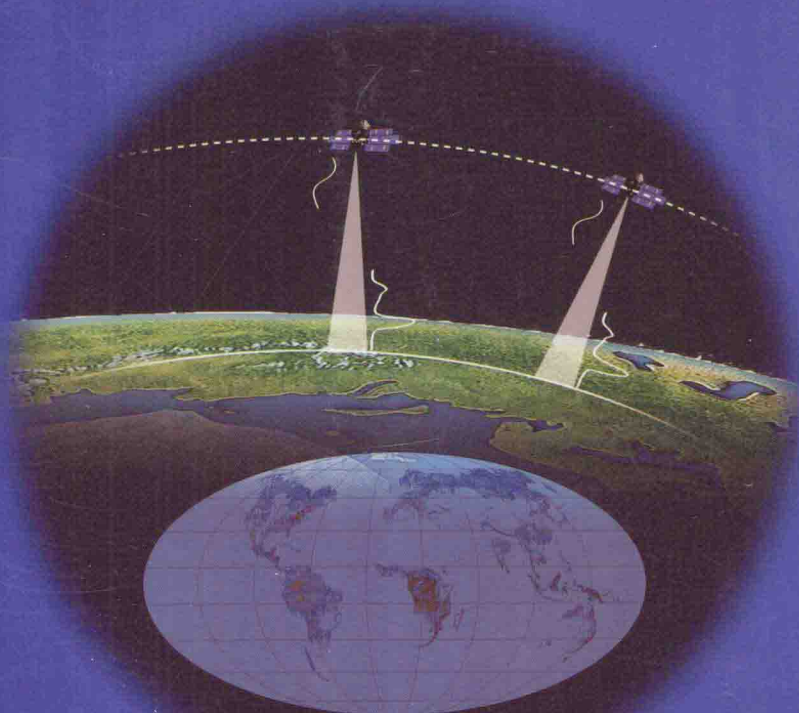




地球观测与导航技术丛书

星载激光雷达数据 处理与应用

王成 习晓环 骆社周 李贵才 著



科学出版社



地球观测与导航技术丛书

星载激光雷达数据处理与应用

王成 习晓环 骆社周 李贵才 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书深入探讨和分析星载激光雷达波形数据的处理方法,波形数据与多源遥感数据融合在森林植被结构参数、城市建筑高度和冰川等方面的应用,以及下一代星载激光雷达数据的处理方法和应用等。全书共分10章,第1章介绍激光雷达技术的理论和发展历程,以及测距激光雷达和星载激光雷达的研究进展;第2章和第3章详细介绍星载激光雷达数据以及波形数据处理方法;第4~8章探讨星载激光雷达数据及其与多源遥感数据融合,在森林冠层高度、叶面积指数、生物量、城市建筑高度以及冰川参数反演方面的应用;第9章和第10章介绍新一代星载激光雷达数据处理方法与应用,以及未来星载激光雷达的发展趋势。

本书适于激光雷达遥感、全球变化、林业、测绘、数字城市等方面的专家、学者和高校师生阅读、参考,也可作为遥感、测绘、林学、地理信息系统等专业的科研院所研究人员、高等院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

星载激光雷达数据处理与应用/王成等著. —北京:科学出版社,2015.1

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-043174-5

I. ①星… II. ①王… III. ①卫星载雷达-激光雷达-数据处理
IV. ①TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第018894号

责任编辑:朱海燕 苗李莉 / 责任校对:李 影

责任印制:张 倩 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:250 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军 陈 戈 陈晓玲 程鹏飞 房建成
龚建华 顾行发 江碧涛 江 凯 景 宁
景贵飞 李传荣 李加洪 李 京 李 明
李增元 李志林 梁顺林 廖小罕 林 琿
林 鹏 刘耀林 卢乃锰 闫国年 孟 波
秦其明 单 杰 施 闯 史文中 吴一戎
徐祥德 许健民 尤 政 郁文贤 张继贤
张良培 周国清 周启鸣

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为863计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示973计划和863计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加863计划地球观测与导航技术领域的项目、973计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009年10月

