

星载激光雷达反演森林 生物量方法及其应用

邢艳秋 等 著



科学出版社

星载激光雷达反演森林 生物量方法及其应用

邢艳秋 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了作者近年来在星载激光雷达领域的研究成果。全书共分9章,详细介绍了 ICESat-GLAS 系统,深入阐述了 GLAS 数据处理及其波形参数提取的方法与过程。在此基础上对基于 GLAS 波形参数反演森林冠层高度与森林地上生物量做了系统的研究,并针对 GLAS 数据空间不连续及无法成像的问题,深入系统地介绍了 ICESat-GLAS 数据联合 MODIS 数据反演森林地上生物量的方法与应用。

本书适合学习研究 ICESat-GLAS 数据与 MODIS 数据的不同层次的读者需要,可作为从事激光雷达数据处理、林业遥感、森林生态系统研究等相关专业的在校学生、教师与科学研究者使用,同时也可作为广大遥感数据处理技术人员的自学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

星载激光雷达反演森林生物量方法及其应用/邢艳秋等著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047888-7

I. ①星… II. ①邢… III. ①卫星载雷达-激光雷达-应用-森林-生物量
IV. ①TN957.52②S718.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 059144 号

责任编辑:彭胜潮 赵 晶 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:11 1/4 插页:1

字数:255 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是激光探测及测距系统的简称,通常由发射系统、接收系统、信息处理等部分组成,作为一种激光技术与现代光电探测技术结合的先进探测方式,具有其他遥感技术不具备的独特优势。激光雷达作为一种主动遥感技术,能够不受日照和天气条件的限制,实现全天候对地观测,同时能够使部分激光脉冲穿透林木冠层,直接打到地面,进而获得林下高精度地面三维信息等,这些优点有效弥补了传统遥感的缺陷与不足,使其在灾害和环境监测、资源勘查、森林资源调查及地形测绘等方面得到广泛应用。近年来,随着科学技术的发展及计算机的广泛应用,激光雷达技术也呈多样性发展趋势,现主要包括星载激光雷达、机载激光雷达、车载激光雷达和地基激光雷达等,且均已成功应用于社会发展与科学研究的多个领域;同时,其商业应用及科学研究的潜力和优势也得到了充分体现与肯定,有望成为下一个“蓝海”。

GLAS(geoscience laser altimeter system)是美国航空航天局搭载在 ICESat(ice, cloud and land elevation satellite)卫星上的第一个用于全球连续观测的星载激光雷达测高系统。它能够进行全球观测,提供大范围、大尺度的地表垂直结构信息,已广泛应用于高程提取、冰盖高度、森林高度、森林蓄积量与生物量估测及水资源、气溶胶等研究领域,促进了冰川学、林学等学科的发展,克服了人工测量的不足,弥补了传统光学遥感的缺陷,为科学研究提供了更加先进的技术手段,具有重大的科学研究价值。

近年来,作者在星载激光雷达 ICESat-GLAS 数据处理、参数提取及森林结构参数定量反演方面进行了大量的探索性工作,并取得了丰硕的研究成果,期间得到了国家自然科学基金面上项目“基于星载激光雷达波形数据的森林水平结构参数反演方法”(40871192)和“星载激光雷达与高光谱数据联合反演森林生物量的方法与机理”(4117124)的资助与支持。

本书在详细论述国内外不同遥感数据源估测森林结构参数基础上,系统地介绍了 ICESat-GLAS 的系统构成及工作原理、ICESat-GLAS 的数据处理与参数提取、ICESat-GLAS 森林结构参数定量反演、MODIS 数据处理与参数提取、MODIS 森林结构参数估测及森林地上生物量的 ICESat-GLAS 与 MODIS 联合反演。作为上述国家自然科学基金项目相关研究成果的系统总结与归纳,本书可作为高等院校与科研院所森林经理、林业定量遥感、森林工程等相关专业老师及学生的教学辅导用书,也可用作从事激光雷达数据处理、林业定量遥感及森林资源调查等工作人员的参考用书。

根据内容的侧重点不同,本书分为四部分共 9 章。第一部分为绪论,包括第 1 章,主要论述了不同遥感数据源在森林结构参数估测方面的研究现状及优缺点,同时简要介绍了本书所选的研究区、研究数据及研究内容等;第二部分为 ICESat-GLAS 森林结构参数定量反演,包括第 2~第 5 章,主要介绍了 ICESat-GLAS 的系统构成及工作原理、

ICESat-GLAS 的数据处理与参数提取、森林冠层高度及森林地上生物量的 ICESat-GLAS 遥感反演；第三部分为 MODIS 森林结构参数定量反演，包括第 6~第 8 章，主要介绍了 MODIS 数据处理与参数提取、MODIS 森林类型识别及 MODIS 森林地上生物量的遥感反演；第四部分为多源遥感数据森林地上生物量联合反演，包括第 9 章，主要是在 ICESat-GLAS 与 MODIS 数据基础上，借助神经网络算法联合实现森林地上生物量的高精度空间连续估测。

