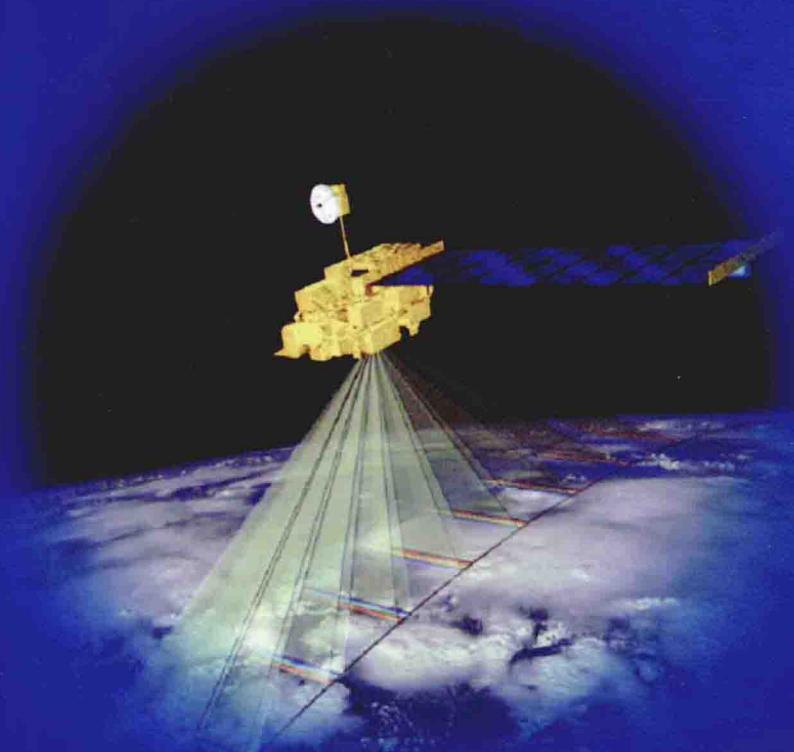




地球观测与导航技术丛书

热红外地表发射率遥感反演研究

唐伯惠 李召良 吴骅 唐荣林 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

地球观测与导航技术丛书

热红外地表发射率遥感反演研究

唐伯惠 李召良 吴 骅 唐荣林 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是《地球观测与导航技术丛书》之一,是作者在完成 863 专题“全球地表发射率的遥感提取方法研究”基础上撰写而成。书中首先介绍电磁波理论和热红外遥感相关的基本理论和概念以及热红外地表发射率遥感反演的国内外相关研究进展;其次,重点阐述热红外波段地表窄波段发射率的遥感反演方法,包括多光谱热红外地表窄波段发射率遥感反演方法以及高光谱热红外地表窄波段遥感反演方法;再次,从中红外波段反射辐射和发射辐射的分离入手,侧重介绍中红外波段地表窄波段发射率的遥感反演方法;然后,围绕宽波段地表发射率的遥感反演,重点介绍 MODIS 数据和中国风云-3 卫星数据宽波段地表发射率的遥感反演方法;并从验证的角度出发,分别对提出的窄波段地表发射率和宽波段地表发射率遥感反演方法进行了验证,给出了相关验证结果;最后,对未来地表发射率遥感反演的发展趋势和研究方向进行展望。

本书既可作为政府、企事业单位、高等院校以及科研院所培养研究生的教材,也可作为从事热红外定量遥感研究人员和工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热红外地表发射率遥感反演研究/唐伯惠等著. —北京:科学出版社,2014.8

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-041326-0

I. ①热… II. ①唐… III. ①地面观测-红外遥感-研究 IV. ①P412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144977 号

责任编辑:彭胜潮 苗李莉 / 责任校对:张怡君

责任印制:赵德静 / 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



2014 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:202 000

定价:79.00 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 凯 江碧涛 景 宁
景贵飞 李 京 李 明 李传荣 李加洪
李增元 李志林 梁顺林 廖小罕 林 琿
林 鹏 刘耀林 卢乃锰 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

前 言

地表发射率是热红外遥感反演中的一个关键特征参数,与地表温度有着同等重要的作用。它是气候模型研究中的一个重要输入参数。地表发射率的精确反演对全球气候变化研究以及各种水文、陆面同化模型等研究具有非常重要的意义。科学技术部“十一五”后期启动了国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“全球陆表特征参量产品生成与应用研究”(项目编号:2009AA122100)。中国科学院地理科学与资源研究所承担了由中国科学院遥感应用研究所主持的第二课题“全球陆表特征参量的遥感提取方法研究”(课题编号:2009AA122102)中的“全球地表发射率的遥感提取方法研究”任务。项目实施以来,在红外波谱区地表窄波段发射率和宽波段发射率的遥感定量反演方面开展了深入系统的研究,以期提高地表发射率遥感定量反演的精度与水平,推动红外遥感的进一步发展。本书为相关研究任务成果的总结。

