDAR 系统对地定位方程

摆镜扫描对地定位方程 通过激光对地面的扫描得到扫描仪与地面上各点的距离，由 GPS 接收机得到扫描仪的位置，由高精度姿态量测装置量测出扫描仪的姿态，即 φ 、 ω 、 κ 角度，由这些量测值可计算出地面点的三维坐标。

设地面点 P 在地面坐标系中的坐标为 $(X, Y, Z)_P$ ， P 在传感器坐标系中的坐标为 $(U, V, W)_P$ ，投影中心 S 在地面坐标系中的坐标为 (X_S, Y_S, Z_S) ，传感器的姿态角为 $(\varphi, \omega, \kappa)$ ，则通用的构象方程为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_P = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \mathbf{A} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix}_P \quad (3.20)$$

其中，

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

是传感器坐标系相对于地面坐标系的旋转矩阵，是传感器姿态角的函数。

对于每一个脉冲，有

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= S \sin \theta \\ z &= S \cos \theta \end{aligned} \quad (3.22)$$

式中， θ 是扫描线方向与 Z 轴夹角，由编码器按固定的激光脉冲间隔给出； S 是激光测距。

代入构像方程，有扫描线定位方程

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_P = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \mathbf{A} \begin{pmatrix} 0 \\ S \sin \theta \\ S \cos \theta \end{pmatrix}_P \quad (3.23)$$

椭圆扫描定位方程

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} + \mathbf{A} \begin{pmatrix} -S \sin 2\delta \sin \gamma \\ S \cos 2\delta \\ -S \sin 2\delta \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

3.6 机载 LiDAR 数据获取新技术

数字化全波形技术 如图3.13所示。

空中内插多脉冲技术 如图3.14所示。

双扫描仪组合技术 如图3.15所示。增加地面激光脚点密度的方法：

- 直接的方法就是增大激光脉冲的重复频率和扫描仪的扫描频率。
- 多脉冲技术可以通过增加激光脉冲的重复频率来达到这个目的，但是扫描仪的扫描频率由于各方面的限制很难有大幅度的提升。
- 双激光雷达组合的系统便应运而生。通过搭载两个激光扫描仪，并使其同时工作，可显著提高地面激光脚点密度。

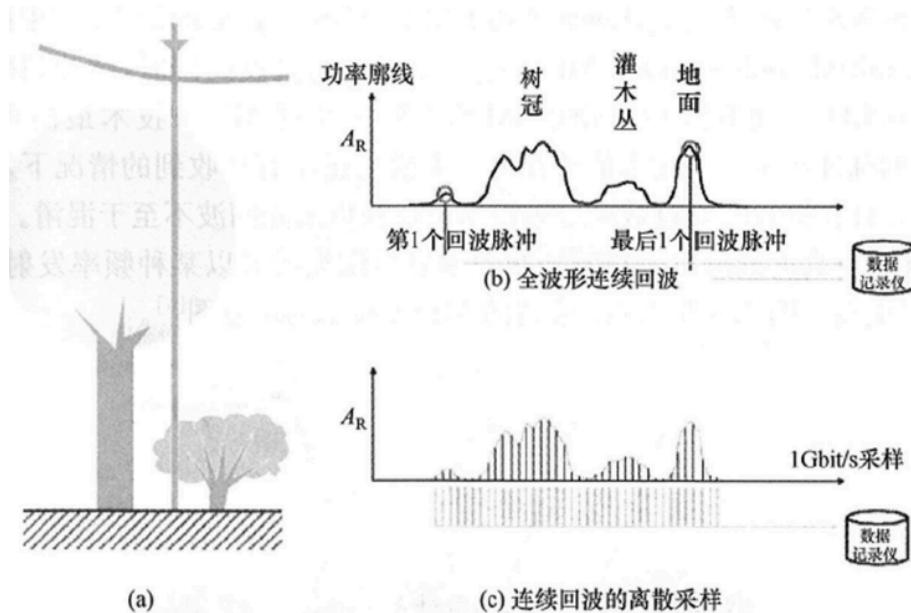


图 3.13 数字化全波形技术

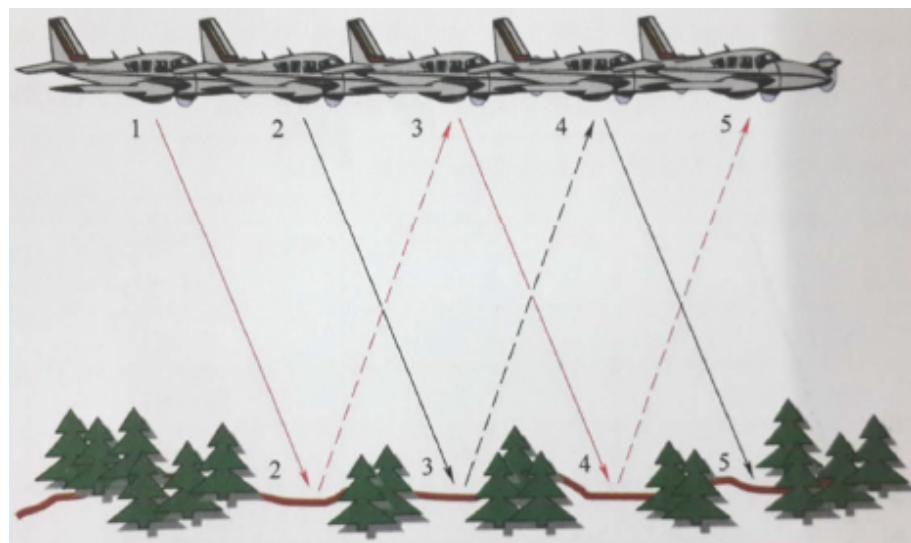


图 3.14 空中内插多脉冲技术

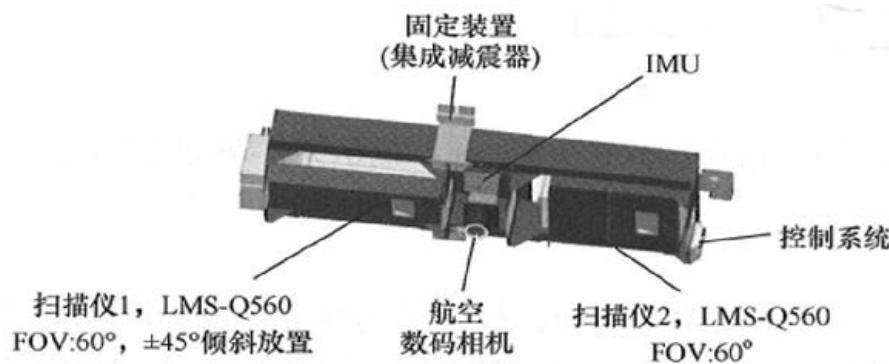


图 2.9 Riegl BP-560 系统结构图

图 3.15 双扫描仪组合技术

第4章 机载LiDAR数据获取基本原理

4.1 数据获取重要参数

4.1.1 LiDAR数据获取重要参数的作用

- 与LiDAR系统性能、数据质量相关的参数关系式或计算公式。
- 是进行激光遥感系统选择及航线设计的重要依据！

4.1.2 参数类型

瞬时视场角 (instantaneous field of view, IFOV) 又称激光发散角，是指激光束发射时其发散的角度。瞬时视场角的大小取决于激光的衍射 (diffraction)，是发射孔径 D 和激光波长 λ 的函数：

$$\text{IFOV} = 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (4.1)$$

视场角 (Field Of View, FOV) 激光束的扫描角，指激光束通过扫描装置所能达到的最大角度范围。

早期LiDAR系统的扫描角一般较小，大约在 30° ，目前比较先进的LiDAR系统的扫描角都在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 度左右，基本能够达到航摄像机的视场角度范围。

脉冲频率 单位时间内激光器所能够发射的激光束数量。

注意：并不是脉冲频率越大越好，过于密集的激光脚点会带来大量的冗余数据，影响数据处理的效率和效果。

扫描频率 扫描频率指线扫描方式，每秒钟所扫描的行数，即扫描镜每秒钟摆动的周期。很明显，扫描频率越大，每秒钟的扫描线就越多。

垂直分辨率 脉冲通过的路径上所能够区分不同目标间的最小距离。

$$H_{\min} = c \frac{t_{\min}}{2} \quad (4.2)$$

若脉冲宽度为 10 ns ，则在一个脉冲宽度内，不同目标距离至少为 1.5 m ，其回波能量才可能经接收器检出，并区别开来。

最大飞行高度 (最大量测距离) 系统所能精确测定的最远距离。

在实际工程中，其影响因素有很多：激光功率、光束的发散性、大气折射率、地物反射率、探测器灵敏度等等。

最小飞行高度 取决于 • 飞行平台的类型 • 探测地区的地形 • 人眼的安全距离

激光脚点光斑特性 包含三个方面：

1. 激光脚点光斑直径（激光束照射面直径）：地面上瞬时激光脚点投射在地面上为一个椭圆形的光斑，其航向直径（航线方向，短轴）与旁向直径（扫描方向，长轴）是不等的；它们与下列因素有关：平台的飞行高度 H ；激光波束发散角 γ ；地形坡度 α ；瞬时扫描角 θ_i 。关系如图所示。

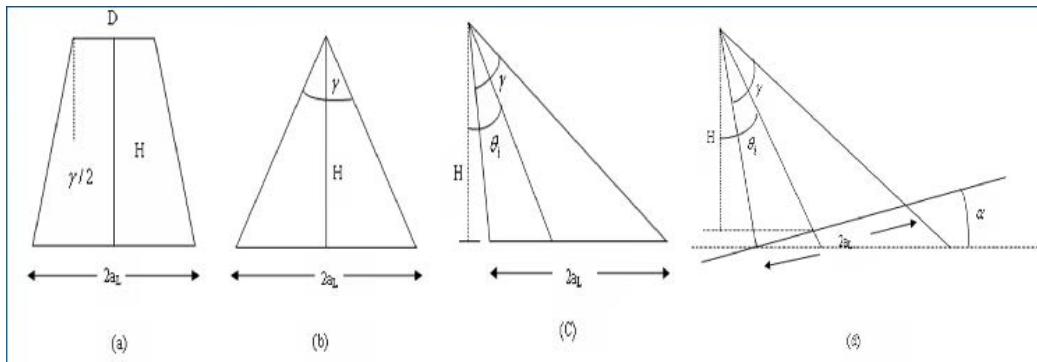


图 4.1 激光脚点直径

- (a) 当遥感平台处于水平状态, 激光束垂直照射水平地面上 (瞬时扫描角 $\theta_i = 0$) 时 (图4.1-a), 激光脚点光斑的旁向直径

$$2a_L = D + 2H \tan \frac{\gamma}{2} \quad (4.3)$$

通常探测器孔径 D 比较小, 只有 10~15 cm, 可以忽略 (图4.1-b)。故有:

$$2a_L \approx 2H \tan \frac{\gamma}{2} \quad (4.4)$$

由于激光波束发散角 γ 也非常小, 可简化为:

$$2a_L \approx 2H \frac{\gamma}{2} \approx H\gamma \quad (4.5)$$

- (b) 当遥感平台处于水平状态, 激光束倾斜 (瞬时扫描角为 θ_i) 照射水平地面上时 (图4.1-c), 旁向直径:

$$2a_L = H \tan \left(\theta_i + \frac{\gamma}{2} \right) - H \tan \left(\theta_i - \frac{\gamma}{2} \right) \quad (4.6)$$

- (c) 当遥感平台处于水平状态, 激光束倾斜 (瞬时扫描角为 θ_i), 照射到倾斜地面 (坡度为 α) 上时 (图4.1-d), 激光脚点光斑的旁向直径

$$2a_L = \frac{H \sin \frac{\gamma}{2}}{\cos \theta_i \cos \left(\theta_i + \frac{\gamma}{2} - \alpha \right)} + \frac{H \sin \frac{\gamma}{2}}{\cos \theta_i \cos \left(\theta_i - \frac{\gamma}{2} - \alpha \right)} \quad (4.7)$$

- (d) 对于激光脚点的航向直径, 始终为

$$2a_L \approx H\gamma \quad (4.8)$$

2. 回波多值性: 由于激光脚点在地面形成光斑, 具有一定的面积。在此区域内也许存在不同的地物类型或者地面有起伏。这些都会造成同一束激光脉冲可能有多个回波信号。这些信号可能先后到达接收器, 就形成多次回波。

3. 动态重合系数 Q : 激光脚点光斑与接收脚印¹重合部分的面积与激光光斑的面积之比。

影响因素: • 激光波束发散角 • 接收瞬时视场角 • 传感器平台高度 • 扫描镜速度 • 波束倾角

¹由于遥感平台的移动的关系, 在反射光束到达接收装置的时候, 已经不是原来的激光脚点的位置、大小和形状了, 形成接收脚印。由于平台的移动, 接收脚印与激光脚点光斑通常只有部分重合。

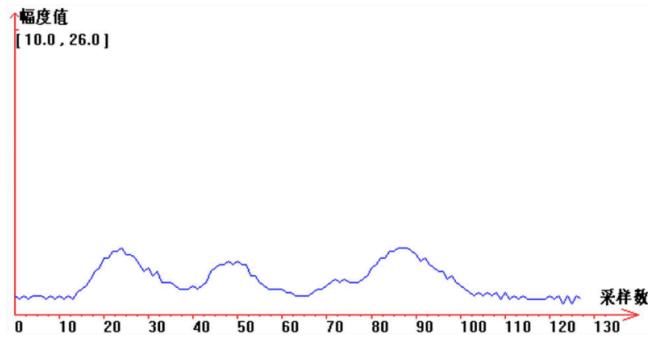


图 4.2 回波多值性

扫描带宽 SW 一般来说, 激光束扫描角即激光扫描视场角是一个已知量, 在确定飞行高度的情况下, 可以计算出扫描带宽:

$$SW = 2H \tan \frac{\theta}{2} \quad (4.9)$$

- 对于椭圆扫描工作方式仍适用, 因为扫描角的量度以天底点方向为准。
- 对于 Z 形扫描, 实际扫描宽度长一些。

扫描行的点数 N 在扫描视场角的范围内可以发射多少束激光, 即一扫描行内扫描点的数量。该参数关系到扫描量测点的密度。

根据脉冲重复频率¹ F 和扫描频率² f_{sc} , 可计算每一扫描行的点数:

$$N = \frac{F}{f_{sc}} \quad (4.10)$$

注意: 可见, N 与飞行高度和扫描带宽无关。扫描点数计算与飞行高度、扫描带宽无关! 由于不同的区域所需的量测密度不同, 当激光扫描仪的扫描频率和脉冲重复频率固定时, 即一行扫描点的个数固定; 若此时针对具体区域制订飞行计划, 要求点的密度要大一些, 就要考虑适当降低飞行高度。

激光脚点间距 (Point Space) 如图4.3所示, 分为航向脚点间距和旁向脚点间距。

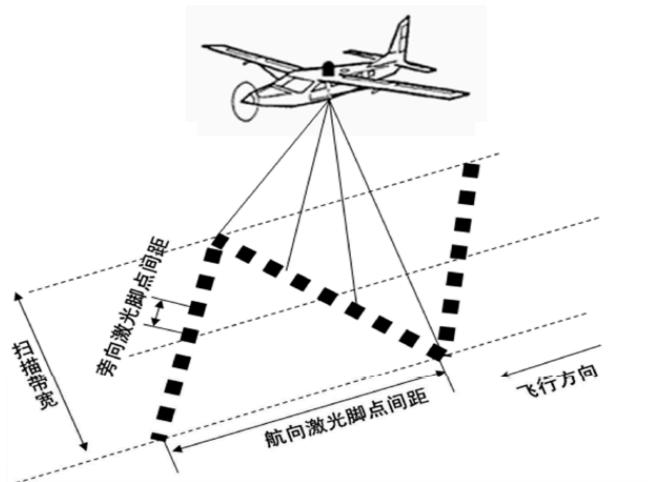


图 4.3 激光脚点间距

¹每秒钟发射激光脉冲的次数

²每秒钟扫描行数

1. 航向脚点间距 dx_{along} : 沿飞行方向扫描点之间的距离称为航向点距。

- 一般扫描方式: 根据飞机飞行速度 v , 计算得到点距

$$dx_{along} = \frac{v}{f_{sc}} \quad (4.11)$$

式中, v 为飞行速度, f_{sc} 为扫描频率。可见, 航向激光脚点间距也与飞行高度无关, 只与飞行速度和扫描频率有关。

- 椭圆扫描方式: 飞行方向上点距较大。
- Z形扫描方式: 由于有两种定义扫描行的方式, 计算飞行方向点距也有两种方式。如图4.4所示。

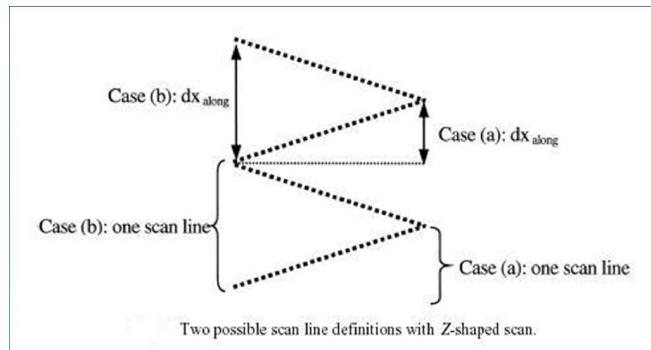


图 4.4 Z 形扫描的激光脚点间距

2. 旁向脚点间距 dx_{across} : 旁向激光脚点间距指一条扫描线上相邻激光脚点的间距, 旁向激光脚点间距与扫描带宽 SW 和每条扫描点上的激光脚点数 N 相关。

- 一般扫描方式:

$$dx_{across} = \frac{SW}{N} \quad (4.12)$$

- 光纤扫描:

$$dx_{across} = h \frac{\theta}{N - 1} \quad (4.13)$$

- 椭圆扫描: 在接近圆形扫描的情况下, 扫描方向点距可按下式作近似估计:

$$dx_{across} = \pi \frac{SW}{N} \quad (4.14)$$

椭圆扫描是由旋转棱镜实现的, 根据其镜面和转轴垂面之间的夹角 SN, 可以较精确地计算扫描方向点距:

$$dx_{across} = \frac{4.4429h}{N} \sqrt{\tan^2(2SN) + \tan^2(1.41SN)} \quad (4.15)$$

最少航带数 对于需要进行激光量测的区域, 在执行量测任务之前, 应对飞行航带数进行估计, 若其宽度为 W km, 航带之间扫描重叠度为 q 。所需航带数为

$$n = \min n_i \quad (4.16)$$

满足

$$(n_i - 1) \geq \frac{W - SW}{SW(1 - q)} \quad (4.17)$$

即

$$n = \text{int} \left[\frac{W - SW}{SW(1 - q)} + 1 \right] \quad (4.18)$$

意义：扫描带宽是一个重要参量，要计算扫描带宽，又与航高有关，在实际制定飞行计划时，航高的确定须根据区域内的最低点，而航带重叠度的计算则要依据区域内最高点，以避免在扫描带宽很窄的情况下产生遗漏。

实际量测面积 在估算出所需航带数的基础上，可以对激光扫描量测的实际覆盖区域面积进行计算。如果飞机速度为 v ，待量测区域长度为 L ，那么，实际量测面积为

$$A = SWvT_S[(n - 1)(1 - q) + 1] = SWL[(n - 1)(1 - q) + 1] \quad (4.19)$$

量测点密度 计算出实际量测面积后，实际量测点密度按下式计算：

$$d = \frac{FnT_S}{A} \quad (4.20)$$

量测点数据量 实际量测点数据量涉及到数据存储空间的问题，如果需要在飞机上实时计算出地面每一被量测点的三维坐标，并记录下每一个点的反射强度，每点序号、坐标 (X, Y, Z) 和时间按 4 字节记录，强度按一个字节记录，每点需要 21 个字节，数据总量为

$$C = FT_f \times 21\text{bytes} \quad (4.21)$$

式中， T_f 是激光扫描量测所需的全部时间。

发射及接收激光束间隔内的飞行距离 在激光器发射脉冲到接收地面发射的脉冲有一个时间间隔，在此间隔内一个平台移动了一段距离

$$d = v \times dt = \frac{2vR}{c} \quad (4.22)$$

一般而言，在以飞机为平台时，这段距离很短。这影响到动态重合系数的大小。

过采样和欠采样 沿扫描方向的估计式为

$$Q_{\text{across}} = \frac{2a_L}{dx_{\text{across}}} \quad (4.23)$$

如果 $Q_{\text{across}} > 1$ ，就是过采样，反之就是欠采样。

4.2 常用商业 LiDAR 系统

Leica 公司 LiDAR 设备

Optech 公司 LiDAR 设备

Riegl 公司 LiDAR 设备

第5章 LiDAR工程数据获取

LiDAR工程步骤 如图5.1所示。



图 5.1 LiDAR 工程步骤

LiDAR 数据获取综述 既繁琐又细致的工作，牵扯到许许多多的因素，需要很多单位和人员的支持和配合。包含了从飞行准备到航线设计，从飞行操作到数据整理，从设备运输到存储维护等方方面面与航测外业相关的作业环节。