本书是作者近年来在星载激光雷达 ICESat-GLAS 数据处理、参数提取及森林结构参数定量遥感方面的研究成果，是目前国内第一本关于星载激光雷达在林业结构参数定量遥感方面的专著，所涉及内容主要来自作者所在团队近几年的研究工作与成果。由邢艳秋负责全书大纲与框架的提出与撰写，并负责全书的修改、定稿与统筹。参加数据处理及章节编写的人员有吴红波、李立存、杨超、李俊明、尤号田、王蕊、丁建华、邱赛、孙小添、王爱娟、谢杰、曾旭婧等。在本书编写过程中，中国林业科学研究院资源信息研究所李增元研究员、中国科学院遥感与数字地球研究所王成研究员等针对本书的章节安排、内容组织等方面提出了很多宝贵的建设性意见，在此由衷地表示感谢。

虽然作者在本书撰写过程中力求叙述准确与完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，敬请广大读者与同行专家批评指正，共同促进本书质量的提高。

邢艳秋

2015 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 森林生物量估测的研究意义	1
1.2 光学遥感在森林结构参数估测领域的应用	3
1.3 微波雷达在森林结构参数估测领域中的应用	7
1.4 激光雷达在森林结构参数估测领域的应用	9
1.5 研究区与数据介绍	20
1.6 研究内容	30
1.7 小结	31
参考文献	31
第 2 章 星载激光雷达 ICESat-GLAS 系统	38
2.1 激光及其测距理论	38
2.2 ICESat-GLAS 技术原理	44
2.3 ICESat-GLAS 系统组成	48
2.4 ICESat-GLAS 工作原理	55
2.5 ICESat-GLAS 产品系列	57
2.6 小结	60
参考文献	60
第 3 章 ICESat-GLAS 数据处理	62
3.1 引言	62
3.2 ICESat-GLAS 波形数据预处理	63
3.3 数据降噪	66
3.4 结果与讨论	79
3.5 ICESat-GLAS 波形误差来源分析	81
3.6 小结	83
参考文献	83
第 4 章 ICESat-GLAS 数据反演森林冠层高度	85
4.1 引言	85
4.2 现存反演模型与问题综述	85
4.3 数据处理	87
4.4 基于现有模型的 ICESat-GLAS 完整波形反演森林冠层高度	93
4.5 ICESat-GLAS 完整波形反演森林冠层高度改进模型	97
4.6 ICESat-GLAS 波形反演森林平均冠层高度	102

参考文献	108
第 5 章 ICESat-GLAS 数据反演森林生物量	111
5.1 引言	111
5.2 现存反演模型与问题综述	111
5.3 基于 LiDAR 最大森林冠层高度反演森林生物量	117
5.4 基于 LiDAR 波形参数反演森林生物量	119
参考文献	131
第 6 章 MODIS 数据介绍及数据处理	134
6.1 引言	134
6.2 MODIS 数据简介	134
6.3 MODIS 数据处理及参数提取	142
6.4 小结	145
参考文献	145
第 7 章 MODIS 森林类型识别	147
7.1 引言	147
7.2 特征信息提取	147
7.3 分类方法及标准	148
7.4 结果与讨论	152
7.5 小结	153
参考文献	154
第 8 章 MODIS 数据反演森林地上生物量	155
8.1 引言	155
8.2 MODIS 数据参数及分析处理	155
8.3 模型建立与分析	162
8.4 结果与讨论	163
8.5 小结	165
参考文献	165
第 9 章 ICESat-GLAS 与 MODIS 数据联合反演森林地上生物量	166
9.1 引言	166
9.2 研究方法和技术路线	167
9.3 模型建立与分析	168
9.4 结果与讨论	169
9.5 小结	171
参考文献	171

第 1 章 绪 论

1.1 森林生物量估测的研究意义

根据国际粮农组织 FAO-FRA 2005 年的定义,森林碳储量是指森林生物量中的碳元素储量。森林生物量中的碳储量取决于植物生长部位、树种和立地条件,所以,最好采用具体的转换因子来计算森林碳储量。如果没有具体的转换因子可用,大多数国家则根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)大纲中的规定,用森林生物量的 47%作为森林碳储量。全球碳素有 3 个大的储库:海洋、大气和陆地生态系统。从 20 世纪 70 年代后期开始,全球碳循环研究受到人类的普遍关注,特别是在近几十年到几百年时间尺度上的人类活动,如化石燃料(煤、石油和天然气等)的燃烧和非持续性土地利用(砍伐森林、开垦草地、改造沼泽等)对全球碳循环的影响。在当前的国际地圈-生物圈研究计划中,碳循环是全球变化与陆地生态系统等多个核心计划中的重要研究内容。陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的生命支持系统,也是受人类活动影响最大的区域,而陆地碳循环是全球碳循环的重要组成部分,在全球碳收支中占主导地位。自 20 世纪以来,人类活动的影响在规模上已从陆地系统扩展到整个地球系统。森林锐减、土地退化、环境污染、生物多样性丧失,特别是人类活动产生的 CO_2 浓度急剧上升和由此导致的温室效应等是目前人类所面临的最严峻的全球环境变化问题。研究陆地碳循环机制及其对全球变化的响应,是预测大气 CO_2 含量及气候变化的重要基础,这已引起科学界的高度重视。在陆地生态系统中,森林是最大的有机碳贮库,森林及其变化对陆地生物圈及其他地表过程有着重要影响。森林植被是陆地生物圈的主体,约有 85%的陆地生物量集中在森林植被(Leith and Whittaker, 2012)。因此,为了正确评估森林在全球碳平衡中的作用,了解森林生态系统在碳循环中的作用,对森林的碳动态进行更为细致的研究正日益成为人们关注的重点,而森林生物量估算是进行陆地生态系统碳循环和碳动态分析的基础(Hussin, 1991),业已成为生态学和全球变化研究的重要内容之一。