全书共分六章。第 1 章介绍了热红外遥感相关的基本理论和概念以及地表发射率遥感反演的国内外研究进展情况;第 2 章重点阐述了热红外波谱区地表窄波段发射率的遥感反演方法,包括多光谱热红外地表窄波段发射率遥感反演方法以及高光谱热红外地表窄波段遥感反演方法;第 3 章主要从中红外波谱区反射辐射和发射辐射的分离入手,侧重介绍了中红外波谱区地表窄波段发射率的遥感反演方法;第 4 章围绕宽波段地表发射率的遥感反演而展开,重点针对 MODIS 数据和中国风云-3(FY-3)卫星数据介绍了宽波段地表发射率的遥感反演方法;第 5 章从验证的角度出发,分别对提出的窄波段地表发射率和宽波段地表发射率遥感反演方法进行了验证,并给出了验证结果;第 6 章给出了相关总结,并重点展望了地表发射率遥感反演的未来工作。

本书的第 1 章主要由唐伯惠、李召良、吴骅、唐荣林等编写;第 2 章主要由唐伯惠、吴骅、唐荣林等编写;第 3 章主要由唐伯惠、李召良等编写;第 4 章主要由唐伯惠、李召良等编写;第 5 章主要由唐伯惠编写;第 6 章主要由唐伯惠、李召良、吴骅等编写。全书由唐伯惠统稿、定稿。

课题组的戴昌达老师对本书的结构和文字修改方面给出了很多建设性意见和建议;王娇、彭硕等对文字的修改和格式的调整付出了辛勤的劳动;参与课题研究的其他许多老师和同学也为本书的出版作出了很大贡献,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加上红外地表发射率遥感反演研究一直是国际遥感科学的难点,因此书中难免有疏漏和不足,敬请读者和同行专家批评指正。

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电磁波辐射基本理论	2
1.3 红外遥感基本理论.....	13
1.3.1 红外辐射相关概念	13
1.3.2 红外辐射传输方程	16
1.4 地表发射率遥感反演研究现状.....	17
第 2 章 热红外窄波段地表发射率遥感反演	23
2.1 现有各种窄波段发射率产品遥感反演算法分析.....	23
2.1.1 现有全球各种发射率产品介绍	23
2.1.2 全球主要发射率产品算法分析	25
2.2 基于 NDVI 阈值法的 MODIS 遥感数据地表发射率遥感反演	34
2.3 基于 TISI 法的 MODIS 遥感数据地表发射率遥感反演	39
2.4 基于 NDVI 阈值法的 FY-3 遥感数据地表发射率遥感反演	43
2.5 热红外高光谱地表发射率遥感反演.....	47
2.5.1 反演方法的提出	47
2.5.2 发射率谱分段线性法理论推导	49
2.5.3 分段线性方法的精度评价及敏感性分析	51
2.5.4 地面实测数据验证	61
第 3 章 中红外窄波段地表发射率遥感反演	68
3.1 中红外遥感数据的特性.....	68
3.1.1 中红外波段区地物反射波谱特性	68
3.1.2 中红外波段区地物发射波谱特性	71
3.2 MODIS 数据中红外双向反射率的遥感反演与验证	72
3.2.1 MODIS 中红外通道透过率影响因素分析	72
3.2.2 MODIS 数据中红外地表双向反射率提取方法	75
3.2.3 MODIS 数据中红外地表双向反射率反演结果及验证	88
3.3 MODIS 数据中红外方向发射率的遥感反演	100
3.3.1 中红外方向发射率计算理论	100
3.3.2 研究区和数据处理	101
3.3.3 计算结果及验证	103

第 4 章 宽波段地表发射率遥感反演	107
4.1 基于 MODIS 数据的宽波段发射率遥感反演	107
4.2 基于 FY-3 数据的宽波段发射率遥感反演	113
第 5 章 地表发射率遥感反演的验证	115
5.1 窄波段地表发射率的验证	115
5.2 宽波段地表发射率的验证	121
第 6 章 总结与展望	127
6.1 地表发射率遥感反演研究小结	127
6.2 地表发射率遥感反演研究的发展趋势	128
参考文献	132

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

地表发射率定义为地表向外发射的热辐射与同温度下黑体向外发射热辐射的比值,它与地表组成成分、地表粗糙度、波长等因素有关。目前,采用遥感手段反演区域地表发射率是获取大范围地表发射率的唯一可行途径,但是由于地表温度和地表发射率的耦合性质,利用卫星数据反演地表发射率并非想象中那么容易。在发射率的反演中,除辐射校正和云检测的问题之外,主要难点还体现在:①如何从观测的辐射亮度中分离出地表温度和地表发射率;②如何解决大气校正的问题(Sobrino et al., 2008)。