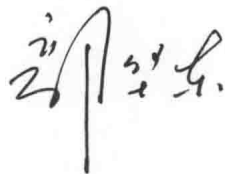
序

激光雷达技术由于其独特的测量原理和三维空间数据获取优势,以及巨大的行业应用和科学研究价值,已被国内外公认为是遥感领域最具活力和发展潜力的技术之一,人们将其与成像光谱、成像雷达并列为当今对地观测领域的三大前沿技术。相比于欧美等西方科技强国,我国激光雷达技术的发展历史相对较短,但各行业对激光雷达技术的需求却与日俱增。随着科技投入的加大,我国激光雷达系统研制和应用水平与国外差距不断缩小,研究成果也如雨后春笋般不断涌现。

该书第一作者是原中国科学院对地观测与数字地球科学中心(现遥感与数字地球研究所)引进的第一位中国科学院“百人计划”研究员,是我国激光雷达应用领域的优秀青年人才。作者在激光雷达遥感领域辛勤耕耘十余载,特别是近5年带领其研究团队潜心星载激光雷达应用研究,产出了一大批富有原创性的研究成果,已陆续发表于国内外重要学术期刊以及学术会议。现作者选择其中富有科学价值的精华部分凝结成书,使笔者有机会先睹为快。

该书是我国第一部关于星载测距激光雷达理论、方法和应用的研究专著,全面介绍了激光雷达测距原理、特点,重点探讨了星载激光雷达数据处理及其在森林、城市、冰川等方面应用的创新方法,并同时对国内外正在开展的星载激光雷达计划进行了梳理。毫无疑问,该书对我国未来的星载激光雷达计划和行业应用具有重要的参考价值。

当前空间信息技术蓬勃发展,由此产生的空间数据和信息也正以前所未有的速度不断增加和更新,是全球变化研究和行业应用不可或缺的宝贵资源。于科学家而言,重点在于对这些数据进行科学处理和信息“再加工”,实现数据“增值”。在祝贺该书出版之际,也期待作者与空间信息领域的其他青年科技工作者更加努力,潜心科研,为我国和国际的对地观测技术发展做出新贡献。



前 言

“大数据”已成为当前社会科学领域研究的热点,网络大数据和商业大数据已广泛用于互/物联网、新闻媒体、数字营销等,成为信息化社会无形的财富。2013年7月习近平总书记在考察中国科学院时指出,“大数据是工业社会的‘石油’资源,谁掌握了数据,谁就掌握了主动权”。美国政府已将大数据上升为国家战略和另一种“国家核心资产”。可以说,大数据不仅正在改变世界,改变人们观察世界的方法,而且对很多行业的发展起到决定胜负的作用,最终成为各国至关重要的自然资源。面对如此数据量大、类型繁多、更新快、时效性高的数据,郭华东院士将其中与科学研究相关的大数据称为科学大数据。这些数据一方面来源于人们对自然界的感知等,另一方面更多的是人们通过各种手段或测量仪器取得的。相对于其他大数据,科学大数据更强调来源的真实性和准确性,这样最终的分析结果才能更加准确和科学。

遥感技术为科学大数据提供了一种重要的数据获取手段,特别是卫星遥感技术的发展,为全球性的科学大数据提供了保障。当前世界各国已经发射了上百颗民用遥感卫星,获取的数据覆盖了地球的每个角落,并且被用于国民经济的方方面面,其中,传统光学遥感的数据量占了绝对优势,其次是微波遥感数据。然而,这些数据大多只客观反映了地球表面的平面信息,或者需要经过进一步复杂的数据处理才可得到垂直结构信息。在很多实际应用中,三维空间信息至关重要,如全球变化研究中的森林生物量和碳储量估算、森林垂直结构、冰川变化、全球高精度数字高程模型等,因此,地球三维空间信息成为科学大数据的重要组成部分。

激光雷达测距技术为三维科学大数据提供了另一种重要的数据获取手段,可以直接获取地物垂直结构参数,与成像光谱、成像雷达技术一起被称为当前遥感领域的三大前沿技术。激光雷达受大气和天空背景的干扰小,测距分辨率和角度分辨率高,既可获取目标垂直结构信息,也可获得目标表面的反射能量信息。星载激光雷达由于运行轨道高、观测范围广、全球覆盖频率高,可以提供全球不同区域(包括南北极等高纬度地区)的三维空间信息,在林业遥感、极地冰川监测和全球变化等领域前景广阔,应用潜力巨大。