三个阶段八个方面 如图5.2所示。

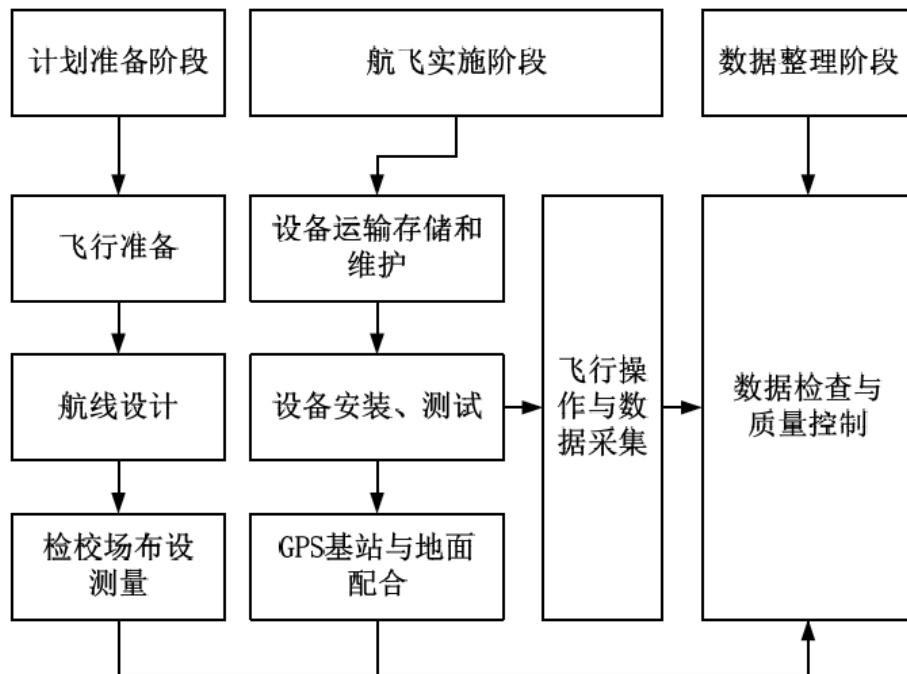


图 5.2 LiDAR 数据获取的三个阶段八个方面

5.1 LiDAR 数据获取流程

5.1.1 计划准备阶段

飞行准备

1. 掌握测区情况。首先应该熟悉实地测区的地形特点和地貌特征。根据不同的地形条件选择和设计不同的飞行航线。
 2. 选择 LiDAR 型号。国内主要有 ALS、ALTM、LiteMapper、TOPOSYS 等产品，每个产品由于性能和参数不同，因此选择不同的设备对于航摄设计来说也是不同的。
 3. 选择飞行平台。不同的飞机性能会对雷达系统的参数设置有不同程度的影响。主要有两个方面，一是飞行速度，二是飞行高度。
 - 飞行速度主要影响雷达的扫描频率的设置。
 - 行高度主要影响脉冲频率的设置，进而影响点密度和精度。
 4. 申请航飞权、协调航空飞行。流程如图5.3所示。
- 飞行任务审批。
 - 机场协调。
 - 飞行协调。

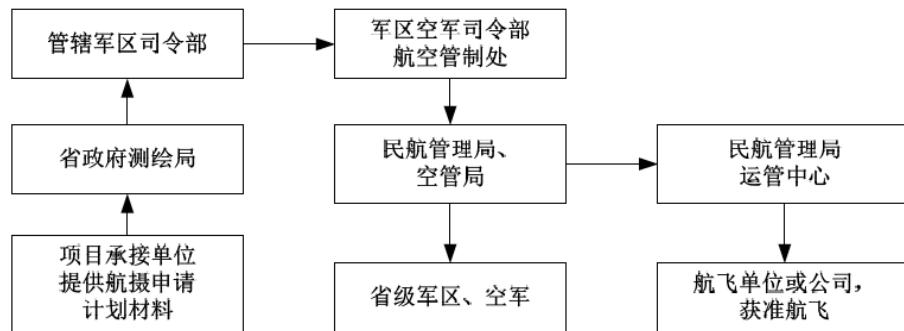


图 5.3 申请航飞权与协调航空飞行

5. 制定项目任务书。在承接航飞任务时，用户单位一般会提交“项目任务书”，一般由甲方提出要求，双方技术人员共同拟定。
 - 飞行高度
 - 飞机型号
 - 航摄分区
 - 成果坐标系
 - 野外控制点量测
6. 评估飞行效率。根据测区远近、飞行高度、空域申请情况来编排航飞航线顺序。

航线设计

1. 步骤：
 - 建立航带设计工程
 - 设置平面坐标系和高程坐标系
 - 加载 DTM 数据
 - 导入设计线位
 - 航带设计
 - 重复以上步骤，完成所有航段的航线设计

航线设计流程如图5.4所示。

2. 单脉冲和多脉冲：同等点间距的设计要求下，多脉冲的航飞效率大约为单脉冲的 3 倍！多脉冲的

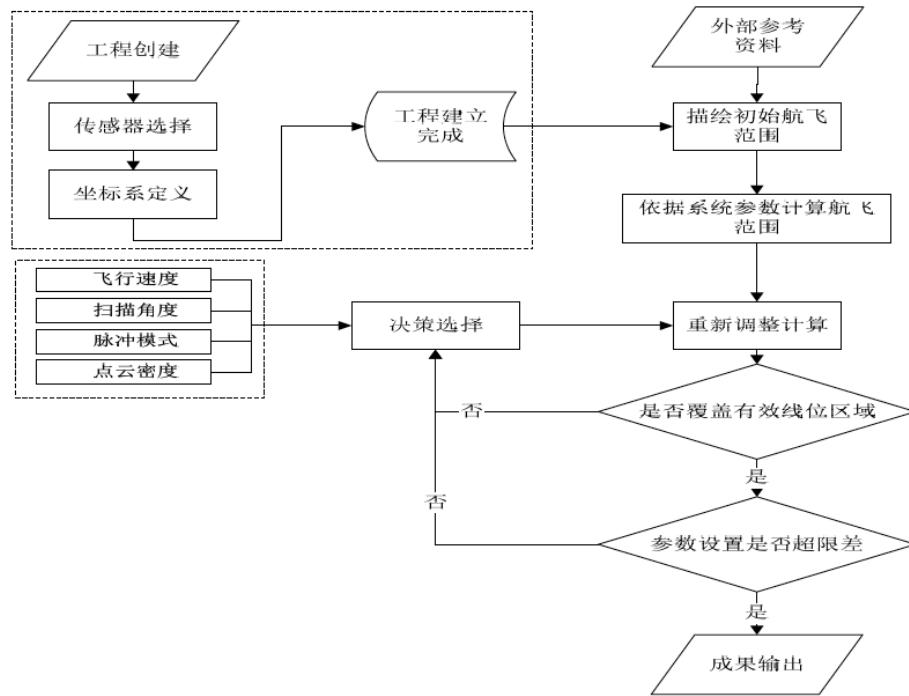


图 5.4 航线设计流程

优势随着地形起伏变化的上升而越加明显。

3. 配备数码相机的航线设计：注意

- 重叠度匹配
- 数码相机航向重叠度设置和摄影基线检查

4. 最终航线检查与地面模拟飞行：为了确保飞行计划的正确性。检查方法主要有三种：

- 将飞行计划导出为 KML 格式，加载到 Google Earth 当中进行浏览。
- 将飞行计划导出到 FCMS 飞行管理控制软件中进行检查。
- 地面模拟飞行。

5. 提交航飞设计数据：完成航线设计之后，需要提交以下材料：

- 飞行记录表
- 领航数据表
- 飞行文件
- 飞行示意图文件
- KML 文件

检校场的布设、量测

1. 必要性：LiDAR 设备属于精密仪器，数据采集时要求部件之间有严格的相对位置关系。但实际工作中，系统安装时不能完全保证它们相互平行，这些偏差会在设备运输中、设备安装时或者随着时间改变。
2. 激光检校场选择及航线设计：IMU 和激光扫描仪的坐标系并不严格平行引起的误差；每次航飞过程中，roll、pitch、heading 等会发生变化。
 - 激光检校场布设方案
 - 校准控制场：校准 LiDAR 的相对和绝对高程。

- 校准建筑物：校准侧滚和俯仰姿态。
- 尽量远离水面（如湖、江）等低反射率的地区。
- 激光检校控制点布设方案
 - 直线控制点：直线大路，2km，每隔5m一个，高程精度<5cm；
 - 零散控制点：中心区域均匀10-15点，高程精度<2cm；
 - 所有控制点都布设在路面上，且地物材料均匀。
 - 控制点数据的坐标系为WGS84。
- 激光航线设计方案：如图5.5所示。
 - 高航高：通过尖顶房屋正上方过房屋中点，垂直道路及房屋的顶角方向往返飞行各一次（EF、FE）；平行于该方向飞行一次（CD）；沿道路方向同向飞行一次（AB）。
 - 低航高：十字飞行（EF,BA）。

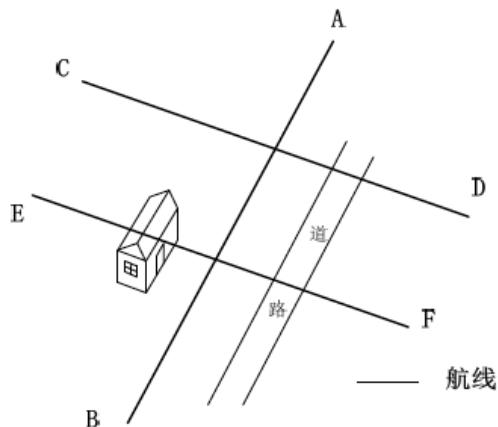


图 5.5 激光检校场布设案例

3. 相机检校场选择及航线设计：相机在安装过程中也会存在和IMU的视准轴不严格一致的情况，这就需要在飞行前或飞行后进行视准轴检校。

- 相机检校场布设方案：从不同方向航线的数据中获取尽可能多的同名地物点，且每一个同名地物点所涉及的航片数量尽可能的多，通过对大量同名点的平差计算，求出相机视准轴与IMU之间的偏差。检校场可选择在地物比较丰富的城市地区，覆盖范围一般为 $6.0\text{ km} \times 4.5\text{ km}$ 。城市区域可供选择的特征点比较多，适于后续进行空三计算并寻找足够的连接点，得到较好的检校结果。
- 相机航线设计方案：相机的焦距不同，检校飞行的航高也不同，一般飞1个高度，采用“十”字对飞，四条航线。如图5.6所示。
- 相机检校控制点布设方案：
 - 测区范围内均匀布设20个控制点，在重叠中心区布设5~10个控制点，在航线四个边缘区域总共布设5~10个控制点，精度<5cm。
 - 控制点选取地物特征点上。
 - 控制点数据的坐标系为WGS84。

设备安装与测试

1. 开箱验货与货物清点。



图 5.6 相机航线设计方案

2. 设备安装步骤

- 飞机改造 (GPS 天线、底舱过渡板、底舱开孔直径与底舱厚度)。
- GPS 偏心分量测量。如图所示。

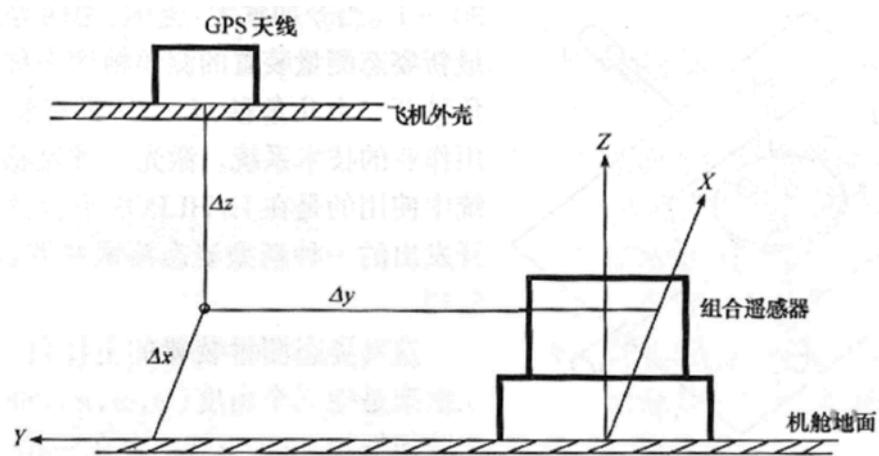


图 5.7 GPS 偏心分量测量

- 设备地面通电测试、记录。
- 温度处理。
- 数据质量检查与设备状态评估。

5.1.2 航飞实施阶段

基站架设与地面配合 地面配合分为 检校场地面配合¹ 和测区地面配合²。

1. 检校场基站架设和地面配合

- 现场勘察
- 检校场标识布设
- 检校场基站布设
- 同步观测
- 平面检查点测量
- 高程控制点测量

2. 测区基站架设和地面配合

- 一般地区基站布设
- 困难地区基站布设
- 检查点测量

3. 基站工作注意事项

飞行操作与数据采集

1. **GPS 星历预测**: LiDAR 在空中工作时, 需要实时锁定卫星接收 GPS 信号, 并且卫星星座分布的几何强度直接决定着卫星测距的误差。在实际飞行之前, 需要对当天点位的三维精度因子 (PDOP) 进行预测。有些商用软件 (GrafNav) 可以通过网络下载卫星星历预报数据来计算出某天某一时刻的 PDOP 值以及卫星数目。

2. 地面通电测试与准备工作

3. 飞行质量要求如图5.8所示。

- 8字飞行
- 地面静态观测
- 盘旋转弯坡度要求
- 飞行姿态要求
- 飞行速度要求

4. **飞行作业和设备空中操作**: 空中操作是固定而且单一的, 高级的激光雷达设备在使用操作上往往十分简单, 用户只需进行触动几个按钮就可以完成整个航飞任务, 其他所有工作都让计算机来监视完成。

5. 激光扫描测量

6. GPS/IMU 定位定向测量

7. 数码相机拍摄

8. 空中异常情况及处理

5.1.3 数据整理阶段

数据检查与质量控制

¹检校场地面配合是针对检校场开展工作, 包括现场确认、检校场标识布设与测量、基站布设与配合观测、控制点测量等方面的工作。

²测区地面配合主要包括基站选择与配合观测、野外检查点观测等。

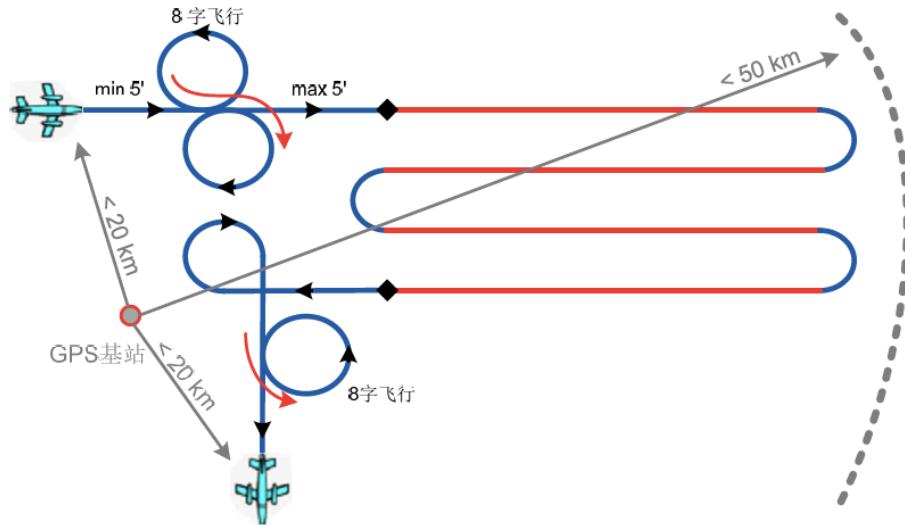


图 5.8 飞行质量要求

1. 数据整理归档
2. 日志文件
3. 数据质量检查
 - GPS/IMU 数据解压
 - 导航文件精度指标
 - 激光数据检查
 - 影像数据检查
4. 补飞和重飞

数据预处理

1. 目的：
 - 三维坐标解算
 - 坐标转换
 - 文件生成
2. 数据预处理流程：如图5.9所示。

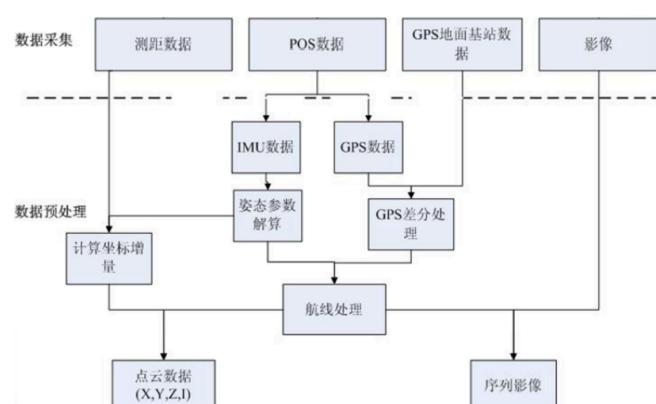


图 5.9 数据预处理流程

3. **SBET (Smoothed Best Estimated Trajectory)** 航迹文件处理：GPS 差分处理（GPS 数据 + 基站数据）。每条航带一个航迹文件，处理软件 POSProc。
4. 位置内插。如图所示。

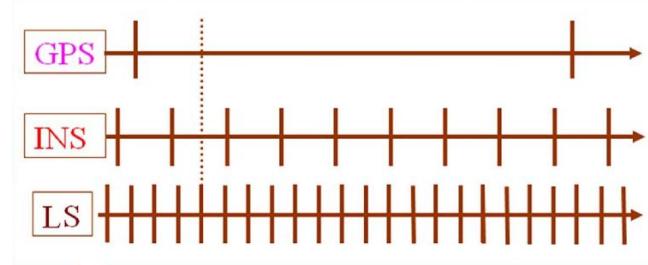


图 5.10 位置内插

5. “*.LAS” 文件——ALS Post Processor

- 解算每个目标点的三维坐标；
- 每条航带生成一个二进制格式的 LAS 文件；
- 存储格式为 lat/lon/el/intensity data 或者 northing/easting/el/intensity in user-selected projection；
- 记录顺序:shot-by shot, return by return。

6. 生成“quick-look edge-of-coverage”高程图 (*.TIF)

调整航带间点云不一致 如图5.11所示。

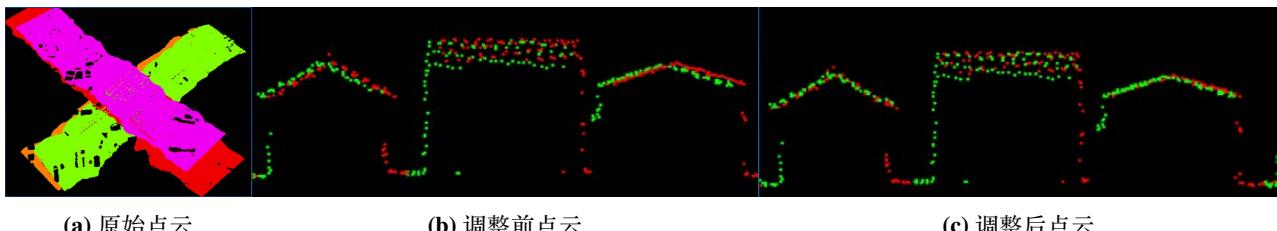


图 5.11 调整航带间点云不一致

坐标变换 由 WGS84 坐标系大地坐标变换为地方局部坐标系坐标。

- 投影变换
 - Gauss 投影
 - UTM 投影
 - Mercator 投影
 - Lambert 投影
 - Albers 投影
- 椭球变换
 - 七参数法（包括布尔莎模型、一步法模型、海尔曼特等），即 X 平移， Y 平移， Z 平移， X 旋转， Y 旋转， Z 旋转，尺度变化 K 。
 - 三参数（莫洛登斯基模型），即 X 平移， Y 平移， Z 平移，而将 X 旋转， Y 旋转， Z 旋转，尺度变化 K 视为 0，所以三参数只是七参数的一种特例。

文件生成

1. **LAS 格式**: 美国摄影测量与遥感协会提出 Lidar Data Exchange Format Standard (LDEFS) 1.0 标准。
 - **公共数据块 (Public Header Block)**: 公共数据块的大小是 227 bytes, 记录了关于该文件的一些基本信息, 如: 文件标识、飞行时间、回波个数、坐标范围等等, 详细描述了关于 las 数据采集的信息。
 - **变长数据记录 (Variable length Records)**。
 - **点数据块 (Point data)**。
 - **变长的波形记录 (1.3 格式)**。
2. **ASC 栅格格式**: 一些公司采用了栅格文件格式作为 Lidar 的数据格式。例如, 采用 ArcInfo Grid 格式的数据作为通用格式。
 - **头部信息**:
 - ncols 行数
 - nrows 列数
 - xllcenter 中心点 x 坐标
 - yllcenter 中心点 y 坐标
 - cellsize 采样间距
 - NODATA_value -9999.000000(无效数据)
 - **数据信息**: 记录具体的信息数据。
3. **自定义 TXT 格式**: 这种格式直接以文本的方式记录 LiDAR 数据, 每一行记录一束激光的回波数据, 以不同的列记录不同属性的数据, 一般会在数据中加以说明。

点云数据特点 LiDAR 激光脚点的分布是按照时间序列进行采样和存储的, 其在地面上的分布不是规则的, 其空间分布呈现为离散的数据“点云”(Points Cloud)。如图5.12所示。

