



◎〔美〕梁顺林 著
范闻捷 等 译



定量遥感



科学出版社
www.sciencep.com



定 量 遥 感

〔美〕梁顺林 著
范闻捷 等 译

科学出版社

北 京

图字:01-2009-0190

内 容 简 介

本书首先概要论述了定量遥感的基础理论,分章节着重介绍大气、植被冠层、土壤和雪面的辐射传输模型,并结合应用实例详细介绍了目前传感器定标、大气纠正、几何纠正、各种植物生理参数(如叶面积指数、植物吸收的光合作用有效辐射比例)、地球物理参数(如宽波段反照率、发射率和表面温度)和四维数据同化等方面的代表现有研究水平的定量算法,最后给出了定量遥感在生态、农业等领域的应用案例。本书全面、系统地介绍了定量遥感领域的反演基本理论和所取得的最新成就,是对目前定量遥感研究的系统概括和总结。

本书的主要读者对象为大专院校遥感和 GIS 专业的本科生、研究生,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的参考书。

Title: Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces.

Author: Shunlin Liang.

Copyright © 2004 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

This Translation published under license.

图书在版编目(CIP)数据

定量遥感/(美)梁顺林著;范闻捷等译. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023742-2

I. 定… II. ①梁…②范… III. 遥感技术-研究 IV. TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 202293 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 李久进 / 责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬 / 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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 2 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—3 000 字数:575 000

定价:68.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

译者序

随着经济和科技的发展,国家的宏观决策、资源调查、环境及灾害监测等影响国民经济发展的关键领域急需数据支持,要求数据具有空间上的宏观性、时间上的连续性和可获得数据的全面性。遥感技术正好具备这一能力,因此备受关注。但是与遥感卫星获取数据的能力相比,遥感数据的自动、量化处理乃至对遥感数据信息的理解能力却远远不足,这也是目前制约遥感发挥作用的瓶颈问题。因此,定量遥感逐渐成为遥感发展的主要方向。但是由于这个方向比较新,发展也比较快,在定量遥感的教学和科研过程中,我一直未能找到一本系统的参考书,直到见到这部书。正巧该书作者梁顺林教授回国讲学,我和他谈起了翻译这本书给学生做教学参考书的打算,竟得到了梁老师的鼓励和支持。于是我鼓起勇气开始了这一艰巨的工作,没想到竟然会耗时四年。如果没有梁老师时时的关心、鼓励和支持,就没有这译稿的完成。

在翻译的过程中,我越来越感受到这本书的价值。本书系统地综合、总结了定量遥感领域的很多最新成果,难得的是,在很多研究方向,作者都有自己的研究成果,并以此为基础,深入浅出,娓娓道来。如果没有多年实际工作经验的话,很多内容是无法写出的,而这些内容也为读者开展定量遥感研究提供了非常有益的帮助。为了保持本书的时效性,作者在部分章节后面增加了最新进展部分,也增加了相应的参考文献,为了方便读者,还增加了一些中文参考文献。除了增加部分,本书的参考文献体例和内容都以原书为准,仅在很少几处做了修改。

本书是在2004年选修“遥感物理”课的高鹏琪、黄钱等20位同学,以及旁听课程的巩慧、李琳娜、王子峰等同学的工作基础上翻译而成的。一校由阎广建教授(第1、2章)、杨华副教授(第3、8章)、肖青研究员(第5章)、秦军博士(第11章)和姚延娟博士(第12章)、王鹏新教授(第13章)和范闻捷共同完成。全书由范闻捷统稿并完成二校、三校,由徐希孺教授、杨建思副教授和梁顺林教授对译稿进行了修改,最后经黄润华教授润色。在翻译过程中得到了刘晓臣、陶欣、闫彬彦等同学的协助。本书也得到了国家自然科学基金国际合作与交流项目(40640420073)、国家自然科学基金重点项目(40730525)和遥感科学国家重点实验室开放基金(SK050003)的资助,在此一并致谢。

由于译者的水平所限,书中有不少疏漏之处,请读者指正。

范闻捷

2009年1月12日于燕园

前言

进入 21 世纪,随着由美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的全球观测系统项目(Earth Observation System, EOS)和其他国际项目及商业项目发射的一系列卫星相继投入业务运行,遥感进入了一个崭新的时代。2000 年 11 月,第一颗民用航天高光谱传感器(Hyperion)在 NASA 地球观测 1 号卫星(EO-1)平台上开始对地表进行观测。第一颗高分辨率商业卫星 IKONOS 也观测得到了 1m(全色波段)和 4m 空间分辨率(多光谱波段)的地表影像。为了进行地表过程监测和其他全球以及区域尺度的应用,越来越多的人在处理和分析海量的光学遥感观测数据。

