

空间信息获取与处理系列专著

多角度与热红外 对地遥感



李小文 汪骏发 王锦地 柳钦火 著



科学出版社

空间信息获取与处理系列专著

多角度与热红外对地遥感

李小文 汪骏发 王锦地 柳钦火 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是国家高技术计划信息领域信息获取与处理技术(863-308)主题成果系列专著之一,是著者在863-308主题的持续支持下,在多角度遥感与热红外对地遥感方面基础研究前沿所取得的系列成果,即对朗伯定律和普朗克定律尺度效应的分析和纠正以及在定量遥感反演中先验知识的表达与应用。本书还介绍了多角度遥感图像处理中在大气订正和图像配准上的研究进展、课题组研制的机载多角度多光谱成像系统的(AMTIS)的原理和性能特点以及与国际前沿同类设备的比较。为了便于读者理解和参考,本书也简明扼要地介绍了多角度与热红外对地遥感的基本原理和AMTIS系统的应用前瞻。

本书可供遥感领域相关专业的研究人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

多角度与热红外对地遥感/李小文等著. - 北京:科学出版社,2001
(空间信息获取与处理系列专著)

ISBN 7-03-009175-2

I. 多… II. 李… III. 红外遥感-研究 IV. TP722.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 04340 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001年3月第一次印刷 印张:14 1/2
印数:1—2 000 字数:330 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著 编辑委员会

名誉主编：匡定波

主 编：郭华东

副主编：许健民 倪国强

编 委（按姓氏笔画为序）

王长耀	王建宇	王德纯	朱敏慧	刘玉洁
刘永坦	孙文新	巫英坚	杨家德	杨震明
李小文	李文友	吴一戎	张光义	张永生
张钧屏	张意红	张澄波	郁文贤	林行刚
周心铁	郇辛樵	孟宪文	侯朝焕	姜文汉
姚岁寒	顾怀瑾	阎吉祥	龚雅谦	梁甸农
彭胜潮	景贵飞	强小哲	缪家駟	魏钟铨

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

- 对地观测技术与可持续发展
- 合成孔径雷达卫星
- 空间探测相控阵雷达
- 对地观测与对空监视
- 航天遥感工程
- 对地观测技术与数字城市
- 对地观测技术与精细农业
- 多角度与热红外对地遥感
- 环境监测激光雷达
- MODIS 遥感信息处理原理与算法
- 对地观测系统与应用

空间信息获取与处理系列专著

序

信息获取与处理技术(308)主题是我国高技术计划最早设立的15个主题之一。20世纪80年代初,美国政府推出“星球大战计划”,接着欧洲出台了“尤里卡计划”。在亚洲,日本率先提出了“未来10年振兴科学技术政策大纲”。面对严峻的国际形势和世界的发展趋势,中国于1986年形成自己的高技术研究发展计划,明确提出308主题重点发展面向空间目标监视和空间对地观测的军民两用技术。

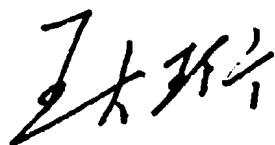
随着20世纪90年代初前苏联的解体、冷战的结束及其后“信息高速公路”、“知识经济”、“数字地球”的出现,308主题根据国际形势的发展和国家现代化建设的需要,科学地调整战略目标,卓有成效地部署实施研究计划。

15年来,308主题围绕对地观测和对空监视两大系统,突破了以新型对地观测系统星载合成孔径雷达、红外焦平面列阵成像和自适应光学为代表的六大关键技术,配套发展了超高速实时成像信息处理专用技术,取得一系列重大成果。星载合成孔径雷达等重大对地、对空关键技术成功地向国家建设主战场转移,实现了863计划与其他计划的有机衔接,带动了我国在这些领域的一系列技术进步和设备研制,开拓了我国对地观测技术和对空探测技术发展的新局面。

