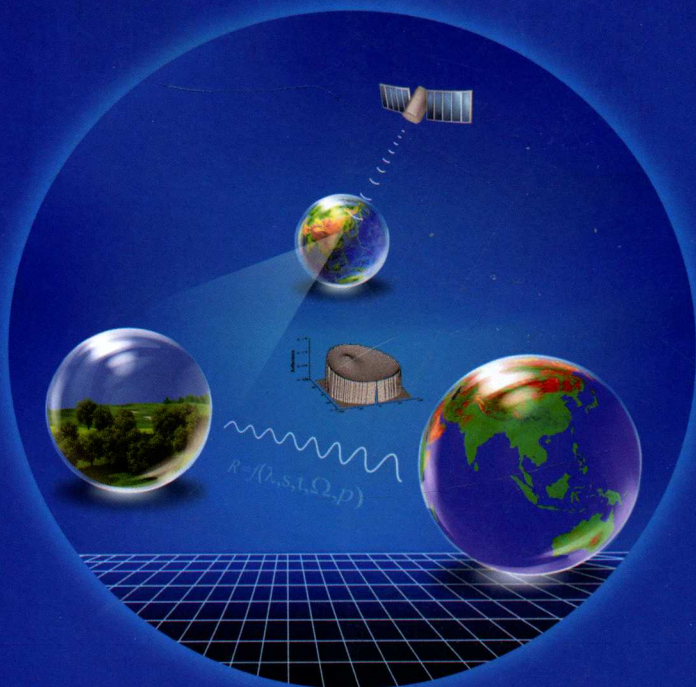


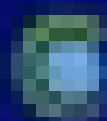
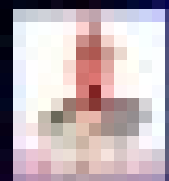
地球观测与导航技术丛书

陆表二向反射特性 遥感建模及反照率反演

闻建光 刘 强 柳钦火 等 著
肖 青 李小文



科学出版社



中国科学院大学系列教材

陆表二向反射特性 遥感建模及反照率反演

王 强 编著
王 强 王 强 王 强 王 强



中国科学院大学系列教材



地球观测与导航技术丛书

陆表二向反射特性 遥感建模及反照率反演

闻建光 刘 强 柳钦火 等 著
肖 青 李小文

科 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

本书在遥感定量反演陆表二向反射和反照率最新研究成果基础上,全面、系统地介绍陆表二向反射特性遥感建模和反照率反演基本理论,是对目前陆表二向反射和反照率定量遥感研究的系统概括和总结。本书首先概要论述与陆表二向反射特性和反照率相关的物理概念和基础理论,探讨和剖析现有陆表二向反射模型及多角度观测试验方法。然后分章节着重介绍基于真实结构场景的陆表二向反射特性遥感模拟、基于陆表二向反射特性先验知识的反照率反演方法、基于多卫星传感器的陆表二向反射和反照率综合反演方法、山区陆表二向反射特性遥感建模和反照率反演方法。最后给出有主要的陆表二向反射和反照率遥感产品及真实性检验方法。

本书可作为大专院校遥感和地理信息系统专业本科生、研究生的教材用书,也可以作为从事遥感科学和技术研究的科技工作者、遥感项目的计划和管理工作者,以及遥感应用部门工作人员等的工具参考书。

图书在版编目(CIP)数据

陆表二向反射特性遥感建模及反照率反演/闻建光等著. —北京:科学出版社,2015. 5

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-043173-8

I. ①陆… II. ①闻… III. ①遥感技术-系统建模 IV. ①TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 018875 号

责任编辑:苗李莉 唐保军 朱海燕 / 责任校对:张小霞

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 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:420 000

定价:149.00 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	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

随着遥感对地观测技术的发展,人们认识到地表反射是具有方向性的,所谓“草色遥看近却无”说的就是从不同方向观察草地地表就会得出不同的结论,而这种不同引起的原因关键在于地表结构。因此,为了有效利用多角度遥感观测信息,需要进行地表二向反射特性建模与反演,从机理上描述地表的方向性反射,进而利于植被结构参数和反照率反演。

