

机载激光雷达

基础原理与应用

赖旭东 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

机载激光雷达基础 原理与应用

赖旭东 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共分6章:第1章简要介绍了激光的物理基础知识,激光技术在测绘领域的应用,激光器的产生、种类及发展等内容;第2章讲解了机载激光雷达的基本知识,包括激光成像技术,针对测绘的机载激光雷达系统的相关技术、原理、扫描方式、构想方程及主要参数,全面地介绍了常用的商业机载激光雷达系统;第3章对机载激光雷达系统采集的数据组成进行了详细论述,包括数据的种类、数据的格式、各种数据的特点及主要处理方法;第4章深入讨论了三维点云数据处理的基本原理和方法以及主要产品的生产流程和常用算法,包括激光脚点的三维坐标计算、滤波方法、建筑物的提取、地物目标分类等;第5章分析了机载激光雷达数据的误差来源,深入阐述了各种误差的原理、校正方法;第6章针对目前生产部门所关心的效率和成本问题,将机载激光雷达技术与同类技术进行了全面的比较。

本书适于遥感科学与技术、测绘工程等专业的本科生和研究生,也可供有关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机载激光雷达基础原理与应用 / 赖旭东编著. —北京:电子工业出版社, 2010.4
ISBN 978-7-121-10538-8

I. 机… II. 赖… III. 机载雷达: 激光雷达 IV. TN958.98

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第046957号

策划编辑:董亚峰

责任编辑:周宏敏

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:850×1168 1/32 印张:8.25 字数:222千字

印 次:2010年4月第1次印刷

印 数:3000册 定价:25.00元。

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

机载激光雷达系统（Light Detection and Ranging，简称 Lidar）是一种综合应用激光测距仪、IMU、GPS 的新型快速测量系统，是解决大比例尺三维制图的重要遥感技术手段，在地形测绘、建筑物三维建模、森林垂直结构探测，以及水利电力设计、公路铁路设计、海岸线分析等方面得到广泛应用。

国际上，尤其是欧美国家，激光雷达硬件技术比较先进，我国相对落后。近些年来，激光雷达技术越来越受到我国遥感界的重视，在“十五”期间，国家 863 计划支持了国产地基激光雷达设备的研制，随后，在“十一五”期间又支持了机载激光雷达系统、数据处理软件平台研制以及应用研究等课题，取得了一批科研成果，形成了一些专业队伍，成为硕士、博士论文的热点选题方向。

机载激光雷达技术是集成了多项测绘技术的新型遥感技术，只有全面了解和正确掌握这些技术，才能在具体研究中找到突破点，在工程应用中得出正确的结果。

本书基于作者多年从事有关项目的研究成果、累积的教学知识和工程实践，吸收国际和国内最新的机载激光雷达硬件设备、数据处理与应用技术进展总结而成。它系统地论述了激光雷达的相关基础、机载激光雷达系统与成像技术、数据获取原理、数据类型与特点等内容，重点介绍了机载激光雷达数据处理的基本原理、流程、方法和误差传递规律，以及在实际应用中参数的含义



和特点，是作者在相关方面耕耘的结晶。

相信该书的面世能使学习者对激光雷达技术有更全面的了解，对我国从事相关方面技术与应用研究的广大科技工作者、工程实践者有所裨益。

李增元

前 言

从空中和太空观测地球获取影像是 20 世纪的重大成果之一，短短几十年，遥感数据获取手段迅猛发展。在信息时代，测绘已发展成为地球空间信息学。

地球空间信息学所获取和处理的是随时间和空间分布和变化的信息。摄影测量与遥感是获取这种信息的主要手段。随着技术的进步，人们不断研究和改进遥感数据采集技术，并将其投入应用研究和生产实践。如今，集成了 GPS 技术、惯性导航技术、激光测距技术等先进技术的机载激光雷达技术具有很强的市场竞争力和广阔的应用前景，其综合性价比要强于传统的遥感数据获取技术，具有一定的技术优势，正日益成为遥感数据采集技术的一种重要方式。