在863计划15年工作行将完成之际,308主题专家组决定撰写出版空间信息获取与处理系列专著,这是一项非常重要的举措:一是科研人员通过系统总结而进一步提高水平,二是可以让更多的人分享多年来的重要科研成果,三是对发展下一期的863计划建立了坚实的基础。这套系列专著的作者,包括了战略型科学家和工程

技术专家,他们长期工作在第一线,对该领域有直接的发言权。该系列专著包括 11 部书,从不同角度在不同程度上介绍了我国对地观测、对空监视高技术领域的发展,并对下一步的工作提出了设想与建议。本套专著的出版,是我国信息获取领域的一件大事,有重要的学术和实用意义。

我高兴地向读者们推荐这套高技术领域的系列专著。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王大珩' (Wang Daxin), written in a cursive style.

2001 年 2 月

空间信息获取与处理系列专著

前 言

新世纪到来之际,我国的 863 计划——高技术研究发展计划,历经 15 年的辉煌,将完成第一期庄严的历史使命。863 计划信息领域信息获取与处理技术主题,经过各级领导和五届专家组及全体参研人员的共同努力,也圆满地实现了她的预期目标。

作为 863 计划信息领域 4 个主题之一的“信息获取与处理技术主题”,1986 年立题伊始即明确其战略目标:发展各种信息获取与处理技术,重点是掌握高速、高精度的新型信息获取和实时图像处理技术,促进信息技术在各个领域的应用。1990 年提出,在重视对空监视的基础上,加强对地观测;1993 年进一步提出,在重视星载对地观测的同时,加强机载对地观测技术的发展。进入“九五”,进一步凝炼战略方向:以中国数字地球战略空间信息资源重大需求为导向,研究发展对空、对地观测技术,形成具有我国自主知识产权的实用化机载对地观测技术系统,开展数字图像处理及信息挖掘方法研究,研究对地观测小卫星有效载荷及卫星数据处理技术,进行应用示范,为我国数字地球战略铺垫基础,为国家可持续发展、国家安全战略服务。

15 年来,308 主题五届专家组在国家科技部领导下,依靠来自 20 多个部、委,分布在 19 个省、区、市的 61 个单位 3000 余名科技人员的精诚奉献,围绕对地观测与对空监测两大系统,突破 7 项关键技术,探索信息获取前沿,取得机载对地观测系统技术、星载合成孔径雷达技术、自适应光学望远镜技术等四大标志性成果;获得 X-SAR 系统样机、SAR 实时成像器、激光测污雷达、激光测风雷达、对地观测小卫星相机、MODIS 接收处理系统、InSb 红外焦平面组件及逆合成孔径雷达等 8 项代表性重点成果;在前沿信息获取方面,取

得新型光学传感器、聚束雷达、微型自适应光学技术等 5 类成果。成功开展机载对地观测系统应用示范,在城市、农业应用等领域取得显著成效,及时开展了“九八”抗洪、“九九”澳门回归、“西部金睛行动”和中关村科技园区遥感飞行等服务国家重大需求的专项。这些成果提高了我国信息获取与处理技术领域发展水平,缩短了我国在该领域与世界先进水平的差距,为国民经济建设、国家安全战略做出重要贡献。

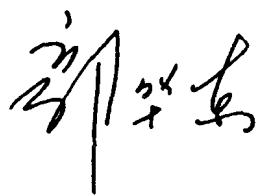
在 15 年研究即将完成之际,对长期以来的科研成果进行科学的、系统的总结,这对未来发展十分有益,为此我们决定出版这套空间信息获取与处理系列专著。本系列书由 11 部著作组成,书名分别是:《对地观测技术与可持续发展》、《合成孔径雷达卫星》、《空间探测相控阵雷达》、《对地观测与对空监视》、《航天遥感工程》、《对地观测技术与数字城市》、《对地观测技术与精细农业》、《多角度与热红外对地遥感》、《环境监测激光雷达》、《MODIS 遥感信息处理原理与算法》及《对地观测系统与应用》。对地观测内容构成本系列书的主体,介绍了对地观测原理、技术、应用与发展;侧重论述 308 主题近年来研究发展的光学传感器、成像雷达系统、信息处理方法及其在城市、农业、环境、资源、灾害等领域的应用,提出了 21 世纪初以可持续发展为牵引发展对地观测技术的建议及战略思考;空间监视内容是本系列书的又一重要方面,概述了空间目标探测与监视技术,介绍了空间探测相控阵雷达技术;激光雷达是信息获取技术的前沿领域之一,书中阐述了环境监测激光雷达原理与技术。