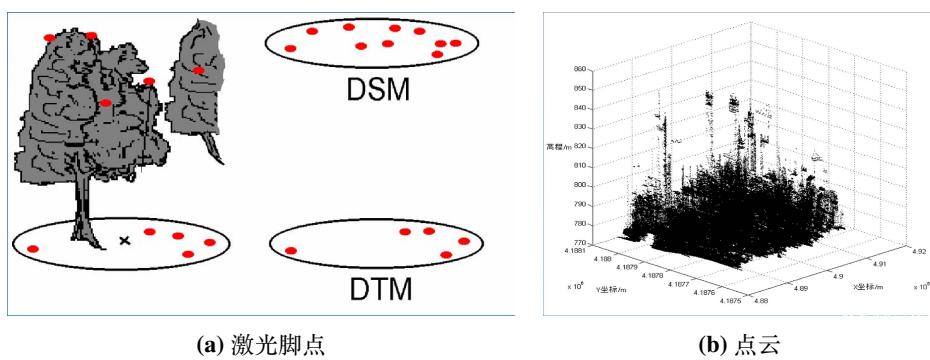


图 5.12 点云数据特点

5.2 LiDAR 技术与同类技术对比

5.2.1 摄影测量与 LiDAR 的主要差异

摄影测量与 LiDAR 的主要差异如表5.1所示。

表 5.1 摄影测量与 LiDAR 的主要差异

主要差异		摄影测量	激光遥感
传感器	种类	<p>摄影测量所用的传感器种类多种多样</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 几何形态：二维、线阵、多线阵、逐点探测 ● 分辨率：几何、辐射分辨率和光谱分辨率 ● 存储介质：模拟、数字 ● 其他：几何精度、重量、功耗、成本等 	<p>LiDAR 系统的传感器种类很少：激光器基本为光学泵浦固体激光器，可用波段较少。</p>
	寿命	<p>简单，容易操作；可靠性强，价格相对低廉；使用寿命可达数十年；</p>	<p>能量要求高，能耗转换为高温，必须冷凝过程，结构复杂；激光器使用寿命较短，温度控制较好的激光器使用寿命也仅有 10000 小时；</p>
	光谱信息	全色、多光谱、高光谱	<p>激光器本身可用谱段范围比可见光和红外传感器宽得多，从 50 nm 到 30000 nm)；但用于机载 LiDAR 系统的激光器仅限于近红外波段。</p>
飞行平台		<ul style="list-style-type: none"> ● 面阵：无需 GPS/INS 系统；线阵：必需 GPS/INS 系统； ● 传感器几乎可以装载到所有可能的飞行平台上，包括气球到空间站；但是线阵 CCD 对飞行高度和飞行速度有较严格的要求。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 必需 GPS/INS 系统； ● 可以装载到直升机和其它飞机上，飞行高度一般在 1000m 左右。 <p>影响因素有：激光器功率、探测器灵敏度、最高脉冲发射率、扫描频率</p>
飞行计划		飞行计划比较简单，易于制订，主要是天气；	<p>飞行计划复杂，参数多：扫描带走向，飞行高度，航带重叠度，速度，卫星分布等；</p> <p>机载 LiDAR 系统要求飞行高度和飞行速度都低于摄影测量系统。</p> <p>视场一般都比较小。在相同时间内机载 LiDAR 系统探测成像范围较小。</p>

(续表)

主要差异	摄影测量	激光遥感	
地物反射与成像方面	<ul style="list-style-type: none"> 摄影测量系统一般工作波长可覆盖整个可见光谱段，即全色波段或者有几个波段，每个波段宽度都是较宽的，成像质量较好。 摄影测量系统动态范围相对较小，一般不存在饱和问题。 	<ul style="list-style-type: none"> 激光是单色光，而且谱段宽度很窄； 激光扫描系统动态范围（记录的反射率数值范围）比摄影测量系统大得多，对于探测器来说，常常导致饱和（溢出）。 激光成像的影像质量低于摄影测量影像，在高航高低反射率区域，越明显。 	
自动化程度	在地物目标三维信息提取方面，摄影测量处理过程需要更多的人工编辑，特别是胶片处理以及传感器的定向很难自动化。	<p>在理想的条件下，机载 LiDAR 系统可以全自动地提供地物目标的三维坐标原始信息，达到很高的自动化程度。原因在于其原始数据已经隐含了大量摄影测量需完成的任务。</p> <p>实际上，机载 LiDAR 点云数据在应用时也需要加入人工编辑操作，如</p> <ul style="list-style-type: none"> 航带偏斜，进行相对校正时，航带连接点（同名点）的寻找。 点云滤波或分类存在错误时，点类别的人工编辑等。 	
技术成熟性和有效性	摄影测量系统建立在成熟的、复杂的技术和算法基础上，已经历数十年的发展，已有数种商业化系统	<p>机载 LiDAR 数据成果仍然需要提供商业服务。</p> <ul style="list-style-type: none"> 软件的缺乏 标准的缺乏 	
DTM 和 DSM	均可生成	在模拟或数字影像上进行人工量测可以得到 DTM 和 DSM，利用数字影像匹配方法所得到的只是 DSM，需要进一步处理得到 DTM。	对三维点云进行简单处理即可得到 DSM，通过滤波处理可以得到 DTM。
	量测点的密度和分布	摄影测量与机载 LiDAR 得到的三维点密度相当，但通过摄影测量密集匹配方法，得到的邻点存在的高度相关性。	

(续表)

主要差异		摄影测量	激光遥感
	量测方式和机动性	采用自动匹配, 因匹配过程盲目搜索, 产生大量冗余计算, 存在误匹配; 若采用人工方法, 量测方式灵活, 可得到高质量的 DTM。	由于数据采集的盲目性, 即使在密度很高的情况下也只能部分地采集到 DSM/DTM 特征点。
	量测精度	摄影测量人工量测方式在影像质量水平和纹理丰富程度中等的情况下, DSM/DTM 量测精度主要取决于飞行高度和传感器定向精度。 平面精度和高程精度分析可以分开进行, 因为两者的关系是彼此独立的, 在整个像幅内, 精度也是基本一致的。	精度影响因素甚多, 其理论精度模型的推导, 误差传播和可达精度的预测都十分复杂。 若存在姿态误差, 则导致高程精度随扫描角度的增加, 特别是飞行高度的增加而很快递减。
	航高对精度的影响	飞行高度在 400-1000m 时, 摄影测量系统的平均精度比机载激光系统稍好, 只是在条件较好情况下, 机载 LiDAR 系统才更精确。	当飞行高度超过 1000m, 姿态量测足够精确, 接收到的地物目标反射信号很好, 则 LiDAR 系统的精度会超过摄影测量。
	平面精度与高程精度	摄影测量平面精度比高程精度要高出 1/3	机载 LiDAR 系统则恰恰相反, 平面精度比高程精度要低 2-6 倍, 而在地形起伏较大的情况下, 平面误差会严重影响高程精度。
	细小目标		机载 LiDAR 系统——可以检测到面积比激光束照射面更小的目标, 如电力线; 但在某些情况下又成了系统的缺点, 那些面积很小的地物被检测出来, 并精确地建立其数学模型, 而在它周围的其它地物却被忽略, 其模型的精度很差。
	地质地貌恢复		机载 LiDAR 获取 DTM 所需时间比摄影测量系统要短得多。摄影测量系统, 若可以利用已有影像数据、资料, 这样, DTM 生产可以进行得更快, 成本也较低些。

(续表)

主要差异	摄影测量	激光遥感
生产成本		仅就获取 DEM 和三维模型而言，机载 LiDAR 的成本远低于航空摄影。但是考虑到 LiDAR 的带宽比较窄，一般比航空摄小 60%~70%，在需要减少航摄架次、提高外业速度时，往往都不是用户的首选。

5.2.2 LiDAR 技术的优势

1. 对于极少纹理的地表面的测绘
2. 森林和植物覆盖物繁多的地域测绘：茂密森林地区——机载 LiDAR 系统可以获得地形数据，而摄影测量系统做不到。
3. 细长地物目标的测绘：包括道路测绘、电力线及电线塔测绘、海岸侵蚀监测、水道水系测量、铁道线测绘、光纤通道量测、管道量测等。机载 LiDAR 系统的扫描带较窄，在上述各种地物量测方面的效率成本比要高得多，对于相关的管理、规划、设计工作，都能提供有效的信息。
4. 城市区域 DSM 的生成：由于机载 LiDAR 系统可以进行密集的高精度量测，对于不连续、突出的三维目标，特别是建筑物的检测、重建，比人工量测速度快得多。可为城市规划、通讯天线的安置等工作，提供非常重要的数据。
5. 需要高密度和高精度量测的区域：
 - 露天矿监测
 - 露天堆集物监测
 - 洪水测绘
 - 局部超级设施（如飞机场）的测绘
6. 微小目标量测：航摄影像中很难发现，人工测量无法进行的工作，如电力线量测等。
7. 需要快速响应的应用领域：如自然灾害监测，需要很快提供信息数据时，由于机载激光系统可以进行直接测距，转换为三维坐标，因此成为极其重要的工具。

5.2.3 LiDAR 与 INSAR 的比较

LiDAR 与 INSAR 的比较如表 5.2 所示。

表 5.2 LiDAR 与 INSAR 的比较

比较内容	LiDAR	INSAR
相同点	LiDAR 技术与机载 INSAR 技术都是由星际探索中孕育发展而来的新技术，它们都是主要用于获得高精度的 DEM 数据。	
投影原理	机载 LiDAR 可以进行倾斜测量和垂直的摄影	机载 INSAR 只能进行侧视成像

(续表)

比较内容	LiDAR	INSAR
距离计算	机载 LiDAR 是通过计算从发射激光到接收到目标反射的激光的时间间隔来计算距离，确定目标位置	机载 INSAR 则是通过解算两束雷达波的相位差来得到目标位置
天气影响	相比机载 INSAR 而言，机载 LiDAR 的测量效果会受到天气状况和目标反射率的影响，例如，雨、雾以及地面的霜、冰等都会对机载激光雷达的测量效果产生影响	机载 INSAR 则不存在这种问题，它对大气的状况不敏感
测量效率	测量效率较低，数据发布速度较慢	数据采集速度快，数据发布速度快
电磁信号	红外激光脉冲	两束垂直的雷达波束
测量方式	计算激光束飞行时间	解算雷达波相位差
波长	μm	cm
受地形地物影响	较少	很大
探测距离	与大气状况密切相关	与大气状况无关
高程精度	dm	m
像素分辨率	dm~m	dm~m
测区范围	小区域或走廊型区域	大范围或首次作业区域
对植被覆盖地区的敏感程度	适宜在植被覆盖地区采集	效果差，不能得到真实地面数据信息
作业成本	高	低

第6章 LiDAR 数据处理

6.1 点云滤波

6.1.1 点云滤波概述

点云滤波的目的

- LiDAR 点云包括：地面点、房屋点、树木、交通工具……。通过点云滤波来提取地面点，剔除非地面点。
- 基于 LiDAR 点云生成 DEM：从点云中识别出地面点，并剔除建筑物、树木等非地面点，接着利用地面点生成 DEM。

基于 LiDAR 数据生成 DEM 的工作

- 点云滤波
- DEM 内插
- DEM 精度分析

点云（距离数据）空间分布特征

- 地形平坦区域，由于激光脉冲的发射频率一般是固定的，激光点云在空间上成规则分布；
- 植被覆盖区域，点云之间的规则间隔被打破，由于脉冲可以穿透植被形成多次回波，空间分布成团聚等不规则形状；
- 水、云、雨或烟雾等能吸收近红外波段的激光脉冲，造成局部区域的点云缺失；
- 玻璃、光亮金属或建筑物边缘等表面的强反射，以及脉冲的折射、多路效应等，会引起点云的 x、y 或 z 值异常，产生噪点。

一般情况下：

- 建筑物和高大植被点云都具有较大的 z 值（在城区，最大 z 值的点云一般都是建筑物）；
- 裸露地表点云的 z 值最小；
- 地面突出物（如围墙、立交桥、花坛等）和灌丛点云的 z 值介于两者之间；

这些地物在垂直方向上形成层次分布，而在相邻地物之间，由于地面与地物的高度差异明显，往往表现出高程突变现象，这就为地面点的识别提供了依据。

基于高程突变的的滤波方法基本前提

- DSM 中非地面点高于地面点（DEM）
- 地面点高程变化不会太大

自动滤波算法的难点

1. 局外点的影响，如图6.1所示。
2. 对象的复杂性、附着对象、点云分布不均匀、有断裂。

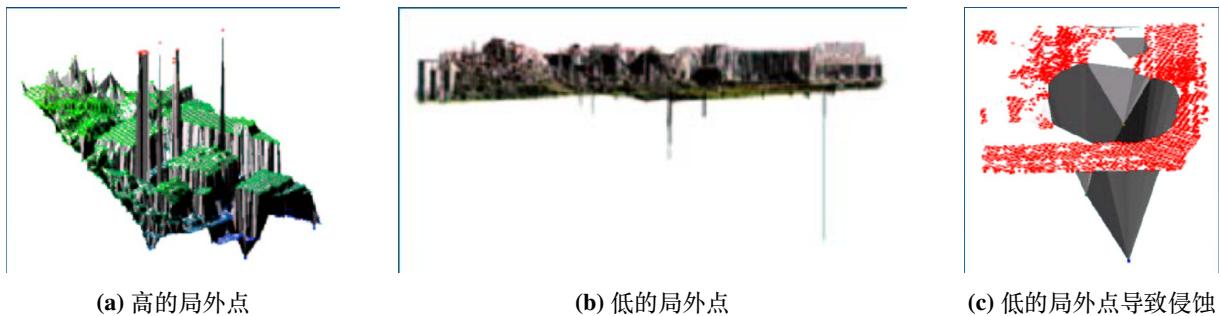


图 6.1 局外点的影响

滤波精度分析方法

1. 第一类错误率 (Type I): 将地面点分为地物点。
2. 第二类错误率 (Type II): 将地物点分为地面点。
3. 总错误率

LiDAR 点云滤波研究现状 如表6.1所示。

表 6.1 LiDAR 点云滤波研究现状

假设条件	存在问题
非地面点均高于地面点	由于粗差、多路径效应等，造成最低点并非理想地面点数据。
激光点可穿透树林到达地面	植被非常密集的地区，激光点难以穿过树林。
地形坡度不会过大	在平坦地区此假设有效，对坡度大的山区，并不总是满足

滤波算法研究趋势

- 高精度
- 全自动
- 高性能运算
- 融合辅助数据源的滤波优化算法

6.1.2 典型滤波方法

一维双向扫描标记法

1. 算法思想
 - 认为非地面点与地面点构成的坡度大于地面点之间构成的坡度；
 - 认为地面点的高程，低于邻域非地面点的高程。
2. 地面点判别条件：

$$\forall P_i : \begin{cases} S_v > S_T \wedge Z_i > Z_T, & \text{地面点} \\ \text{else}, & \text{非地面点} \end{cases} \quad (6.1)$$

3. 算法步骤

- (a) 基于高程和坡度条件扫描标记出初始地面点：假设起始点为房屋点，根据坡度与高程阈值按

从右到左、从左到右进行识别标记

$$S_i = \arctan \left[\frac{Z_i - Z_{i-1}}{\sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}} \right], \quad S_i \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \quad (6.2)$$

(b) 基于线性衰退法进一步去除非地面点：认为局部区域地面点构成坡度一致，利用线性衰减法进一步去除非地面点

$$Z = a_0 + a_1 D, \quad D < D_T \quad (6.3)$$

4. 实例：如图6.2所示。

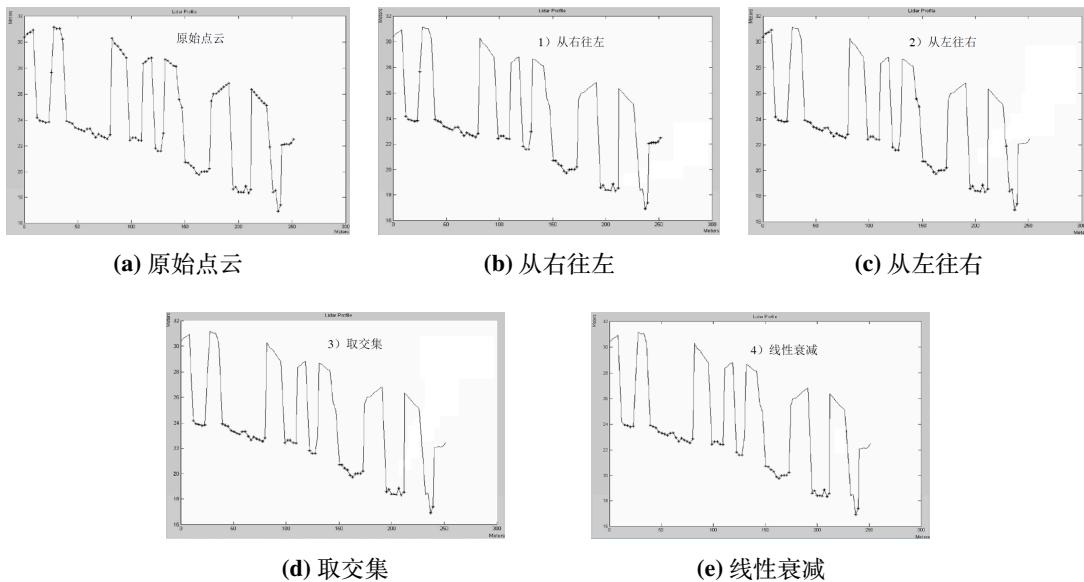


图 6.2 一维双向扫描标记法算法步骤

TopScan 算法

1. 步骤过程：

- 采用比较大的移动窗，在窗中搜索最低点，由每次移动窗中找出的最低点的全体，形成了一个初步的地貌模型。
- 将所有的点与此模型比较，在每一点上形成高差，凡高差超过某个阈值，被认为是非地面点，将这些点滤除。
- 减小窗口，重复第一、二步工作，搜索最低点，形成地貌模型，改变阈值，滤除与地貌模型高差大的点，重复数次以后得到比较精确的地貌点高程数据集合。

2. 窗口和滤波阈值大小的选取：

- 窗口小，就可能将一些大房屋顶点保留下来；窗口太大则会将地表面“平滑”，使微小的地貌变化部分被滤除。
- 阈值太大，会将一些植被点作为地面点保留下来；阈值太小，可能将真实的较小的地貌突变点去掉；
- 窗口和阈值大小与实际地貌密切相关。不同的地域，如平原、丘陵、山地，应该有不同的参数。

基于多分辨率方向预测的点云滤波算法

- 线性预测法：若相邻两点距离比较近，而且二者的高程相差较小，则认为这两点为同一类型点的可能性比较大；否则较高点为地物点的可能性比较大。当然随着两点之间的距离的加大，较高点为地物点的可能性也随之减小。

假设集合 S 为原始 LiDAR 点云，则地面点集合 S_T 可以表示为

$$S_T = \left\{ p_i \in S \mid \forall p_j \in S : h_{p_i} - h_{p_j} \leq \Delta h_{\max}(d(p_i, p_j)) \right\} \quad (6.4)$$

- 方向预测法：在某一距离范围内，若当前点与所有方向预测值的差值均大于该距离条件下的最大高差限差，则该点为地物点，否则为地面点。

对于原始 LIDAR 点云属于集合 S ，方向数据集 $S_{\text{dir}} \in S$ ，则地物点数据集 S_O 可以表示为

$$S_O = \left\{ p_i \in S \mid \forall p_j, p_k \in S_{\text{dir}} : h_{p_i} - h(p_j, p_k) > \Delta h_{\max}(d(p_j, p_k)) \right\} \quad (6.5)$$

则地面点数据集 S_T 可以表示为

$$S_T = S - S_O \quad (6.6)$$

- 多分辨率方向预测处理：采用类似影像金字塔的方式，构建不同分辨率的数据集，以分辨率由低到高的次序依次进行平滑处理。邻域方向如图6.3所示。

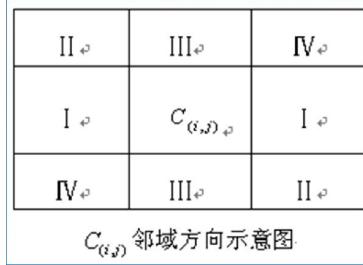


图 6.3 邻域方向

移动曲面滤波方法

- 算法原理：激光点云的空间关系反映了地形表面的空间变化，任何一个复杂的空间曲面，其局部面元可利用一个简单的二次曲面拟合

$$Z_i = f(X_i, Y_i) = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i^2 + a_4 X_i Y_i + a_5 Y_i^2 \quad (6.7)$$

当局部面元小到一定程度，甚至可以将该局部面元近似表达成一个平面

$$Z_i = f(X_i, Y_i) = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i \quad (6.8)$$

2. 算法步骤

- 选择初始地面种子点。选择局部最低的三个点作为种子点（图6.4a）。
- 进行初始平面拟合（图6.4b）。
- 基于平面拟合方程判别邻近激光点。当拟合点数达 6 个时，改用二次曲面方程进行地形拟合（图6.4c）。
- 基于二次曲面方程进行地面点的迭代判别，并不断更新地形曲面，完成 LiDAR 点云的滤波（图6.4d）。

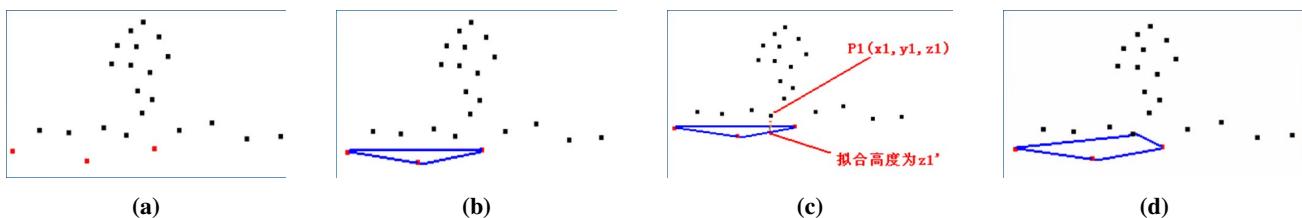


图 6.4 移动曲面滤波算法

3. 难点：该算法的难点在于种子点的选择以及滤波阈值的确定。种子点选择不恰当会使得曲面迭代拟合结果陷入极值，无法得到正确结果；同时滤波阈值需要根据地形起伏自适应地变化，否则难以取得较好的效果。

基于 TIN 加密的点云滤波方法

1. 原理：

- 获取一定的地面种子点组成初始的稀疏不规则三角网；
- 对各点进行判断，如果该点到三角面的垂直距离及角度小于设定的阈值，将该点加入地面点集合，实现 TIN 的不断加密。
- 重新计算不规则三角网，然后再对非地面点集合内的点进行判别。
- 如此迭代，直到不再增加新的地面点，或者满足给定条件为止。