利用激光作为遥感设备起源于宇宙航天的需要，在航天工程实践中，人们为得到星球之间的距离（地球与月球、卫星与星球等）而研究使用了激光测距设备和技术，并取得了较好的结果。20 世纪 70 年代，在美国的阿波罗登月计划中就成功地使用了激光测距装置。20 世纪 80 年代，以美国和德国为首的发达国家开始积极开展机载激光雷达技术的可行性研究，其标志性成果为 1990 年德国 Ackermann 教授领衔研制的在 Stuttgart 大学诞生的世界上第一个激光断面测量系统。1993 年，德国出现首个商用机载激光雷达系统 TopScan。

随着相关技术的不断成熟，机载激光雷达技术得到了蓬勃发展，欧美等发达国家的许多公司和科研机构投入了大量的人力、物力和财力进行相关技术和系统的研究，并先后研制出多种机载激光雷达系统，相继投入商业运作。目前生产机载激光雷达系统



的公司主要有 Leica、Optech、TopoSys、Riegl、IGI、TopEye、TopScan 等。机载激光雷达在测绘市场所占的份额不断扩大，其应用的领域和深度也日益拓宽和加深。

我国的学者也投入到了激光雷达技术的研究中，北京遥感所李树楷教授等研制的机载激光测距—成像系统于 1996 年完成了原理样机的研制，但该系统距实用化尤其是形成产品尚有一段距离。我国的中国科学院光电研究院也已经在研制机载激光雷达系统，目前研制进展比较顺利。也有一些公司从国外引进了机载激光雷达设备用于商业运作。截至 2008 年，国内拥有的机载激光雷达系统为 15 套左右，其中很多都处于性能摸索阶段，没有能够完全发挥其作用。总体而言，我国在机载激光雷达的硬件研制及理论研究和工程实践应用、数据处理等方面都落后于发达国家。

机载激光雷达系统获得的主要数据是三维激光脚点坐标（距离信息数据），形成了数字表面模型（DSM）。由于能够同时搭载其他类型的传感器，现在的机载激光雷达系统还能够获取一些其他形式的地物信息，例如，红、绿、蓝波段的光谱信息，多次回波数据，全波形数据，多光谱数据，等等。机载激光雷达系统的主要产品和应用有：通过滤波生成数字高程模型（DEM）；测绘地形图；绘制石油管道、电力线等专题图；对地面目标进行分类；自动提取高密度城市地区的房屋和道路；三维城市景观模型（并用于虚拟现实）；海岸地带地形测绘，包括沙丘和湿洼地，监测海岸变化及动态侵蚀情况；城市规划；自然灾害三维实时监测；GIS 数据采集；土地剖面测量；等等。具体主要包括以下几个方面：

- DEM 的获取。这是机载激光雷达技术的主要应用，也是基础应用之一。通过一定的滤波算法，将 DSM 数据中的非地面点剔除，得到测区的 DEM 数据。使用这种方法在树林密集地区和建筑物密集地区都有很成功的应用。但是，这些算法大多针对某种特殊的数据，使用针对性参



数，不具有通用性。

- 基础地理数据的获取。通过机载激光雷达技术来获取城市的建筑物的三维数据，可以用于构建 GIS 数据库和对已有数据库的地理数据进行变化检测和更新。目前，这一过程需要大量的人工干预。
- 数字城市的建设。数字城市是“数字地球”的一个重要组成部分，其中，建立三维城市模型是关键，已被广泛运用于城市规划设计、建筑物景观模拟、通信基站布网设计等领域。机载激光雷达数据本身就是高密度和精确的三维数据，建筑物的三维重建比用传统方式更容易，也比手工处理更快，具有很广阔的应用前景。
- 绘制带状地形图。主要用于工程建设，包括测绘铁路、公路线路图，测绘输油管道图，绘制电力线图，等等。
- 沿海地带的测绘。利用机载激光雷达系统来测绘海岸线；对海岸侵蚀的情况进行监测；利用不同频率激光束的穿透性来测量近海的水深；监测沿海的沙丘、堤坝、防护林的状况；等等。
- 灾害调查与环境监测。利用机载激光雷达测量的快速、全天候和高精度的特点，可以在灾害发生后迅速获得灾害现场的具体情况，从而快速提供可靠的灾害损失数据，用于制订救灾方案和评价灾害损失。
- 林业的应用。机载激光雷达技术在林业方面的应用是比较有效和成功的。激光所独有的穿透性使得我们能够得到森林地区准确的 DEM、树木的生长状态、木材的蓄积量等重要参数，这些都是林业部门所必需而传统方法无法精确提供的信息。