2003年1月美国NASA发射了ICESat-1卫星,其上搭载的GLAS(geoscience laser altimeter system)激光雷达测高系统是世界上第一个能够进行全球连续观测的星载激光雷达系统,目前已被广泛用于全球或区域尺度的地学应用,如森林高度、林木蓄积量、林分断面积、地上生物量、全球DEM等提取。GLAS虽然在轨运行只有7年的时间,但却产生了巨大的科学研究价值。因此,美国在GLAS失效后立即开始了其后续计划——ICESat-2,其上主要的传感器即为激光雷达测距系统。NASA还计划在未来空间探索的多个领域使用激光雷达技术,如在地球科学领域将获取全球大气和陆地的长期监测数

据,反映了全球尺度高分辨率数据对激光雷达技术的强烈需求。

由于 GLAS 为离散的大光斑波形数据,地形对波形影响较大,处理方法因应用目的不同而多样,当前国内外还没有针对 GLAS 波形数据处理的商业软件,因此数据处理与应用多限于林业和冰川研究。我国激光雷达软硬件技术研制起步较晚,一些单位开展了星载激光雷达原理样机的研制,但距实际应用还有一定的距离,或者其针对的用户和应用范围有限。总之,我国目前还没有相对成熟和商业化的激光雷达测距系统问世。

本书是作者多年从事星载激光雷达 GLAS 数据处理研究与应用实践经验的结晶,是目前国内外第一本关于星载激光雷达数据处理和应用方面的专著,所涉及内容主要来自作者最新研究成果。由王成提出撰写大纲,并负责部分章节的编写以及全书的修改定稿。参加各章节编写的人员有刁晓环、骆社周、李贵才,以及课题组参与激光雷达数据处理与应用工作的部分研究生,包括聂胜、程峰、夏少波、唐福鑫、王勃、杨婷、韩婷婷等。

在研究过程和本书编写中得到了美国 NASA 的孙国清教授、美国北得克萨斯大学的董品亮教授和潘霏霏教授、加拿大多伦多大学的曾鸿程博士、云南师范大学王金亮教授、东北林业大学的邢艳秋教授、中国林科院的庞勇研究员、北京师范大学的张吴明教授、中国农业大学的苏伟教授、国家卫星气象中心王圆圆、郭兆迪博士等对本书内容提出了很多建设性的建议,作者在此表示感谢。遥感与数字地球研究所激光雷达研究组王星东博士以及历届研究生也付出了辛勤的汗水,在此一并感谢。

本书的出版得到了中国科学院百人计划专项、科技部 973 计划项目(2010CB951700)、国家自然科学基金重大国际合作研究项目(41120114001),以及国家自然科学基金面上项目(41271428 & 41371400)的支持。本书的编写得到《地球观测与导航技术丛书》编委会的指导和大力支持,并得到郭华东院士高屋建瓴的指导,在此表示衷心感谢。

虽然 GLAS 已于 2009 年结束其数据获取历史,但本书所涉及的全波形激光雷达数据处理算法和应用也同样适用于未来相关的星载激光雷达计划,以及机载、地面全波形激光雷达数据处理和应用。全波形激光雷达包含的信息丰富,是激光雷达的未来发展趋势。

由于激光雷达仍处于迅速发展阶段,一些原理和技术方法还在不断探索,本书内容仅反映了作者的部分研究成果和思想,加之编写时间仓促,疏漏和错误之处在所难免,望广大读者批评指正。此外,在本书编写过程中,为丰富书中内容、增加知识面,多处引用了互联网或者其他来源的部分参考资料,因编写疏忽而遗漏这些参考文献或者未标明其出处,敬请谅解。

著者

2014 年 12 月

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 激光雷达介绍	1
1.2 激光雷达理论	6
1.3 激光雷达发展历程	8
1.4 测距激光雷达研究进展	10
1.5 星载激光雷达研究进展	19
1.6 小结	23
参考文献	23
第 2 章 星载地球科学激光测高系统简介	26
2.1 概述	26
2.2 GLAS 工作原理	30
2.3 GLAS 数据误差分析及改正	32
2.4 GLAS 数据产品	34
2.5 GLAS 数据应用	39
2.6 小结	42
参考文献	42
第 3 章 GLAS 数据处理与波形分析	45
3.1 概述	45
3.2 数据预处理	45
3.3 波形数据处理算法	52
3.4 波形特征提取	61
3.5 小结	68
参考文献	68
第 4 章 GLAS 估算森林平均高度	70
4.1 概述	70
4.2 森林高度估算的研究进展	70
4.3 数据及数据处理	71
4.4 GLAS 光斑点的森林平均高度估算	77