近几年来,遥感科学国家重点实验室遥感辐射传输研究室的青年团队在科技部和国家自然科学基金相关课题的支持下,重点针对地表方向性反射的遥感模拟和反演、地表二向反射和反照率产品生成,以及多角度遥感观测和产品真实性检验开展了遥感基础性研究。《陆表二向反射特性遥感建模及反照率反演》一书是对研究室在陆表二向性反射和反照率建模、遥感定量反演和试验验证相关研究成果的总结。无论在科普陆表方向性反射和反照率遥感知识基础上,还是在遥感建模和反演方法上,都有一定的理论深度和应用实例,是读者了解和学习陆表方向性反射遥感原理的重要参考书。

遥感由定性评价走向定量研究,关键科学问题是建立遥感观测数据与地表参数关系的模型和地表参数的遥感反演。特别是非均质混合像元的遥感信息建模和多源遥感数据地表参数协同反演仍然是我们研究的重点,需要我们共同努力,继续深入研究,为推动我国定量遥感研究的发展贡献力量。

李仁文

北京师范大学

2014年11月

前 言

二向反射是表征陆表特征的重要基础参量,二向反射特性遥感建模和观测一直是定量遥感研究的热点问题之一。随着遥感科学技术的发展,传感器实现对地多角度观测,抓住了地物表面的方向反射特征,并可由二向反射模型模拟和预测,为地表反照率产品的发展提供了重要的间接参数。作者近年来在陆表二向反射特性遥感建模和反照率反演方面,得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模(2013CB733401)”,国家自然科学基金项目“多源遥感数据地表 BRDF/反照率联合反演方法及试验验证(41271368)”“复杂地形条件的地表反照率遥感反演与尺度效应研究(40901181)”和国家高新技术研究发展计划(863 计划)项目“全球陆表特征参量的遥感提取方法研究(2009AA12210)”“多尺度遥感数据按需快速处理与定量遥感产品生成关键技术(2012AA12A304)”的支持,围绕陆表二向反射特性遥感观测和建模、基于先验知识和多传感器的陆表二向反射特性反演方法、复杂地形条件下的二向反射建模与反演,以及反照率产品真实性检验等方面开展遥感基础研究。

本书在总结目前方向性反射遥感建模、反演和试验国内外研究基础上,作为以上项目相关研究成果的总结,既可以作为普通高校和科研院所学生学习的教学辅导书,也可以作为广大科研人员开展陆表方向性反射/反照率遥感建模和反演研究的参考材料。

本书共 8 章,第 1 章介绍陆表二向反射和反照率的基本概念。第 2 章描述陆表二向反射特性的辐射传输模型、几何光学模型、经验半经验模型和计算机模拟模型的特点和反演方法。第 3 章从地基、近地面、航空和卫星等不同尺度介绍陆表二向反射特性的多平台多角度观测方法。第 4 章阐述基于真实结构场景的陆表植被二向反射特性计算机模拟模型的原理及初步应用。第 5 章结合 GLASS 反照率产品算法,介绍陆表二向反射特性先验知识在地表反照率反演中的作用及其算法原理。第 6 章阐述利用新增传感器数据综合反演陆表二向反射特性和反照率的应用潜力、模型算法发展和初步应用。第 7 章介绍针对山区异质地表,如何结合数字高程模型准确估算山区陆表二向反射和反照率。第 8 章介绍现有陆表反照率产品的特点及产品真实性检验的主要方法。

本书第 1 章由闻建光、刘强、李小文等编写;第 2 章由闻建光、游冬琴、柳钦火等编写;第 3 章由闻建光、彭菁菁、刘强、肖青等编写;第 4 章由张阳、柳钦火、陈敏等编写;第 5 章由刘强、彭菁菁、游冬琴等编写;第 6 章由窦宝成、闻建光、游冬琴、唐勇等编写;第 7 章由闻建光、赵小杰、刘强等编写;第 8 章由闻建光、彭菁菁、游冬琴、吴小丹、唐勇等编写。本书由柳钦火研究员主审,闻建光综合定稿。

李小文院士作为老一辈遥感科学家,无论在平时的科学探究,还是在本书的撰写过程中,都给予了大力的支持和帮助,并为本书作序。遥感科学国家重点实验室遥感辐射传输研究室的其他老师也为本书的出版做出了贡献,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足,敬请读者和同行专家批评指正。