1992 年,全世界 166 个国家签署了《联合国气候变化框架公约》,1997 年 12 月各国又在日本京都签订了《京都议定书》,规定了各国为减少温室气体的排放而应履行的责任和义务。为了帮助发展中国家实现可持续发展,同时协助发达国家实现其在《京都议定书》第 3.1 条款下的减排承诺,《京都议定书》第 12 条确立了清洁发展机制。2003 年 12 月,《联合国气候变化框架公约》第九次缔约方大会已经正式通过了《CDM 造林再造林项目活动的方式和程序》。2004 年 12 月第十次缔约方大会进一步确定了小规模 CDM 造林再造林项目活动的简化方式和程序。随着 2009 年年末第 15 次会议通过的《哥本哈根协议》的生效,公约参加国对控制温室气体的排放,尽量延缓全球变暖效应,将大气中的温室气体含量稳定在一个适当的水平,进而防止剧烈的气候改变对人类造成伤害达成

一致,至此 CDM 造林再造林项目再次受到各国的重视。本书以吉林省长白山汪清林区为研究区,以星载激光雷达和多光谱遥感数据为基础数据,旨在进行森林地上生物量的估测理论和方法研究,以期能够实现森林地上生物量的大区域连续高精度估测,为我国其他类似研究提供可靠的理论和实践经验。其具体意义主要体现在以下 5 个方面。

1. 研究的必要性

大量研究表明,森林破坏(尤其是热带雨林的破坏)已成为继化石燃料燃烧之后,大气中 CO_2 浓度增加的第二大来源。与此同时,人们通过对全球碳通量的估算发现,大气中 CO_2 浓度的增加、海洋 CO_2 的吸收与化石燃料燃烧和森林破坏所释放 CO_2 的量之间还存在着一个巨大的亏空,即前二者的量要小于后二者的量,化石燃料消耗及热带林破坏导致约 $7.0 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ ($1 \text{ Pg} = 10^9 \text{ t}$) 的 CO_2 向大气排放,其中 $3.0 \sim 3.4 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 CO_2 被用于大气 CO_2 浓度的升高,约 $2.0 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 CO_2 被海洋吸收,而陆地生物圈被认为是 CO_2 净吸收与净排放基本达到平衡。因此,在人工源 CO_2 中,尚有 $1.6 \sim 2.0 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 CO_2 去向不明。这就是目前科学家已普遍公认的 CO_2 “失汇”。很多科学家认为,造成 CO_2 “失汇”的原因是对陆地生态系统尤其是森林生态系统的碳动态缺乏精确的了解。大气成分监测、 CO_2 通量测定,以及模型模拟等方面的研究都表明,北半球是一个巨大的碳汇(Fransson, 1999)。但由于碳循环是一个极其复杂的生物学、化学和物理学过程,受到自然和人为活动的双重作用,所以现代的科学技术及其数据的积累尚不能准确地回答碳汇到底有多大,其区域分布如何。也就是说,碳汇问题仍存在着相当大的不确定性(Houghton et al., 2001; Kramer, 1981)。因此,很难说某一国家对碳汇的具体贡献有多大。为减少碳汇估计值的不确定性,方精云等(2001)认为,加强长期定位监测、改良现有估测模型对提高碳汇估测精度是至关重要的,特别是由于我国地域辽阔,植被类型多样,这就需要对不同地区植被分别进行研究,以寻求不同森林类型的碳库,进一步探索碳循环模式。

2. 研究的紧迫性

我国作为世界上最大的发展中国家,对能源的需求量很大,1992 年因化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量位居世界第二。北京大学研究小组利用森林资源清查资料及生物量实测资料构建了世界上第一个国家尺度的长达 50 年的森林生物量数据库,阐明了半个世纪以来中国森林植被 CO_2 源汇功能的动态变化,为确认北半球陆地碳汇的存在和大小提供了直接的证据(Fang et al., 2001),为探索 CO_2 “失汇”之谜打下了坚实基础。但总的来说,中国在这方面的研究仍十分薄弱,知识积累也较少,特别是对森林生态系统中下木及林内草本生物量的研究甚少。这不仅不利于了解中国生态系统的结构、功能及其对未来环境变化的响应,也不利于中国参加有关的国际谈判。因此,对中国而言,碳循环的研究十分重要,也十分紧迫,尤其是搞清中国陆地生态系统在全球碳循环中是碳源还是碳汇,这关系到中国未来能源和农林业政策的制定以及履行在《联合国气候变化框架公约》哥本哈根会议中所达成的共识——稳定当前的大气温室气体含量。

