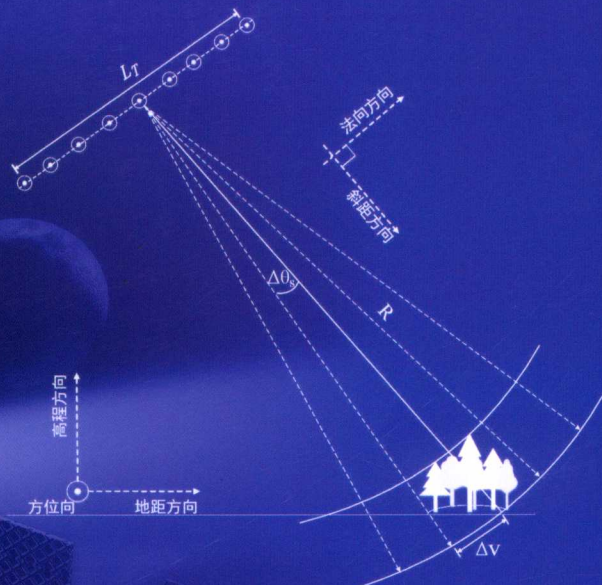




地球观测与导航技术丛书



合成孔径雷达森林参数 反演技术与方法

李增元 陈尔学 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

合成孔径雷达森林参数反演 技术与方法

李增元 陈尔学 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

合成孔径雷达是探测森林参数的重要手段,尤其随着极化、干涉、长波长合成孔径雷达的发展,显示出了对森林植被垂直结构参数探测的独特优越性。本书以森林资源培育、管理以及全球变化研究等方面需求的森林参数为出发点,首先给出了森林参数的基本概念;之后,简单介绍了合成孔径雷达的基础理论,以承接后续的森林参数反演;最后,以本团队近年来的研究成果为主,将方法论述与应用示例相结合,系统地介绍了极化、干涉、极化干涉和层析合成孔径雷达用于森林参数反演和估测的技术与方法,书中也综述了相关方面国际上主流的前沿研究动向。

本书可作为遥感专业研究生的教学参考书,也可供从事相关研究与应用的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达森林参数反演技术与方法 / 李增元等著. —北京: 科学出版社, 2018.12

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-059836-3

I. ①合… II. ①李… III. ①合成孔径雷达-应用-森林遥感 IV. ①S771.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 264891 号

责任编辑: 朱海燕 籍利平 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

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>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 13 插页: 12

字数: 308 000

定价: 118.00 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	景贵飞
景 宁	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	阎国年	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》编写说明

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”规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

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像技术是以微波波段的电磁波作为探测手段, 利用成像传感器获取观测对象散射特征和相关信息的获取技术。与传统的光学成像相比, SAR 成像不受日照和天气条件的限制, 能够全天时、全天候地对目标或场景进行观测, 已发展成为资源勘察、环境监测和灾害评估的重要手段, 是 21 世纪最具发展潜力的高技术领域之一。

经过长年的发展, SAR 技术与系统已从单波段、单极化逐步发展到多波段、全极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR, 特别是近几年迅速发展起来的极化干涉层析 SAR, 更是把 SAR 遥感应用推向了高潮, 这已在很大程度上实现了从高分辨率定性成像到精准高分辨率定量测量的转变。

森林是陆地生态系统的主题, 是遥感研究与应用的重要对象。森林植被是一种典型的分布式体散射地物, 多生长在成像条件恶劣、地形复杂的山区。作为一种主动微波遥感手段, SAR 虽然具有独特的在恶劣气象条件下高效成像的优势, 但同时也由于复杂的地形和植被结构, 对 SAR 森林定量遥感带来了巨大的挑战。“多维度 SAR”的概念就是为了迎接这个挑战, 更有效地发展成像机制优化方法、成像处理和信息提取技术方法而提出的。我欣喜地看到, 李增元研究员等将要出版的这本专著正是“多维度 SAR”概念模型和方法论在森林植被定量遥感研究方向上的较为完整和系统的应用与实践。