闻建光

2014年11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 遥感科学与定量遥感中的方向反射特性	1
1.2 二向反射特性研究的意义	3
1.3 基本术语	4
1.4 地表反射特性的数学描述	9
1.5 多角度遥感观测	16
1.6 从遥感信号到地表二向反射	18
参考文献	20
第 2 章 陆表二向反射模型及反演方法	21
2.1 陆表二向反射模型概述	21
2.2 物理模型——辐射传输模型	23
2.3 物理模型——几何光学模型	30
2.4 物理模型——混合模型	35
2.5 经验/半经验模型	37
2.6 计算机模拟模型	42
2.7 二向反射模型反演方法	44
参考文献	47
第 3 章 陆表二向反射特性遥感观测技术与试验	53
3.1 地表二向反射特性观测原理及影响因素	53
3.2 实验室样品二向反射特性观测	59
3.3 野外地面地表二向反射特性观测	61
3.4 野外基于遥感车和遥感塔的地表二向反射特性观测	65
3.5 航空遥感地表二向反射特性观测	71
3.6 卫星遥感地表二向反射特性观测	76
3.7 国内外具有二向反射特性观测的遥感试验	79
参考文献	83
第 4 章 植被冠层二向反射特性计算机模拟模型	85
4.1 模型概述	85
4.2 基于蒙特卡罗方法的植被冠层二向反射特性计算机模拟模型	85
4.3 基于辐射度方法的植被冠层二向反射特性计算机模拟模型	90
4.4 小结	124

参考文献..... 125

第 5 章 基于陆表二向反射特性先验知识的地表反照率反演方法..... 127

5.1 先验知识在地表二向反射特性和反照率反演中的作用 127

5.2 全球二向反射特征和反照率先验知识 128

5.3 基于二向反射先验知识的地表反照率遥感反演算法 132

5.4 基于背景场的地表反照率产品时空滤波方法 153

5.5 小结 165

参考文献..... 165

第 6 章 多传感器综合反演陆表二向反射特性和反照率..... 168

6.1 多传感器综合观测 168

6.2 多传感器综合观测的角度信息量 172

6.3 多传感器综合反演地表二向反射特性的主要挑战 176

6.4 多传感器综合反演地表二向反射特性主要方法 180

6.5 多传感器反演地表 BRDF/反照率..... 186

6.6 基于多传感器反射率数据反演全国反照率产品 189

6.7 小结 192

参考文献..... 193

第 7 章 山区陆表二向反射特性遥感建模与反照率反演..... 195

7.1 地形影响遥感像元反射估算的理论基础 195

7.2 高分辨率遥感像元山区地表方向反射率估算 201

7.3 低分辨率遥感像元山区地表方向反射率估算 211

7.4 山区地表反照率估算 224

7.5 山区地表反照率的空间尺度效应 228

7.6 小结 232

参考文献..... 233

第 8 章 全球陆表反照率遥感产品及其真实性检验..... 235

8.1 全球陆表反照率遥感产品及一致性评价 235

8.2 地表反照率产品真实性检验方法 239

8.3 反照率遥感产品真实性检验试验 249

8.4 小结 265

参考文献..... 265

索引..... 268

第1章 绪 论

二向反射,是指地物表面的反射不仅与太阳入射方向相关,还与传感器观测的方向相关。人们通过测量发现了自然界表面这种反射现象,并提出了多角度遥感的概念,推动了定量遥感研究的快速发展。地表二向反射作为描述自然界地表反射电磁波特性的物理量,是遥感可提取的地表属性信息之一,其建模与反演是光学遥感科学研究的基础。

作为全书的理论基础,本章介绍与遥感相关的基本物理量、二向反射的定义和多角度遥感的概念。全书若不做特别说明,地表二向反射是指自然界地表在可见光近红外波段($0.3\sim 3\mu\text{m}$)的二向反射,在这一谱段内,地物表面主要反射来自太阳辐射的电磁波。

1.1 遥感科学与定量遥感中的方向反射特性

20世纪60年代早期,美国海军研究办公室一份未正式出版的论文上最早出现了“遥感”一词。1962年,第一届环境遥感大会(美国密歇根州)上“遥感”术语正式被国际科技界使用,标志着遥感的诞生。遥感,广义上理解是指通过非物理或近距离的接触,由传感器测量获取目标特性信息的过程(Jensen, 2006)。而狭义的遥感可表述为从远距离、高空以至外层空间平台上,利用可见光、红外、微波等探测器,通过摄影或扫描、信息感应、传输和处理,从而识别地表物质的性质和运动状态的技术和科学。