由著名的普朗克方程可知,某个通道接收到的辐射能是温度和发射率的函数。因此, N 个通道观测的辐射数据,总对应有 $N+1$ 个未知数(N 个发射率和1个温度),温度和发射率始终耦合在一起,其中任何一个物理量的确定都需要以另一个物理量的确定为前提(Becker and Li, 1995; Li and Becker, 1993; Li et al., 2000)。这种病态性成为科学家公认的地表发射率反演的难点。另外,观测到的地表辐射亮度除了包含地表自身发生辐射以外,还有大气下行辐射的反射分量。由此可见,地表发射率是解决地表自身发射辐射和大气下行辐射耦合问题的关键参数,需要发射率的先验知识才能够改正地表发射辐射,进而反演地表温度。还应考虑到,离开地表的辐射能在经过大气被传感器接收的过程中,大气自身的吸收和辐射又会影响到进入传感器视场的辐射能量。这几个过程叠加在一块,使地表发射率的反演更为复杂。

由于地表发射率产品在社会、经济方面的重要性,使得地表发射率的反演研究一直成为国内外科技的热点之一。因此,研制全球高精度的地表发射率遥感反演产品必将产生显著的社会效益和经济效益,这主要体现在以下三方面。

(1) 地表发射率作为地表自然物质的固有属性,受土地覆盖类型、土壤水分、土壤有机质、植被密度和结构、表面粗糙度和地表起伏等多因素影响,能够指示地表的物质组成,在地表分类、土壤形成和侵蚀、稀疏植被覆盖与变化估算、岩床制图和资源探测等方面都有重要意义(Gillespie et al., 1998)。

(2) 地表发射率在地表温度的反演中扮演着非常重要的角色,没有准确的发射率就很难得到精确的温度反演结果(Wan and Li, 1997)。当地表温度反演精度向着1K,甚至更高精度迈进时,地表发射率的反演水平也需要向前挺进。开发出大范围、高精度、时空连续的地表发射率产品,能够提高我国遥感观测数据的处理和应用能力,实现对我国乃至全球陆表地表温度和地表发射率的实时动态监测,为我国和国际全球变化与气候系统科学研究提供宝贵的科学模拟系统和数据平台,为国家实施开发战略积累宝贵的数据资料,为生态环境监测、资源开发和经济社会可持续发展提供科学依据和技术支撑。

(3) 提高陆面过程和气候系统等模型的模拟能力。由于地表发射率决定了长波净辐射大小,如果简单采用窄通道发射率替代宽波段发射率,长波辐射的反演误差可能达到 $100\text{W}/\text{m}^2$ (Wang et al., 2005)。从这个角度考虑,地表发射率是能量平衡中的一个关键因素。这些陆面分量模型和气候系统模型对于地表能量平衡的模拟性能,在一定程度上取决于地表发射率产品的准确度。地表发射率产品的不准确可能会显著影响地气系统的模拟能力,降低模型预报水平。地表发射率产品反演方法的研究对于提高陆面过程中地气能量平衡的预测和理解,在气候和天气预报、农业预测、水资源管理、减灾等方面也将产生重要作用。

总之,地表发射率的反演技术本身涉及热红外遥感反演的核心问题,全球高精度地表发射率数据是其他地学参数估算所必需的参数之一,同时也是实现地学信息高效应用、满足热红外领域相关研究发展的需要。全球高精度地表发射率产品的生成,将提升中国全球变化与气候系统科学研究水平,提升我国对地观测的科研能力和产品化能力,提高我国遥感应用研究的水平。

1.2 电磁波辐射基本理论

电磁辐射是按电磁波的形式,以光速进行传播。真空中的光速为 $2.99793(\pm 0.00001) \times 10^8 \text{m/s}$,大气中的光速也非常接近这一数值。从 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光到红外辐射、微波、电视信号以及无线电波,共同构成了电磁波波谱(Liou, 2002)。描述电磁辐射的参数主要有:

1. 波长(wavelength)

波长指波在一个振动周期内传播的距离,即沿波的传播方向,两个相邻的同相位点间的距离,一般用 λ 表示。波长常用人们熟悉的长度单位来度量,如米(m)、厘米(cm)、毫米(mm)、微米(μm)、纳米(nm)等。对于红外辐射,波长的常用单位为微米(μm)。