该书紧紧围绕森林植被参数的 SAR 遥感定量反演技术和方法, 首先沿着“维度”这条线, 递进式地介绍了 SAR、极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR 和干涉层析 SAR 的基础理论和方法; 随后, 将前沿技术方法研究和应用实例相结合, 逐章分别论述了极化、干涉、极化干涉和层析 SAR 用于森林参数反演和估测的技术与方法, 全面展示了作者在 SAR 森林植被定量遥感领域的研究成果, 反映了他们对该领域国际学术前沿的敏锐洞察力和勤勉踏实但又勇于创新的科研作风, 是一本倾注了作者多年心血、目前国内外还为数极少的 SAR 森林植被遥感专著。

该书的出版将为 SAR 在我国林业的深入推广和应用提供理论基础与实践指导, 也期望该书在推动我国多维度 SAR 技术理论研究和应用推广方面发挥应有的作用。我相信该著作会得到读者的喜爱和关注。

中国科学院院士 吴一戎

2018 年 12 月 8 日

前 言

森林参数的遥感定量反演不仅可为我国森林资源的科学管理、森林质量精准提升经营方案的编制、森林培育经营效果的动态评价和生态修复工程的规划与实施等林业应用提供精确的森林资源监测信息,而且还可以为我国政府参与气候谈判、履行国际生态环境公约、深入全球气候变化科学研究提供高时空分辨率的森林生物量、碳储量动态变化信息。

合成孔径雷达(SAR)具有光学遥感所不具备的全天候、全天时成像能力,而且对地物的几何结构和介电特性敏感,通常利用长波长 SAR 的后向散射强度反演森林参数不容易出现遥感信号的饱和现象。长波长 SAR 干涉测量技术是目前唯一的真正能够穿透冠层、同时测量冠层结构和林下地形参数的遥感技术。将 SAR 极化信息和干涉信息相结合,甚至采用基于多轨(极化)干涉 SAR 数据的层析 SAR 技术,可进一步提高森林参数的定量反演精度。极化干涉 SAR、层析 SAR 森林参数反演技术已成为国内外 SAR 遥感应用科学研究的热点方向。

本书紧密结合森林资源调查应用需求,从森林参数 SAR 定量遥感反演角度,系统描述了极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR 和层析 SAR 应用于森林参数定量反演的理论、技术与方法,是我们科研团队十多年研究成果结晶的体现。全书共包括 6 章。第 1 章介绍了森林参数遥感反演的基本概念和 SAR 遥感系统的发展概况;第 2 章从雷达成像理论出发,简要介绍了 SAR、极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR、层析 SAR 的基础理论和方法;第 3~6 章从 SAR 地形校正及森林参数估测、干涉 SAR 森林参数反演、极化干涉 SAR 森林参数反演、层析 SAR 森林参数反演 4 个方面,将理论方法和实例应用相结合,系统阐述了利用不同模式的 SAR 遥感手段反演森林高度、蓄积量和地上生物量等参数的模型和方法。

本书由李增元和陈尔学组织编写,李增元统稿、修订并定稿。赵磊、张王菲核对、校稿。参加编写的主要人员包括:第 1 章:李增元、陈尔学。第 2 章:张王菲、陈尔学、赵磊;第 3 章:赵磊、李增元、陈尔学。第 4 章:冯琦、田昕、陈尔学;第 5 章:李增元、罗环敏;第 6 章:李文梅、李兰、陈尔学。科研团队的在读研究生万祥星、范亚雄、徐昆鹏、文哲、赵俊鹏等参加了书稿编辑工作。

本书成果得益于国家科研项目的支持,包括 973 计划(2013CB733400、2007CB714404)、国家重点研发计划(2017YFD0600900、2017YFGX040109)、国家自然科学基金(60890074)、863 计划(2011AA120405)和中欧国际合作项目“龙计划”等。在编写过程中得到了科学出版社相关领导、编辑的指导与关心,在此对大家的支持和帮助表示诚挚的谢意。