我们期望,这套专著能起到理论总结的作用、学术交流的作用;同时,我们也期望着她能对下一期国家高技术发展起到有益的参考作用。

15 年来,信息获取与处理技术主题工作受到科技部、科技部高新技术司、863 联合办公室、信息领域办公室各级领导的大力支持,得到各承研单位及课题组和关心 308 主题同志们的全力支持,在此谨代表主题五届专家组向以上领导与同志们致以真诚的谢意。诚然,没有大家的支持,本系列书也不可能问世,值此系列专著出版之际,向大家表示衷心的感谢。863 计划发起者之一的王大珩院士在百忙之中亲自为系列专著作序,我们向推动我国高技术计划的元勋

王大珩先生致以崇高的敬意。11部专著的数十位作者都是工作在863计划第一线的优秀科学家,在繁忙的工作之余,他们将高技术成果进行理论总结,为国家高技术“书写”奉献,亦特向各位辛勤的作者致以敬意。在本系列专著出版时又受到科学出版社的鼎力相助,特别是姚岁寒等先生付出了十分艰辛的劳动,谨此一并鸣谢。

系列专著不久将与大家见面了,鉴于水平与时间所限,书中不妥乃至错误之处在所难免,恳望读者不吝批评指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '姚岁寒' (Yao Suihan).

2001年元月

前 言

感谢《空间信息获取与处理系列专著》给我们一个机会向广大读者介绍我们 863-308-14-03(8)课题组为发展我国热红外多角度遥感事业所做的工作。

本书第一、三、四章由北京师范大学王锦地教授和我本人、第二、七章由中国科学院遥感所柳钦火博士、第五章由中国科学院上海技术物理研究所汪骏发博士、第六章由核工业部地质研究院肖青工程师分头执笔。我们从各自擅长的领域和视角,合力描述了热红外多角度遥感的理论基础和最新的进展。

关于多角度遥感的理论基础,本书着重讲了二向性反射的几何光学模型和定量遥感的病态反演理论,因为这是遥感基础研究中我们的特色。不久前《遥感学报》要我为我们的一辑专刊写前言,我写道:

时届中秋佳节,“明月几时有?”我国古代地理学家一千年前就提出这一问题。二向性反射的几何光学学派的回答是,只有当观察者位于“热点”方向,即背对太阳时,才能看到满月,而且看不到环形山的任何阴影,因而最明亮。

这个回答也许太简单,因为还有大气透明度的问题、日地距离、相干效应,等等,等等。但不可否认,几何光学的回答抓住了问题最核心的本质。同样的原理,我们已成功地应用于可见光、近红外波段的对地遥感,在攀登项目中又成功地推广到热红外,解释非同温像元热辐射的方向性。本期增刊的几篇文章用实测或模拟数据证实了我们温差面积的投影加同温多次散射模型的合理性。

《遥感学报》在此时要我为增刊写前言,我愿祝读者中秋快乐,愿故乡的明月能成为遥感机理研究中国几何光学学派成功的见证。

当我写这番话时,我以为月亮的朔望,上弦下弦,这些几何光学关系是大家都清楚的。不料好几位地理学的博士、教授怀疑我满月即热点的提法。经过热烈讨论,我才弄清楚他们把新月当作月食了。再深入问,为什么满月不总有月食?这复杂一些,牵涉到地球的锥形阴影和满月的“热点宽度”,但仍然是一个几何光学问题。看来本书花一定篇幅介绍几何光学模型的基本原理和应用还是有必要的。