依据此定义,最初的遥感可以追溯到1608年,汉斯·李波尔赛发明了第一架望远镜,为观测远距离目标开创了先河,但还不能将观测到的事物记录下来,可称为无记录的地面遥感(1608~1838年)。1826年法国约瑟夫·尼塞福尔·涅普斯在法国勃艮第拍摄了第一张照片(图1.1),该照片被认为是遥感图像的雏形,为有影像记录的遥感出现奠定了基础。1839年,路易·达盖尔发表了他和涅普斯拍摄的照片,标志着有记录的地面遥感的开始(1839~1857年)。随着探空技术的发展,气球、飞机和卫星相继出现,遥感进入了最重要的航空遥感(1858~1956年)和航天遥感(1957年至今)两个发展阶段。观测的地物波段范围从可见光扩展至近红外、红外及微波波段;传感器的成像从摄影扫描的单波段成像发展到多光谱、高光谱传感器成像;遥感的信息提取技术从目视解译到对数字图像处理、自动分类或人机交互判读,再到利用遥感探测的电磁辐射定量提取地球表面多种信息。越来越多的研究表明,遥感研究实现从定性到定量的过渡,需要多学科交叉,加强遥感基础研究工作(李小文,2005)。

20世纪80年代初,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发起了遥感科学计划。所谓遥感科学,是指利用传感器远距离测量地物的电磁辐射,采用数学统计或物理模型反演的方式从数据中提取有价值信息的科学研究。因此,广义上遥感科学是获取、处理和解释电磁波能量和物质相互作用的科学。陈述彭先生认为遥感科学是一门综合性的科学,它借助物理学的基础、数学的方法、计算机的手段,

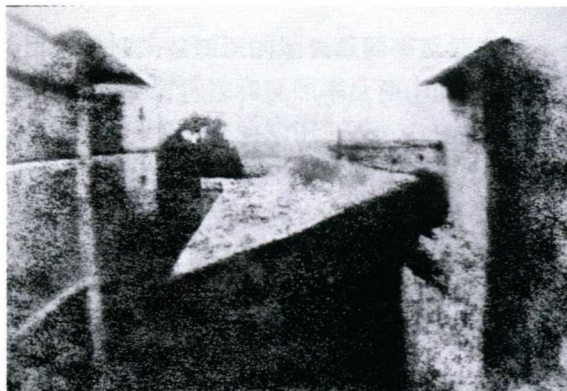


图 1.1 约瑟夫·尼塞福尔·涅普斯于 1826 年拍摄的照片

以及地学、生物学的分析,解决对地观测的科学理论和实际问题(李小文,2005)。随着地球系统科学的提出,遥感科学的重心转向了以促进地球系统科学发展为目标,以定量遥感为主要标志,注重多学科交叉综合,从整体上观测研究地球(李小文,2006)。

研究地表物体与电磁辐射之间相互作用的物理机理,建立遥感观测的电磁辐射信号与地表参数之间的函数关系,是定量遥感研究的基础,称其为遥感建模。从遥感观测的电磁辐射信息中求解出应用所需的地表和大气属性参数,称为遥感反演。建模与反演是定量遥感科学问题的两个方面,是定量遥感研究的主要内容和支撑遥感发展的基础理论,是遥感作为一门科学的标志(宫鹏,2009;柳钦火等,2009)。

电磁波与地物表面的相互作用,表现为任何物质都会反射、吸收和透射电磁波,不同性质和不同结构的物质对不同频率电磁波的反射、吸收和透射能力各不相同。反射作为自然界中物体对电磁波作用的一种基本现象,可以表示为光谱特征、空间特征、时间特征、角度特征和偏振特征的函数:

$$R = f(\lambda, s, t, \Omega, p) \quad (1.1)$$

式中, R 是遥感观测的地表反射率,是波长 λ 、空间位置 s 、时间 t 、观测几何 Ω 和偏振状态 p 的函数。遥感初期,人们所关注的信息主要是空间特征,即依据像元间的灰度差异进行空间特征的处理与分析,达到识别地物的目的。随着多/高光谱成像技术的发展,人们很快从遥感数据中意识到光谱特征和时间特征的重要性,从光谱谱段信息和时间序列信息中分辨和提取地物信息,提升了遥感的应用能力。