3. 研究的实用性

由于历史原因,我国对森林生物量的调查研究始于20世纪70年代末和80年代初,虽然近30年来已积累了大量研究资料,但由于传统估测方法耗时费力、破坏性大且不具备在大的时间和空间尺度上操作的可能性,因此这些研究只是关于某一时间林分生物量的实测和森林现存生物量的推测,缺乏森林生物量和碳储量在时间和空间尺度上的动态变化研究,因而无法对我国森林的源汇功能进行正确评估,从而影响进一步评价我国森林在全球气候变化中的作用。“3S”(RS、GIS、GPS)技术的出现和发展,使这一问题得以初步解决,并大幅度提高了森林生物量估测的效率及精度。本研究利用星载激光雷达与多光谱遥感技术,综合地形因子参数建立森林生物量模型,不仅为林业生产和科研提供可靠理论与实践依据,也为研究区提供了可视化的整体规划指导,增强了研究成果的推广性。

4. 研究的经济性

作为传统森林生物量调查方法的一种,收获法所使用的手图主要是航空像片和地形图,且需要投入大量的人力和物力。由于地形图编制周期较长,且在森林资源信息的表达方面不能满足森林分类的要求,因此经常采用费用比较高的航空像片。这样就造成了森林生物量调查的巨额费用。相比而言,费用低、现势性好的航空遥感数据则显示出巨大的竞争力和生命力。本研究的主要目的是在保证估测精度的前提下,最大限度地减少地面调查工作量,以较少的人力与物力投入来得到大面积范围的森林生物量,具有较强的经济优势。

5. 研究的创新性

星载激光雷达ICESat-GLAS与MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)多光谱影像数据协同实现森林生物量的大区域连续高精度估测。

星载激光雷达ICESat-GLAS在森林生物量估算方面虽已取得了一定成功,但因现有滤波算法均无法完全消除地形的影响,同时因数据本身为点状离散分布,致使其在实现森林生物量大区域连续高精度估测方面有一定的局限性。MODIS作为全球覆盖的光学遥感数据,波段较多,波段分割相对较为精细,因此能够反映较为详细的连续森林水平结构信息,应用到大区域连续森林生物量反演时具有一定优势。本研究将星载激光雷达ICESat-GLAS与MODIS影像数据进行联合,共同用于反演森林地上生物量,与单数据源相比,既提高了估测精度又实现了大区域的连续估测,为全球森林生物量的连续估测奠定了基础。

1.2 光学遥感在森林结构参数估测领域的应用

传统光学遥感一般是被动遥感,接收的电磁波辐射源是地物对太阳光的反射和散射,电磁波波长主要分布在可见光和近红外区域($0.4\sim 2.5\mu\text{m}$),对其光谱信息进行分

析发现其能够在一定程度上反映森林的生物物理特性(Lefsky et al. , 2001; Patenaude et al. , 2005)。近年来,许多研究以光学遥感数据为基础,借助回归分析等方法对森林立木结构参数,如郁闭度、冠幅、叶面积指数和森林类型等进行估测。目前,常用的光学遥感数据有 Landsat TM/ETM+ (landsat thematic mapper/enhanced thematic mapper)、MODIS、SPOT(systeme probatoire d'observation de la terre)、快鸟影像(Quick-Bird)等。各传感器特点见表 1-1。

表 1-1 用于森林结构参数估测的主要光学遥感数据

传感器	任务	空间分辨率	幅宽/km	重访周期/d	时间范围
TM/ETM+	Landsat-5/Landsat-7	30 m(ETM 全波段为 15 m)	185	16	1984~1999~
	Landsat-8				2003
VEGETATION	SPOT-4, -5	1. 15 km	2200	2	1998~
IKONOS	IKONOS	4 m (全波段 1 m)	11	1~3	1999~
MODIS	Terra, Aqua	1 km, 0. 5 km, 0. 25 km	2330	2	1998~
QuickBird	QuickBird	24 m(全波段 0. 61 m)	16. 5	1~3. 5	2001~
Hyperion	EO-1	30 m	7. 5	—	2000~

1. 森林郁闭度

森林郁闭度是指森林中乔木树冠遮蔽地面的程度,直接反映了林分的密集程度,是森林的主要结构参数之一。许多研究用光学遥感数据成功估测了森林的郁闭度,如谭炳香等(2006a)应用 EO-1 Hyperion 高光谱遥感数据定量估测森林郁闭度;曾源等(2007)利用线性光谱混合模型和几何光学模型,以高光谱遥感数据为数据源,对龙门河自然保护区的森林冠层和郁闭度进行研究;杜晓明等(2008)首先用 Bootstrap 方法筛选出 ETM 数据估测森林郁闭度的最优变量,接着用偏最小二乘回归算法建立森林郁闭度估测模型,从而实现了森林郁闭度的高精度估测;陈崇等(2011)从 TM 遥感影像中提取变量因子,利用 BP 神经网络和逐步回归分析模型对亚热带森林郁闭度进行估测,结果表明 BP 神经网络优于逐步回归分析模型;江森等(2011)对 NDVI、MODIS 和 TM 数据进行非线性回归分析,利用像元二分法修正回归模型估测了森林植被的覆盖度并得到较高的估测精度;万红梅等(2011)以 QuickBird 遥感影像为基础,采用人机交互的方法提取了塔里木河下游离河距离不同的胡杨、怪柳的树冠信息,并与野外实测值进行对比,结果林分郁闭度的提取精度为 69. 45%;高云飞等(2012)以重庆市云阳县为研究区,分别计算了对应地块同期 SPOT-5 影像各波段的 DN 均值和标准差,并对 SPOT-5 影像在不同郁闭度情况下的稳定性进行了分析与评价,结果表明,红、绿波段是反演郁闭度的最佳波段组合,拟合方程判定系数 R^2 为 0. 66。