定量遥感本质上是病态反演,这是由于地表太复杂,而遥感信息总是有限的,不认识这一点就好比瞎子摸象。如果摸到腿,就说“象像柱子”,摸到鼻子,就说“象像蟒蛇”,那就错了,就会引起无谓的争执和旁人的嘲笑。病态反演理

论用于定量遥感,则要求信息的融合、积累和综合。如果用于瞎子摸象,最后可以得到“像柱子的大概是象腿,像蟒蛇的大概是鼻子。……,象真大!”这样一个最大似然的估计。

需要说明的是,由于各位作者工作在不同的领域,他们习用的语汇、符号、公式和单位有一些细微的差别,曾经考虑在本书中应该统一,但很快发现牵涉太广,而且可能会给各不同领域的读者带来不必要的困扰。所以基本上仍尊重各领域的习惯用法,不强求一致,希望读者能惠予谅解,并从中体味到遥感作为交叉学科的多样性。

本书虽然以介绍几何光学模型为主,但并不排斥其他的模型或学派,古语说,“珠联璧合”,“相得益彰”,就是讲多样性的互补与综合,或英语里的 synergic。说到珠联璧合,时髦的读者也许会想到珍珠项链什么的,1992年版《常用成语词典》解释为:“指珍珠串在一起,美玉合在一块儿,比喻……”这是望文生义,也不算错。但其实语出《汉书》:“日月如合璧,五星如连珠,”讲的是两种罕见的天文地理现象。

日月同辉不稀罕,在上弦月、下弦月时,太阳-地球-月亮成直角,我们常常可以看到。但日月合璧就难得一见了。日月合璧指的是太阳和月亮重叠在一起,而又不是日食——它们一道放射光华。有人也许认为这种罕见现象是对几何光学模型的挑战。但其实我相信只有几何光学模型(加上大气分层模型)才能解释这种目前据说只能在东南沿海十月朔日、天朗气清时才能看到的日月同升现象。不过要验证这种解释就比较困难,需要在指定时刻,指定地点,测太阳/月亮的直射光谱,放探空气球,但也不是办不到的。

除各章执笔的同志以外,我愿在此向崔成禹研究员表示由衷的谢意和敬意。他是我国热红外遥感事业的先行者之一,本课题早期的实际负责人,本书开始时的筹备和组织工作,也是委托他负责的。望他早日康复,继续为我国热红外多角度遥感事业发挥余热。书中论及的对几何光学模型和反演方法模型的验证研究,大量的地面遥感实验数据是在中国科学院地理研究所项月琴教授和张仁华教授的指导下和合作中获得的;通过国际合作,美国 NASA、法国 CNES 也为我们提供了遥感和地面观测数据。此外,王进高工、阎广建博士、刘强同学、苏理宏博士、杨华博士也参与了本书部分章节的撰写或先后做了不少工作。谨此鸣谢。