4.5	GLAS 与 MISR 数据反演连续森林平均高度	80
4.6	GLAS 与 MODIS 数据反演森林平均高度	86
4.7	小结	94
	参考文献	94
第 5 章	GLAS 反演森林叶面积指数	96
5.1	叶面积指数研究进展	96
5.2	研究区域概况	98
5.3	数据获取与处理	99
5.4	GLAS 光斑内 LAI 反演	100
5.5	GLAS 与 TM 数据联合反演 LAI	102
5.6	小结	103
	参考文献	103
第 6 章	GLAS 估算森林生物量	107
6.1	森林生物量研究进展	107
6.2	研究区概况	109
6.3	试验数据	110
6.4	基于森林高度的云南省森林生物量估算	113
6.5	基于波形半能量高度的生物量估算	115
6.6	小结	117
	参考文献	117
第 7 章	GLAS 城市变化监测	121
7.1	城市变化遥感监测概述	121
7.2	实验数据	122
7.3	基于 GLAS 数据的城市变化监测方法	125
7.4	监测结果与变化分析	126
7.5	小结	130
	参考文献	131
第 8 章	GLAS 冰川地形坡度估算	133
8.1	概述	133
8.2	研究区域和数据	134
8.3	研究方法和模型	136
8.4	结果与分析	140
8.5	小结	144
	参考文献	144
第 9 章	ICESat-2 数据处理及应用	147
9.1	ICESat-2 介绍	147
9.2	ICESat-2 试验与数据处理	150

9.3 ICESat-2 应用实例与展望	154
9.4 小结	158
参考文献	158
第 10 章 未来星载激光雷达计划及展望	160
参考文献	161
索引	163

第 1 章 绪 论

1.1 激光雷达介绍

1.1.1 激光雷达

“雷达”源自英文 radar (radio detection and range) 一词,以毫米、微米等电磁波作为信息载体,利用波的振幅、频率、相位和偏振来搭载信息,用于测量距离、角位置、速度等运动参数和反射率、散射截面及形状等目标特征参数。而激光雷达是现代激光技术与光电探测技术相结合的产物,是传统的微波雷达向光学频段的延伸(Wagner et al., 2006)。它是一种以激光器作为发射光源、采用光电探测技术的先进技术。在工作原理上,激光雷达与雷达相似,区别在于激光雷达是以激光为信息载体,可以测距、定向,并可通过位置、径向速度、物体反射和散射等特性来识别目标特性(戴永江, 2002)。

激光雷达系统一般由发射系统、接收系统、信号处理系统及相关控制系统组成。

1. 发射系统

发射系统包括激光发射器、激光调制器、光束控制器和光学发射天线。激光发射器由激光电源和激光器等组成,用于产生和发射激光。激光调制器能将发射的激光调制成探测所需的连续波或脉冲,并形成探测所需的特定频率、幅度、偏振化、相位、脉宽、脉幅和重复频率。光束控制器主要功能是控制激光束在空间的位置、方向及激光束宽度。光学发射天线(发射望远镜)通过改变激光束宽度和波形形状来达到所需的波形参数,使探测目标获得的能量最大。

2. 接收系统

接收系统包括光学接收天线和光电探测器。前者通常也称为接收望远镜,主要任务是接收目标的反射和散射信号,并经能量汇集后输入光电探测器的光敏面。后者获取天线接收的信号,并将其转换为电信号。

3. 信号处理系统

信号处理系统包括信号预处理系统和信号处理系统。信号预处理系统首先利用前置放大器将电信号进行匹配滤波、去噪、信噪比增强,以及频率、相位和偏振等预处理,再经主放大器放大到一定功率。信号处理系统将预处理后的信号处理为含有速度、距离、

角度和目标图像特征等信息,然后通过模/数转换器转变为数字信号,最后转变为可分析、显示及传输的数据和图像信息。

4. 控制系统

控制系统包括伺服系统和通信系统。伺服系统主要是利用处理器提供的角速度和角度信息来控制激光雷达对捕获目标的跟踪。通信系统将处理器输出信号以光电通信方式传输到其他控制中心并进行存储或其他操作(戴永江, 2002)。