期望本书能对相关科研工作者提供技术、方法与研究思路的借鉴,为教学提供参考。由于作者知识面所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

李增元

2018 年 9 月 1 日

序

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像技术是以微波波段的电磁波作为探测手段, 利用成像传感器获取观测对象散射特征和相关信息的获取技术。与传统的光学成像相比, SAR 成像不受日照和天气条件的限制, 能够全天时、全天候地对目标或场景进行观测, 已发展成为资源勘察、环境监测和灾害评估的重要手段, 是 21 世纪最具发展潜力的高技术领域之一。

经过长年的发展, SAR 技术与系统已从单波段、单极化逐步发展到多波段、全极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR, 特别是近几年迅速发展起来的极化干涉层析 SAR, 更是把 SAR 遥感应用推向了高潮, 这已在很大程度上实现了从高分辨率定性成像到精准高分辨率定量测量的转变。

森林是陆地生态系统的主题, 是遥感研究与应用的重要对象。森林植被是一种典型的分布式体散射地物, 多生长在成像条件恶劣、地形复杂的山区。作为一种主动微波遥感手段, SAR 虽然具有独特的在恶劣气象条件下高效成像的优势, 但同时也由于复杂的地形和植被结构, 对 SAR 森林定量遥感带来了巨大的挑战。“多维度 SAR”的概念就是为了迎接这个挑战, 更有效地发展成像机制优化方法、成像处理和信息提取技术方法而提出的。我欣喜地看到, 李增元研究员等将要出版的这本专著正是“多维度 SAR”概念模型和方法论在森林植被定量遥感研究方向上的较为完整和系统的应用与实践。

该书紧紧围绕森林植被参数的 SAR 遥感定量反演技术和方法, 首先沿着“维度”这条线, 递进式地介绍了 SAR、极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR 和干涉层析 SAR 的基础理论和方法; 随后, 将前沿技术方法研究和应用实例相结合, 逐章分别论述了极化、干涉、极化干涉和层析 SAR 用于森林参数反演和估测的技术与方法, 全面展示了作者在 SAR 森林植被定量遥感领域的研究成果, 反映了他们对该领域国际学术前沿的敏锐洞察力和勤勉踏实但又勇于创新的科研作风, 是一本倾注了作者多年心血、目前国内外还为数极少的 SAR 森林植被遥感专著。

该书的出版将为 SAR 在我国林业的深入推广和应用提供理论基础与实践指导, 也期望该书在推动我国多维度 SAR 技术理论研究和应用推广方面发挥应有的作用。我相信该著作会得到读者的喜爱和关注。

中国科学院院士 吴一戎

2018 年 12 月 8 日

前 言

森林参数的遥感定量反演不仅可为我国森林资源的科学管理、森林质量精准提升经营方案的编制、森林培育经营效果的动态评价和生态修复工程的规划与实施等林业应用提供精确的森林资源监测信息,而且还可以为我国政府参与气候谈判、履行国际生态环境公约、深入全球气候变化科学研究提供高时空分辨率的森林生物量、碳储量动态变化信息。

合成孔径雷达(SAR)具有光学遥感所不具备的全天候、全天时成像能力,而且对地物的几何结构和介电特性敏感,通常利用长波长 SAR 的后向散射强度反演森林参数不容易出现遥感信号的饱和现象。长波长 SAR 干涉测量技术是目前唯一的真正能够穿透冠层、同时测量冠层结构和林下地形参数的遥感技术。将 SAR 极化信息和干涉信息相结合,甚至采用基于多轨(极化)干涉 SAR 数据的层析 SAR 技术,可进一步提高森林参数的定量反演精度。极化干涉 SAR、层析 SAR 森林参数反演技术已成为国内外 SAR 遥感应用科学研究的热点方向。