李小文

目 录

第一章 二向性反射与多角度遥感	(1)
§ 1.1 地表像元二向性反射机理	(1)
§ 1.2 多角度遥感	(8)
§ 1.3 地面目标的多角度观测实验	(9)
第二章 热红外遥感基础	(12)
§ 2.1 地表的热红外辐射特性	(12)
§ 2.2 大气的热红外辐射及传输	(26)
§ 2.3 遥感传感器波谱响应函数及大气辐射传输计算程序	(37)
§ 2.4 地表温度遥感反演的现有方法简介	(49)
第三章 尺度效应与几何光学模型用于尺度纠正	(58)
§ 3.1 遥感基础研究中的尺度问题	(58)
§ 3.2 朗伯定律的尺度效应和几何光学模型	(60)
§ 3.3 衡量尺度效应的三要素及尺度纠正	(62)
§ 3.4 普朗克定律的尺度效应及其纠正	(63)
§ 3.5 非同温混合像元热辐射尺度效应模型的模拟验证	(74)
第四章 定量遥感反演基础	(84)
§ 4.1 定量遥感反演面临的主要问题	(84)
§ 4.2 遥感模型反演的基本原理	(86)
§ 4.3 地表结构参数的遥感反演方法	(90)
§ 4.4 大尺度地表反照率的遥感反演	(104)
§ 4.5 地表温度参数的遥感反演	(127)
第五章 AMTIS 系统原理及性能特点	(154)
§ 5.1 概述	(154)
§ 5.2 AMTIS 系统原理	(156)
§ 5.3 AMTIS 的性能	(163)
§ 5.4 地面试验	(164)
§ 5.5 结论	(166)
第六章 AMTIS 的几何纠正和大气校正	(167)
§ 6.1 几何纠正	(167)
§ 6.2 多角度遥感图像的大气校正	(175)
第七章 AMTIS 系统的应用前瞻	(194)
§ 7.1 AMTIS 系统在理论模型研究中的应用	(194)
§ 7.2 AMTIS 系统在陆面过程研究中的应用	(196)

§ 7.3	AMTIS 在云与气溶胶研究中的应用	(197)
§ 7.4	AMTIS 飞行试验与应用	(198)
主要参考文献		(207)

第一章 二向性反射与多角度遥感

§ 1.1 地表像元二向性反射机理

从对地多角度观测数据中提取地面目标的空间结构等参数,从机理上讲,主要依赖于地物本身的二向性反射特性。由于无论大气或地表,都不是理想的均匀层或朗伯表面,所以都有垂直方向上的变化和空间结构。地物表面的反射特性通常既不是理想的漫反射也不是理想的镜面反射,甚至不是二者的加权和。

二向性反射是自然界中物体对电磁波反射的基本宏观现象,即反射不仅具有方向性,这种方向性还依赖于入射的方向。物体的反射辐射/发射与物体的表面结构特征及物体的物质组成有密切关系,不同物体表面将入射的电磁波向四面八方散射(除吸收外),形成散射通量不同的空间分布,反射的方向性是其材料波谱特征和空间结构特征的函数。人们早已观察到这种现象,从而发展了二向反射比、二向反射比因子等不同概念。随着对反射方向性描述的精度要求的提高,二向性反射分布函数(BRDF)的精确概念在 20 世纪 70 年代出现,但其产生机理的研究到 80 年代才受到足够重视,不同复杂程度的参数和模型陆续发展出来描述这种分布函数。

二向反射是英文 Bidirectional Reflectance 的译名。有人译为双向反射,更顺口一些。但中文里“双向”往往有来回、往返之意,所以我们倾向于用更拗口的“二向反射”的译名,以强调其为两个独立方向(入射与反射)的函数,而不是正反双向。描述三维空间的两个方向需要 4 个变量,加上波长就 5 个变量,所以 BRDF 的描述本身就很繁琐。只要有可能,人们总倾向于用更理想化的假定以求更简单的描述,如漫反射假定、相函数等等。这大概是因为迟至 20 世纪 70 年代 BRDF 的精确概念才由 Nicodemus 确立的原因。由于 BRDF 是物体表面的固有性质,而科学的发展对精确描述这一概念提出了迫切的需求,因而这一概念一经确立很快就为大家所接受,并形成了以前很多实用、简化、但有时混淆的方向反射概念统一的基础。

70 年代初 Nicodemus 给出了二向性反射分布函数的迄今最完善的定义(Nicodemus et al., 1977),即:

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\Omega_r)}{dE(\Omega_i)} \quad (1.1)$$

单位为 $1/\text{sr}$ (球面度⁻¹)。

从这个严格定义的 BRDF,可以推演出不同情况下常用的其他量,如二向反射比等等。这个定义看来形式很简单,但理解和使用均很困难。式中 θ_i (天顶角)和 ϕ_i (方位角)确定入射方向; θ_r 和 ϕ_r 描述某一反射方向; Ω_i 和 Ω_r 相应表示在反射和入射方向上的两个非常小的(微分)立体角, $dE(\Omega_i)$ 表示在一个微分面积元 dA (为叙述简洁计,假定水平放置)之上,由于 Ω_i 这个微分立体角内辐照度 $E(\Omega_i)$ 的增量所引致的 dA 上辐亮度的增