在热红外遥感中,通常多用“波数”来描述波谱范围。所谓“波数”,是指在波的传播方向上单位长度内所含波长的数目,即波长的倒数($1/\lambda$),一般用 ν 表示。波数的单位最常用的是厘米 $^{-1}$ (cm^{-1})。若波长取微米(μm)为单位,波数取 cm^{-1} 为单位,则在数值上它们满足如下关系:

$$\lambda \cdot \nu = 10000 \quad (1.1)$$

例如在热红外遥感中, $8\mu\text{m}$ 波长就对应于 1250cm^{-1} 波数, $12.5\mu\text{m}$ 波长就对应于 800cm^{-1} 波数。

2. 频率(frequency)

频率指单位时间内,波完成振动或振荡的次数,即在单位时间(1s)内,通过波传播方向上一个固定点的波峰数,一般用 f 表示。频率的单位以赫兹(Hz)为基础,常用的有赫兹(Hz)、千赫(kHz)、兆赫(MHz)、吉赫(GHz)等。

电磁辐射的频率与波长满足如下换算关系:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.2)$$

式中, c 为电磁辐射在介质中的传播速度。在真空中 c 即为光速($c=2.998 \times 10^8$ m/s), 在大气中 c 略小于光速。

当电磁辐射进入介质时, 其频率是不会改变的, 但波长将会随传播速度的改变而变化。因此通常所说的单色光是针对频率而言, 而非波长而言的。

一般可用波长或频率来描述电磁波谱的范围。如在可见光-近红外遥感中, 多用波长来描述波谱范围, 如 μm 、 nm 等; 而在微波遥感中, 多用频率来描述波谱范围, 如 MHz、GHz 等。

3. 振幅(amplitude)

振幅指振动物理量偏离平衡位置的最大位移, 即每个波峰的高度, 或每个波长间隔的能量级。

4. 偏振、传播方向、相位等

偏振(polarization)是横波才具有的特殊现象。电磁辐射作为一种横波, 其相互垂直的电场和磁场的振动方向是与传播方向垂直的。传播方向确定后, 其振动方向却并不唯一, 它可以是不变的, 也可以随时间按一定方式变化或按一定规律旋转。通常把包含电场振动方向的平面称为偏振面, 依电场方向确定电磁辐射的偏振方向。电磁辐射在反射、折射、吸收、散射过程中, 不仅强度会发生变化, 其偏振状态也往往会发生变化。偏振在微波技术中也被称为“极化”。

相位或称位相(phase), 指某物理量随时间或空间位置作正弦变化时, 该量在任一时刻或位置状态的一个数值。

5. 立体角

分析辐射场常需要考虑单位立体角内的辐射能量。立体角定义为锥体所拦截的球面积 A 与半径 r 的平方之比(廖国男, 1985; 2004), 如图 1.1 所示, 它可写为

$$\Omega = A/r^2 \quad [\text{sr}] \quad (1.3)$$

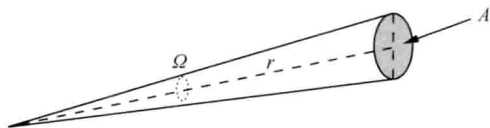


图 1.1 立体角定义

立体角的单位用球面度(sr)表示, 对面积为 $4\pi r^2$ 的球, 它的立体角为 4π 球面度。在极坐标系中, 我们常用天顶角 θ 和方位角 ϕ 来代替立体角。由图 1.2 可知, 微分立体角元可以表示为

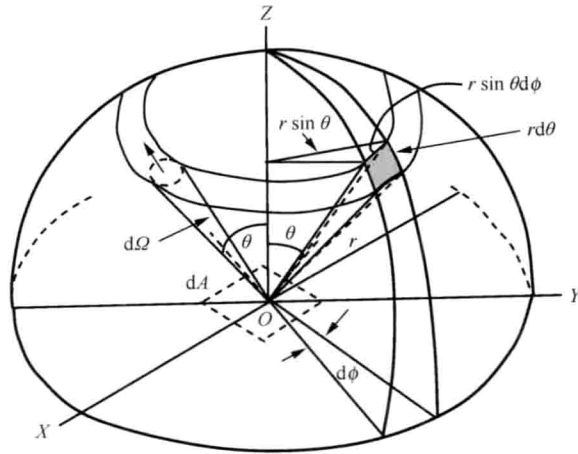


图 1.2 立体角在极坐标中的示意图

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r\sin\theta d\phi)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi = d\mu d\phi \quad (1.4)$$

方程式(1.4)中, $\mu = \cos\theta$, 天顶角 θ 的取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 其中, $[0^\circ, 90^\circ]$ (即 $0 \leq \mu \leq 1$) 代表向上半球, $[90^\circ, 180^\circ]$ (即 $-1 \leq \mu \leq 0$) 代表向下半球。方位角 ϕ 取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ 。

6. 辐射通量(radiant flux)