本书紧密结合森林资源调查应用需求,从森林参数 SAR 定量遥感反演角度,系统描述了极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR 和层析 SAR 应用于森林参数定量反演的理论、技术与方法,是我们科研团队十多年研究成果结晶的体现。全书共包括 6 章。第 1 章介绍了森林参数遥感反演的基本概念和 SAR 遥感系统的发展概况;第 2 章从雷达成像理论出发,简要介绍了 SAR、极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR、层析 SAR 的基础理论和方法;第 3~6 章从 SAR 地形校正及森林参数估测、干涉 SAR 森林参数反演、极化干涉 SAR 森林参数反演、层析 SAR 森林参数反演 4 个方面,将理论方法和实例应用相结合,系统阐述了利用不同模式的 SAR 遥感手段反演森林高度、蓄积量和地上生物量等参数的模型和方法。

本书由李增元和陈尔学组织编写,李增元统稿、修订并定稿。赵磊、张王菲核对、校稿。参加编写的主要人员包括:第 1 章:李增元、陈尔学。第 2 章:张王菲、陈尔学、赵磊;第 3 章:赵磊、李增元、陈尔学。第 4 章:冯琦、田昕、陈尔学;第 5 章:李增元、罗环敏;第 6 章:李文梅、李兰、陈尔学。科研团队的在读研究生万祥星、范亚雄、徐昆鹏、文哲、赵俊鹏等参加了书稿编辑工作。

本书成果得益于国家科研项目的支持,包括 973 计划(2013CB733400、2007CB714404)、国家重点研发计划(2017YFD0600900、2017YFGX040109)、国家自然科学基金(60890074)、863 计划(2011AA120405)和中欧国际合作项目“龙计划”等。在编写过程中得到了科学出版社相关领导、编辑的指导与关心,在此对大家的支持和帮助表示诚挚的谢意。

期望本书能对相关科研工作者提供技术、方法与研究思路的借鉴,为教学提供参考。由于作者知识面所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

李增元

2018 年 9 月 1 日

目 录

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 森林参数遥感反演基本概念	1
1.1.1 森林的定义	1
1.1.2 森林参数	2
1.1.3 森林垂直结构参数	2
1.2 合成孔径雷达森林参数定量反演技术特点	3
1.2.1 森林资源遥感监测主要内容	3
1.2.2 森林资源遥感监测的主要手段	3
1.2.3 SAR 森林参数定量反演技术方法的特点	3
1.3 SAR 遥感系统发展概况	4
1.3.1 SAR 遥感系统发展历程	5
1.3.2 机载 SAR 遥感系统的发展	5
1.3.3 星载 SAR 遥感系统的发展	6
1.3.4 SAR 遥感系统的技术发展阶段	8
1.3.5 我国 SAR 遥感系统研发进展	9
参考文献	9
第2章 成像雷达基础理论方法	12
2.1 雷达成像理论基础	12
2.1.1 雷达方程	12
2.1.2 真实孔径雷达	15
2.1.3 合成孔径雷达	19
2.2 极化 SAR	24
2.2.1 极化波的表征	24
2.2.2 极化 SAR 系统	27
2.2.3 极化波的地物散射特点	29
2.2.4 极化 SAR 数据表征	34
2.2.5 极化 SAR 统计描述	35
2.2.6 极化 SAR 目标分解	36
2.3 干涉合成孔径雷达	39