武汉大学是国内较早对机载激光雷达技术进行跟踪和研究的机构，很早就在本科阶段设置了关于机载激光雷达技术的专业课，进行相关技术的介绍。目前已经毕业和正在从事机载激光雷



达技术研究的博士和硕士已经多达数十人，有专门的研究所和教师进行相关技术的研究，承担了国家“十一五”863 重点项目等多个关于机载激光雷达理论及应用的国家级及省部级研究项目。武汉大学遥感信息工程学院还于 2007 年引进了机载激光雷达系统设备，并已经进行了一些实验和工程项目。

本书是在作者博士论文“机载激光雷达数据处理中若干关键技术的研究”的基础上，结合作者研究的一些项目（包括国家 863 目标导向类项目机载激光雷达数据处理软件平台，博士点基金机载激光雷达数据处理研究，国家测绘局基础测绘项目机载激光扫描测量应用研究等），遥感信息工程学院引进 Lidar 设备中的调研工作，以及从事本科生教学工作的研究成果和经验，进行扩充和总结而写成的。

本书详细介绍了机载激光雷达技术的相关基础知识、系统结构、数据获取原理、数据特点和数据处理及应用的主要方法。希望本书能有助于机载激光雷达技术的学习和研究。本书还可以用做遥感及相关专业的本科生教材，以及作为从事遥感教学、科研和生产的参考用书。

由于受编写时间和作者水平之限，全书难免存在缺点甚至错误，欢迎批评和指正。

目 录

第 1 章 激光物理基础	1
1.1 激光与激光技术	1
1.1.1 激光	1
1.1.2 激光技术	3
1.1.3 激光在测绘领域的应用	6
1.2 激光原理	8
1.2.1 物质与光相互作用的规律	8
1.2.2 激光	9
1.2.3 激光的产生	11
1.3 激光器	13
1.3.1 激光器的诞生	13
1.3.2 激光器的分类	15
1.3.3 激光器的发展	18
第 2 章 机载激光雷达	20
2.1 激光成像技术	20
2.1.1 激光雷达的产生及特点	20
2.1.2 激光雷达的分类	21
2.1.3 激光成像雷达	23
2.1.4 激光成像雷达硬件技术简介	25
2.2 机载激光雷达系统及相关技术	37
2.2.1 机载激光雷达系统	37
2.2.2 激光测距技术	38
2.2.3 全球定位系统	50
2.2.4 惯性导航技术	53



2.2.5	IMU 与 DGPS 组合定位技术	54
2.3	机载激光雷达系统	56
2.3.1	系统原理	56
2.3.2	系统组成	57
2.3.3	扫描方式与构像方程	62
2.3.4	系统的主要参数	75
2.3.5	常用的商业机载激光雷达系统	87
第 3 章	激光雷达数据简介	101
3.1	数据组成及数据格式	101
3.1.1	数据组成	101
3.1.2	数据格式	101
3.2	强度信息数据的特点及处理	114
3.2.1	一种针对城区激光雷达强度图像的去噪算法	118
3.2.2	一种自适应的城区激光雷达绿波段信息空间去噪算法	123
3.2.3	一种基于平坦度的非城区激光雷达强度图像去噪算法	128
3.3	波形数据及其处理	133
3.3.1	多次回波数据的处理	134
3.3.2	波形数据的处理	136
3.4	数码影像数据及其处理	141
3.5	激光雷达点云数据及其特点	144
第 4 章	机载激光雷达数据处理	146
4.1	基本流程	146
4.2	滤波处理	150
4.2.1	Lidar 数据中的对象	151
4.2.2	Lidar 数据滤波的难点	153
4.2.3	滤波算法的错误分类	156
4.2.4	滤波算法的一些关键因子	156