众所周知,光的传播过程即是能量的传递过程,发光体(光源)在发光时要失去能量,而吸收到光的物体就要增加能量。发光体在单位时间内辐射出来的光(包括红外线、可见光和紫外线)的总能量(Q)就是光源的辐射通量。它是一个反映光源辐射强弱程度的客观物理量,表示为 $\Phi = \alpha Q / \alpha$, 单位是 1 瓦特=1 焦耳/秒(1W=1J/s)。

7. 辐射亮度(radiance)

在遥感研究中,我们常指波谱辐射亮度,它定义为单位面积 A、单位波长 λ 、单位立体角 Ω 内的辐射通量 Φ , 表示为

$$L(\theta, \phi, \lambda) = \partial^3 \Phi / (\partial A \cdot \partial \lambda \cdot \partial \Omega) \quad [W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m) \text{ 或 } W / (m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})] \quad (1.5)$$

习惯上,人们常用波数 ν 来描述红外辐射的特征。波数定义为波长 λ 的倒数,表示为 $\nu = 1/\lambda$, 单位为 cm^{-1} 。因此,在数值上, $1 \mu m$ ($1 \mu m = 10^{-4} cm$) 的波长等于 $10^4 cm^{-1}$ 的波数。

在实际应用中,如果需要将辐射亮度的值由波数的单位 $[W / (m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})]$ 转换为微米的单位 $[W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]$, 只要把前者乘以 $\nu^2 / 10^4$ 即可。

8. 辐照度(irradiance)

这里指波谱辐照度,也叫波谱辐射通量密度,是指单位面积、单位波长上的辐射通量。

由定义可知,辐照度是由辐射亮度在整个半球方向的积分,表示为

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi, \lambda) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})] \quad (1.6)$$

如果辐射亮度与方向无关,即各向同性辐射,则我们可以得到 $E = \pi L$ 。

9. 波谱响应函数

波谱响应函数的定义为:探测系统(或其他光度系统)对单位入射的单色辐射亮度所产生的响应大小(洪焯, 1992),用公式表示为

$$\text{RSR}(\lambda) = P(\lambda)/L(\lambda) \quad [-] \quad (1.7)$$

式中, $\text{RSR}(\lambda)$ 为波谱响应函数; $L(\lambda)$ 为探测器接收的单色辐射亮度; $P(\lambda)$ 为探测器在对应单色辐射下的反应量。

我们通常说的波谱响应函数是针对某一个特定通道而言的,一个特定通道的波谱响应函数是一个依赖于波长探测和滤波响应的综合反映。因此,在计算一个通道的辐射亮度时,常常取其平均值。假设 $L_{\lambda,i}$ 为传感器接收的波谱辐射亮度,那么,可以根据下式计算某个通道平均的辐射亮度 L_i

$$L_i = \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} L_{\lambda,i} \text{RSR}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \text{RSR}(\lambda) d\lambda} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})] \quad (1.8)$$

式中,下标 λ_L 、 λ_U 分别为通道 i 波谱范围内最小波长和最大波长值。作为例子,图 1.3 给出了 MODIS 可见光到近红外 1~7 通道及中红外 22 和 23 通道的波谱响应函数。

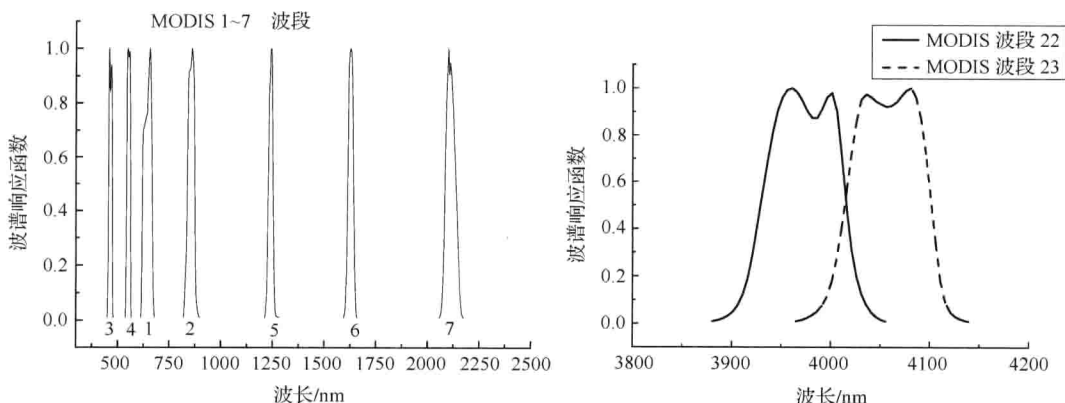


图 1.3 MODIS 波谱响应函数

10. 大气层顶太阳辐照度

进入大气顶部的太阳辐照度与地球和太阳的天文距离(D)有关。如果给定天文距离 $D=1$ 时的大气顶部太阳辐照度 $\bar{E}_0(\lambda)$, 则我们可以用下式来近似计算任意某天大气顶部的太阳辐照度 $E_0(\lambda)$

$$E_0(\lambda) = \frac{\bar{E}_0(\lambda)}{D^2} = \bar{E}_0(\lambda) \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \right] \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})] \quad (1.9)$$