2. 过程：

- 采用逐级内插
- 逐步迭代，由粗到细的内插方法。
- 迭代条件：
 - 点与三角形的夹角不能大于一定的限度。
 - 点与所在三角形的距离不能大于一定的限度。

3. 种子点选取思路：建筑物一般不会覆盖较大的区域（譬如： $80m \times 80m$ ）。这个范围内的低点一般是地面点。

4. 难点：

- 需要先将低的噪声点去除，否则会造成没有点可以选入的情况。
- 对于低矮植被不容易去除。
- 对于陡峭的小山坡也会发生错分的情况。

其他滤波算法

1. 基于数学形态学滤波方法
2. 基于 TIN 的改进滤波方法
3. 基于区域增长的点云滤波方法

6.1.3 DEM 生成

DEM 内插 地面空白填补滤波之后产生了一些空缺点，如房屋顶点滤除后，应补上所在位置的高程。

1. 反距离权重法 (inverse distance weighting)

$$f(P) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^{-u} Z_i}{\sum_{i=1}^n d_i^{-u}} & \forall P_i, d_i \neq 0 \\ Z_i & \exists P_i, d_i = 0 \end{cases} \quad (6.9)$$

2. 多项式插值法 (interpolating polynomials)

3. 最近点插值法 (Nearest Neighbor)

4. 克立格插值法 (Kriging)

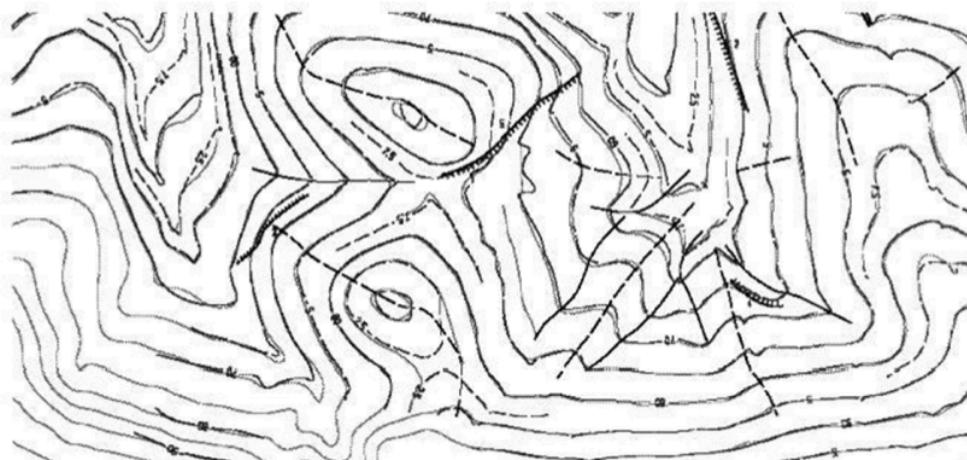
不同的插值方法对应不同的插值精度以及插值效率，也适用于不同的插值用途。

DEM 模型

1. 规则格网模型：根据生成 DEM 的要求，如范围、间距等，由邻近地面点的位置（即 (X, Y) 坐标）内插规则格网点上的高程才能最终产生 DEM。
2. 不规则三角网模型 (TIN)：直接基于离散地面点构建 Delaunay 三角网。
3. 混合模型：规则格网 + TIN。在地形变化小的地方采用低分辨率的规则格网，在地形变化大的地方用 TIN。

6.1.4 精度分析

叠加对比分析 如图6.5所示，由激光扫描数据生成的等高线（浅色）；由摄影测量方法生成的等高线（深色）。



Contour lines derived from the laser scanner points (light), contour lines photogrammetrically determined (dark) and geomorphologic structure lines (black). In some regions (e.g., lower left), there are no photogrammetrically derived contours due to ground coverage by vegetation.

图 6.5 叠加对比分析

抽样统计分析 选择植被较少或没有植被的平坦地区作为检查区域，与差分 GPS 测量结果进行比较，得到高程残差统计图。如图6.6所示。

LiDAR 的优势

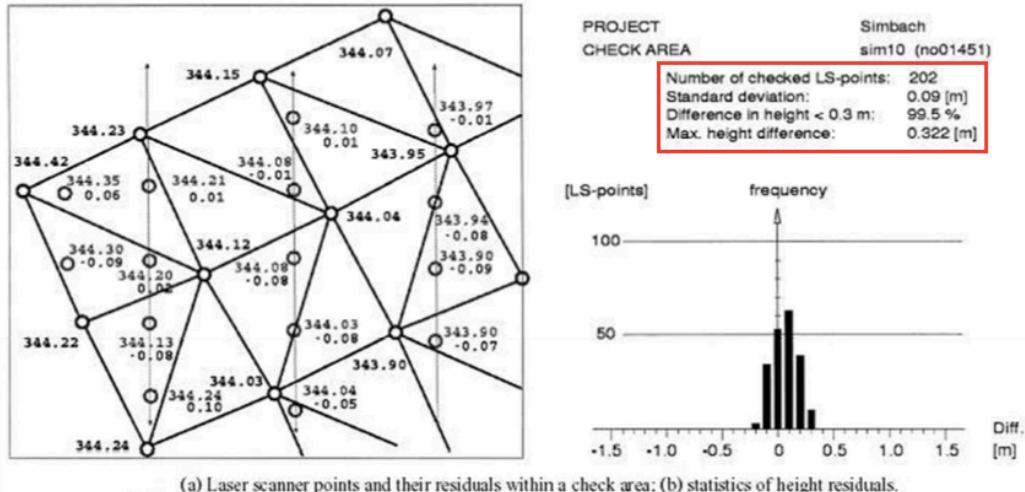


图 6.6 抽样统计分析

- **费用成本低：**与摄影测量方法比较，所需费用只是其 25%~33%，节省了山区林地地面实测的费用、内业处理的费用等。
- **限制条件少：**飞行季节、时间、天气的限制较少。
 - 冬季也可以进行，既便有雪也无碍；
 - 白天黑夜都可以工作；
 - 在阴天，云下飞行扫描同样有较好的结果。

建议

- **时间：**最好在 11 月到第二年三月间进行；
- **天气：**最好选择无雪、无雨的日子；
- **参量：**飞行和扫描参量根据各种不同需要，在飞行前要认真讨论确定；扫描点的分布要尽可能有规律；对于 10 m 格网间距高程精度要求数分米的 DEM，平均扫描点距不要超过 5m。
- **基站：**用于 GPS 差分处理，对于提高精度非常重要；
- **检测区域：**要选择平地或斜地，植被复盖尽可能少，量测点密，量测精度要优于 1 dm；
- **检测：**95% 的点的精度优于 3 dm 的情况下才算合格。

6.2 强度数据处理

商用 LiDAR 系统在获取三维位置坐标信息（距离）数据的同时都可以记录下各激光脚点反射的回波信号的强度信息。由于强度信息的本质同传统的光学影像是一样的，大多数学者倾向于采用传统的数字图像处理的方法来处理。

6.2.1 强度数据特点

1. 噪声大
2. 未定标
3. 与距离信息同时获取

4. 与光学影像相似

6.2.2 强度数据校正

LiDAR 系统记录的强度值与接收回波信号能力成正比，因为为了使得强度值真实反映目标的反射特性，必须去掉距离、瞬时角度以及大气和传感器参数等外部影响。

依据激光雷达方程

$$P_r = \frac{\eta_o \rho T_a^2 A_r}{\pi R^2} \cdot \frac{A_i}{A_b} P_t \quad (6.10)$$

式中， P_r 是激光雷达接收到的激光功率； P_t 是光学系统效率； ρ 是目标表面反射率， T_a 是单程大气透射率， A_r 是光学系统有效接触面积， R 是目标与激光雷达的距离； A_i 是目标被照面积（截面积）； A_b 是目标处的光斑面积。经推导得到

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho}{4 R^2} \cos \theta_i \eta_{sys} \eta_{atm} \quad (6.11)$$

式中， θ_i 为瞬时角度， η_{sys} 为系统发射因子， η_{atm} 为大气影响因子。

可借助接收功率与距离、角度等比例关系进行强度校正！

6.2.3 强度图像生成处理

1. 重采样：将时间序列的数据转换为规则格网数据阵列，每个像素值代表该点对应的回波强度值。
2. 去粗差
3. 去噪：LiDAR 强度信息存在着较严重的噪声，噪声中的主要成份为脉冲噪声（椒盐噪声），其概率密度函数 (PDF) 一般为指数密度分布和伽马密度分布。这种噪声为乘性噪声，与信号相关，本质上是非线性的，难以去除。
 - 中值滤波去噪：常用的非线性滤波方法。中值滤波对脉冲干扰及椒盐噪声的抑制效果好，在抑制随机噪声的同时，造成边缘模糊程度小。
做法：对一个滑动窗口内的所有像素灰度值排序，用中值作为窗口中心像素输出值的处理。
 - 针对城区 LiDAR 强度数据的去噪
 - 基于平坦度的 LiDAR 强度图像去噪：适用非城区数据处理。

6.2.4 应用案例

结合 LiDAR 强度和距离信息实现道路的自动提取。

6.3 基于 LiDAR 数据的建筑物提取

建筑物提取的方法

1. 基于光学影像的方式
 - 利用单幅影像阴影分析的方法，或直接通过边缘检测获取建筑物边界的方法。
 - 利用立体像对进行人工判读（模拟及解析测量的成图方式），提取建筑物的方法；或利用数字摄影测量工作站进行半自动或全自动的建筑物提取。
2. 基于 LiDAR 点云的方式：基于 LiDAR 点云进行建筑物提取即模型重建。

- 建筑物检测（分割）
- 建筑物模型生成（重建）

两种提取方法的不同 基于影像的建筑物提取方法与基于 LiDAR 的建筑物提取方法的不同之处如表 6.2 所示。

表 6.2 建筑物两种提取方法的不同

比较内容	基于影像	基于 LiDAR
建筑物的信息不同	影像信息具有丰富的语义信息，可以判定建筑物的存在、结构和性质。但是城市建筑物的屋顶在影像中通常 是纹理频发的区域，且由于投影差的影响，通常难以准确匹配，即使能够匹配，其精度也比较低。	LiDAR 可以直接得到较为密集的屋项离散点数据，容易通过高程将建筑物与同材质的地而区分
提取策略不同	摄影测量方法形成建筑物模型周期长，代价大。利用航空立体相对获取建筑物的方法，是通过获取点、线、面特征，再得到三维模型，可以看做是自下而上的处理流程。	利用 LiDAR 的建筑物模型生成通常采用建筑物拟合生成。通过整体的建筑物数据逐步细化每一个屋顶模型，可以看做是自上而下的方法。
主要误差源不同	一般影像中建筑物的特征容易受到各种光照情况的干扰，如：阴影、屋项的涂料颜色等。	LiDAR 数据是高程数据，不受光谱信息的干扰，精度较高。其主要问题在于边缘处可能没有信息，造成建筑物边缘的提取误差。
处理方法不同	基于影像的建筑物提取和建模方法，经过几十年的发展，已经比较成熟，有较为固定的流程和算法。	基于 LiDAR 数据的建筑物提取和建模方法还在不断摸索中，还没有很成熟的流程和方法。

6.3.1 建筑物检测（分割）

分割 由激光扫描数据建立房屋模型，首先必须将房屋点从点云数据中识别、提取出来。

一般步骤

1. 检测出建筑物激光脚点数据
2. 确定各建筑物激光脚点所属的建筑物，即建立多对一的映射关系。

现有分割方法

- 在数据密度足够大，地面起伏不大的情况下，可采取局部极值检测方法，并以极值点为中心进行局部直方图分析，得到合理的阈值，实现房屋点的检测。
- 采取滤波方法来辅助建筑物的提取。滤波是为了滤除非地面点，可用于房屋点的提取。
- 利用激光扫描回波强度数据，作为分析房屋的辅助数据。如对于近红外激光，植被的反射率很高，可以用来区分房屋和植被，但这种反射率数据质量一般较差。
- 利用辅助数据源：

- 利用二维 GIS 信息，即利用已有的图形数据，辅助建筑物数据的提取。但需要注意实际的屋项面常常比图形数据所显示的面积要大。
- 利用影像光谱信息，现有的 LiDAR 系统在飞行时，会同时载有多光谱和高光谱扫描仪，其影像数据将大大有利于房屋的提取。

涉及的处理方法：高度直方图分析、形态滤波等方法、房屋最低高度阈值、最小屋顶面积等：

6.3.2 建筑物模型的生成（重建）

任务 提取矢量化的建筑物模型。

现状 虽然 LiDAR 提供了丰富的建筑屋项面¹的信息，但是，由于建筑物结构复杂，自动化程度较高的建筑物模型重建算法、商用软件并没有出现。

建筑物提取的典型方法

- 基于三角网的房屋模型重建方法
- 基于不变矩的建筑物提取方法
- 自适应迭代的 DSM 影像分割方法
- 基于边界表达的建筑物模型重建方法
- 其他：基于特征线的数据驱动方法、Hough 变换以及其扩展变换、模型驱动的方法……

基于三角网的房屋模型重建方法

1. 分割建筑物点，并构建三角网
2. 分析三角面元，确定屋项平面。
 - 对每一个小三角平面都可以根据三个定点的坐标，计算出两个坡度参量 S_x 、 S_y 和一个距离参量 d ，因为每一个平面可由下式描述

$$Z = S_x X + S_y Y + d \quad (6.12)$$

- 计算出所有小平面的上述参量，形成一个三维参量聚类空间，参量相同的小平面在同一个屋项面内。
3. 提取边界线。将各个屋项面参量求解出来之后，就可以提取边界线和屋脊线。如果有多条脊线，则最长的脊线代表房屋的主方向。
4. 进行边界优化和拟合

(a) 前提条件：

- 边缘线与代表房屋方向的屋脊线平行或垂直；
- 主方向的边缘点应当是高程等值点。

(b) 拟合流程：对分割后数据集中处于边缘上的点进行分析：

- 从其中任意一点出发，找到相邻点之后即初步估计出连线的方向，计算出连线的直线方程。
- 按该直线方向与房屋走向的关系进行调整，后续点根据它与该直线的距离是否超过某一阈值，决定它是否为该直线方向的边缘点，当超过阈值就是另一条边缘直线的开始点。
- 对于初步的搜索结果通过最小二乘拟合进一步优化，使所有边缘点到边缘线的距离平方和最小。

¹屋项面虽然仅仅是建筑物模型的一个重要部分，但几乎所有的建筑物模型重建研究都集中于屋项模型的重建。

- 拟合结果并非边缘线的真正位置，因为边缘线应当将所有边缘点都围在所形成的多边形内，要尽可能使边缘点处于边界内。

可以利用墙面点信息，对边缘线位置作一点调整，墙面点信息是被分割的屋顶点集以外的点，有助于屋顶边缘线的确定，也有助于计算墙面高度。

利用不变矩提取房屋模型

- 对于连续函数，矩的定义

$$M_{ij} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} x^i y^j f(x, y) dx dy \quad (6.13)$$

LiDAR 数据是离散数据，分割之后，按分割的子集分别计算其矩，并以高程值作为权重，则矩的定义

$$M_{ij} = \sum_{p=p_i}^{p_n} x_p^i y_p^j H_p \quad (6.14)$$

H_p 为子集 p_1, p_2, \dots, p_n 中某点的高程。

不变矩是各坐标重心化之后，相应于个子集重心的矩。

- 平移不变矩
- 比例不变矩
- 旋转不变矩

对于灰度化的数据， $H_p = 1$ ，可以得到二值矩 m_{ij} 定义如下

$$M_{ij} = \sum_{p=p_i}^{p_n} x_p^i y_p^j \quad (6.15)$$

注意：房屋的参数必须由归一化矩计算得到，即与除以 m_{00} 进行归一化处理。

- 房屋类型的确定：可以通过比较带高程权重的二阶矩与灰度化二阶矩得到，即

$$r_q = \frac{M_{20}/M_{02}}{m'_{20}/m'_{02}} \quad (6.16)$$

- 若 $r_q = 1$ ，则屋顶为平面；
- 若 $r_q > 1$ ，则屋顶面与房屋主轴平行；
- 若 $r_q < 1$ ，则屋顶面与房屋主轴垂直。

- 一般步骤

- 房屋点的分割
- 确定房屋特征参数与不变矩函数关系式
- 计算不变矩，导出房屋特征参数
- 利用房屋点及特征参数，计算房屋特征点坐标，并重建房屋模型。

- 不变矩的方法常用于计算具有平面或人字形屋顶的房屋的参数。其他屋顶类型的确定需要计算更高阶的矩。更高阶的矩还可以检测屋顶的不对称性。

- 不同屋顶类型的处理方法

- 不对称屋顶：首先利用矩确定标准的人字形屋顶类型：然后根据实际点云与标准模型之间的差异，将其他点（烟囱、天窗、天线等）分割出来：最后进一步利用不变矩来分析，提取其参数。
- 复杂屋顶：将屋顶分割为多个单元，如基元屋顶，然后分别提取这些基元屋顶的参数：
- 底面形状非矩形的屋顶：不推荐采用高阶不变矩分析的方法来确定其模型。

自适应迭代的 DSM 影像分割方法

1. 处理流程

- | | |
|---------------|------------------|
| (a) 城市 DSM 数据 | (h) 边界点的分组和拟合方位角 |
| (b) 中值滤波平滑 | (i) 确定或给定建筑物主方向 |
| (c) 图像阈值分割 | (j) 建筑物各边缘线段规格化 |
| (d) 提取建筑物的边界 | (k) 边缘规格化效果评价 |
| (e) 建筑物边界跟踪 | (l) 计算建筑物的高度 |
| (f) 去除不闭合的边界 | (m) 建筑物高度填充 |
| (g) 多边形逼近建筑物 | (n) 建筑物 DSM 图像 |

2. 影像分割

3. 边缘提取

4. 边缘优化处理

5. 高度填充

基于边界表达的建筑物模型重建方法

1. 处理流程

- 建筑物检测：去除地形、树木、其他噪声
- 边缘提取
- 面特征提取
- 特征融合、模型重建

得到：阶跃边缘、屋脊线、屋顶面片。

2. 建筑物检测

3. 建筑物边缘提取：对于阶跃边缘，计算每个点邻域内 Z 坐标差异。

4. 特征直线检测：每个点分为 9 个局部方向，采用角度分解的方法，每个点投票决定直线，点对直线的贡献，由点到直线的距离决定特定。

5. 优化内容：

- 孤立点分类：点到线段的距离决定归属。
- 线段合并：将方向想尽、距离相近的线段合并为一条线段。
- 线段竞争：最优线段最长，且满足正交关系。
- 规则化：边缘垂直、平行处理。

6. 屋顶面片检测：

(a) 思路

- 屋顶面片检测的常用方法：三维 Hough 变换。缺点是比较慢，计算量大。
- 三角形向量统计方法，由于数据过于密集，三角形小，法向量对噪声十分敏感。
- 点法向量统计：用点和其邻域内的点构成的小平面代替三角形计算法向量。

(b) 面片检测顺序

- 安高程直方图进行区域增长
- 按面片法向进行面片竞争和屋脊线检测。

(c) 屋顶面的分裂与合并：消除虚假边缘，得到完整的屋顶面。

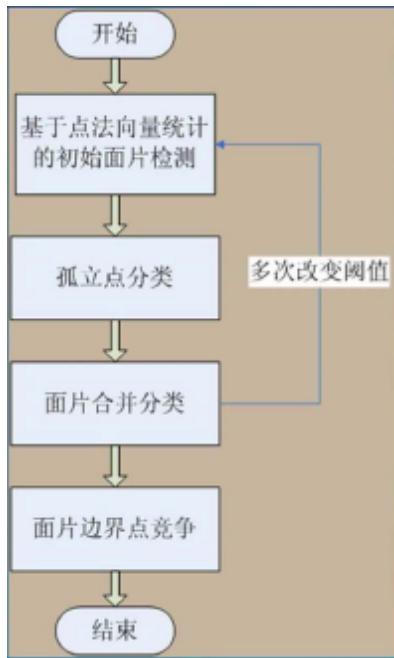


图 6.7 点法向量统计处理流程

- 分裂：充分利用已经检测到的建筑物边缘作为初始条件和约束，寻找两个不同类型的区域之间最合适的边界。
- 合并：将那些属于建筑物的同质区域合并起来，则可以形成闭合的建筑物边界多边形，这就是普通测图需要完成的一项重要工作——建筑物轮廓线生成。

合并的优先级

- 大块优先合并
- 合并朝着使对象几何特性更加规则的方向进行
- 注意边界坚固性对合并的影响，如图6.8。

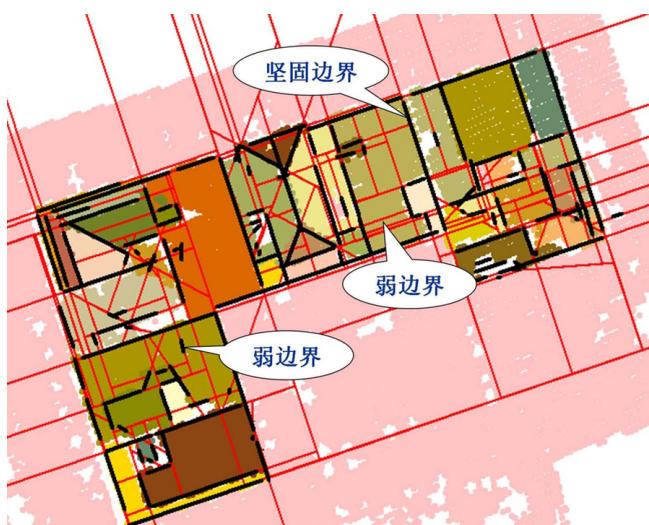


图 6.8 边界坚固性

6.3.3 三维重建质量检查

城市三维重建误差来源 如表6.3所示。

表 6.3 城市三维重建误差来源

数据处理过程		误差来源
数据源	航片资料	几何变形、灰度变形、参数精度
	待更新数据	数据精度、准确性、现势性
	DEM 数据	数据精细程度、精度
	纹理数据	纹理映射误差
	属性数据	属性逻辑错误、完备性
生产过程	早期数据纠正	自己准精度、定向精度
	数据采集	仪器、人员、定向精度、采集方式
	数据建模	数据格式转换
	数据编辑	编辑原则、编辑方法、操作人员