遥感观测的地物表面反射还具有方向性特征,可以描述为地物表面对太阳辐射的反射和散射能力的半球空间分布。这种分布不仅与太阳和传感器的角度有关,还与地物表面的粗糙度有密切联系。根据电磁波与目标物相互作用的性质差别,一般可将物体分成镜面反射体、漫反射体和方向反射体(图 1.2)。

镜面反射体,常见于玻璃和平静水体的表面,这种情况下物体的表面粗糙尺度远远低于电磁波的波长。物体表面的反射满足反射定律,对电磁波的反射表现为镜面反射,即入射波和反射波在同一平面内,入射角和反射角相同,可用折射定理、菲涅耳反射来描述。

漫反射体,也称为朗伯体,自然界中很少见理想的漫反射体。硫酸钡和硫酸镁等表面可以近似认为漫反射体,常作为制作实验室定标或野外反射率测量所用的参考板材料。

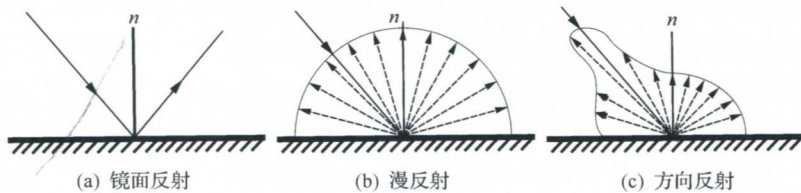


图 1.2 自然界三种不同的反射特性

漫反射体表现为物体表面足够粗糙,对太阳短波辐射的反射以目标物为中心的半球空间呈现为常数,即物体表面的反射能力不随观测角度变化而改变。

方向反射体,也称为非朗伯体,是自然界的常态,介于镜面反射和漫反射特性之间的物体,对太阳短波辐射的反射随观测方向变化。物体表面将入射的电磁波向四面八方散射,形成散射通量不同的空间分布,具有明显的方向性特征。

除地物表面粗糙外,地物的三维空间结构特征也是影响地物方向反射的一个重要因素。显然,遥感影像仅仅是二维空间的投影,对于具有三维空间结构的自然地物而言,用遥感影像的空间信息不足以表示复杂的三维结构特征。在遥感技术发展的早期,已认识到了角度特征的重要性,提出了“多角度分辨率”的概念。只要能构建出多角度遥感观测的反射率模型,描述地物反射太阳辐射在半球空间的分布规律,便可以利用多角度观测的遥感影像获取更多的地物信息。

1.2 二向反射特性研究的意义

遥感初期,人们假设地表为朗伯体,即地物反射方向的空间分布均匀。利用传感器垂直观测的方式,综合地物的时间特性、空间特性和波谱特性,进行地物信息的人工解译和分类,在当时被认为是非常有效的。步入定量遥感发展阶段后,特别是多角度遥感的出现,地物方向反射特性的重要性逐渐突显。1996年9月,第一届国际多角度测量与模型专题研讨会(The First International Workshop on Multiangular Measurements and Models, IWMMM-1)在北京举行,强调测量与模型结合,将二向反射特性的理论研究推上了日程。受地表二向反射特性的影响,同一传感器观测地表同一目标物,一天中不同时刻或不同角度观测,地表将有不同的反射特征。图 1.3 显示了中国科学院遥感应用研究所(现为中国科学院遥感与数字地球研究所)2001 年在北京顺义地区利用机载多角度多

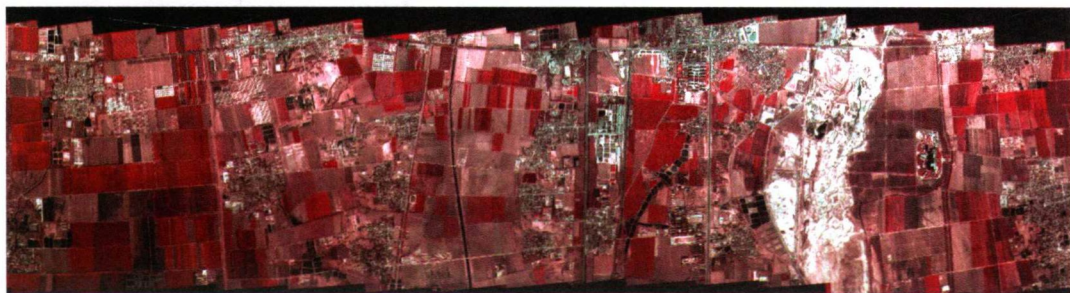


图 1.3 机载多角度多光谱成像仪获取的北京顺义地区多角度遥感图像

光谱成像仪获取的多角度遥感图像,可以看出,影像上对应的传感器在前向散射观测方向上色调偏暗(影像南部区域),而对应传感器在后向散射观测方向上色调较亮(影像北部区域),显示了较强的反射方向特性。