式中, d_n 为一年中的第几天, 取值范围为 $[1, 365]$ 。一个更精确的计算公式为

$$E_0(\lambda) = \bar{E}_0(\lambda) [1.00011 + 0.034221 \cos \chi + 0.00128 \sin \chi + 0.000719 \cos 2\chi + 0.000077 \sin 2\chi] \quad (1.10)$$

式中, $\chi = 2\pi(d_n - 1)/365$ 。当然, 对于大多数应用, 用两个公式计算的结果不会带来太大的差别。

这里值得指出的是, 由于 $\bar{E}_0(\lambda)$ 是波长的函数, 所以在计算传感器某个通道大气顶部的太阳辐照度时, 须计算这个通道大气顶部平均的太阳辐照度

$$\bar{E}_{\text{band}, i} = \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \bar{E}_0(\lambda) \text{RSR}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \text{RSR}(\lambda) d\lambda} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})] \quad (1.11)$$

如果将 $\bar{E}_0(\lambda)$ 在整个波长范围内进行积分, 就可获得人们常说的太阳常数 S_0

$$S_0 = \int_0^{\infty} \bar{E}_0(\lambda) d\lambda \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (1.12)$$

根据 20 世纪 80 年代人们对太阳常数的观测结果, Hartmann 等(1999) 认为太阳常数的平均值大约为 $1369 \text{W}/\text{m}^2$, 不确定度为 $\pm 0.25\%$ 。太阳常数值对地球大气中实测的太阳吸收率和加热率的研究至关重要(廖国男, 2004)。

11. 双向反射率

双向反射率即人们常说的双向反射率分布函数(BRDF)。物体表面对电磁波的反射有三种形式: 一种是镜面反射(mirror reflection), 即反射能量集中在一个方向, 如图 1.4(a), 此时, 反射角 θ 等于入射角 θ_s 。另一种是漫反射(diffuse reflection), 即物体的整个表面都

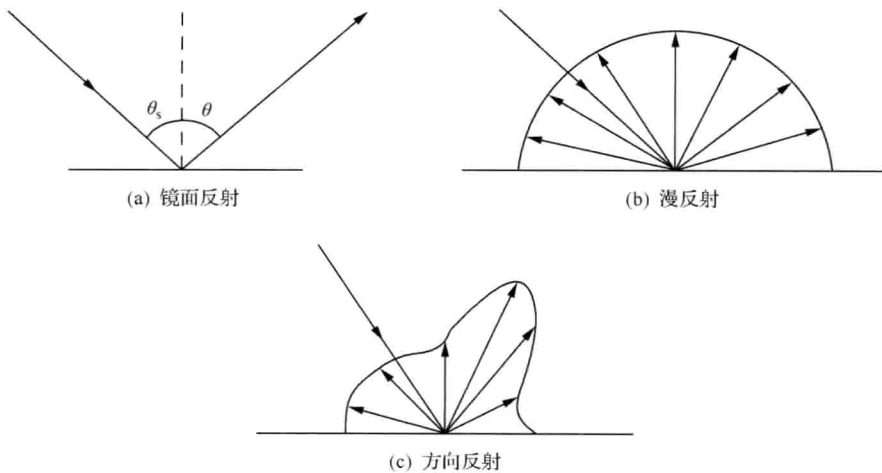


图 1.4 地物对电磁波的三种反射形式

均匀地向各个方向反射入射光,如图 1.4(b)。这种漫反射体被称为朗伯体,漫反射称为朗伯反射或各向同性反射。在自然界,纯粹的朗伯体是不存在的,然而有不少自然表面对可见光和热红外辐射的波长而言,都是粗糙表面,当表面足够粗糙并且分布较均匀时,它对太阳短波辐射的反射辐射亮度在以目标物为中心的 2π 空间内接近常数,反射辐射亮度随观测角度的变化很小,可视为近似朗伯体。

第三种是介于漫反射和镜面反射之间的方向反射,也称非朗伯反射。产生方向反射的物体在自然界中占绝大多数,即它们对入射辐射的反射与散射具有各向异性性质。当遥感应用进入定量分析阶段,必须抛弃“目标是朗伯体”的假设。描述方向反射不能简单用反射率表述,因为各方向的反射率都不一样。对非朗伯体而言,它对太阳短波辐射的反射、散射能力不仅随波长而变,同时也随散射方向而变。