1.1.2 激光雷达分类

经过几十年的发展,激光雷达种类也在不断增加,不同学者对激光雷达有不同的分类方法。通常可根据搭载平台、激光波长、激光发射波形、激光介质、探测方式、激光雷达功能及用途等对激光雷达进行分类(胡炜, 2003;文斐, 2013):

1. 按照搭载平台

按照搭载平台,激光雷达可分为天基激光雷达、空基激光雷达和地基激光雷达三类。天基激光雷达主要以卫星、航天飞机、太空站等航天器为平台;空基激光雷达主要以固定翼飞机、直升机、无人机等航空器为平台;地基激光雷达主要包括地面(三脚架固定)、船载、车载及手持激光雷达等。

2. 按激光器所采用的激光波长

激光雷达可分为紫外激光雷达、可见光激光雷达和红外激光雷达。激光雷达由最初的可见光波段拓展到红外波段,甚至紫外波段。紫外波段通常为 $0.3\sim 0.38\mu\text{m}$,可见光波段在 $0.38\sim 0.74\mu\text{m}$,红外波段又可以分为近红外($0.72\sim 1.5\mu\text{m}$)、中红外($1.5\sim 5.6\mu\text{m}$)和远红外($5.6\sim 1000\mu\text{m}$)(赵英时, 2003)。

3. 按激光发射波形

激光雷达可分为脉冲激光雷达和连续波激光雷达。脉冲激光雷达主要利用激光脉冲在发射和接收信号之间往返传播的时间差来进行测量;连续波测量模式是一种间接方式,利用无线电波段频率对激光束进行幅度调制并测定调制光往返观测目标一次所产生的相位延迟,最后根据调制光波长计算此相位延迟所代表的距离,该模式测量精度高。

4. 按探测方式

激光雷达可分为直接探测激光雷达和相干探测激光雷达两类。直接探测激光雷达较为简单,激光器发射的信号经目标反射后被接收系统收集,雷达将接收的辐射直接转换成信号,并通过测量信号往返时间来确定激光器和目标之间的距离;相干探测激光雷达由激光器本身振荡辐射与回波形成混合信号,最终信号与两种辐射场的相对位置有关(胡春生, 2005)。

5. 按激光介质

激光雷达可分为气体激光雷达和固体激光雷达。气体激光雷达利用气体或蒸汽作为工作物质来产生激光,主要以 CO₂ 激光器为代表,采用波长为 10.6 μ m,其特点是相干性好、波束窄、视场小、抗干扰能力强,同时还具有良好的大气传输性、兼容性及使用安全等优点,缺点是体积庞大而沉重。固体激光雷达又可以分为半导体激光雷达和二极管泵浦固体激光雷达,前者以激光条为基本单元,输出功率大、工作电流大、热损耗大;后者以钇铝石榴石(YAG)激光器为代表,采用高重复频率、高峰值功率的二极管泵浦固体激光器和高灵敏度的雪崩二极管探测器,体积小、质量小、价格低,虽然相对于气体激光器其转换效率低,但仍然是目前激光雷达发展的重点。

6. 按激光雷达功能

激光雷达可分为激光测距雷达、激光测速雷达、激光测角和跟踪雷达、激光成像雷达、测深激光雷达、激光目标指示器和生物激光雷达等。

7. 按激光雷达用途

激光雷达可以分为测距激光雷达、火控激光雷达、靶场激光雷达、跟踪识别激光雷达、侦毒激光雷达、多功能战术激光雷达、气象激光雷达和大气监测激光雷达、导航激光雷达等。

8. 按接收回波类型

激光雷达可以分为波形激光雷达和离散激光雷达两种。波形激光雷达可对回波信号进行精细采样,采样次数可达几百次,能进行波形重构;而离散激光雷达仅进行有限次回波采样。

9. 按光斑大小

激光雷达可以分为大光斑激光雷达和小光斑激光雷达。例如,星载激光测高系统 GLAS 的光斑直接约为 70m,属于大光斑激光雷达系统;而机载激光雷达光斑通常从几厘米到几十厘米,属于小光斑激光雷达系统(骆社周,2012)。