2. 森林冠幅

树冠是树木进行光合作用的重要场所,是树木生长所需能量的重要来源之一,林分冠幅结构具有一定的空间分布特征,从高分辨率影像数据所表现出的几何形状、尺寸和

空间格局等角度去研究林分冠幅空间结构特征,可以得到林分冠幅较为准确的估计。冯益明等(2006)以 QuickBird 遥感影像为数据源,利用统计学半方差理论对林分冠幅进行估计,结果表明,对郁闭度较高的人工纯林而言,整个林分影像像素值半方差函数的变异可以作为林分冠幅的准确估计值;Sohn 等(2007)同样用 QuickBird 遥感影像为数据源,通过对塞内加尔北部靠近达拉镇的干旱植被进行调查和分析,在其基础上用异速生长模型估测了冠幅等参数,接着在 QuickBird 遥感影像上应用对像分类法估测了林分的树冠覆盖度,结果表明,实际调查与通过遥感影像确定的树冠覆盖度均为 3.0%。

3. 叶面积指数

与此同时,许多学者采用传统光学遥感手段对森林叶面积指数(leaf area index, LAI)也进行了估测。Pu 等(2002)利用 Hyperion、ALI(the advanced land imager)和 AVIRIS(airborne visible infrared imaging spectrometer)三种遥感数据对森林植被 LAI 进行了估测,首先采用逐步回归方法选择与 LAI 关系密切的光谱波段,然后建立各波段与 LAI 的多元回归方程。结果表明,AVIRIS 的估测精度最高,其次为 Hyperion,ALI 的估测精度最低,其中中心波长为 820 nm、1 040 nm、1 200 nm、1 250 nm、1 650 nm、2 100 nm、2 260 nm 的波段最适合估测 LAI。赵丽芳等(2007)利用 Hyperion 遥感图像,通过建立与分析三个植被指数,即归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数(simple ratio, SR)、缩小比值植被指数(reduced simple ratio, RSR)与地面实测 LAI 的关系,估测了山东省徂徕山林场的 LAI,并绘制了 LAI 等级图。结果表明,估测精度依次是 $RSR > NDVI > SR$,且 RSR、NDVI 和 SR 与 LAI 均呈正相关关系。

4. 森林类型分类

光学遥感具有大尺度、高时间分辨率等特点,因此被广泛用于森林类型识别的研究,如杨永恬等(2004)分别采用最大似然分类法和控制聚类法对汪清林区的 TM 影像进行分类,分类精度分别为 84.146%和 88.141%,结果表明,控制聚类法可以显著提高森林分类精度,是一种值得推荐的遥感图像分类方法。王立海和赵正勇(2005)利用改进的 BP 神经网络分类识别系统同样对吉林汪清林区的 TM 遥感图像进行识别分类研究,结果表明,改进型 BP 神经网络分类识别系统的总体分类精度为 76.1%,总体 Kappa 指数为 0.168 00,分类精度虽较杨永恬等(2004)的研究结果低,但也完全满足生产需要。Nelson 等(2009a)应用 MODIS 数据对森林类型进行分类,将林地类型分成 4 类,即阔叶林、针叶林、混交林、灌木林。其中阔叶林的分类精度为 97.36%,针叶林的分类精度为 91.4%,混交林的分类精度为 91.50%,灌木林的分类精度为 88.51%。包海青(2012)利用生长季的 TM 数据建立基于马氏距离和基于 Fisher 判别分类的主要乔木树种的训练样本,并提取训练样本 TM 4 波段、3 波段、2 波段的灰度值作为特征向量,取其均值向量建立判别函数,对研究区主要乔木树种进行分类,结果表明,基于马氏距离的总体分类精度为 67.73%,其中落叶松林、油松林、白桦林的分类精度分别为 39.79%、41.62%、88.17%;基于 Fisher 判别的总体分类精度为 67.25%,其中落叶松林、油松

林、白桦林的分类精度分别为 62.16%、61.27%、70.98%。结合不同时相的 TM 数据,对油松林进行提取,得出基于相关掩膜的分类精度为 80.49%;对 TM4(R)3(G)2(B)波段进行差值运算后,利用最大似然法得到的分类精度为 86.82%;进行密度分割得到的分类精度为 69.75%;利用非生长季的 TM 影像进行波段运算后的密度分割得到的分类精度为 82.99%。

随着高光谱遥感数据的出现,使得探测的遥感波段范围不断延伸,波段的分割也越来越精细,其反映的森林结构信息也越来越详细。高光谱遥感数据凭借其波段较多的特性已成功用于森林类型识别研究中,如谭炳香等(2006a, 2006b)将高光谱数据 Hyperion、多光谱数据 ALI 和 ETM+ 数据进行联合共同用于森林类型识别研究,结果总体分类精度达到 87.04%。李小梅等(2010)通过高光谱遥感影像的特征,对高光谱 CHRIS 影像进行分类,分类结果显示应用面向对像的最近邻分类方法能较好的识别森林类型,总体精度为 89.06%, Kappa 系数为 0.82,而应用最大似然法分类精度为 85.75%, Kappa 系数为 0.79。