21 世纪光学遥感的一个基本特征是广泛应用定量算法估测地表参数。由于应用新科技,新型传感器具有更高的测量精度以及更为先进的定标技术。自 20 世纪 80 年代初,经验统计模型逐渐被基于物理机理的模型所替代。到 2020 年,NASA 地球观测远景规划中,环境预测将是主要目标。可靠的预测则依赖于地表过程的物理动态模型,而这些模型的变量必须是可以从地球观测数据中定量估计得到的。

本书既强调光学遥感($0.4\sim 14\mu\text{m}$)模型的基本原理,也强调从遥感观测数据中定量估算地表参数的实用算法。本书将遥感的物理解作为一个体系,着重介绍了大气、植被冠层、土壤和雪面的辐射传输模型,以及目前传感器定标、大气纠正、几何纠正、各种植物生理参数(如叶面积指数、植物吸收光合有效辐射比率)、地球物理参数(如宽波段反照率、发射率和表面温度)和四维数据同化等方面代表当今研究水平的定量算法。

本书基于作者在马里兰大学讲授的研究生遥感课程讲稿撰写而成,但它同样是本科生高级参考书和不同科学领域应用遥感数据的专业人士有价值的参考书。本书设定读者具有本科水平的统计、微积分、线性代数基础知识。为供参考,书中列出了一些特定部分的详细公式,但是没有列出这些公式的推导过程。为方便读者,每个章节的开始有一个简短的概述,概要介绍要讨论的研究问题,也是相关文献的指南。相关公式也会在文中给出详细的文字解释。

对本书的学习应循序渐进,但是对实用算法感兴趣的读者可以专注于第 1 章、第 5~13 章。为方便应用起见,本书章节从概念上可以分为两部分:第 2~12 章,第 1 章和结尾(第 13 章)。第 1 章引入了一些基本概念,并对将地表环境变量和遥感数据联系在一起的光学遥感模型体系进行了归纳。这一体系的主要组成部分也为后面各章做了铺垫。第 13 章给出了许多不同的例子以说明定量遥感技术是如何应用于解决科学和实际问题。

定量估测地表参数主要依赖于对遥感数据以及它们对于这些变量的物理解。第 2~4 章,总结了大气、植被冠层、土壤和雪介质反射光谱的主要物理模型,着重强调辐射传输模型。热红外光谱的辐射传输模型以及地表温度在第 10 章中介绍。

第 2 章介绍辐射传输理论的基本原理、与大气参数的关系以及大气辐射传输方程的

数值和近似解法。第3章介绍三种冠层反射模型:辐射传输模型、几何光学模型和计算机模拟模型。在辐射传输模型中,不仅介绍了不同的叶片模型,一维冠层辐射传输方程的不同解法,也概要介绍了解决地表植被冠层空间不均一性的方法。在几何光学模型中,概要介绍了主要的模型,详细介绍了简单但又应用广泛的 Li-Strahler 模型。在计算机模拟模型中,主要介绍了蒙特卡罗模拟模型和 radiocity 模型的基本原理。第4章介绍了土壤和雪介质的模型方法,重点介绍了辐射传输模型,也对几何光学模型做了简要介绍。

第5~12章讲述了根据光学遥感数据估测地表参数的实用算法,内容涵盖传感器定标到数据验证的整个过程。第5章讨论了传感器辐射定标的必要性和多种发射后替代定标方法。同时,也提供了陆地遥感卫星(Landsat TM)、国家海洋、大气管理局超高分辨率光度计(NOAA AVHRR)数据的定标系数以便查询。第6章讲述了将云顶反射率转为地表反射率的大气校正基本原理和实践方法。重点介绍了利用单一观测角度遥感数据估算气溶胶光学性质的方法,同时也讨论了属于多角度遥感范畴、利用多角度分光辐射成像仪(MISR)估测气溶胶算法和估测大气中水汽含量的方法。第7章讨论了去除由于地形变化引起形变的地形校正算法。同时,也评述了目前的数字高程模型的发展现状。第8章介绍了多种估算地表参数的方法,如叶面积、植被冠层吸收的光合有效辐射比例、植被覆盖度以及生化参数浓度。统计方法(主要基于从多光谱和高光谱遥感数据得到植被指数)和物理反演方法(主要基于本书第1章曾经提到的过程模型)在本书中也做了介绍。