大量的研究表明,不同太阳入射和传感器观测获取的地表反射率有显著的区别,特别是对于地表三维结构特征比较明显的地物类型,常见于植被、城市和裸土,甚至是非光滑的水面。为了能够准确全面反映地表特征,要求传感器需要有足够的能力获取这种反射特性,因此,推动了多角度传感器的研制以及多角度观测试验的发展。

地表二向性反射具有重要的理论研究和应用价值。一方面,可通过地表二向反射特性来反映地物目标的三维结构特征和提取不同地表类型的生物和物理属性。例如,植被的二向反射特性与植被冠层结构(如冠层高度、冠层叶倾角分布、叶的形态结构和空间分布)、植被冠层构成要素的光谱特性和植被下垫面特性之间有密切的联系。通过进行植被冠层反射率多角度观测和二向反射模型构建,由模型反演来获取植被冠层结构信息。再比如,反照率的估算,早前利用垂直观测的方式,假设地表为朗伯体,利用单一方向观测的反射率来计算,该方法已被证明存在较大的误差。较为精确的地表反照率估算,需要充分考虑地物目标的方向反射特性。利用地表二向反射模型,通过对其进行半球积分可精确地获取地表反照率。目前在轨卫星业务化运行的陆表反照率产品基本都是基于地表二向反射特性来估算的。

另一方面,通过地表二向反射特性的研究,期望能减少同一影像上由于角度不同带来的反射率差异,即需要利用二向反射模型进行入射角和观测角的归一化,才能进一步进行地表参数的准确估算。大量研究表明,太阳角度和观测角度的不同,对比值植被指数和归一化植被指数的计算有显著影响。减少角度对植被指数影响的方法之一就是用二向反射模型将不同角度观测的反射率拟合到标准几何角度下观测的反射率,在此基础上计算植被指数,即进行植被指数角度归一化。常见的还有期望通过多角度归一化的反射率来提高地表类型的分类精度,减少由不同角度观测的反射率差异引起的错判、误判。

二向反射特性研究是光学遥感研究的基础,不仅在反映地表结构特性上有重要的意义,还在地气能量传输中占据重要的位置,是多种陆表参数计算的必要条件。从 20 世纪 70 年代以来,二向反射特性的研究主要集中于二向反射特性的定义、二向反射特性建模与反演,以及二向反射特性测量,并已取得了系列研究成果。

1.3 基本术语

1. 立体角

立体角指三维空间中某一表面对某一点所张开的角度,可用符号 Ω 表示。定义为一个半径为 r 的球面,从球心向球面作任意形状的锥面,锥面与球面相交的面积为 A ,则面积 A 与半径 r 的平方的比值就是此锥体的立体角:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \tag{1.2}$$

如果用极化坐标来表示,在天顶角为 θ 和方位角为 ϕ 条件下,微小单位立体角可以表示为

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta) \times (r\sin\theta d\phi)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \tag{1.3}$$

它是二维平面角度在三维空间中的扩展,可用来描述辐射的方向,单位为球面度(sr)(图 1.4),在半球空间的积分是 2π 。定义投影立体角 Λ 的半球积分为

$$\Lambda = \int_{2\pi} \cos\theta d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \pi \tag{1.4}$$