除了上述光学遥感数据外, QuickBird 高分遥感影像也已成功用于森林类型的分类研究中。王登峰等(2010)从不同森林类型的纹理入手,利用小波变换提取 QuickBird 卫星遥感影像的纹理特征,然后利用面向对像分类法将纹理信息和原有的光谱信息结合进行分类,最后得到总体分类精度为 92.7%。结果表明,纹理信息的加入能够有效提高分类精度,面向对像分类法在利用纹理信息方面有明显优势。

5. 森林生物量

20 世纪 70 年代起,光学遥感数据已成功用于植被生物量研究中。Curran 等(1992)研究了 TM 数据红色波段和近红外波段与叶生物量间的关系,发现它们具有较强的相关性。Dubayah 等(1997)结合地面调查数据、TM 数据与 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)数据,对欧洲森林生物量进行了较为准确的估算。Boyd 等(1999)对热带雨林生物量的遥感研究表明,中红外植被指数与总生物量具有较好的相关性。Dong 等(2003)利用 AVHRR-NOAA(advanced very high resolution radiometer-national oceanic and atmospheric administration)图像提取了 1981~1999 年 6 个国家 167 个省的生长季 NDVI 数据,建立了 NDVI 与森林生物量的关系模型,用其估计了温带及寒带的森林生物量,并对其碳源或碳汇功能做了评价。Utku 等(2006)利用林分断面积、冠层郁闭度以及叶面积指数估算了澳大利亚西部干旱地区森林生物量并对结果进行对比,结果表明,林分断面积与森林生物量的相关性较好,但不易从遥感获取,而冠层郁闭度与叶面积指数也能较好地反演森林生物量。Soenen 等(2010)在利用物理冠层反射率模型获取森林结构参数的基础上,基于 SPOT-5 数据对森林生物量进行了反演,取得了较好的结果。

综上所述,虽然光学遥感数据已成功估测了森林的结构参数,但仍存在一定的不确定性,主要是因为光学遥感数据受云层覆盖和信号饱和的影响较大,尤其是在密林地区敏感性明显下降。

1.3 微波雷达在森林结构参数估测领域中的应用

微波是指波长在 1 mm 到 1 m(对应频率为 300 MHz 到 30 GHz)之间的电磁波。微波波段的频率远低于可见光和红外波段,对于发射、接收和处理系统的响应速度的要求要比可见光和红外波段低得多,所以能够实现更高的系统性能。雷达成像的一般原理是,利用宽带信号技术来获得目标散射中心在距离上的高分辨率,然后利用运动目标的多普勒信息,获得散射中心在横向距离上的高分辨率。两者相结合就可以获得对目标的二维或三维分辨率,从而使目标的多维高分辨率成像得以实现。利用雷达遥感技术能够直接获取森林垂直结构的信息,弥补了其他遥感手段在探测森林空间结构方面的不足。随着遥感技术的迅速发展,合成孔径雷达以其对地观测的显著优势,在林业研究工作中越来越受到重视。当前应用于森林结构参数估算的主要雷达数据源及其数据特征见表 1-2。

表 1-2 用于森林结构参数估测的主要雷达数据

传感器	任务	波段	极化方式	空间分辨率	幅宽/km	重访周期/天	时间范围/年
SAR	ERS-1/2	C	VV	30 m	100	35	1991~
WSC	ERS-1/2	C	VV	0.25°	400	35	1991~
ASAR	ENVISAT	C	VV, HH, VH, HV	950 m, 150 m, 30 m	400, 100, 5	35	2001~
SAR	JERS-1	L	HH	18 m	75	44	1992~1998
PALSAR	ALOS	L	全极化	7~100 m	30~350	46	2006~
AIRSAR	机载	C+L+P	全极化	—	—	—	—

1. 树高

森林树高的反演一直是极化干涉研究领域中的热点。极化干涉 SAR(synthetic aperture radar)是未来 SAR 系统发展的必然趋势,它既具有对地表森林散射体的空间分布敏感的特性,又具有对森林散射体的形状和方向敏感的特性,还具有从数据中分解得到不同散射机制的特征分量的能力(李廷伟等,2009)。Cloude 等(1998)提出,建立树冠渗透模型,结合分解算法的 SIR-C 数据得知极化干涉 SAR 能够很好地应用于森林,以及其他散射体的参数估计,为了更好地穿透冠层,应选择较低频率的波段,因此 L 波段是很好的选择。Yamada 等(2001)提出了一种极化 SAR 干涉测量每个局部散射干涉相位提取技术,这是在 ESPRIT(estimating signal parameters via rotational invariance techniques)算法的基础上制定本地产射中心提取方法,能否准确地估计局部散射中心位置密切影响森林树高估计。Gullaso(2005)的实验结果显示,从反演结果对比中还可以看出改进的 ESPRIT 三阶段算法相对于最初的 ESPRIT 三阶段算法在结果上有了很大改善;这主要是由于选择地相位时并不再简单地由 ESPRIT 算法的地相位来决定,因为其估计往往是不准的。庞勇等(2005)利用新疆和田的 SIR-C/XSAR(shuttle image radar-C/X synthetic aperture radar)极化干涉数据,提取了森林植被的高度信息,并结合