三维重建质量检查 从三维重建的角度来看，三维模型检查主要包括几何模型检查和拓扑结构检查。

1. 几何模型的检查：将建立的三维模型跟立体像对中的立体模型进行比照，检查三维模型几何结构的正确性，并确定精度超限需要重新量测的地物。实践中可以按点、线、面与体的不同层面来检查其模型结构的正确性。对应不同的层面其检查方式和检查内容也有区别：

- 点检查：主要是检查平面位置是否正确、同高的点是否同高。
- 线检查：主要是检查地物边缘垂直、平行条件是否满足。如房屋边缘大部分表现为垂直与平行结构，但在实际量测过程中一般难以满足。当前普遍采用的方法是对不满足垂直与平行结构的部分，使用格网功能进行编辑改正。
- 面检查：主要是检查面结构是否合理，共面误差是否满足给定的限度。
- 体检查：模型高度是否正确，组合是否完整，几何结构是否合理。

2. 拓扑结构检查：遍历三维模型并与影像对中的立体影像对照，检查三维模型的拓扑结构是否正确，其主要内容包括：

- 目视检查：根据立体模型检查所建立的三维模型在视觉上是否与立体影像在主要结构特征上一致。
- 冗余面检查：检查是否存在破坏面完整性的冗余面。
- 外拓扑检查：复杂房屋及其附属设置间的拓扑关系。

质量控制策略

1. 生产过程的质量约束

2. 误差补偿

- 自动补偿：通过数学方法对系统误差和随机误差的不确定因素进行模拟估计从而进行补偿。
- 人机互补补偿：对不能用数据方法模拟的随机误差，利用误差检测算法检测超限模型采用人机交互进行补偿的方法。

6.4 基于 LiDAR 的道路提取

6.4.1 道路特征及道路提取

城市道路的主要特征

- 几何 (Geometric) 特征
- 灰度/辐射 (Photometric) 特征
- 拓扑 (Topologic) 特征
- 功能 (Functional) 特征
- 上下文/关联 (Contextual) 特征

道路提取方法

- 基于影像的道路提取方法
 - 低分辨率道路检测
 - 高分辨率道路检测
 - 多尺度道路检测
- 基于 LiDAR 数据的道路提取方法
 - 直接基于 LiDAR 数据
 - 结合辅助数据
 - 结合 GIS 数据库信息
 - 结合高分辨率影像

道路特征提取 包括道路中心线、道路轮廓线以及道路宽度的提取等。

- 预处理：形态学闭操作。
- 道路中点的检测：细化处理。
- 道路中线提取：基于多尺度的道路中线追踪。

道路提取评价指标

1. 完整度指标 (Completeness)

$$R_{\text{Completeness}} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6.17)$$

2. 正确度指标 (Correctness)

$$R_{\text{Correctness}} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6.18)$$

3. 遗漏度指标 (Miss)

$$R_{\text{Miss}} = \frac{FN}{TP + FP} \quad (6.19)$$

4. 冗余度指标 (Redundance)

$$R_{\text{Redundance}} = \frac{FP}{TP + FP} \quad (6.20)$$

5. 总质量指标 (Quality)

$$R_{\text{Quality}} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (6.21)$$

6.4.2 基于 LiDAR 点云的道路特征提取

6.4.2.1 基于点云高程与强度约束的多尺度道路提取

提取流程图 如图所示。

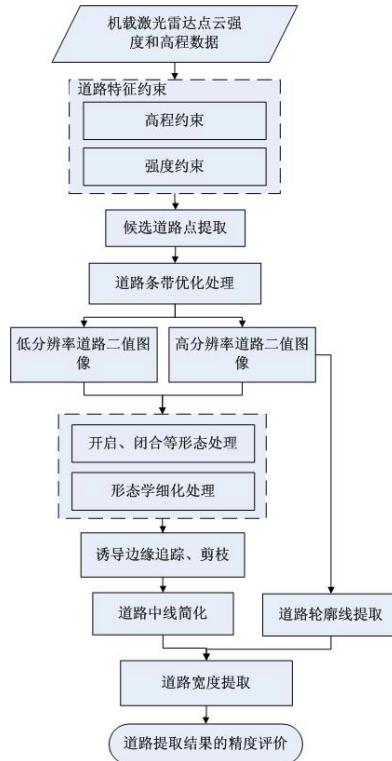


图 6.9 基于点云高程与强度约束的多尺度提取流程

高程约束

$$S_1 = \{Z_k \in S \mid \forall Z_k : Z_{\min} < Z_k < Z_{\max}\} \quad (6.22)$$

提取结果如图6.10b所示。

强度约束

1. 预处理:

- 粗差剔除
- 平滑处理

2. 强度约束公式

$$S_2 = \{I_k \in S_1 \mid \forall I_k : I_{\min} < I_k < I_{\max}\} \quad (6.23)$$

处理结果如图6.10c

道路条带优化处理

- 基于密度的孤立噪声点剔除

$$S_3 = \{D_k \in S_2 \mid \forall D_k : D_{\text{th}} < D_{(k,r)}\} \quad (6.24)$$

- 基于面积的孤立区域剔除

- 点云拓扑关系构建

- 区域连通性分析
- 面积阈值分割

处理结果如图6.10d

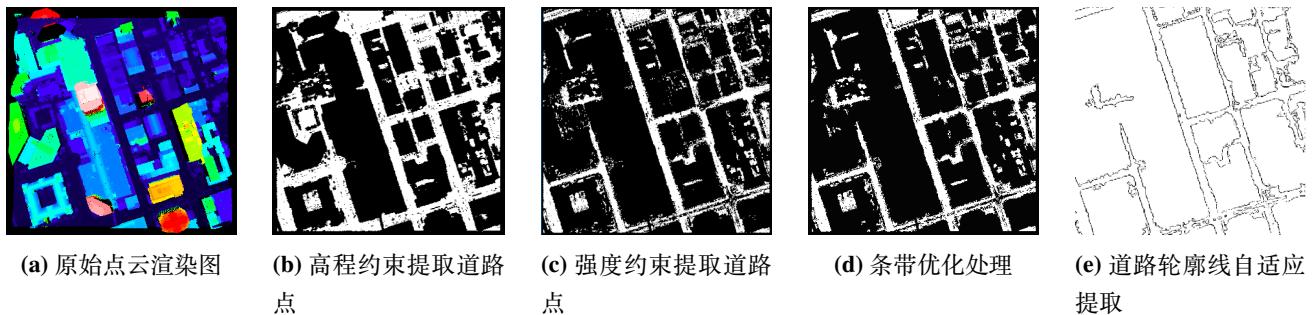


图 6.10 基于点云高程与强度约束的多尺度提取

道路曲线简化处理 Douglas-Peucker 算法

1. 第 1 步到第 2 步的结果, C 为最远点 (图6.11a)。
2. 第 3 步到第 2 步的结果, 上一步的 C 现为 B (图6.11b)。
3. 为简化的结果, 其中, d 为距离阈值 (图6.11c)。

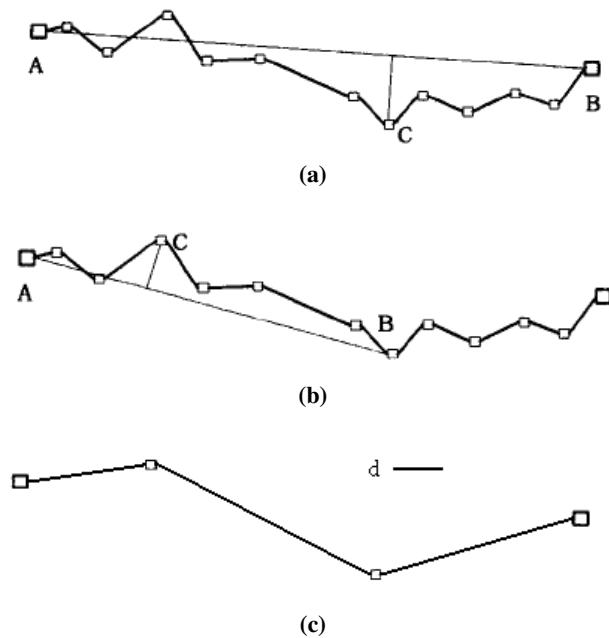


图 6.11 Douglas-Peucker 算法

道路轮廓线的自适应提取

6.4.2.2 基于相位编码圆盘的道路提取方法

基本步骤

- 基于高程的道路点约束提取 (常采用滤波处理)
- 基于强度的道路点约束提取

- 基于数学形态学、相位编码圆盘的道路特征提取

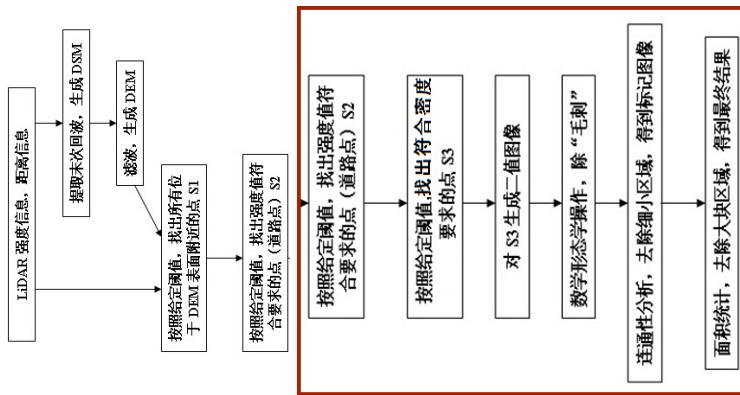


图 6.12 基于相位编码圆盘的道路提取方法步骤

提取道路特征矢量线

- 利用相位编码圆盘 (图6.13a) 与之卷积

$$Q(x, y) = f(x, y) \otimes O_{\text{PCD}}(x, y) \quad (6.25)$$

其中, $O_{\text{PCD}}(x, y) = e^{j\gamma(x, y)}$, $\gamma(x, y) = 2 \tan^{-1}(y, x)$ 。

- 经过卷积可以得到幅度图像 (6.13c) 和相位图像, 进一步可以得到道路的特征矢量线

- 幅度图像的计算

$$M = |f(x, y) \otimes O_{\text{PCD}}(x, y)| \quad (6.26)$$

- 相位图像的计算

$$\varphi = \frac{1}{2} \arg(f(x, y) \otimes O_{\text{PCD}}(x, y)) \quad (6.27)$$

- 道路特征矢量线的生成

- 道路中心线: 连接道路中心线段, 形成道路网 (图6.13d)。
- 道路双边线: 以中心线为标准, 半路宽为距离作平行线 (路宽可由卷积算法自动导出)。

提取效果 如图6.14所示。

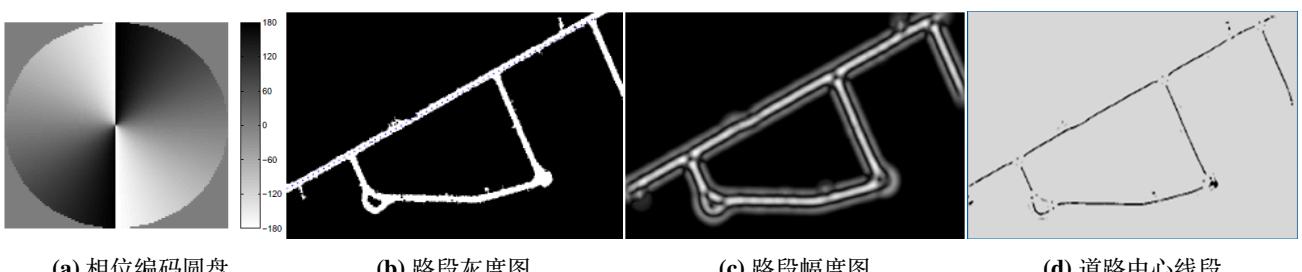


图 6.13 利用相位编码圆盘提取道路特征矢量线

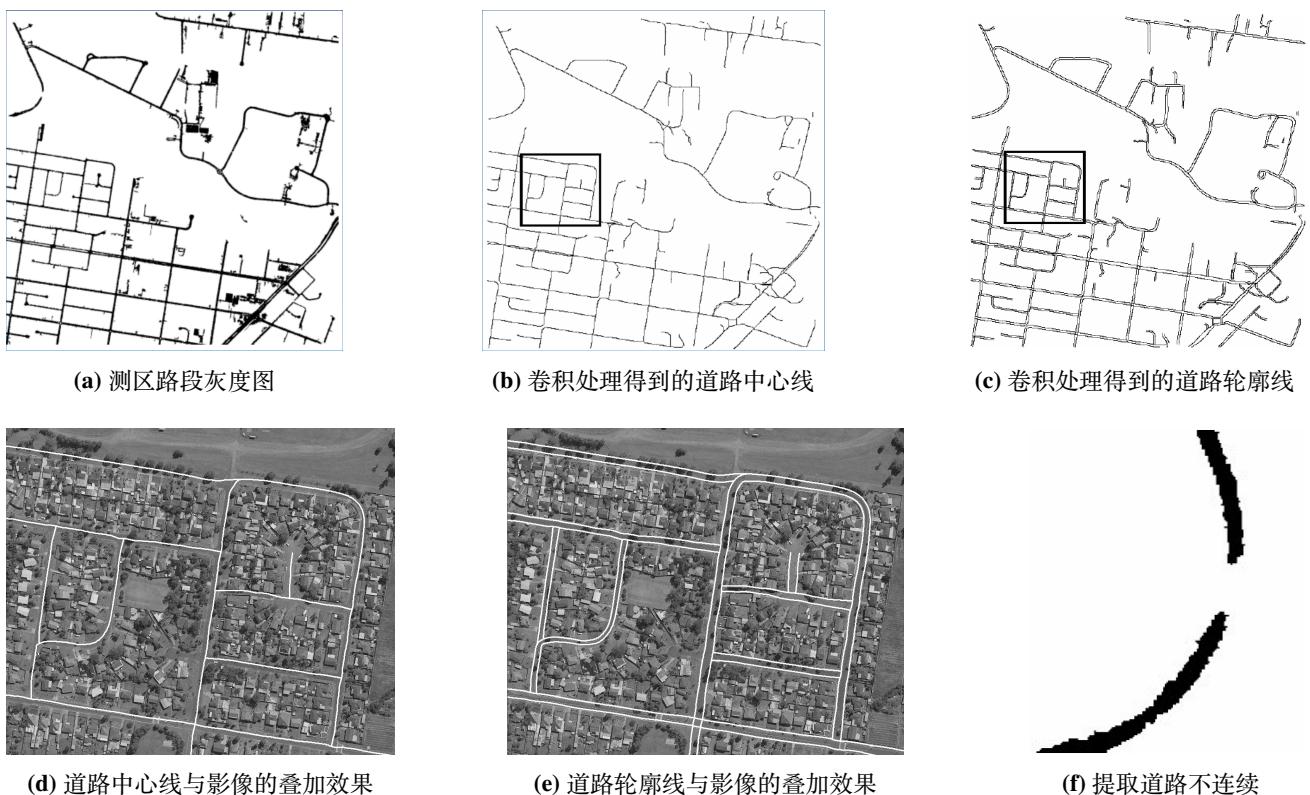


图 6.14 基于相位编码圆盘的道路提取方法效果

6.5 分类、变化检测及波形处理

6.5.1 LiDAR 点云分类

地物目标分类 基于不同地物目标在遥感数据中表现不同的特性，采取合适的判别方法（函数），将其划分为不同的类别，制作成专题图，供用户使用。

分类算法的通用性：设计分类算法时，首先要确定各种对象的定义，这些定义要尽可能地一般化（通用）——能较好地适应大多数的地貌。

目标对象的定义 如图6.15所示。

- 地貌：裸露地面及地面上对象构成的场景
- 裸露地面：分段连续、光滑的曲面
- 地面上对象：自然对象、人造对象
- 分离对象
- 附着对象：桥梁等
- 局外对象：系统误差、远离地貌的对象

地物点数据的几何特点

1. 建筑物的几何特点：沿一条扫描线分析

- 建筑物顶面多是平面，在一条扫描线中表现为一条直线，数据的二阶导数应当为零。
- 屋脊线或屋顶面交线处，二阶导数不为零。

对于一般建筑物，沿扫描线的几何模型可以表示为：若某点处 $\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = 0$ ，则该点为线段中点；若

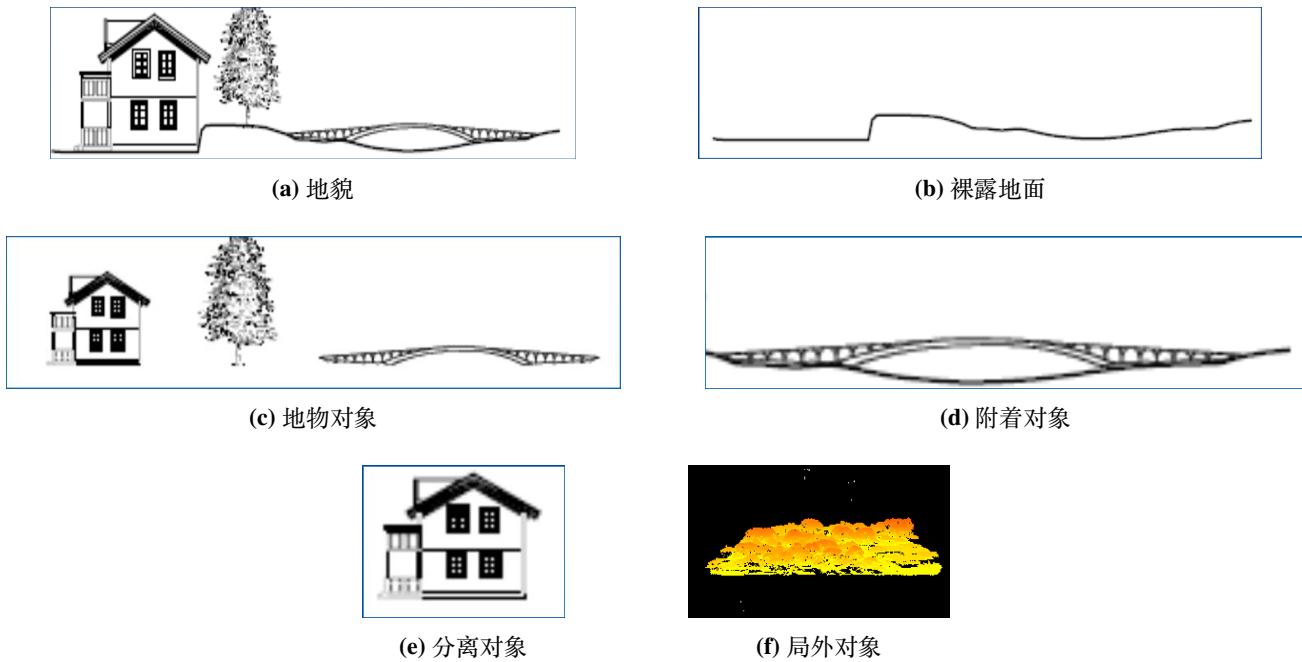


图 6.15 LiDAR 数据中的对象

$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \neq 0$, 则该点为直线间断点。其中, x 是沿扫描线方向的坐标, Z 表示高程。

2. 植被数据的几何模型: $\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \neq 0$ 且二阶导数值连续随机分布。
3. 电力线: 电力线和植被都具有多重回波特点, 因此在分析时还需借助回波强度信息, 因为它们的回波强度不同。

此外, 要保证分析结果的正确性, 得到初步结果后, 还需要根据电力线彼此平行, 及每一根电力线上各点形成线性结构的特点, 采取 Hough 变换分析方法, 以准确地提取电力线。

LiDAR 数据分类依据 LiDAR 的数据源有: 高程数据、强度数据、同步采集的数码影像。利用这些信号针对不同地物制定约束规则, 逐步将地物区分开来。

- 高程突变信息;
- 地物几何特征;
- 强度信息;
- 多次回波信息(波形信息);
- 影像光谱信息。

LiDAR 分类规则

1. 局外对象: 明显高于或低于周围的环境
2. 裸露地面:
 - (a) 基于连续、光滑的裸露地面的定义假设:
 - 在水平邻域内, 裸露地面点的高度限定在一定的范围内
 - 裸露地面点的梯度、曲率限定在一定的范围内
 - 裸露地面在局部和全局上都是相对平坦的
 - (b) 基于分段连续、光滑的裸露地面定义的假设: 裸露地面点及其 k 近邻所表达的局部曲面片是

相对平坦的。

3. 植被：

- 表面较粗糙；
- 多次回波间存在高度差，在同平面位置(X, Y)处由多重回波得到几个高度值。

4. 建筑物：

- 垂直突出于裸露地面之上
- 占据一片连续的区域
- 除了部分建筑物边缘，其它部分均不反射多重回波。根据这个特性有可能区分植被和建筑物。

5. 电力线：电力线一般有两次回波

- 激光照射电力线后，被电力线反射形成回波。
- 一部分激光绕过电力线照射到地面，形成二次回波。

地物的强度信息 虽然激光脉冲的反射强度受不同因素的影响，包括回波总数，目标的材质以及脉冲的入射角等。但有研究表明强度数据可以辅助地表目标的分类。

影像特征辅助点云分类

- 尽管 LiDAR 数据能够直接获得目标的空间三维点云，对于区分垂直方向特征明显的地物（例如房屋、高大植被）具有极大的优势，但是却难以区分物体表面的材质和结构差异。
- 光学遥感影像提供了丰富的、水平连续的光谱信息，但获取的主要是地物表面的信息，有些地物（如建筑物和水泥地）的异物同谱和同物异谱现象突出，仅靠光学影像信息分类，困难较大。
- 针对不同传感器的优点和局限性，将多源数据融合以弥补单个数据源的局限性是一个非常重要的研究方向。

6.5.2 变化检测

变化检测

- 广义变化检测：根据不同时间的多次观测来确定某个物体的状态变化或确定某现象的变化发展过程。
- 遥感影像变化检测：利用多时相获取的覆盖同一地表区域的遥感影像及其它辅助数据来确定和分析地表变化。