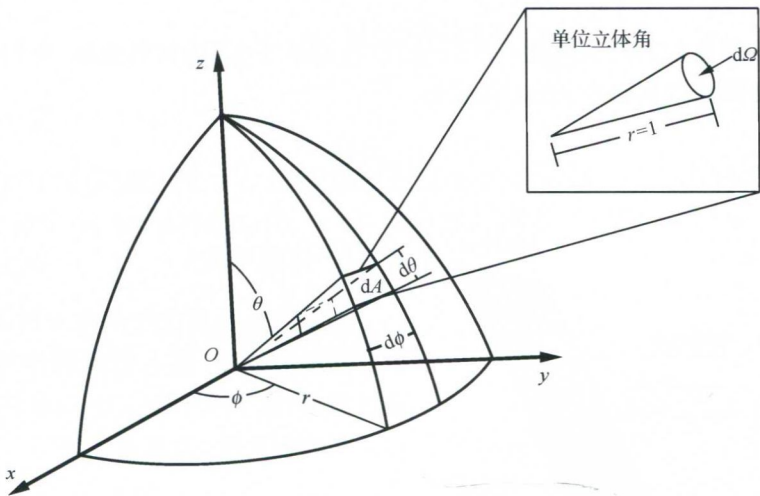


图 1.4 立体角示意图
 r 为球面半径; A 为锥面与球面相交的面积; θ 为天顶角; ϕ 为方位角; Ω 为立体角

2. 散射角

散射角指入射光束和出射光束之间的夹角,是定量遥感中常见的角度物理量,可以用符号 Θ 表示。在已知入射光束角度 (θ_i, ϕ_i) 和出射光束角度 (θ_v, ϕ_v) 条件下(图 1.5),散射

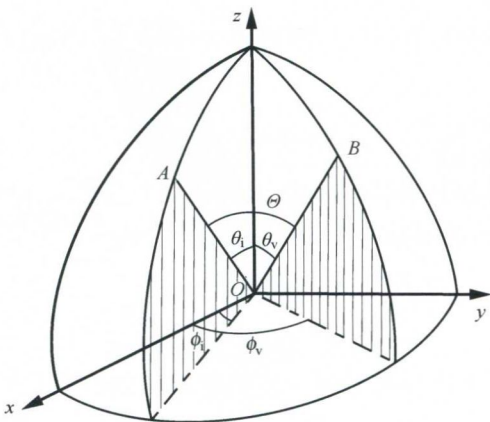


图 1.5 散射角示意图
 A 表示对应角度是 (θ_i, ϕ_i) 的入射光束; B 表示对应角度为 (θ_v, ϕ_v) 的出射光束;两者之间的散射角为 Θ

角的余弦可表示为

$$\cos\Theta = \cos\theta_i \cos\theta_v + \sin\theta_i \sin\theta_v \cos(\phi_i - \phi_v) \tag{1.5}$$

3. 辐射能量

辐射能量指电磁场以辐射的形式发射、转移或接收的能量 Q , 单位为焦耳(J)。

4. 辐射通量

辐射通量指单位时间内通过一个任意面(曲面或平面)的辐射能量, 符号为 Φ , 单位为瓦(W)。同义词为辐射功率, 公式表示为

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1.6}$$

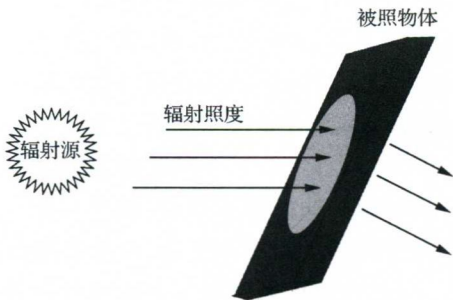


图 1.6 辐射照度示意图

5. 辐射照度

辐射照度指单位时间内入射到物体单位面积上的辐射能量, 或入射到物体单位面积上的辐射通量(图 1.6), 符号为 E , 单位为 $W \cdot m^{-2}$ 。同义词为辐照度, 公式表示为

$$E = \frac{d^2Q}{dAdt} = \frac{d\Phi}{dA} \tag{1.7}$$

6. 辐射出射度

辐射出射度描述物体单位面积出射的辐射通量, 符号为 M , 单位为 $W \cdot m^{-2}$ 。同义词为辐出度, 又称辐射通量密度。式(1.7)可以表示辐射出射度, 但此时的辐射能量是指出射的辐射能量(图 1.7)。

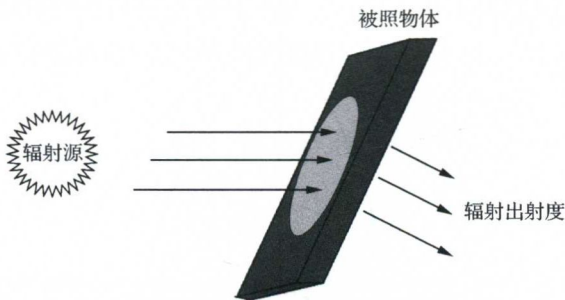


图 1.7 辐射出射度示意图

7. 辐射强度

辐射强度描述点辐射源在某一方向上的立体角内所发出的辐射通量(图 1.8), 可用