光学影像对产生的误差源进行了定性分析;利用同一实验区的 ESAR (electronically steerable array radar) 数据和地面实测数据对常用的反演算法进行了定量评价。一些学者基于同一像元中不同散射机制相位中心之间的差异,利用 ESPRIT 算法,提取优势相位用于森林高度计算,结果显示计算效率有所提高,但对反演精度的改善有限(杨磊等, 2007)。

2. 森林类型识别

成像雷达图像的色调是识别不同森林类型的有效工具,尤其是通过计算机图像处理软件将多波段、多极化成像雷达数据配准、合成为彩色图像后,不同的森林类型将会在图像上呈现不同颜色,从而可以在图像上直接区分出不同类型的森林(廖静娟等, 2000)。Knowlton 和 Hoffer(1981)的研究表明,在 X 波段 HH 极化图像上比 HV 极化图像上更容易识别出针叶林和落叶林,但在 HV 图像上雷达的阴影则有助于识别出森林砍伐区。Domik 等(1986)用不同入射角的 SAR 图像上的对比亮度区分不同的树种及每一树种的结构,进而有效地进行森林分类。图像的纹理信息有助于森林覆盖类型的识别, Drieman 等(1989)以高分辨率 X-HH SAR 数据为基础,利用图像色调及纹理的放大分析,以 1:20 万的比例尺,识别了加拿大阿尔伯塔北部鲁林生态区 20~40 cm 厚积雪覆盖下的各种森林类型,尤其是硬木类森林效果更好。Leckie(1990)将可见光、红外光遥感与 SAR 结合,用于加拿大安大略省白奎河附近的森林类型分类研究,结果表明,对针叶树种区分雷达波段较可见光和红外波段要好。邵芸等(2001)以广东肇庆为试验区,利用 1996 年及 1997 年 Radarsat-1,即多时相单极化雷达图像进行土地覆盖类型分类研究,分析了试验区内典型植被的结构、形态及其散射机理等特征,总结了各类目标的时域散射特性,识别了多种目标,制作了土地覆盖类型分类图,其分类结果平均精度达到 90.1%,总体分类精度为 91.49%。李增元等(2003)利用 ERS SAR Tandem 数据对中国南部增城县的森林及非森林的制图研究,其分类精度与地面实际值相比可以达到 75%。Goodenough 等(2005)将 2004 年夏天和冬天获得的加拿大北部森林 ASAR 多极化数据,通过使用 LOGIT 软件对森林类型进行分类,其总体分类精度可以达到 59.4%,若加入 ETM+数据,则其平均分类精度可以达到 90%以上。ASAR 数据可以用来进行森林类型的分类。Pairman 等(2005)采用 C 波段和 L 波段的全极化的 AIRSAR 数据对新西兰地区的森林与草地进行分类,其精度可以达到 90%以上,比单独使用 C 或 L 波段的数据精度要高,结果表明,可以使用全极化数据来区分森林与其他地类。

3. 生物量

雷达遥感作为主动式的微波遥感技术,在林业方面的研究及应用已经有 30 多年的历史。近年来,各种星载和机载合成孔径雷达数据已被广泛应用于估算陆地植物生物量。合成孔径雷达在森林生物量估测方面得到的结果要优于光学遥感。SAR 具有多波段、多极化、多角度的特点,根据需要进行不同的极化方式可以获取有利于判读和分析的影像信息。SAR 是利用波长 0.001~1 μm 的微波来探测地物。生物量估算已成为 SAR 数据的重要应用领域之一,使生物量估测精度进一步提高。Sun 和 Simonett(1988)

及 Kasischke 等(1993)分别利用航空或航天 SAR 数据估测了森林生物量,研究表明,雷达影像密度与生物量高度相关,且 Kasischke 等得出其相关系数为 0.87~0.93。Hussin 和 Hoffe (1990)及 Hussin 等(1991)利用星载 SAR 数据对美国佛罗里达的贝克县人工松树林的生物量进行了高精度估计,并分析了 SAR 不同的入射角及极化与地上林木生物量的关系。Hoekman 和 Quinones(2000)利用 SAR 数据分析了亚马孙流域的陆地覆盖类型和生物量,并且比较分析不同波段及极化数据的不同组合在土地覆盖分类和生物量估算中的精度,发现 L 波段和 HV 极化的组合或者 P 波段的效果最好。Santos 等(2003)利用了 SAR 数据的 P 波段能够很好地区分原始林、次生林的优势,用该波段数据估算了巴西热带雨林的生物量。王臣立等(2006)采用 Radarsat-SAR 数据对森林生物量进行了估测,并且探讨了 SAR 数据在森林生物量估测中的可能性与局限性。

尽管微波遥感数据在森林生物量估测研究方面已经有了很大的进展,然而,在密林或当地面森林生物量密度大于 150 Mg/hm^2 时, SAR 也出现信号饱和问题。如果这些问题得不到理想解决,微波雷达就不能有效地用于高密度森林生物量估测。