2.3.1 干涉合成孔径雷达测高原理	39
2.3.2 干涉相干性及其统计特性	43
2.3.3 InSAR 系统模型	44
2.3.4 InSAR 数据处理	46
2.4 极化干涉 SAR	49
2.4.1 矢量干涉	49
2.4.2 极化干涉相干优化	52
2.5 干涉层析 SAR	54
参考文献	57
第 3 章 SAR 地形校正及森林参数估测	59
3.1 国内外研究现状	59
3.2 SAR 地形校正方法	61
3.2.1 极化 SAR 地形效应校正方法	61
3.2.2 干涉 SAR 地形效应校正方法	65
3.3 基于 SAR 地形校正的森林地上生物量估测	70
3.3.1 实验区和数据	70
3.3.2 结果与分析	73
参考文献	87
第 4 章 InSAR 森林参数估测	90
4.1 国内外研究现状	90
4.1.1 InSAR 森林高度估测研究	90
4.1.2 InSAR 森林 AGB/蓄积量估测研究	91
4.2 InSAR 森林高度估测	92
4.2.1 DEM 差分法	93
4.2.2 相干幅度法	93
4.2.3 机载实验	94
4.2.4 星载实验	97
4.3 InSAR 森林 AGB/蓄积量估测	106
4.3.1 间接估测法	106
4.3.2 干涉水云模型估测法	108
参考文献	115
第 5 章 PolInSAR 森林参数反演	118
5.1 国内外研究现状	118
5.2 PolInSAR 森林高度反演模型	119
5.2.1 相干散射模型	120
5.2.2 森林高度反演方法	122
5.2.3 森林高度反演实验	125
5.3 极化干涉相干优化森林高度反演	132

5.3.1	极化相干优化算法	133
5.3.2	相干优化对森林高度反演的影响	134
5.4	森林高度反演方法的改进	138
5.4.1	地体散射比对相干性的影响	138
5.4.2	地体散射比对高度反演精度的影响	139
	参考文献	141
第 6 章	层析 SAR 森林参数反演	144
6.1	层析 SAR 森林参数反演国内外研究现状	144
6.2	极化相干层析森林高度反演	146
6.2.1	极化相干层析基本原理	146
6.2.2	极化相干层析模拟仿真实验	149
6.2.3	极化相干层析森林参数反演实验	156
6.3	干涉层析 SAR 森林高度反演	164
6.3.1	干涉层析 SAR 成像方法	164
6.3.2	干涉层析 SAR 模拟仿真实验	168
6.3.3	干涉层析 SAR 森林高度反演实验	170
6.4	层析 SAR 森林地上生物量反演	181
6.4.1	极化干涉层析 SAR 成像方法	181
6.4.2	极化干涉层析 SAR 森林地上生物量估测方法	183
6.4.3	极化干涉层析 SAR 森林地上生物量反演实验	185
	参考文献	189

彩图

第1章 绪 论

1.1 森林参数遥感反演基本概念

遥感可用于地表覆盖或土地利用类型的分类,也可用于地球生物物理、化学参数的定量反演或估测,这是遥感技术的两大应用方向。本书的遥感对象是森林,所讨论的遥感技术聚焦于森林参数(属于植被的生物物理参数)的遥感定量反演,林地类型、森林类型的分类及变化检测等遥感监测技术不属于本书的讨论范围。

1.1.1 森林的定义

森林生态学上通常将森林定义为主要由树木组成,且具有足够大的覆盖范围(大到足够形成具有一定特征的森林气候)的一种植被形态。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)在组织全球森林资源评价工作中,将森林定义为连续覆盖面积超过 0.5hm^2 ,地表覆盖的林木高于 5m ,且郁闭度大于 10% ,或具有潜力达到这些指标的土地,包括:①虽然目前生长着幼林,其高度和郁闭度还没有达到指标,但有希望达到树高 5m 以上和郁闭度大于 10% 的土地;②由于采伐或灾害导致的暂时性的森林植被消除,但有希望在 5 年内恢复的土地;③林内道路、防火道等面积比较小的开放区域(open areas);④国家公园、自然保护区和其他出于环境保护、科学、历史、文化等需求而设立的保护区的森林;⑤包括面积超过 0.5hm^2 ,宽度超过 20m 的防护林;⑥由于轮作暂时达不到指标但预期更新后的林木可达到树高 5m 和郁闭度不低于 10% 的林地;⑦潮间带红树林,不管其地类是否被划分为陆地类别;⑧橡胶树、栓皮栎和圣诞树等人工林;⑨竹林、棕榈林,但树高和郁闭度需达到指标。不包括农业系统中的林木,如果园、油棕榈种植园、橄榄种植园及用于农田防护的林木(FAO, 2012)。