地物几何变化的表现形式 如图6.16所示。

- 出现或消失
- 大小或形状发生变化
- 空间位置发生变化
- 多种变化形式的组合

变化监测的主要内容

- 检测和判断是否发生了变化；
- 标定变化发生的区域；
- 确定变化的性质（对于多时相数据，也称变化的轨迹）；
- 评定变化检测结果的精度；
- 评估变化的时间和空间分布模式。

变化监测方法分类

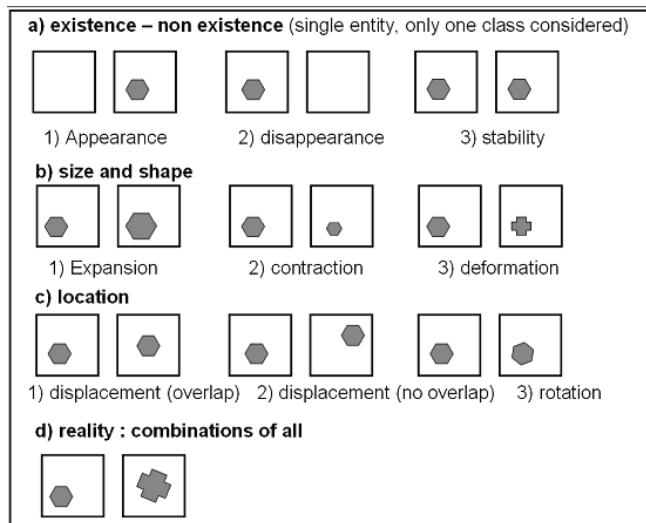


图 6.16 地物几何变化的表现形式

1. 基于影像的变化检测：根据遥感信息灰度值的变化而进行检测。

- 分类后比较：先对不同时相的原始影像分别进行分类解译，然后比较各时相分类结果图来发现变化，同时确定变化类型。其过程如图6.17所示。

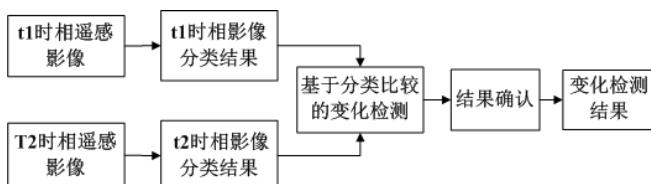


图 6.17 分类后比较

- 直接比较：直接比较同一位置上不同时相的像元特征值来检测变化，通常是先采用数学变换的方式生成不同时相间的差异影像，再对差异影像进行阈值化处理，从中提取变化区域。其过程如所示。

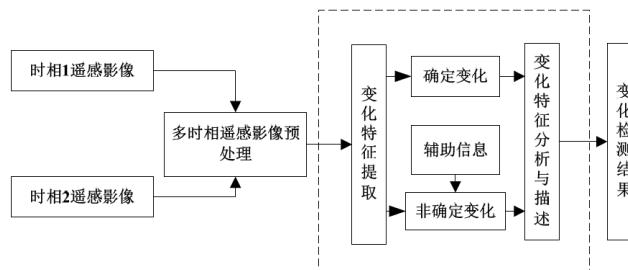


图 6.18 直接比较

- ### 2. 基于高程的变化检测：宫鹏曾使用数字摄影测量工作站和加利福尼亚州丘陵区及佛罗里达州滩涂区的多时相航空摄影立体像对，构建数字表面模型，用以测量河沟侵蚀、河道窄化和深切以及海岸带滩涂地带盐沙地的移动，精度达到 1 m 以内。这种方法的自动化程度很低，主要是人工对于正射影像和数字高程模型产品的研究和比较。



图 6.19 基于高程的建筑物变化检测流程

基于变化检测实现城市空间信息数据库的更新

- 采用人工判读航片方式，精度高，但周期长、代价大。
- 基于影像灰度的变化检测方法，结果可靠性有待提高，且难以检测高程方面的变化；
- 基于立体像对进行高程变化检测的方法：虽然技术上已十分成熟，但对于城市地区，房屋密度比较大，影像匹配常常失败。
- 适宜采用 LiDAR 数据的变化监测

6.5.3 数码影像处理

LiDAR 系统的数码影像 主要目的是为 LiDAR 点云数据提供辅助的光谱影像信息，帮助获得纹理和分类的信息；存在着光谱影像与激光点云的配准问题；LiDAR 系统中的数码相片经过解算后，得到与点云数据一致的坐标。一般将影像结合点云 (DSM) 数据，制作真正射影像 (True Ortho Image)。

真正射影像：真正射影像和正射影像的差别，体现在建筑物的纠正上，由于 DEM 没有建筑物的高度信息，在纠正时只能按照地面的高度进行纠正，造成了一定的偏差，采用具有建筑物信息的 DSM 就不存在这个问题，能够得到正确的投影位置。

真正射影像纠正原理 如图6.20所示。

数字正射纠正的两种方式 如图6.21所示。

- 反解法（间接法）：从纠正后影像的像点出发，反求其在原始影像上像点坐标的方法。
- 正解法（直接法）：从纠正前原始影像的像点出发，计算纠正后该像点的坐标的方法。

存在的问题

- DSM 精度不高，导致影像质量下降。
- 有的地区缺少纹理。
- LiDAR 点云有空缺。
- 点云与影像配准的问题。

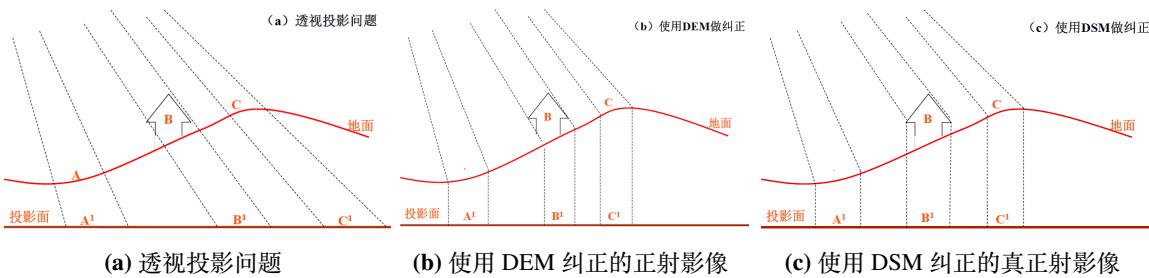


图 6.20 真正射影像纠正原理

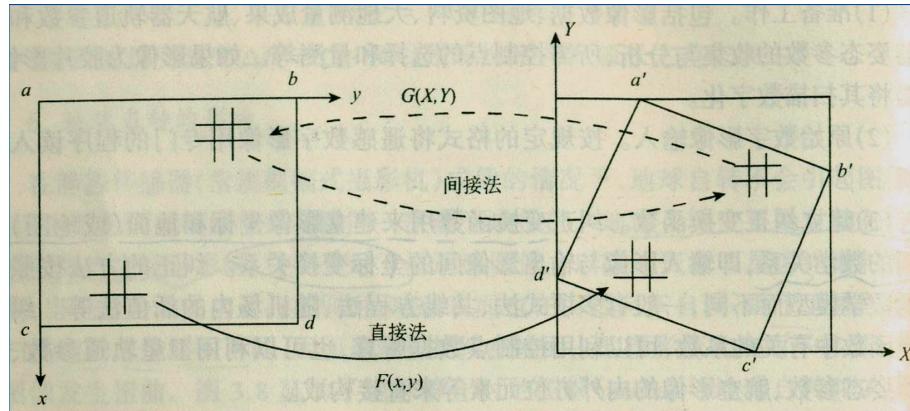


图 6.21 数字正射纠正的两种方式

解决方案

1. 房屋边缘的问题：建筑物边缘不清晰。

原因：点云密度不足。

解决方法：DEM+DBM+ 影像。地形起伏纠正采用 DEM，建筑物纠正采用 DBM。以 LiDAR 原始点云滤波过后得到的 DEM 和数字建筑物模型 DBM 为基础，建立 TIN 结构的 DSM

2. 纹理缺失

- 遮蔽检测
- 纹理选择
- 纹理修复

6.6 波形处理技术

激光信号的特点

- 激光束及其回波信号的能量都是连续的。
- 多次回波，是将回波能量进行探测和量化之后得到的。
- 探测和量化方法不当会引起误差。

激光回波数据处理 如图6.22所示。

- 多次回波数据处理
- 全波形数据处理

多次回波数据处理 通常将首次和末次回波进行相减，这样可以得到具有多次回波信息的地物的信息。

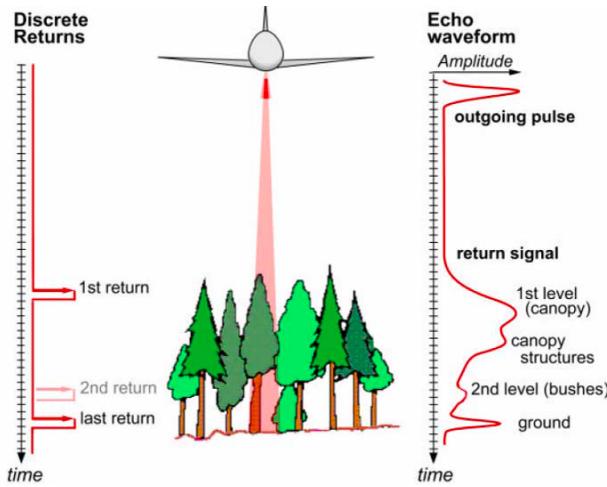
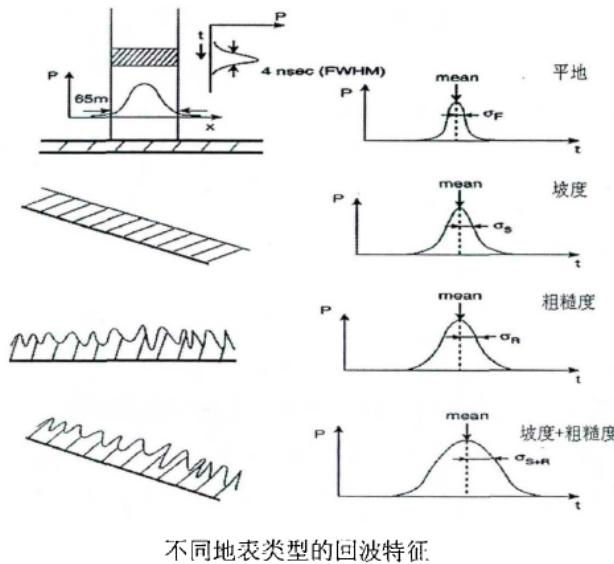


图 6.22 激光回波数据处理方法

全波形数据处理 对于激光信号还有一种不同的量化方法，即将发射信号和回波信号均以很小的采样间隔进行采样并加以记录，而不是仅仅提供若干次离散的回波信号，这就是所谓的波形数据 (full-waveform)。

1. **特点：**激光回波信号是由发射脉冲和激光光斑内的地物、地面共同决定的。地形的起伏以及地表的粗糙度对波形都有一定的展宽效应。如图6.23所示。



不同地表类型的回波特征

图 6.23 展宽效应

2. 分类

- 星载大脚印全波形数据
- 机载小脚印全波形数据
 - 可以得到更多数量的激光脚点。
 - 可以得到更多次的回波数据。
 - 用户更了解数据采集的实际情况，可以采取更合适的方法进行解算，得到更高精度的点位坐标。

- 如果使用波形分解方法，能够得到每次地面对反射的波形，进而得到振幅（强度信息）、回波宽度、回波位置和反射系数等参数。

波形数据分解 全波形数据需要进行分解，以确定反射点（激光脚点）的位置。

1. **脉冲探测方法**: 将波形按时间进行分析和判别，直接探测回波数据的极大值点作为目标的位置。
 - (a) 阈值探测法: 将整个波形数据看作整体，采用一定的阈值（时间、面积的百分比、上升沿等）进行判断，得到不同时刻的点坐标，作为不同目标地物的位置。
 - (b) 均方差判别法 (ASDF): 认为 LiDAR 的反射波是一个混合波，该混合波由一系列的单个波组成的。这些单个波是发射波（参考波）经过时间延迟的变化得到的，这些变化包括振幅、宽度等参数。ASDF 方法使用某种标准，采用局部最优的判断方法，得到极大值点位信息

$$R_{\text{ASDF}}(\tau) = \frac{1}{N} = \sum_{k=1}^n (x_1(kT) + x_2(kT + \tau))^2 \quad (6.28)$$

2. **波形分解方法**: 通过波形分解的方法能够得到振幅（强度信息）、回波宽度、回波位置和反射系数等参数，波形数据的应用研究大多是基于这些参数的进行的。

小光斑波形数据的分解大多基于高斯分解原理的方法。这种方法认为，LiDAR 的回波波形是由若干个单一高斯函数的线性叠加而成的，这些高斯函数的振幅、峰值位置、波形宽度、峰值与峰值之间的间距等都是后续波形分析中的重要参数。

- (a) EM 算法: 将 LiDAR 的全波形数据视为一个高斯混合模型，其主要目的是找出一组高斯参数使其符合原波形的期望值，并以最大似然法 (Maximum Likelihood) 来计算这些期望值的估值。

- **原理**: 假设波形是由一系列简单的高斯分布组成，则混合分布的数学表示式为

$$f(x) = \sum_{j=1}^k p_j \times f_j(x), \quad f_j(x) \in N(\mu_j, \sigma_j^2) \quad (6.29)$$

式中， k 是高斯函数的数量（波峰数量）； $f_j(x)$ 是每个单一高斯分布的概率密度函数； p_j 是权，表示该分布在混合分布中占的比重，满足 $0 < p_j < 1$ 且 $\sum_{j=1}^k p_j = 1$ ； μ_j 是均值， σ_j 是标准差。

EM 算法计算高斯混合模型的参数最大似然估计值为

$$Q_{ij} = \frac{p_j f_j(x_i)}{\sum_{j=1}^k p_j f_j(x_i)} \quad (6.30)$$

$$p_j = \frac{\sum_{i=1}^s N_i Q_{ij}}{\sum_{i=1}^s N_i} \quad (6.31)$$

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^s N_i Q_{ij} i}{p_j \sum_{i=1}^s N_i} \quad (6.32)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s N_i Q_{ij}(i - \mu_j)^2}{p_j \sum_{i=1}^s N_i}} \quad (6.33)$$

s 是整个波形采样的个数, N_i 是每个采用 i 的强度值, p_j 是权值。

- 步骤: 在进行 EM 算法之前必须先估计高斯混合模型内的高斯函数的个数以及各函数的高斯参数的初值。
 - 确定参数初值 P_j 、 μ_j 、 σ_j 、 k 代入上述各式重新计算参数。
 - 重复上述步骤, 知道满足迭代终止条件。

(b) LM 分解方法: 最小二乘法同样假设全波形是由多个单一波线性组合而成, 且每个单一波满足高斯分布函数。必须事先给出单一波的个数, 一般先统计波形信息, 以波峰的个数决定单一波的个数。

建立高斯形态的非线性数学公式

$$w(t) = \sum_{j=1}^k A_j \exp \left[-\frac{(t - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2} \right] \quad (6.34)$$

式中, k 为波峰数, A_j 为振幅, t 为时间, μ_j 与 σ_j 为高斯函数的平均值与标准差。

对上式组成观测方程组, 待求参数为 A_j 、 μ_j 、 σ_j 。假设假设各单一波为等权且不相关, 以最小二乘法求解, 其参数解如下式

$$x = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (6.35)$$

x 为改正数, B 为系数矩阵, P 为权矩阵, L 为观测向量。

第7章 地面及星载激光遥感技术

7.1 地面激光扫描系统 (TLS)

7.1.1 地面激光扫描系统的工作原理

1. 激光扫描仪发出一个脉冲信号，经物体表面漫反射后，沿几乎相同的路径反向传回到接收器，得到目标点 P 与扫描仪距离 S ，控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值 α 和纵向扫描角度观测值 β 。
2. 一般采用仪器自定义坐标系： X 轴、 Y 轴在横向扫描面内，且相互垂直， Z 轴与横向扫描面垂直。
3. 点 P 的坐标为

$$\begin{aligned} X_P &= S \cos \beta \cos \alpha \\ Y_P &= S \cos \beta \sin \alpha \\ Z_P &= S \sin \beta \end{aligned} \tag{7.1}$$

7.1.2 地面激光扫描系统分类

1. **移动式扫描仪系统**：集成了激光扫描仪、CCD 相机、GPS 接收机以及记录系统，基于车载平台，由激光扫描和摄影测量获得三维建模的数据源的系统。
 - **应用涉及**：公路测量，维护和勘察、公路检测（车辙，道路表面，道路变形）、公路资产清查（交通标志，隔音障，护栏，下水道口，排水沟等）、结构分析（立交桥）、交通流量分析，安全评估和环境污染评估等。
 - **参数**：
 - 激光点云量测范围：≤80 m
 - 激光点云垂直方向视场角：300°
 - 定位定姿（POS）系统指标航向姿态精度：0.05°
 - 绝对定位精度：0.5 m
2. **固定式扫描仪系统**：类似于传统测量中的全站仪，它由一个激光扫描仪和一个内置或外置的数码相机以及软件控制系统组成，数码相机的功能就是提供对应模型的纹理信息。
 - **按测距原理分类**
 - 脉冲测距——基于时间漂移原理进行，大部分设备采用这种方式，扫描范围可以达到千米，但是大范围内的扫描测距，精度相对较低；
 - 相位测距——基于相位方式进行测量，主要用于中等距离的测量，扫描范围通常在 100 米范围内，与脉冲测距的时间漂移原理相比，它的精度可以达到 mm 级；

- 基于光学三角测量原理：可以得到亚毫米级的精度，主要用于工业测量和逆向工程应用中，一般只扫描几米到十几米的范围。

- 按成像方式分类

- 全景扫描仪
- 混合式扫描仪
- 摄影式扫描仪

3. 手持型激光扫描仪

7.1.3 地面激光扫描系统的应用

1. 地面景观形体测量：地面景观形体测量主要应用于测绘领域，用来获取大型景观三维数字化设计，三维测量及逆向工程、快速模具制造等方面。
2. 带状地形测量和矿山测量：地面激光的扫描距离越来越远，对获取局部带状地形区域矿山等类型的地形具有很大的优势。常用于带状地物三维建模，生成带状地形图，如测量铁路、公路、河流两岸的局部不规则带状地形图等。
3. 变形监测：相比传统形变测量方式，可以获取均匀的、高精度、高密度的变形监测对象的点云数据，用于整体变形监测。可进行隧道、隧洞、桥梁、矿山，尤其是地铁隧道和高铁桥梁的变形监测。
4. 森林和农业资源调查：可以获取表征树木的重要参数（曲直度、可砍伐性等），还可准确了解某时刻的森林现状等信息，如利用不同期的扫描数据能够获取树木和农作物的生长状况，进行森林密度、长势的统计，以及农作物病虫害和干旱情况的分析。
5. 城市三维可视化模型的建立：随着城市建筑对于精度、分辨率、时效性、仿真度需求的提高，对空间数据获取能力的要求不断增强，机载激光扫描与地面激光扫描技术的结合能够很好的完成空间数据的采集。
6. 复杂管线测量：针对油厂、油库及电厂等工厂里面管线林立，纵横交错，形状各异，用其它空间数据获取技术如摄影测量的方法，难以找到同名点并且数据处理的复杂度也非常高，其他传统的测量方法更是效率低下。
7. 古建筑与古文物的保护：TLS 的优势
 - 能够非常精确保存这些文物的详细的电子资料信息，包括空间位置、尺寸和纹理细节，并且易于保存。
 - 能够提供丰富的表面信息，随时方便地得到等值线、断面、剖面等信息。
 - 为古建筑的保护和修复、古文物的三维数字化提供有力的支持。
8. 医学和工业测量：这个领域应用的扫描仪特点是测程短，一般只有几米，精度要求比较高，一般在 1 mm 内，如 Minolta VI900，配置长、中、广三种不同焦距的镜头，测距精度高于 0.1 mm，测程为 0.6~2.5 m。
 - 医学：外科整形、人体测量、矫正手术等方面。
 - 工业：用于在线检测物体体积；检测部件质量；检测物质材料；进行目标自动导航；工业设计；

7.1.4 案例：基于 TLS 技术的古建筑三维重建

重建的必要性

- 自然因素的威胁：时间、风蚀、沙尘、雨水、地震
- 人为因素的威胁：游客、工作人员的疏忽、不法分子的盗窃、破坏

TLS 技术的优势

- 三维激光扫描技术克服了传统技术的局限性，能够对实物进行立体扫描；
- 与传统数字化方法相比，它的速度快、实时性高、精度高，可以大大降低成本，节约时间。

步骤 利用三维激光扫描点云数据重建三维模型时，由于应用对象的不同，处理过程也不尽相同。概括地讲，有以下步骤

1. **数据采集：**同时获取激光点云和数字影像。
 - 仪器（地面或机载）：如 Leica、Rigel、Faro、Optech、TopEye 等。
 - 参数指标：测距精度、测距范围、数据采样率、激光等级（波长）、扫描视场等；
2. **不同测站数据的配准和融合：**利用标靶（平面、球形、圆柱，图7.1）、基于几何特征和基于 ICP 算法，将不同站点数据配准到同一个坐标系统下。

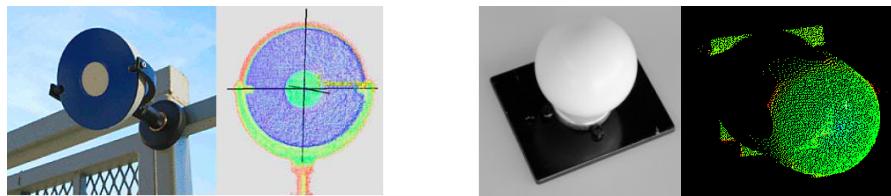


图 7.1 标靶

3. 三维模型的重建和后处理

- 利用几何约束或数学上自由曲面函数等方法进行物体曲面的重构；或基于 3D TIN 方法进行建模；
- 由于点云数据有时采集不全或存在噪声，重建后的模型一般还需要进行后处理，如补洞、平滑等。