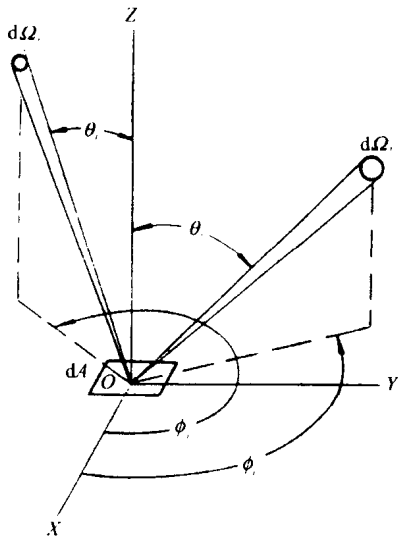


图 1.1 BRDF 中的参量图示

量。\$dL(\Omega_r)\$ 则是由于增量 \$dE(\Omega_i)\$ 引起的 \$\Omega_r\$ 方向上辐照度的增量, 参见图 1.1。

Nicodemus 的严格定义在实用中的一个主要困难之一是它基于微分面积元, 而 \$\Omega_r\$ 是由这一点向上辐射的立体角, 在遥感实际中, 传感器更接近于一个点 (几十到几百微米), 而传感器的视场角 (FOV) 是一个向下的立体角, 覆盖地面数米到数公里一个像元。当然从数学上讲, 仍然可以对像元进行分割, 把传感器接收的信号作为这些微分亚像元在传感器上产生的立体角的辐亮度的积分, 但这样过于繁琐, 对实际应用和弄清遥感信号机理并没有什么帮助。因此, 李小文与 Strahler 在 1986 年定义 BRDF 为 (Li and Strahler, 1986):

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \lim_{\substack{\Omega_i \rightarrow 0 \\ \Omega_r \rightarrow 0}} \frac{1}{\pi} \text{DRF} \quad (1.2)$$

这里 DRF 是在给定入射光和传感器等因素不变的情况下, 传感器接收到的信号 (辐照度) 与假定该像元为一理想漫反射标准参考板时传感器接收到的信号之比。这里 \$1/\pi\$ 是使 DRF 在数量上和单位上与 BRDF 一致的因子。在实际运用中, 常常没有必要多这一次运算而使结果与习惯熟悉的反射率有一个 \$\pi\$ 倍的差别, 这时有人称之为二向性反射因子 (BDRF)。由于这样定义的 BDRF 与 BRDF 并无实质上的差别, 除在具体比较数值时外, 本书中统称为 BRDF。

物体表面 BRDF 产生机理研究的蓬勃开展, 其需求主要来自遥感。BRDF 模型的研究在近 20 年来取得了长足的进展, 主要是由于原来关于表面反射的理想化假定和近似 (镜面反射、朗伯反射) 不再能满足对地观测的需要, 如宽视场遥感器由于观察方向的差异能产生极强的同物异谱现象, 卫星过顶时刻特定太阳高度角时观测到的反射率无法外延到其它太阳高度角, 因而无法精确估计全日的平均反射率, 等等。

BRDF 与热红外辐射的方向性有直接关系, 但当遥感像元内表面温度非处处均一时, 热红外辐射的方向性不仅由其表面的 BRDF 确定。由于地物表面的 BRDF 载有其结构的信息, 多角度遥感具有反演地物表面亚像元尺度上的结构参数的潜力, 而由于地物结构对不同波段电磁波是共同的特征, 地物结构即成为多波段与多角度遥感信息的融合点。