我国《国家森林资源连续清查技术规定》(国家林业局, 2014)中虽没有明确给出森林的定义,但明确了地类分类系统,将林地划分为乔木林地、灌木林地、疏林地、竹林地、未成林造林地、苗圃地、迹地和宜林地。按照 FAO 对森林的定义,乔木林地、疏林地、未成林造林地都可认为是森林。我们国家将乔木林地的郁闭度下限定为 20% ,将疏林地郁闭度限定为 $10\%\sim 19\%$,除了缺少高度限制指标外,从郁闭度上,有林地和疏林地都符合 FAO 对森林的定义;我国对未成林造林地的定义具有“虽然现在没有成林,但有希望成林”的含义,这也符合 FAO 对森林的定义;迹地包括采伐迹地、火烧迹地和其他迹地,这显然也属于 FAO 所定义的森林的范畴。通过以上对比,也可以看出,FAO 对“森林”的定义,实际上并不是主要从地表“覆盖”的角度定义的,也考虑了“土地利用”属性。

FAO 对森林的定义不包括灌木林地。在我国 2011 年 1 月发布的《森林资源规划设计调

查技术规程》(GB/T 26424-2010) 国家标准中, 森林覆盖率的计算公式明确将国家特别规定灌木林的面积统计在内。另外, 根据《中华人民共和国森林法实施条例》(2018 年 3 月), “森林包括乔木林和竹林”, 并在第二十四条特别说明“森林法所称森林覆盖率是指以行政区划为单位的森林面积与土地面积的百分比, 森林面积包括郁闭度 20%以上的乔木林地面积和竹林地面积、国家特别规定的灌木林地面积、农田林网以及村旁、路旁、水旁、宅旁林木的覆盖面积”。

综上所述, FAO 和我们国家对“森林”的定义是有较大不同的, 并且我国森林资源调查相关技术标准、技术规定和 2018 年修订的森林法实施条例中的规定也略有不同。在利用遥感进行森林参数定量反演时, 可根据具体的应用目标和用户的需求确定“森林”的具体含义。

1.1.2 森林参数

由以上对“森林定义”的讨论可知, 森林和组成它的个体“林木”或“单木”有本质的区别。“森林”是由一定数量的“林木”个体组成的, 因此森林参数必须通过组成森林的“林木”个体的参数经统计计算得到。描述“林木”个体的定量参数主要包括树高、胸径、冠幅、材积、生物量、叶面积指数 (leaf area index, LAI) 等。注意本书的“参数”是指其数值具有连续变化特点的“定量”参数, 不包括树种类型、树干形状等定性特征。与“林木”参数相对应的“森林”参数主要包括森林高度、平均胸径、平均冠幅、蓄积量、生物量、LAI、郁闭度等。森林高度的定义有很多种, 如胸径加权平均高、优势木平均高等 (关玉秀等, 1986)。当我们讨论遥感定量反演得到的森林蓄积量、森林生物量空间分布专题图 (栅格) 时, 每个栅格单元的数值一般不是指一个空间分辨单元 (像元) 面积内的森林蓄积量总量 (m^3)、生物量总量 (t), 而是指单位面积的森林蓄积量 (m^3/hm^2)、森林生物量 (t/hm^2), 这时用森林蓄积量密度、生物量密度的概念更加贴切。