4. 影像与激光点云的配准有时需要对模型映射真实纹理或者借助影像进行模型的精细重建

- 一般采用数码相机拍摄的真实照片作为纹理来源。
- 进行影像与激光点云的配准。

5. 纹理映射

- 前提是实现二维影像与三维模型的配准。
- 配准后，将几何模型投影到相应的照片，即可自动获取纹理坐标，并进行纹理映射。
- 将生成的模型框架输入 CAD 系统，人工补充目标的细节。

7.2 星载 LiDAR 系统

星载激光遥感系统主要应用

- 天体测绘

- 全球高程信息的采集
- 全球控制点的采集
- 环境监测的应用（极地冰盖监测、林业资源调查、大气成分和结构测量）

国内外典型星载激光遥感系统

- 用于探测气体溶胶与云层的 LITE 计划和 CALIPSO 计划。
- 用于天体测绘系统：MOLA-2 系统（火星）、Clementine 系统（月球）、嫦娥工程（月球）。
- 用于极地冰盖监测与大气成分检测的 GLAS 系统。

星载 LiDAR 数据处理及林业应用

- 星载 GLAS 波形数据处理：波形参数提取。
- 东北地区森林高度反演：基于模拟分析和 GLAS 波形数据关键参数因子计算，采用回归方程进行森林高度的反演。
- 云南森林地上生物量反演：结合机载 LiDAR 和星载 GLAS 建立星载 GLAS 估测森林生物量的模型，利用 MERIS 反射率数据和全球土地覆盖产品等遥感数据，对 LiDAR 反演生物量外推，得到的整个研究区的森林地上生物量图。

第 8 章 LiDAR 数据误差分析及处理

8.1 LiDAR 数据误差源

8.1.1 量测误差

1. 测距误差：激光测距仪是 LiDAR 系统最重要的核心设备，在所有影响激光脚点坐标精度的因素中，测距精度是最复杂的。

(a) 测距仪误差：

- 包括时延估计误差和时间测量误差。此外还包括传感器激光信号发射与接收不平行（可校正）产生的误差；反光镜的旋转、震动误差；脉冲零点误差等。
此类误差，表现为常数误差，可通过比较利用激光测距和精密测量手段获取同一表面高度的差别来确定，一般在室内测定。
- 光学元件引起的误差
 - 背景光反射作用
 - 光经过光学窗口或被反射镜反射后的衰减
 - 由光学窗口或反射镜造成的散射（灰尘和光学元件表面原因）
 - 经过光学窗口后光速减慢
 - 光学窗口的曲度造成发射光束和接收光束散焦
- 探测器影响
 - 一般要求探测器对被探测的光波波长具有最大的响应值，最快的响应速度，由其自身造成的噪声应尽可能小。
 - 探测器中的噪声包括：信号的出射噪声 (shot noise)、暗电流 (dark current) 噪声，还有热噪声等。

(b) 大气损耗引起的误差：大气改正要同时考虑大气延迟和大气折射，一般来讲，每 100 米激光光程由于大气的影响会产生大约 2 cm 的距离误差。

- 大气折射影响：其影响程度取决于激光脉冲的波长；对同一种信号而言，大气折射误差主要与气温、气压和大气湿度有关。
- 大气时延影响：相比 GPS 载波信号（激光脉冲波长约 1 微米，GPS 载波波长约 2 分米），激光脉冲信号受此影响较小，绝对量只有几个 mm 量级。

(c) 地物目标引起的误差

- 由于地表物理特征的不同而产生不同的后向反射
 - 如当信号发生漫反射时出现大量反射信号被接收，会形成较大的接收噪声；
 - 当信号照射到光滑物体表面便形成镜面反射，可能会造成激光测距信号“丢失”；

- 另外有的信号可能经几次反射后反射回去，这样测定的时间延迟不能代表真正的时间延迟。
 - 激光测量精度与还地面粗糙程度、坡度、地物类型等有关。另外，被水域覆盖的地方，红外激光大部分被吸收，只有少量被反射；地表不连续以及地物移动，如行人、车辆，动物等都会影响测距的精度。
2. **GPS 定位误差**: 主要包括卫星轨道误差，卫星钟钟差，接收机钟钟差，多路径效应，相位中心不稳定，可视卫星几何图形强度，观测噪声，整周模糊度求解正确与否等。
- 这类误差对定位精度影响较大，且随着观测环境的变化而不断变化，不容易消除或模型化。
 - 通常为了削弱 GPS 定位误差的影响，采用的方法是在测区内建立多个分布较均匀的基准站。
3. **IMU 姿态误差**: 影响定位精度的主要因素之一
- 主要包括：- 设备安置误差 - 加速度计常数误差 - 加速度计比例误差 - 陀螺仪漂移 - 测量噪声 - 轴承间的非正交性 - 重力模型误差 - 大地水准面误差
 - 姿态参量对三维定位精度的影响表现为：随着飞行高度增加和扫描角度增加姿态量测误差的影响会有所增加。
 - 解决办法：可通过降低飞行高度以减弱 INS 姿态测量误差对定位的影响。
4. **激光束发散角产生的误差**: 由于激光光束都有一定的发散角，与不同的目标表面作用时会产生不同程度的脉冲展宽从而增加测距的不确定性，使探测信号强度、信噪比与及探测概率等呈随机性变化，影响测距仪的测量精度和性能。
- 对于不同的系统，其影响情况可能有些差异。若 LiDAR 系统只记录首次回波信号的系统，假设激光光束的发散角为 γ ，那么最大可能带来的角度误差为 $\gamma/2$ ，其误差对定位的影响效果类似于扫描角误差。

8.1.2 集成误差

1. 安置误差

- 偏心距误差**: 偏心距误差主要是激光束出射点到 IMU 系统中心之间的距离以及 IMU 中心到 GPS 接收机天线中心的距离的测量误差。
- 视准轴误差**: 视准轴误差指 IMU 系统与激光测距仪之间的角度安置误差，包括翻滚误差、俯仰误差、航偏误差（图）。

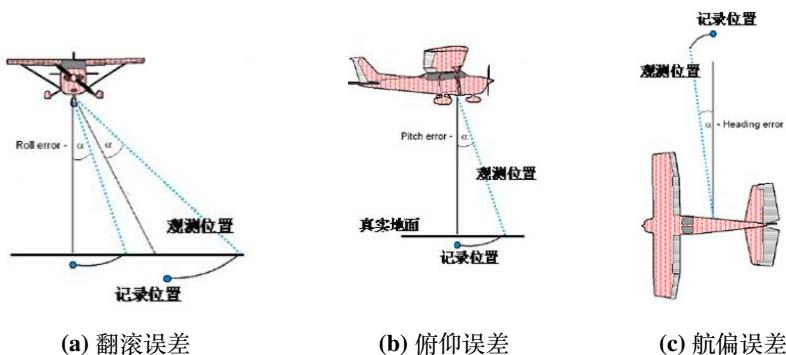


图 8.1 视准轴误差

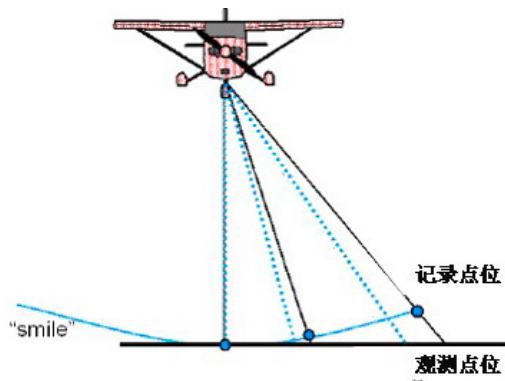


图 8.2 扭矩误差

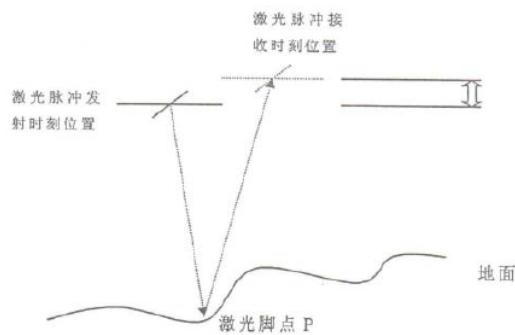


图 8.3 动态时延误差示意图

(c) **扫描角误差**: 扫描电机的非匀速扫描以及扫描转镜的震动等引起。

以旋转棱镜为例, 如果转镜转速为 ω 转/秒, 扫描视场范围为 θ 弧度, 每行采样点数为 N , 则在以扫描行为单位的一个周期 $T = 1/\omega$ 中。每个采样点对应的扫描角不是实际量测, 而是根据扫描视场范围 θ 和每行采样点数计算出来。

因此相应要求扫描电机的匀速旋转, 但设计时不能完全保证匀速旋转, 从而产生扫描角误差。

- 角度步进误差: 角度记录装置在记录角度变化的时候产生的误差, 一般在出厂的时候进行校正。
- 扭矩误差: 扫描镜在旋转和摆动的时候, 由于惯性的原因, 其转动的实际角度必然会与预期的(记录装置记录的)角度不一样, 这就是扭矩误差(图8.2)

2. 处理误差

(a) **时间同步误差**: GPS 接收机、INS、激光测距系统独立工作, 各自的数据采样率不同, 即实际数据采样不同步, 处理时, 需要将它们的时间系统统一到标准 UTC(Universal Coordinated Time) 系统。

时间偏差对定位结果的影响会使平坦的表面发生变形或扭曲。

(b) **动态时延误差**: 如图8.3所示, 动态时延误差包括两个部分, 一部分是由于激光测距和 GPS 定位数据采集率不同引起的时延改正; 另一部分是由于飞机的垂直运动分量引起的附加改正。

(c) **内插误差**: 是由于 LiDAR 各系统具有不同的记录(采样)频率造成的。由于 GPS 数据采样频率一般为 1~2Hz; INS 数据采样率一般为 8~50 Hz; 而激光扫描测距的脉冲重复频率可达 2~25 KHz, 采样率不一样, 最后还要根据采样率低的姿态数据和位置数据内插出每个激光测

距记录时刻的姿态和位置，势必产生内插误差。

- (d) **二类高程误差**: 当地面起伏较大或有一定的坡度时, 由于激光脚点平面位置的误差而产生的高程方向的附加误差。

假设激光脚点的真实位置(实际不知道)为 (X_0, Y_0, Z_0) ; 由于受到各种观测误差的影响, 由LiDAR推算出的位置为 (X, Y, Z) , 即

$$(X, Y, Z) = (X_0, Y_0, Z_0) + (e_X, e_Y, e_Z) \quad (8.1)$$

由于平面误差的存在, 使得激光脚点的位置由图中的 (X_0, Y_0, Z_0) 跑到 (X, Y, Z) 位置, 高程误差除了 $e_Z = Z - Z_0$ 外, 还有由平面误差形成的二类高程误差 e_S :

$$e_S = e_X \tan \Phi + e_Y \tan \Psi \quad (8.2)$$

- (e) **坐标转换误差**: 如图所示。

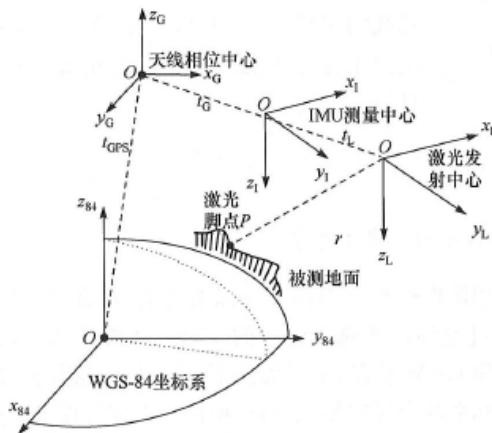


图 8.4 坐标转换误差

8.2 误差的分析

8.2.1 误差的定性定量分析

测距误差 测距误差同多种因素有关, 包括系统和随机两部分。这里考虑系统误差部分, 其大小取决于不同的系统、反射介质及地形条件等外界条件。可用公式表示为

$$\mathbf{r}^* = \mathbf{r} + \Delta \mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho + \Delta \rho \end{pmatrix}^T \quad (8.3)$$

式中, \mathbf{r}^* 是含有测距误差 $\Delta \rho$ 的激光脚点在瞬时激光束坐标系中的位置向量; $\Delta \mathbf{r}$ 为测距误差引起的激光脚点在顺势激光束坐标系中的误差向量。

扫描角误差 会使定义的激光扫描参考坐标系绕 X 轴旋转一个小角度。同时由于安装时激光扫描平面不可能完全垂直于激光扫描参考坐标系的 X 轴，这就使得实际的激光扫描平面绕扫描参考坐标系的 Y 轴和 Z 轴各有一个小的旋转角。因此，实际坐标变换旋转矩阵为

$$\Delta \mathbf{R}_L = \mathbf{R}(\Delta\kappa)\mathbf{R}(\Delta\varphi)\mathbf{R}(\Delta\tau_i) = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & 1 & -\Delta\tau_i \\ -\Delta\varphi & \Delta\tau_i & 1 \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

因此，激光点在激光扫描坐标系中的坐标为

$$\mathbf{P}_L^* = \Delta \mathbf{R}_L \cdot \mathbf{R} \cdot (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) \quad (8.5)$$

系统安置误差 激光扫描参考坐标系同惯性平台参考坐标系的坐标轴间不能完全保证相互平行引起的误差。系统安置误差必须经过在航检校测定。旋转矩阵课表示为：

$$\Delta \mathbf{R}_M = \mathbf{R}(\Delta\gamma)\mathbf{R}(\Delta\beta)\mathbf{R}(\Delta\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\gamma & \Delta\beta \\ \Delta\gamma & 1 & -\Delta\alpha \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (8.6)$$

偏心改正测定误差包括激光发射参考点在惯性平台参考坐标系中的分量误差 Δt_L 以及 GPS 天线相位中心在惯性平台参考坐标系中的分量误差 Δt_G 两部分。因此对应激光脚点在惯性平台参考坐标系中的坐标为

$$\mathbf{P}_M^* = \Delta \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{R}_M \cdot \Delta \mathbf{R}_L \cdot \mathbf{R}_L \cdot (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) + \mathbf{t}_L + \Delta \mathbf{t}_L - (\mathbf{t}_G + \Delta \mathbf{t}_G) \quad (8.7)$$

姿态测定误差 INS 测定姿态角存在误差。假定三个姿态角的测定误差分别为 ΔR 、 ΔP 、 ΔH ，类似的可以得到误差旋转矩阵

$$\Delta \mathbf{R}_N = \mathbf{R}(\Delta H)\mathbf{R}(\Delta P)\mathbf{R}(\Delta R) = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta H & \Delta P \\ \Delta H & 1 & -\Delta R \\ -\Delta P & \Delta R & 1 \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

对应激光脚点在当地水平参考坐标系中的坐标为：

$$\mathbf{P}_{\text{LH}}^* = \Delta \mathbf{R}_N \cdot \mathbf{R}_N \cdot (\Delta \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{R}_M \cdot \Delta \mathbf{R}_L \cdot \mathbf{R}_L \cdot (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) + \mathbf{t}_L + \Delta \mathbf{t}_L - (\mathbf{t}_G + \Delta \mathbf{t}_G)) \quad (8.9)$$

GPS 定位误差 GPS 动态差分定位过程中，会受到包括对流层延迟误差、电离层延迟误差、多路径误差等系统误差的影响。若用 \mathbf{APC}_w 表示 GPS 定位模型，则激光点的几何模型可表示为

$$\mathbf{P}_W^* = \mathbf{R}_W \cdot \mathbf{R}_G \cdot \Delta \mathbf{R}_N \cdot \mathbf{R}_N \cdot (\Delta \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{R}_M \cdot \Delta \mathbf{R}_L \cdot \mathbf{R}_L \cdot (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) + \mathbf{t}_L + \Delta \mathbf{t}_L - (\mathbf{t}_G + \Delta \mathbf{t}_G)) + \mathbf{APC}_W + \Delta \mathbf{APC}_W \quad (8.10)$$

时间偏差 时间偏差主要包括同步误差和内插误差，当同步误差 $< 10 \sim 4 \text{ sec}$ 就不会带来位置误差，同步误差和内插误差表现为随机特性。

含有各项误差影响的 LiDAR 几何模型可表示如下：

$$\mathbf{P}_W^* = \mathbf{R}_W \cdot \mathbf{R}_G \cdot \Delta \mathbf{R}_N \cdot \mathbf{R}_N \cdot (\Delta \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{R}_M \cdot \Delta \mathbf{R}_L \cdot \mathbf{R}_L \cdot (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) + \mathbf{t}_L + \Delta \mathbf{t}_L - (\mathbf{t}_G + \Delta \mathbf{t}_G)) + \mathbf{APC}_W + \Delta \mathbf{APC}_W + \Delta t_{\text{TB}} \quad (8.11)$$

8.2.2 误差整体分析

LiDAR 点云定位方程 根据激光测距数据、激光器位置的 GPS 量测数据及姿态数据计算地面点三维坐标的公式。

通用构像方程 设地面点 P 在地面坐标系中的坐标为 $(X, Y, Z)_P$, P 在传感器坐标系中的坐标为 $(U, V, W)_P$, 投影中心 G 在地面坐标系中的坐标为 $(X, Y, Z)_G$, 则 P 点的地面坐标可用通用构像方程表示

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G + \mathbf{A} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix}_P \quad (8.12)$$

其中, \mathbf{A} 为旋转矩阵。

线扫描误差的影响

- GPS 的定位误差与激光测距点的定位误差关系是 1 : 1 的关系, 而且仅在同一方向上产生影响, 即激光测距点 X 坐标的误差只与 GPS 定位误差中 X 方向上的误差有关, Y 、 Z 方向也是如此。
- 各项系数随扫描角及测距数据的变化而变化
- 在同一扫描线上, 不同测距点上坐标的精度不同; 对于不同扫描线, 各项系数具有一定周期性变化的特点。

总结

- 在 GPS 定位精度、姿态度量测精度、激光测距精度和码盘测量扫描角精度等保持不变的情况下, 同一条扫描线上不同位置的定位精度是不同的, 圆锥扫描也是这样, 扫描角不同, 定位精度也有差异。
- 圆锥扫描方式总体性能比线扫描方式好, 其定位误差小, 定位误差的变化幅度也小, 这说明采用圆锥扫描方式, 激光脉冲的利用率大大提高, 缩小了激光测距点的间距, 增加了单位面积内激光测距点的密度, 对提高激光点定位精度是非常有利的。
- 对于线扫描方式, 随着扫描角的增加, 定位精度下降, 扫描方向 (Y 方向) 误差比飞行方向和 Z 方向误差要大, 这主要是由于测量扫描角的码盘的量测误差引起的, 这可以从有关误差传播分析的公式中反映出来, 飞行方向的定位精度则几乎不受码盘量测精度的影响。
- 对于圆锥扫描方式来说, 主要是 Z 方向的误差, 这个误差比 X 方向和 Y 方向要大, GPS 定位精度、激光测距精度、姿态度量测精度和码盘测角精度逐次下降情况下的定位精度反映了圆锥扫描方式定位精度的总体趋势, 只要能保证上述四种量测精度, 就可以达到很好的效果。
- 集成系统在数据处理的各个环节上都会产生一些误差, 主要包括激光测距误差、扫描角误差、GPS 定位误差、IMU 姿态误差、部件集成安置误差等。因此, 采取一定的方法减小误差, 提高精度, 成为激光遥感集成系统工程的关键问题。

8.3 误差处理

8.3.1 LiDAR 误差检测及消除

根据误差来源分析, 机载 LiDAR 系统受到多种误差源的影响, 为了提高机载 LiDAR 的精度, 最大可能地降低各种系统误差的影响, 一般有三种方法:

- 建立误差改正模型

- 仪器检校
- 条带平差改正

8.3.1.1 建立误差改正模型

有些系统误差可以建立误差模型进行消除。比如激光脉冲在大气中的传播延迟误差；前面讨论的二类高程误差；GPS 动态定位中的相关误差源等。

8.3.1.2 检校

检校的原则

- 有些系统误差能够单独检校出来，而有些系统误差彼此相关，难以分离。
- 对于不同的扫描方式，检校方法会有些差异。
- 一般在讨论其中一种误差源的影响时，认为不受其它误差源的影响，或忽略其它误差的影响。
- 而在实际飞行过程，这些误差是相互相关的，所有误差对最后坐标的影响并不是各项的简单叠加，而应该根据式(8.11)计算。

检校的两种状态

1. 静态检校比较容易分析。假设系统安置在直升飞机上，飞机停在一个升降台上，提升升降台进行静态扫描测量。当扫描角 $\theta = 0$ 时，激光脚点坐标高程分量只受到测距误差和偏心元素测定误差的影响。此时有

$$e_0^Z = \Delta\rho_i + \delta Z_{LG} \quad (8.13)$$

当扫描角分别取得最大值和最小值时，也就是对应于扫描线的两端，根据公式可得扫描线最左端高程 Z_L 和最右端高程 Z_R 值，两者之差就有

$$Z_L - Z_R = 2H\Delta\alpha \tan\theta_{\max} \quad (8.14)$$

可求解出其中一个视准轴误差 $\Delta\alpha$ 。

- 优点：不受姿态测定误差和 GPS 动态定位误差的影响。
- 缺点：不一定适合实际工作时误差影响的情形。

2. 动态检校比较多见。

视准轴误差的检校 性能优良的 GPS/INS 组合定位定姿系统为获取载体高精度的位置、姿态参数提供支持，这是机载 LiDAR 实现高精度对地定位的前提。但由于激光扫描三个主轴与载体坐标系的三个主轴不相互平行，会产生视准轴误差。直接测定比较困难，通常都是利用自行检校技术直接从机载 LiDAR 数据中估计出视准轴误差。视准轴误差是机载 LiDAR 中最大的系统误差源，根据经验观测这些安置角误差通常为 $0.1\sim0.3^\circ$ ，这些安置角误差对地面激光脚点坐标的影响还取决于飞行的高度和扫描角的大小，有必要进行消除。