设波长为 λ ,空间具有 δ 分布函数的入射辐射,如图 1.5,从 (θ_s, ϕ_s) 方向,以辐射亮度 $L_s(\theta_s, \phi_s, \lambda)$ 投射到点目标 T ,造成该点目标的辐照度增量为 $dE(\theta_s, \phi_s, \lambda) = L_s(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cos(\theta_s) d\Omega_s$ 。传感器从方向 (θ, ϕ) 观察目标物 T ,接收到来自于目标物 T 对外来辐射 dE 的反射辐射,其亮度值为 $dL_T(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda)$,则定义双向反射率分布函数为

$$f(\theta, \phi, \theta_s, \phi_s, \lambda) = \frac{dL_T(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda)}{dE(\theta_s, \phi_s, \lambda)} \quad [\text{sr}^{-1}] \quad (1.13)$$

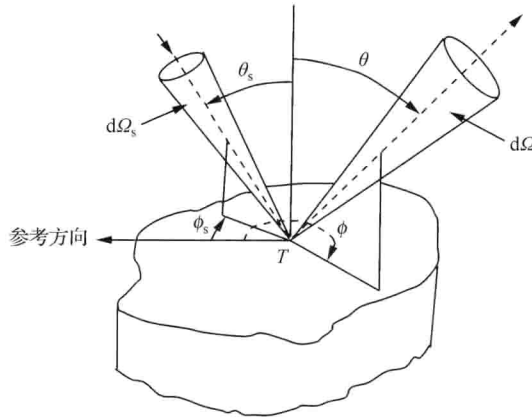


图 1.5 物体的双向反射示意图

(引自: Nicodemus, 1965)

所以说,双向反射率分布函数(BRDF)的物理意义是:来自 (θ_s, ϕ_s) 方向地表辐照度的微增量与其所引起的 (θ, ϕ) 方向上反射辐射亮度增量的比值。可以说,BRDF 恰当地表达了地物的非朗伯体特性。因为我们知道,在现实世界中,投射到地物表面的辐射能量往往由两部分组成,即来自太阳的直射辐射与天空的散射辐射,而传感器在方向上测得的辐射亮度是空间入射辐射场的综合效应,它不仅与该点地物的反射特性有关,而且与辐射环境(即入射辐射亮度的空间分布函数)有关。但是同时也必须看到,虽然 BRDF 在理论上能较好地表达地表特征物的非朗伯体特性,可是实际测量上困难较大,因为精确地测量 $dE(\theta_s, \phi_s, \lambda)$ 是很困难的(徐希孺, 2005)。

12. 双向反射率因子(BRF)

在相同的辐照度条件下,如图 1.6 所示,地物向 (θ, ϕ) 方向的反射辐射亮度与一个漫反射体在该方向的反射辐射亮度之比值,称为双向反射率因子 R

$$R(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda) = \frac{dL_T(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda)}{dL_P(\theta_s, \phi_s, \lambda)} \quad [—] \quad (1.14)$$

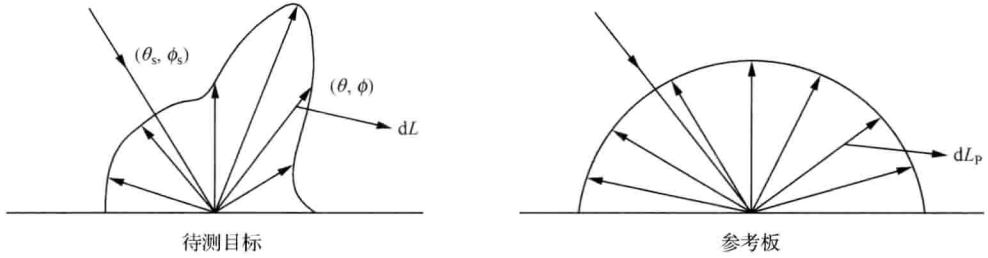


图 1.6 目标反射与参考板反射示意图

下标 T 与 P 分别代表目标物和具有理想漫反射体特性的参考板。所谓理想的漫反射体是指反射率为 100% 的朗伯体,即入射辐照度的微增量 dE_P 等于出射辐照度的微增量 dM_P 。根据漫反射体辐射通量密度值与亮度值的关系,可以得到

$$f_P = \frac{dL_P}{dE_P} = \frac{dM_P/\pi}{dM_P} = \frac{1}{\pi} \quad (1.15)$$

应该指出,由于在给出 BRF 的定义时,我们并没有对辐射环境作任何限定,严格意义上讲,BRF 不仅取决于目标物的非朗伯体特性,而且还与辐射环境有关。因此它并不是一个理想的描述地物非朗伯体特性的物理量。况且,BRF 与 BRDF 两者的量纲也不一样,这充分表明了它们的区别。