1.1.3 森林垂直结构参数

森林垂直结构是指森林植被某特征量自地表面向上随垂直向高度的一种分布特征, 强调的是“垂直”维度上的结构特征。以森林地上任何高度处一个很小高度圆盘切片内的生物量为例, 我们可以用一个函数 $\Omega(h)$ 来表示在高度 h 处每立方米内的生物量 (t/m^3), 这个 $\Omega(h)$ 就可认为是表达森林垂直结构的一个参量, 这个参量是高度 h 的函数。假设森林的最大高度为 h_0 , 则森林单位面积地上生物量 Ω_{total} 可表示为式(1.1)。

$$\Omega_{\text{total}} = \int_0^{h_0} \Omega(h)dh \tag{1.1}$$

由于 $\Omega(h)$ 是很难在地面进行测量的, 因此, 为了进行森林的经营管理所开展的森林资源调查工作通常只测量得到林分总的地上生物量 Ω_{total} 。

类似地我们也可以认为森林蓄积量实际上指的也是单位面积的森林蓄积总量。叶面积指数是植被遥感定量反演的重要参数之一, 也是一个总量的概念, 同样可以用式(1.1)表示为叶面积密度 (LAD) 在森林高度区间 $[0, h_0]$ 上的积分。

因此,森林高度、蓄积、地上生物量、LAI、郁闭度等不是严格意义上的森林垂直结构参数,而是森林垂直结构信息的一种综合体现。但由于 $\Omega(h)$ 很难在地面测量,我们即便是通过遥感反演得到 $\Omega(h)$,目前也只能通过 Ω_{total} 进行精度验证。

1.2 合成孔径雷达森林参数定量反演技术特点

1.2.1 森林资源遥感监测主要内容

森林资源、湿地资源、荒漠化/沙化/石漠化土地等是林业资源遥感监测的主要对象。本书主要聚焦于森林资源遥感监测技术。根据《中华人民共和国森林法实施条例》(2018年3月),森林资源包括森林、林木、林地以及依托森林、林木、林地生存的野生动物、植物和微生物。森林包括乔木林和竹林;林木包括树木和竹子;林地包括郁闭度0.2以上的乔木林地以及竹林地、灌木林地、疏林地、采伐迹地、火烧迹地、未成林造林地、苗圃地和县级以上人民政府规划的宜林地。由于过去对依托森林、林木、林地生存的野生动物、植物和微生物等资源的遥感调查监测技术研究和应用都较少,目前森林资源遥感监测通常主要是指对森林、林木和林地的调查和监测。

森林资源遥感监测包括森林资源类别(如森林类型、林木树种类型、林地类型等)的遥感分类和变化检测、森林资源数量化参数(高度、蓄积、生物量等)的遥感定量反演或估测两大基本内容。本书主题为合成孔径雷达森林参数定量反演技术与方法,属于森林资源参数遥感定量反演技术和方法研究范畴。

虽然本书不讨论遥感分类和变化检测技术,但森林参数的遥感定量反演通常是以遥感分类和变化检测的结果为基础的。如我们要对一个区域的森林蓄积量进行遥感制图,其前提条件是已知森林的空间分布,所建立的蓄积量遥感反演模型只用于地类为“森林”的遥感像元。而且,通常区分不同的森林类型建立反演模型要比不区分森林类型建模精度更高,要采取这种“分层”反演的策略,就需要首先具备森林类型分布图。

1.2.2 森林资源遥感监测的主要手段

从遥感模式上区分,遥感技术可概括为被动、主动两大类。被动遥感主要包括光学遥感(可见光-近红外、热红外等)和被动微波(如微波辐射计)遥感;主动遥感主要包括合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、激光雷达等。除了微波辐射计很少用于森林资源遥感外,其他主、被动遥感手段都适合森林资源的调查和监测应用。这些主被动遥感手段都适用于森林资源类型的分类、变化检测制图,但对森林参数定量反演应用来说,光学遥感更适合森林植被LAI、郁闭度、生化参数的定量反演,不太适用于森林高度、蓄积量和生物量等垂直结构参数的定量反演,而主动遥感手段正好可弥补光学遥感在这方面的不足。