1.4 激光雷达在森林结构参数估测领域的应用

LiDAR(light detection and ranging)是近年来国际上发展特别迅速的主动遥感技术,由于其具有较高的角分辨能力、距离分辨能力和抗干扰能力,使其可以高精度地获取地表物体的高度信息(赵丽琼等,2010)。

近年来,国内外已经就激光雷达数据在森林结构参数估测领域的应用进行了大量的尝试,已取得了比较大的进展,特别是针对森林垂直结构参数反演方面,其具有其他遥感技术无可比拟的优势,它不仅能够克服光学遥感和微波遥感信号饱和的局限性,并且还能够获取森林的垂直结构信息,提高森林结构参数的估测精度。鉴于此,激光雷达在森林结构参数的定量测量和反演上取得了成功的应用,业已成为森林调查研究的主要遥感数据源(Wulder et al., 2012)。根据搭载平台的不同,激光雷达可分为机载激光雷达和星载激光雷达。

1. 机载激光雷达

机载激光雷达系统是激光探测及测距系统的简称,它由四个基本部分组成,即激光扫描系统(laser and scanning subsystem)、全球定位系统(global positioning system, GPS)、惯性测量单元(inertial measuere unit, IMU),以及监视及控制系统,图 1-1 为机载激光雷达系统示意图。其中,激光雷达扫描系统是 LiDAR 的核心部件,主要负责激光信号的发射与接收,确定地面目标到激光器的距离、回波数量及激光回波强度信息。典型的机载激光扫描系统示意图如图 1-2 所示。

监测及控制系统主要用来控制激光扫描仪、GPS 及 IMU 的工作状况,核心是保持系统的协调同步工作,同时对获取的数据进行存储。由于 LiDAR 集合了多种量测和记录仪器,可同时获得传感器精确的位置和方向以及激光束的回波强度,从而自动、快速获取地学编码影像。经过数据后处理,很快就可以得到三维高程图和回波强度纹理图像。

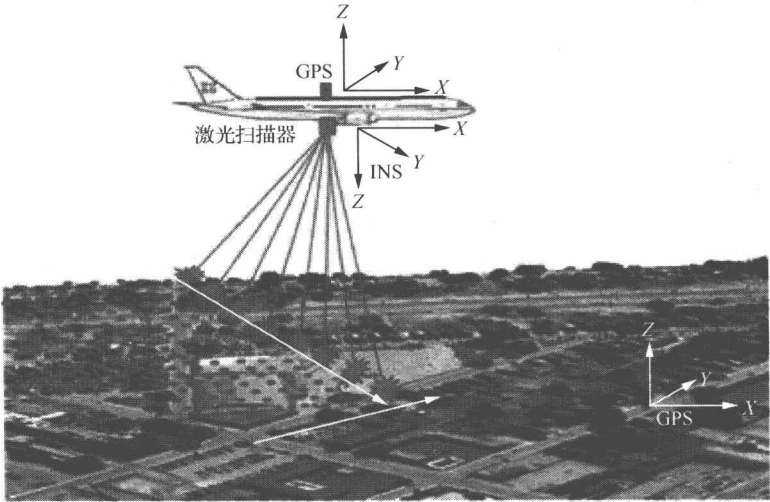


图 1-1 激光雷达系统原理示意图

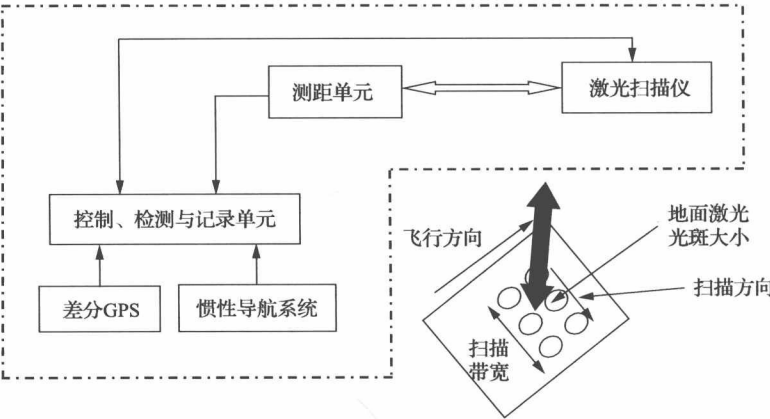


图 1-2 机载激光雷达扫描系统示意图

1) 树高

树高是众多森林结构参数中可以直接从激光雷达数据中得到的一个参数，是估计其他参数(如胸径、蓄积量、生物量等)的基础。因此，用小光斑激光雷达数据反演森林结构参数时，树高的反演显得十分重要，因为其精度的高低直接影响着其他参数估计结果的好坏。相应地，树高估计也成为小光斑激光雷达成功用于林业研究的最重要一步，所以自始至终一直成为研究的焦点。虽然研究人员曾采用多种技术手段来提高估计精度，但仍无法完全消除多种因素(如地形、森林密度)对其估计结果造成的不良影响，对小光斑激光雷达数据估计树高的机理进行深入研究是未来提高树高估计精度的主要手段和方法。

在林业研究中，样方是进行野外数据采集的基本单元，样方平均树高指样方内所有林木树高的平均值，因为样方在林业研究中的特殊性，所以样方平均树高的估计可以分