如果入射光源对目标物所张立体角 $\Delta\Omega_s$ 以及传感器对目标物所张立体角 $\Delta\Omega$ 都趋于无穷小,则

$$R = \frac{dL_T}{dL_P} = \frac{f_T dE}{f_P dE} = \pi f_T \quad (1.16)$$

即是说,当 $\Delta\Omega_s$ 和 $\Delta\Omega$ 都趋近于无穷小时,在数值上双向反射率因子等于双向反射率分布函数的 π 倍,表示为

$$R(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda) = \pi f(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda) \quad (1.17)$$

13. 表观反射率(apparent reflectance)

这里指大气层顶的表观反射率,它定义为大气层顶表面辐射出射度与该表面入射辐射度之比(Dingirard and Slater, 1999; Hill and Sturm, 1991; Markham and Barker, 1987; Price, 1987),一般用 ρ 表示

$$\rho = \frac{M}{E} \quad [—] \quad (1.18)$$

如果假定大气层顶表面是一个朗伯体(lambertian)反射面,则表观反射率又可以表示为(Markham and Barker, 1987; Roderick et al., 1996)

$$\rho = \frac{\pi L D^2}{E_0 \cos \theta_s} \quad [—] \quad (1.19)$$

式中, π 为常量(球面度); L 为大气层顶进入卫星传感器的光谱辐射亮度 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$]; D 为日地之间距离(天文单位); E_0 为大气层顶的太阳光谱辐照度 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]; θ_s 为太阳天顶角。

14. 反照率

这里指的是波谱反照率,即目标物的波谱出射辐照度与波谱入射辐照度之比值,亦即向上的波谱辐照度 $F_u(\theta_s, \lambda)$ 与向下的波谱辐照度 $F_d(\theta_s, \lambda)$ 的比值(Liang et al., 1999),通常用 a 表示

$$a = \frac{M}{E} = \frac{F_u(\theta_s, \lambda)}{F_d(\theta_s, \lambda)} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 R(-\mu', \phi', \mu, \varphi) L^{\text{in}}(-\mu', -\mu_s, \phi', \phi_s) \mu \mu' d\mu' d\phi' d\mu d\phi}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} L^{\text{in}}(-\mu', -\mu_s, \phi', \phi_s) \mu' d\mu' d\phi'} \quad [—] \quad (1.20)$$

式中, $\mu_s = \cos \theta_s$, $\mu = \cos \theta$, $L^{\text{in}}(-\mu', -\mu_s, \phi', \phi_s)$ 表示地面上总的向下的太阳入射辐射亮度(包含直射辐射和散射辐射)。由于在某些问题中,我们并不需知道辐射亮度及其空间分布,而只需知道辐射通量密度,如辐射平衡的求解问题等,因此,我们引入了反照率的概念。严格来说,计算目标物的出射辐照度 M ,必须对 2π 空间的 f 值进行积分,但这几乎不可能。因为从个别方向的 BRDF 测量值中,我们无法判断目标物在 2π 空间的反射辐射行为,因此也无法由积分求得半球反射率。值得指出的是,目前流行的目标物半球反射率的测量方法,实际上只是取视角为天底角条件下的 BRF,如果用此值替换严格意义下的半球反射率,其误差有时可高达 45%(徐希孺, 2005)。

在地表短波辐射平衡以及其他应用研究中,我们必须知道方向-半球反射率,它是固定太阳天顶角,在观测的半球空间对双向反射函数积分,称为“黑半球反照率”,也叫直入扇出反照率(李小文等, 2000),用公式表示为

$$r(\lambda, \theta_s, \phi_s) = \int_{2\pi} f(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda) \cos \theta_s \sin \theta d\theta d\phi \quad [—] \quad (1.21)$$

当然,如果固定观测角度,在太阳入射的半球空间对双向反射函数积分,又称为半球-方向反射率,用公式表示为

$$r_b(\lambda, \theta, \phi) = \int_{2\pi} f(\theta_s, \phi_s, \theta, \phi, \lambda) \cos \theta_s \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s \quad [—] \quad (1.22)$$

另外,在美国 EOS-MODIS 的反照率产品中,还有一种产品被称为“白半球反照率”,它是在太阳角和观测角的双半球空间积分双向反射函数,所以也叫扇入扇出反照率。表示为

$$r_0(\lambda) = 2 \int_0^1 r(\lambda, \theta_s, \phi_s) \cos \theta_s \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s \quad [—] \quad (1.23)$$