以钱德拉塞卡为代表的辐射传输理论在大气物理和核物理中取得了巨大的成功 (Chandrasekhar, 1950)。在遥感科学发展的初期人们很自然地将其引入遥感机理研究。然而人们很快发现, 地物, 尤其是植被, 很难用“绿色气体”来描述。叶片的大小、形状、角分布和叶片总量等结构参数与叶面的反射与透射特性一道决定其 BRDF, 情况与大气中电磁波的传输有不同的特点。经各国科学家从不同着眼点的共同努力, 目前形成的基本共识是地物的空间结构与地物材料波谱共同决定地物表面的 BRDF。

1.1.1 植被辐射传输模型简介

描述植被冠层与入射辐射之间相互作用过程和特征的辐射传输模型,是在研究辐射在混浊介质中的传输机理的基础上发展起来的。鉴于植被冠层的构成与混浊介质相比已有本质上的区别,对辐射在植被冠层中的传输过程的研究有其特有的理论方法和参量。辐射传输理论和平均冠层透射理论为辐射传输模型的理论基础。冠层构成及其基本光学特性的描述,如冠层厚度、冠层密度、叶面倾角/叶面方向及其分布、叶面积指数和冠层中各组分的基本散射特性等,均为模型所采用的参量。辐射传输模型以研究辐射在冠层中薄层或单元中的传输过程为基础,对辐射传输方程求解,推算辐射与冠层相互作用,由此解释辐射在冠层中的传输机理,并进而得到冠层及其下垫面对入射辐射的吸收、透过和反射的方向及光谱特性,包括其空间分布。

辐射传输理论(Radiative Transfer Theory)在天体物理学,大气科学和地球科学中早已具有广泛的应用,如对于恒星和行星的外层大气的研究,对地球表面和海洋的研究等。辐射传输理论的经典研究出自诺贝尔奖获得者、天体物理学家 S. Chandrasekhar(1950)40多年前的工作,近期许多研究成果都表明这一理论已广泛应用于许多研究领域。

辐射传输理论的核心是辐射传输方程。对非极化形式的辐射,该方程表示为:

$$\frac{\partial I(\tau, s)}{\partial \tau} = -I(\tau, s) + \frac{\pi}{4} \int P(s, s') I(\tau, s') d\omega' + \epsilon(r, s) / \sigma \rho \quad (1.3)$$

式中, I 为光强,亦称为辐射亮度或亮度,定义为三维空间中在方向 s 上、位置 r 处的光强度,其物理意义为在单位立体角内,以给定频率为中心的单位波段中的平均功率通量密度,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。 ρ 为入射辐射作用范围内的单位体积内的微粒数目, σ 为一个介质微粒对入射辐射的散射和吸收有效截面的总和,因而该微粒吸收和散射的功率为 σI 。 $d\omega'$ 为立体角微分元,对 ω' 积分则包括了所有方向 s' 的贡献。 τ 为光学路径,定义为:

$$\tau = \int \sigma \rho ds \quad (1.4)$$

$P(s, s')$ 即所谓相函数,为在 s' 方向上的辐射散射到 s 方向的立体角内的概率。用以描述最初以方向 s' 传输的光子,在与叶面相互作用后,叶面截获的部分能量进入到关于 s 的一个单位立体角中的散射。 ϵ 为来自植被冠层内的发射源,对于可见光波段和近红外波段,来自植被冠层内的发射可忽略不计,即 $\epsilon(r, s) \approx 0$ (Ellanson and Amundson, 1981)。

对植被冠层,这一基本的微积分方程的求解可分作两步。

1. 根据植被冠层的特征计算或描述相函数

相函数的计算无论对于哪种应用问题(如大气、地球和海洋表面)都是相当困难的,对于植被就更难。因为植被冠层通常为各向异性,十分复杂,并且不能简单地视作规则的或完全随机的介质。而且,称作植被组分的叶、茎、花等散射和吸收元的尺寸,与辐射传输方程成功地研究大气辐射中的介质微粒如空气分子和气溶胶之类空气组分相比,要大得多,