1.1.3 激光雷达的特点

激光雷达使用的激光束的工作频率比微波高,其特点主要表现为:

(1) 获取地物三维空间信息快速、直接。激光雷达最大的特点是测距功能,能够直接、快速获取目标高精度、高密度的三维空间信息。

(2) 分辨率高。激光波长短、方向性好,具有极高的角度、距离和速度分辨率,通常角分辨率约为 0.1mrad,可同时跟踪多个目标。

(3) 抗干扰能力强。激光直线传播、方向性好,光束非常窄、隐蔽性好;不受无线电波干扰,能穿透等离子鞘,低仰角工作时受地面多路径效应影响小。

(4) 激光波长短。可以在分子量级上对目标探测,其他雷达不具备这样的功能。

(5) 低空探测性能好。微波雷达易受各种地物回波的影响,低空探测时存在盲区。而激光雷达只有被照射目标才会产生反射,不受其他地物的影响。

(6) 与功能类似的微波雷达比较,激光雷达的体积更小、质量更小。

(7) 穿透性强。激光雷达脉冲频率高,可以穿透森林植被到达林下,蓝绿激光雷达还可以穿透一定深度水体获取水下地形信息。

激光雷达优势明显但也有其不足之处。首先,激光受天气和大气影响大:晴朗天气激光衰减较小,传播距离远;而大雨、浓烟、浓雾等恶劣天气激光衰减急剧加大,传播距离短;另外,大气湍流也会降低激光雷达的测量精度。其次,激光雷达的波束极窄,搜索目标非常困难,影响目标的截获概率和探测效率。

1.1.4 激光雷达的应用

激光与目标接触后的作用方式主要包括反射、(瑞利、米氏和拉曼)散射、吸收和透射等类型(张金业,2010)。其中,反射通常用于测量距离,是激光雷达重要应用之一。按应用领域不同可分为科学试验激光雷达、民用激光雷达和军用激光雷达。

1. 科学试验领域

科学试验领域主要利用星载激光雷达系统进行测距,主要用于行星、月球、大气探测、对地探测等方面。

1) 行星探测

行星探测主要利用激光高度计的测距功能,对火星、水星或者其他小行星等的地形、地貌进行探测,同时还可以获取行星表面反射率特征、分析行星表面矿物分布,以及反射率的季节变化,为星体地质科学和物理学研究提供更多的科学数据;通过绘制高精度地形图,为人类未来登陆这些行星、科学选择着陆点提供地学和地形学上的依据。

2) 月球探测

月球是距离地球最近的天体,了解月球、利用月球资源始终是人类的梦想,月球地形为人类研究月球内部结构及其演化提供重要的基础信息。利用飞船搭载的激光雷达高度计可以测量月球山体、撞击坑及其他地形高度,制作月球表面高精度的高程图,也可以研究月球岩石圈的应力应变特性,或者结合重力信息研究月球外壳密度及其空间分布。另外,还可以通过激光波束测量月球表面的起伏程度,通过反射能量强度来测量月球表面反射率,以及通过激光波束的不同返回时间测量月球表面的倾斜度;结合月球表面的数字高程模型(digital elevation model, DEM),可以确定月球表面上永久阴影区和永久光照区的分布,这些研究可为探月计划中选择登陆点和建设基地等提供参考。

2. 民用领域

1) 大气探测应用

激光雷达可以监测气溶胶和云的特性、云与气溶胶相互作用,以及大气质量与污染物的扩散等。气溶胶浓度是衡量大气污染程度的标准之一,激光与气溶胶粒子作用发生米氏散射,根据这一特性完成气溶胶浓度和能见度测定及其时空分布的动态监测。另外,差分吸收激光雷达还可以观测大气成分以及测量风速、气温、湿度等气象要素。

2) 对地探测应用

(1) 基础测绘。激光雷达可获取高密度、高精度的点云数据,记录目标表面的三维坐标。选用合适的点云滤波算法可去除植被、建筑物等地上目标的激光点云,然后通过构建不规则三角网(TIN)提取数字高程模型。星载激光雷达数据空间分辨率较低,但是垂直分辨率高,能获取目标点的高精度三维坐标信息,可以用于全球高程测量以及控制点获取。