4.2.5	迭代最小二乘线性内插滤波算法	160
4.2.6	数学形态学滤波方法	165
4.2.7	变化窗口算法	168
4.2.8	基于不规则三角网的滤波算法	169
4.2.9	基于分割方法的滤波算法	173
4.2.10	融合强度信息的 Lidar 滤波算法	191
4.2.11	滤波算法的发展	201
4.3	建筑物分割及模型生成	201
4.3.1	基于 Lidar 数据的建筑物分割	204
4.3.2	基于 Lidar 数据的建筑物重建	207
4.3.3	主要的基于 Lidar 数据的建筑物提取方法	209
4.3.4	城市变化检测	213
4.4	对 Lidar 数据中其他类别的提取	217
4.4.1	植被的分割处理	217
4.4.2	线状地物的提取	219
第 5 章	机载激光雷达的误差及其校正	221
5.1	量测误差	221
5.1.1	量测误差整体分析	221
5.1.2	激光测距值	225
5.1.3	GPS 定位误差	229
5.1.4	IMU 姿态误差	229
5.1.5	扫描角误差	230
5.2	硬件安置误差	230
5.2.1	偏心距误差	230
5.2.2	照准误差	230
5.2.3	角度步进误差	232
5.2.4	扭矩误差	232
5.3	数据处理误差	233
5.3.1	时间同步误差	233

5.3.2	内插误差	233
5.3.3	坐标转换误差	234
5.4	误差的消除	234
5.4.1	翻滚误差的检校	234
5.4.2	俯仰误差的检校	235
5.4.3	航偏误差的检校	236
第 6 章	机载激光雷达技术与同类技术的比较	237
6.1	机载激光雷达技术与航空摄影测量技术的比较	237
6.2	机载激光雷达技术与机载 INSAR 技术的比较	241
	参考文献	243
	后记	251

第 1 章 激光物理基础

本章简要介绍激光的物理基础。机载激光雷达系统的关键技术是激光测距技术，其核心技术是激光技术。由于激光的特点，使得人们能够通过它精确地测出空间两点间的距离，因此激光测距技术也成为测绘领域的重要技术之一。

1.1 激光与激光技术

1.1.1 激光

激光是一种自然界原本不存在，因人工处理，受激而发出的光。激光被誉为“神奇的光”，是因为它有普通光所完全不具备的四大特性。

1. 方向性好

普通光源（如太阳、白炽灯或荧光灯）向四面八方发光，而激光的发光方向可以限制在小于几毫弧度的立体角内，激光束的发散角很小，几乎是一束平行的光线。激光照射到月球上形成的光斑直径仅有 1km 左右，即便是最好的探照灯，如将其光投射到月球上，光斑直径将扩大到 1000km 以上。激光准直、导向和测距就是利用了方向性好这一特性。

2. 亮度高

激光是当代最亮的光源，只有氢弹在爆炸瞬间发出的强烈闪光才能与它相比拟。一台大功率激光器的输出光亮度比太阳光高

出 7~14 个数量级。因此，尽管激光的总能量并不一定很大，但由于能量高度集中，很容易在某一微小目标处产生高压和几万摄氏度甚至几百万摄氏度的高温。激光打孔、切割、焊接和激光外科手术就是利用了这一特性。

3. 单色性好

光是一种电磁波。光的颜色取决于它的波长。普通光源发射的光子通常包含各种波长，在频率上是各不相同的，是各种颜色光的混合。太阳光中就包含了红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种颜色的可见光及红外线、紫外线等不可见光。激光的波长只集中在十分狭窄的光谱波段或频率范围内，如氦氖激光的波长为 632.8nm，其中波长变化范围不到万分之一纳米（nm）。由于激光的单色性好，为精密仪器测量和激励某些化学反应等科学实验提供了极为有利的手段。