1.2.3 SAR 森林参数定量反演技术和方法的特点

森林参数的遥感定量反演技术方法可概括为两大类。第一类是基于遥感观测的电磁波物理量,如可见-近红外遥感的反射率、SAR遥感的后向散射系数/极化参数,或者综合应

用基于这些物理量空间分布计算得到的纹理特征、地形特征等，通过建立经验模型、半经验物理模型进行反演。但由于光学遥感不能穿透植被冠层，只对森林冠层信息，如 LAI、郁闭度、叶绿素含量等敏感，对森林高度、蓄积量、生物量等垂直结构参数不敏感，在参数反演时容易出现“信号饱和”现象；而微波对森林结构体的大小、形状、空间分布特征及组分含水量敏感，特别是长波长微波可穿透森林冠层与森林的主干、枝干等组分发生作用，使得 SAR 后向散射强度、极化分解、极化合成等遥感观测量对森林垂直结构参数更加敏感，不容易出现“信号饱和”问题。

第二类森林参数的遥感定量反演技术方法主要基于遥感对地物的“立体”观测能力，包括立体摄影方法和干涉 SAR 方法。光学和 SAR 都可以通过立体摄影测量获取地物的垂直维信息，但立体测量技术的高程测量精度受遥感影像的空间分辨率所局限，空间分辨率较低时较难达到较高的测高精度。SAR 遥感还可以采用干涉技术测量高程，测高精度受空间分辨率限制较小，理论上可达到微波波长级高程测量精度。若干涉 SAR 所采用的微波波长较短，如 X-、Ka-波段，测得的数字表面模型（DSM）就更加接近光学立体摄影测量测得的结果，若干涉 SAR 观测的是森林，则所采用的微波波长越短，DSM 越能刻画森林冠层顶部的结构信息。但若测量森林覆盖下的地形，或者说提取数字高程模型（DEM），在森林冠层完全郁闭时，只有长波长的 SAR 才具有穿透森林冠层测量到林下地形的能力。由于光学立体摄影测量不具有对森林冠层的穿透能力，虽然在空间分辨率很高时对稀疏的森林也有一定的林下地形探测能力，但不可能用于测量高郁闭度森林的林下地形（NI et al., 2015；倪文俭等，2018）。

由于微波波长越长对森林冠层的穿透能力越强，因此综合利用短、长波长的干涉 SAR 技术就可提取森林冠层顶部的高程、林下地形的高程，两者的差异就和森林高度、蓄积量、生物量等参数相关，从而具有定量反演森林垂直结构参数的能力（ULBRICHT et al., 2000）。

另外，我们还可以将极化 SAR、干涉 SAR 两种技术手段结合起来，采用较长波长（如 L-波段）的极化干涉 SAR 直接反演森林高度。采用长波长（如 P-、L-波段）单极化/全极化干涉 SAR 层析成像技术提取森林的三维垂直信息，进而用于反演森林高度、森林生物量等参数。

显然，森林垂直结构参数的遥感定量反演技术方法要求所采用的遥感手段同时具有高精度探测森林冠层、林下地形的能力。光学立体摄影测量、激光雷达遥感采用的都是可见光-近红外反射波段，电磁波达到目标后就会被反射回来，不具有穿透森林结构组分（如树枝、树叶、树干等，都属于不透光目标）的遥感机理，只能通过林冠内、林木间的空隙探测林下地形信息，一旦森林郁闭度较大，就失去了提取 DEM 的能力。相比之下，目前只有长波长的 SAR 具有真正穿透冠层的能力，使得无论是利用 SAR 观测的物理量还是干涉 SAR 测量的高程信息反演森林参数，都具有光学遥感无法比拟的优势，更不用说因微波对云、雨、雾等具有强穿透性为 SAR 遥感所带来的特有的“全天候、全天时”遥感监测能力。

1.3 SAR 遥感系统发展概况

雷达是由于第二次世界大战中的军事需求而发展起来的，最早用于跟踪恶劣天气及黑