1. 视准轴误差手工检校方法

- 检校顺序：翻滚误差检校 → 俯仰误差检校 → 航偏误差检校
- 翻滚误差的检校：翻滚误差会造成航带的倾斜（一边高，一边低，图8.5a），在设计航线的时候，为了使相邻航带间的翻滚误差最大（最明显，容易修正），需要使用相同的航高，沿着相对的方向各飞行一条航带。如图8.6所示，翻滚的大小为

$$\text{Roll}_\omega = \arctan \frac{\Delta h/2}{r} \quad (8.15)$$

式中, Δh 为相同飞行高度条件下相向飞行的两条航带间近似同名点的高程差; r 为近似同名点到航带中心的垂直距离。

- 俯仰误差的检校: 如图8.5b所示。俯仰误差的大小与航高相关, 在同一航高时, 误差的表现 在数据难以辨别。需要使用不同航高的相对飞行的相邻航带数据才能看出其误差。如图8.7所 示, 俯仰角的大小

$$\text{Pitch}_{\varphi} = \arccos \frac{\Delta H}{\Delta H + \Delta h} \quad (8.16)$$

式中, ΔH 与 Δh 分别为航高差与同名点计算得到的高程差。

- 航偏误差的检校: 如图8.5c所示, 航偏误差与飞行的方向是无关的, 使用相对飞行的航线无法判读航偏误差。其检校的方法是使用相互垂直 (同一航高即可) 的两条航线, 在重叠区域内, 航偏误差会达到最大, 可以比较容易判别。需选取十字飞行的两个条带, 在其中一条的中心位置和另一条的边缘重叠区内, 寻找尖顶房或坡面, 量测平均分离值 Δx 和到条带中心的距离 Δr , 航偏角的大小为

$$\text{Heading}_{\kappa} = \arctan \frac{\Delta x}{\Delta r} \quad (8.17)$$

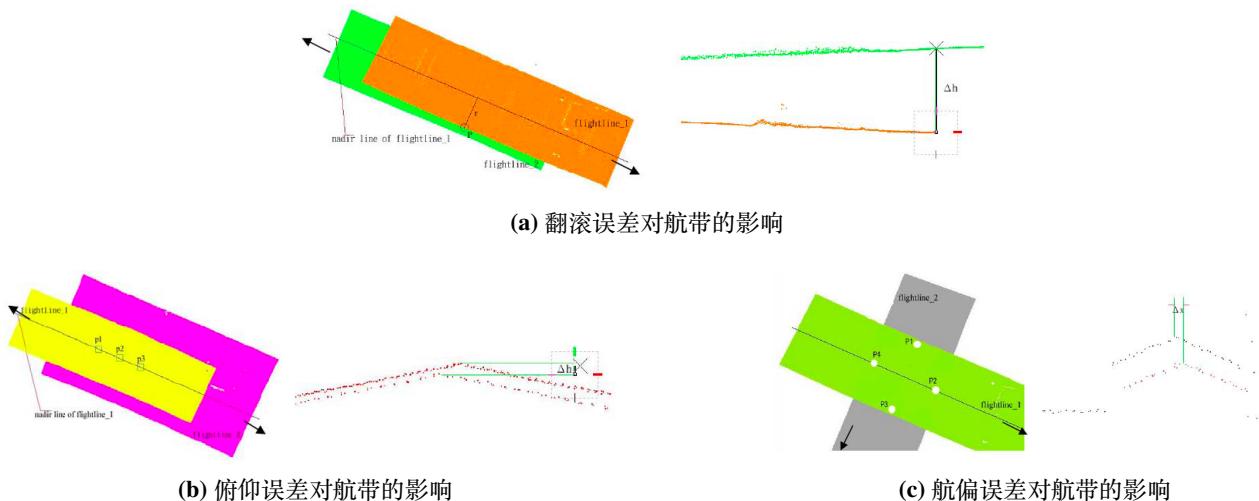


图 8.5 视准轴误差对航带的影响

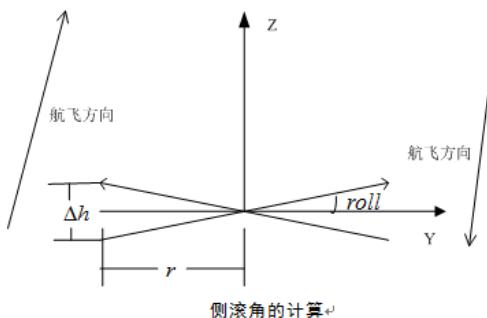


图 8.6 侧滚角的计算

2. 一种无需检校飞行的视准轴误差检校方法

- 顺序: 翻滚误差检校 → 航偏误差检校 → 俯仰误差检校。首先消除翻滚造成的同名地物高程 差异; 然后在用同向航线检校航偏以消除其反向航向上的影响; 最后用反向航向检校俯仰。

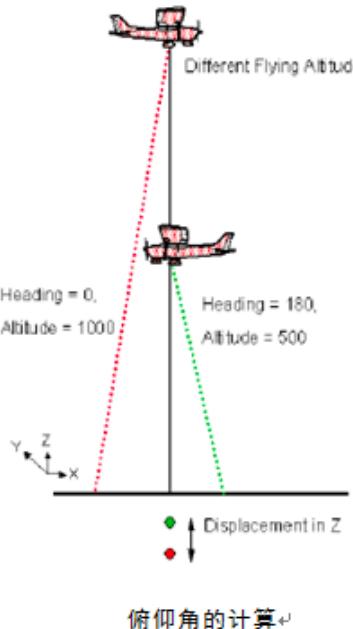


图 8.7 俯仰角的计算

- 对飞行航线的要求：如图8.8b所示。

- 为能够使用测区航线进行视准轴检校，只需每架次航飞时选择一条航线进行“跳线”飞行。
- 测区必须要有复合条件的人字形屋顶类的建筑物存在。

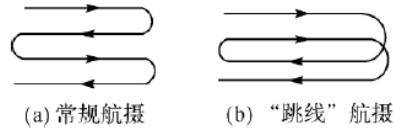


图 8.8 无需检校飞行的视准轴误差检校方法对航线的要求

- 翻滚检校：如果没有飞行检校场数据，仅利用相邻航带的重叠区域进行检校时，由于视准轴系统偏差很微小，且相邻航线旁向重叠距离有限，图中所示相邻航线反向时（航线 B 和 C），翻滚的表现并不明显，重叠区域断面点云基本上难以看到交叉。

如图8.9a，利用同向两个条带数据则能够准确测算翻滚视准轴偏差值

$$\text{Roll}_\omega = \arctan \frac{S}{L - D} \quad (8.18)$$

其中， S 为高程差值， L 为测量点位置的激光条带宽度， D 为测量位置的两相邻条带重叠部分的宽度。

- 俯仰检校：如图8.9b，利用测区两个相邻但航向相反的条带，选择重叠区域内的尖顶房屋（房屋的屋脊线应垂直于航向），通过沿航向的断面能够量算尖顶的偏移值，从而测算存在的俯仰值

$$\text{Pitch}_\varphi = \arccos \frac{D}{2H} \quad (8.19)$$

其中， D 为量测的尖顶分离值； H 为平均相对航高。

- 航偏检校：如图8.9c，在同向飞行的两条相邻航线的重叠部分选取区域内尖顶房屋（屋脊线

应垂直于航向), 通过测量尖顶偏移值进而计算航偏值

$$\text{Heading}_\kappa = \arcsin \frac{S}{L} \quad (8.20)$$

其中, S 为测量的尖顶房屋分离值; L 为相邻航线中心线间距离。

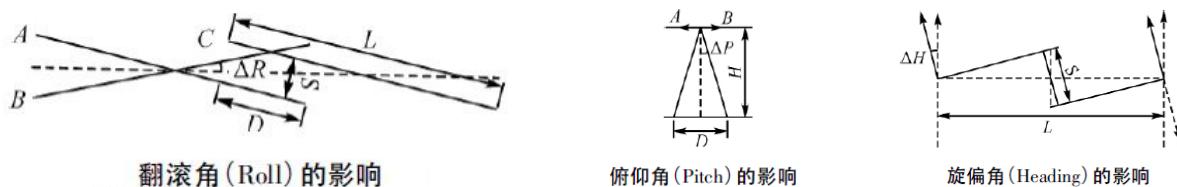
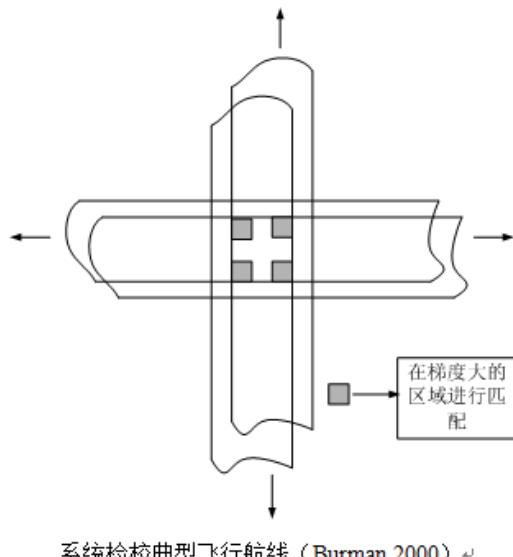


图 8.9 无需检校飞行的视准轴误差检校中视准轴误差的影响

8.3.1.3 条带平差改正

原理 如图8.10所示, 如果激光光束的空间方位有误差, 不同航带测定的同一点的坐标和高程间就彼此会有差异, 可以利用多条航带的重叠区域数据进行改正。



系统检校典型飞行航线 (Burman, 2000) ↵

图 8.10 系统检校典型飞行航线

方法 根据这些差异建立相应的参数模型, 利用一定的匹配技术将不同的航带的条带重叠部分联系起来, 通过最小二乘平差, 求解这些参数。然后利用求解出的参数改正每条航带的激光脚点坐标。

难点 重叠区域激光“同名点”的匹配, 一般都是找重叠区域的地物的特征点作为联系点。

效果 如图8.11所示。

8.3.2 LiDAR 工程实践中的误差分析及处理

8.3.2.1 误差分析

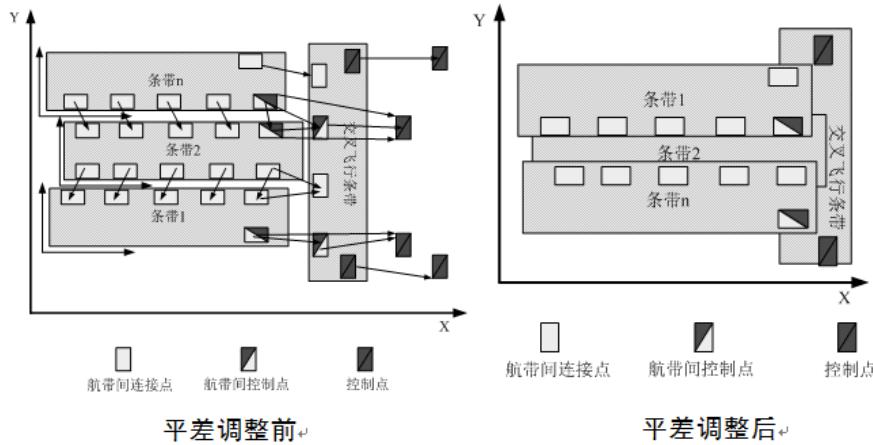


图 8.11 条带平差改正效果

1. 飞行计划

- 与地面参考站距离
- 参考站的数量及分布
- 飞行高度
- 扫描角度

2. 系统集成

- 同步误差
- 偏心量测误差
- IMU 和 Laser 的角度偏差 (视准轴误差)

3. 专门设备

(a) GPS 误差

- 相位测定不准确
- 大气延时
- 太阳活动干扰
- 其它随机误差

(b) IMU 误差

- 安置误差: - 水平 - 陀螺仪位置

- 漂移
- 量测噪声
- 坐标轴不互相垂直
- 加速度计测量误差

(c) 激光测距仪

- 激光脚点的随机抖动
- 测距的漂移偏差
- 测距误差
- 角度量测误差
- 其他不明原因引起的误差

4. 处理过程

- 坐标转换误差
- 水准面校正误差
- 滤波处理误差
- 地物提取误差

8.3.2.2 误差评估

误差评估的方法

- 可视化检查
- 航带叠加分析
- 与参考高程数据比较
- 与现有地图数据比较

可视化检查 将测区内各航带的数据同时加载，叠加影像。

1. 系统误差：系统误差引起的高程差异和强度差异。
2. 滤波算法质量

3. 地物提取质量：如图8.12。

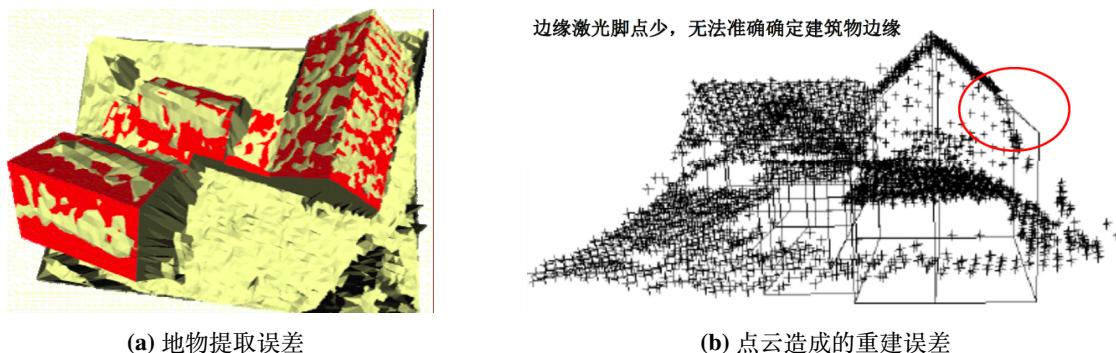


图 8.12 地物提取质量

航带叠加分析

1. 作用：

- 可以估算出 LiDAR 的量测误差
- 分析误差的来源
- 可辅助航带校正

2. 高程误差估算：选择平坦地区，利用航带重叠处点云进行剖面高程统计分析，估算出高程误差，如图8.13a所示。

• 不同扫描线之间的差异：

- 将奇数和偶数扫描线分开，分别生成 DEM，如图8.13b。
- 两者相减，以颜色表示差别，如图8.13c。
- 原因：正多面体棱镜的边长有差异。

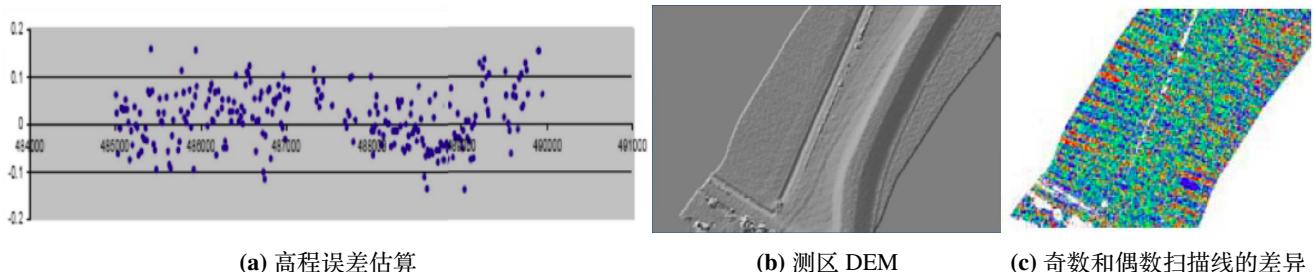


图 8.13 高程误差估算

3. 航带间平面位置漂移：

- 原因：IMU 安置误差、GPS 误差、仪器标定误差
- 表现形式：相邻航带同一地物的平面位置及高程的不一致。
- 平面漂移的估计：

- 可通过均匀的倾斜地面估计（如图8.15a、图8.15b），但仅依据高程差异判断是不充分的（图8.15c）。
- 使用强度图像
 - 噪声太大

- 若质量够好，应选择具有较长边缘作为校正的参照。

- 估计方法

- 首先进行强度图像内插，然后基于影像匹配技术进行同名特征匹配；
- 以同名点作为控制点，求出漂移系数

$$\begin{aligned} X_S &= X_t + \Delta X \\ Y_S &= Y_t + \Delta Y \\ Z_S(X_S, Y_S) &= Z_t(X_t, Y_t) + \Delta Z \end{aligned} \quad (8.21)$$

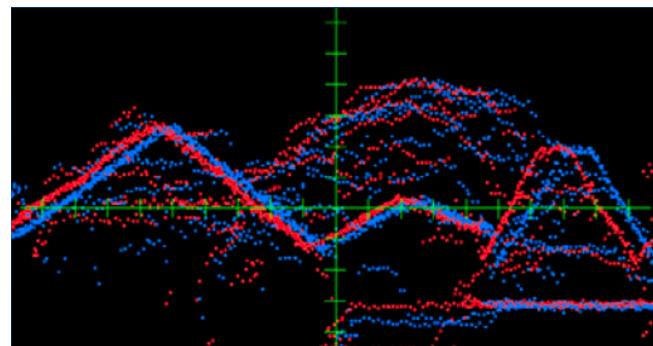


图 8.14 航带间平面位置漂移

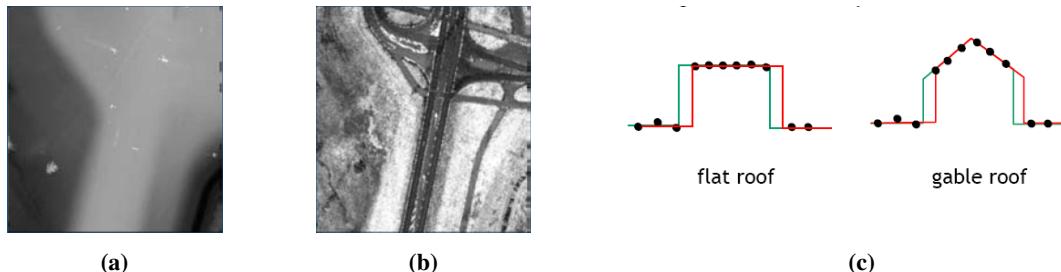


图 8.15 通过均匀倾斜地面估计平面漂移

4. 同名点查找的数据集格式

- 规则格网： - 运行速度快 - 很多主流软件平台支持 - 内插误差较大
- 三角网： - 精度较高 - 对程序的性能要求较高
- 高程漂移估计：通常采用拟合方法进行估计，可以避免栅格数据的内插误差，也可以避免强度数据受噪声影响，以及难以获取均匀的倾斜地面等因素造成的匹配误差。

拟合区域选择为： - 沟渠 - 人字形屋顶

参照现有高程数据 现有高程数据是摄影测量方法获得的数据或地面测量方法得到的数据，可以评估滤波算法的误差，如图8.16所示。

参照已有的地形图 如图8.17，地形图精度为 10 cm，LiDAR 影像的精度即每像素大小 25 cm。

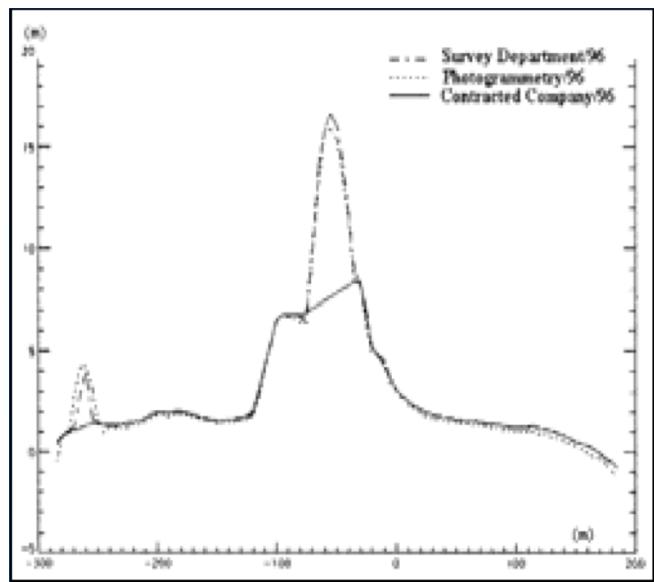


图 8.16 参照现有的高程数据

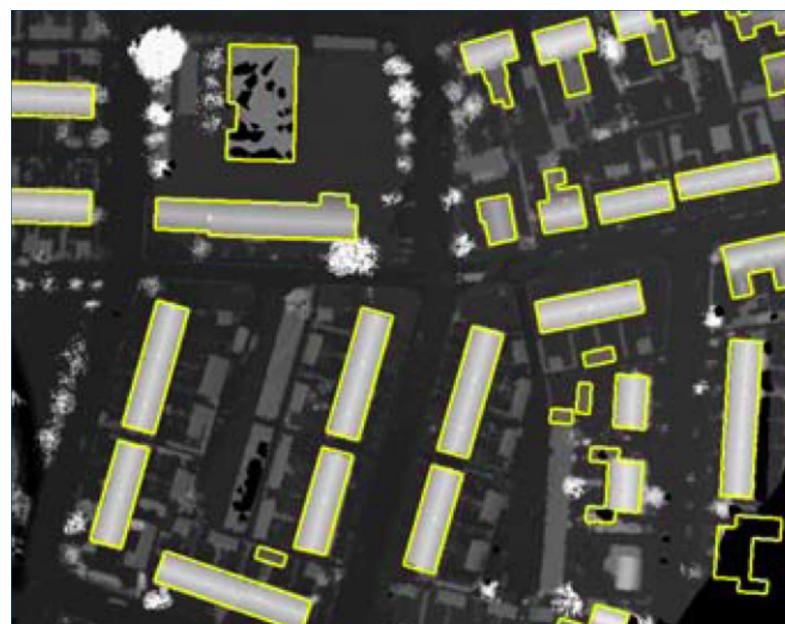


图 8.17 参照已有的地形图