4. 相干性好

干涉是波动现象的一种属性。由于受激辐射的光子在相位上是一致的，再加之谐振腔的选模作用，使激光束横截面上各点间具有固定的相位关系，所以激光的空间相干性很好（由自发辐射产生的普通光是非相干光），物理学家通常用相干长度来表示光的相干性，光源的相干长度越长，光的相干性越好。激光的相干长度可达几十千米（km）。因此，如果将激光用于精密测量，它的最大可测长度要比普通单色光大 10 万倍以上。激光的这一特性使全息照相成为现实。

自 1960 年 7 月梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器以来，经过多年的发展，人们在激光研究上突破了许多技术难题并取得了很大成就，因对激光及其应用的创造性贡献而先后获诺贝尔物理学奖的科学家共有 10 位。自激光被发明以来，以其方向性强、



单色性好、高亮度和高度的时空相干性引起了科学家们特别是军事家们的广泛关注，经过科学家们的不懈努力，今天的激光仪器无论是在工作原理、实验手段还是制造工艺方面都已逐步成熟。激光技术日益受到人们的重视，尤其是各大军事强国的重视，许多激光技术率先在军事技术中发展成熟起来，随后由于其巨大的价值推广到民用，成为目前最活跃的科学研究领域之一。

1.1.2 激光技术

激光作为一种新类型的光，带来了光学应用技术的革命，在生产、生活、国防等各个方面都有应用，已成为几乎所有现代技术依赖的手段。所谓激光技术，就是探索开发各种产生激光的方法以及探索运用激光的这些特性为人类造福的技术。

1. 激光在自然科学研究上的应用

(1) 非线性光学效应

在熟悉的反射、折射、吸收等光学现象中，反射光、折射光的强度与入射光的强度成正比，这类现象称为线性光学现象。如果强度除了与入射光强度成正比外，还与入射光强度成二次方、三次方乃至更高的方次，这就属于非线性光学效应。这些效应只有在入射光强度足够大时才表现出来。高功率激光器问世后，人们在激光与物质相互作用过程中观察到非线性光学现象，如频率变换、拉曼频移、自聚焦、布里渊散射等。

(2) 用激光固定原子

气态原子、分子处在永不停息的运动中（速度接近340m/s），并且不断与其他原子、分子碰撞，要“捕获”操纵它们十分不易。1997年，华裔科学家、美国斯坦福大学朱棣文等人，首次采用激光束将原子束冷却到极低温度，使其速度比通常做热运动时低，达到“捕获”操纵的目的。此项技术在光谱学、原子钟、研究量子效应方面有着广阔的应用前景。



2. 激光在加工领域的应用

以激光良好的单色性和相干性为基础，激光全息技术可以用做无损探伤，即不用损坏零件便可检测出零件内部的缺陷。利用激光亮度高和方向性好的特点可以进行精密的机械加工，如可以在零件上打一般钻头不能打的异形孔和尺寸达微米级的小孔。利用激光进行切割具有速度快、切面光洁及不发生形变的特点，激光焊接可焊一般焊接法不能焊的难熔金属。还可以利用激光亮度高、能量集中、可通过理论计算进行控制的特点对金属工件表面进行改性处理。

3. 激光信息处理

引入激光全息技术后，能大幅度提高信息处理能力。普通照相只记录了物体表面的光强分布，没有记录从物体各部分到观察者的远近和角度，即没记录下物体发出光线的相位分布，这样的像没有立体感。全息照相是用相干光照射物体，从物体反射或漫射的光不是经透镜成像而是直接照射到全息底片上，用干涉图样把那些光的光强分布和相位记录下来。底片上并没有被拍物体的形象，在显微镜下看到的是一幅长短不一、间距不等、走向不同的复杂干涉条纹，称为全息图。要想看到物体形象，再用相干光按一定方式照射全息图，便可在一定方向看到物体的像，称为再现。因为再现的是从物体反射或漫射的光束本身，所以像是立体的。

因为激光的相干性很好，用聚光系统可以把激光聚焦成比针头还细小的光束，所以它在介质上写入信息所占空间尺寸可以非常小（小于1nm），因而信息存储密度很大。

4. 激光通信

激光通信也是利用激光束单色性好、方向性好的特点。

激光提供了单色性很好的光波，使光波通信进入实用化阶