(2) 文化遗产保护。地面激光雷达能获取遗产表面结构或者考古现场真实形态的高密度点云数据,通过点云处理、模型构建和纹理映射等步骤产生遗产及其周边环境的真三维数字模型,也可实现考古过程的数字化和动态记录。

(3) 数字城市。激光雷达对地面建筑物进行多角度扫描,快速获取城市中各类建筑物的三维点云数据,处理后得到“数字城市”建设所需要的高精度、真三维、可量测且具有真实感的城市建筑三维模型,实现对建筑目标的精确量测及实时交互呈现。

(4) 工程测量。激光雷达已逐步应用于土木建筑工程、巷道与洞穴测量、工厂设施与管线测量、大坝变形监测等,涉及建筑产业、采矿产业、电力产业等多个领域。

(5) 林业调查。激光雷达技术可以用来提取树高、冠幅、地上生物量、冠层覆盖率、叶面积指数、林木密度、蓄积量等信息,还可以提取林下地形信息。

(6) 极地冰盖监测。激光雷达能够精确测量极地冰盖表面特征、冰层厚度变化,还可以测量海冰高程、粗糙度及表面反射率等。例如,星载激光雷达 GLAS 数据的覆盖范围广,已经被成功用于南北两极冰盖变化及全球海平面变化的研究。

3) 测深激光雷达

测深激光雷达发射大功率窄脉冲蓝绿激光,可以穿透几米到几十米的水体,通过接收反射回波探测水下目标的方位、速度等参数,还可以识别水下目标的形状特征,通常用于海洋测绘和水下目标探测。

3. 军事领域

激光雷达主要应用于战场侦测、跟踪及火控系统等方面。

1) 战场侦察激光雷达

激光雷达与传统成像技术的区别在于可通过采集方位角、俯冲角、距离、速度、强度等数据显示仿真图像,不仅能获取精确的三维地理信息,还可产生分辨率极高的辐射强度图像、速度图像、距离图像等,是战场侦察的有效手段,在军事领域有着广阔的应用

前景。

2) 火控及跟踪激光雷达

20 世纪 70 年代末激光雷达开始用于武器的火控系统。基于精确测距、精确跟踪、精确测速等特点,激光雷达已应用于军事跟踪测量,可在大角度范围内以高跟踪修正速率跟踪单个或多个目标。

3) 其他军用激光雷达

激光雷达还可以应用于武器鉴定、指挥引导、障碍回避、导弹发射初始段和低飞目标的测量。

1.2 激光雷达理论

激光雷达通过发射脉冲信号并接收回波信号来对物体表面进行非接触的探测,其遥感过程主要包括两个内容:①信号与大气的相互作用,包括脉冲下行与反射信号上行;②物体与信号的相互作用,包括散射、吸收与透射等。研究激光雷达观测机理对激光雷达产品生产及地表参数反演有重要意义。然而,激光雷达接收信号不仅反映了遥感过程,还受传感器性能、观测对象表面特性以及周围环境等因素的影响。通常激光雷达的工作过程可以用激光雷达方程来表达,激光雷达方程是描述激光雷达成像过程的理论基础。

1.2.1 激光雷达方程

激光束穿透大气—与散射体相互作用—返回接收器,这一物理过程十分复杂,因此,需要对遥感过程进行简化。通常激光雷达方程基于两个基本假设:①激光器发射的能量在光斑内均匀分布;②散射体将入射能量均匀地散射到立体角为 Ω 的圆锥体中。在此基础上,推导得到雷达方程(Wagner et al., 2006)。

激光束打在某一散射体表面的光斑面积 A_{laser} :

$$A_{\text{laser}} = \frac{\pi R^2 \beta_t^2}{4} \quad (1.1)$$

式中, R 为散射体与激光器的距离; β_t 为激光脉冲的宽度。依据基本假设①,散射体表面的能量密度 S_s 表示为

$$S_s = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \quad (1.2)$$

式中, P_t 是发射能量; S_s 描述了激光脉冲能量随传输距离增加而逐步衰减的性质。考虑散射体的反射率 ρ 及有效面积 A_s , 则散射出的能量 P_s 可表达为

$$P_s = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \rho A_s \quad (1.3)$$

依据基本假设②,若圆锥体与接收器视野存在重叠,则返回信号的能量密度 S_r 可表达为