第9章和第10章讨论了估测地表辐射收支成分的各种方法,如宽波段反照率,宽波段发射率和地表温度。在介绍宽波段反照率的计算时,我们重点讨论了从窄波段反照率到宽波段反照率的反演算法。在计算地表温度时,我们在介绍分裂窗方法的同时也介绍了温度和发射率分离算法。第11章介绍了四维数据同化算法和应用。这是一个从异质、不规则分布、且时间上不连续、精度也不同的观测数据定量、客观地推断出动态系统状态的方法。本书介绍了该方法的基本原理和典型算法以及在水文和作物生长中的应用。第12章讨论了对估算出的地表参数的真实性检验和多种空间尺度融合方法。由于地表参数驱动着相关地表过程的各种模型,遥感产品的精度将大大影响模型的结果输出和最终的结论。真实性检验基本原理、NASA EOS 真实性检验项目和一些验证方法都在本章中讲述。由于其在遥感中的重要性,在真实性检验之外,将单独讲述空间尺度效应。重点讲述了 downscaling(尺度放大)方法,包括线性分解,生成均质实验场,分解 NDVI 时间序列,多尺度数据融合,大尺度统计全球环流模型的结果输出。

本书引用了参考文献中多篇杂志的论文和书籍,这些文献仅是其中最具代表的,可能会有遗漏。书中的许多参考文献引自网络或免费信息。众所周知,网址 URL 经常发生变化,有些可能已被停止或删除,我们尽力使这些信息符合现状,但随着时间的推移,其中的部分将会消失或在不为我们所知的情况下改变。

本书引用文献超过 1300 篇,一些有用的程序代码和有价值的数据集也收录在光盘中以便读者使用。

作者

目 录

译者序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光学遥感中的定量模型	1
1.2 基本概念	2
1.2.1 数字值	2
1.2.2 辐亮度	2
1.2.3 立体角	3
1.2.4 辐照度	4
1.2.5 二向性反射率及反照率	5
1.2.6 地球外的太阳辐照度	5
1.3 遥感建模系统	7
1.3.1 场景生成	8
1.3.2 场景辐射建模	9
1.3.3 大气辐射传输建模	9
1.3.4 导航建模	10
1.3.5 传感器建模	10
1.3.6 制图和面元划分	15
1.4 小结	16
参考文献	16
第 2 章 大气短波辐射传输建模	18
2.1 辐射传输方程	18
2.2 地表 BRDF 统计模型	20
2.2.1 Minnaert 函数	20
2.2.2 Lommel-Seeliger 函数	21
2.2.3 Walthall 函数	21
2.2.4 Staylor-Suttles 函数	22
2.2.5 Rahman 函数	22
2.2.6 核函数	23
2.3 大气光学特性	24
2.3.1 瑞利散射	25
2.3.2 米氏散射	25
2.3.3 气溶胶粒子大小分布	27

2.3.4 气体吸收	32
2.3.5 气溶胶气候学	35
2.4 辐射传输方程求解	36
2.4.1 辐射场分解	36
2.4.2 数值解法	37
2.4.3 近似解:二流算法	42
2.4.4 辐射传输的代表性解法(软件包)	44
2.5 考虑表面 BRDF 的近似表达	44
2.6 小结	49
参考文献	50
第3章 植被冠层反射模型	54
3.1 冠层辐射传输方程	54
3.1.1 冠层结构	54
3.1.2 一维辐射传输公式	57
3.1.3 边界条件	59
3.1.4 热点效应	59
3.1.5 非均质冠层公式	63
3.2 叶片光学模型	65
3.2.1 “平板”模型	66
3.2.2 针叶模型	69
3.2.3 光线追踪模型	70
3.2.4 随机模型	70
3.2.5 混合介质模型	70
3.3 辐射传输方程的求解	71
3.3.1 近似解	71
3.3.2 数值解:高斯-塞德尔算法	79
3.4 几何光学模型	82
3.5 计算机模拟模型	84
3.5.1 蒙特卡罗光线追踪模型	85
3.5.2 辐射度模型	91
3.6 最新进展	95
3.7 小结	96
参考文献	96
第4章 土壤和雪的反射模型	105
4.1 雪和土壤单次散射的性质	105
4.1.1 雪的光学性质	106
4.1.2 土壤的光学性质	107
4.2 雪和土壤角反射率的多重散射解法	108
4.2.1 近似解法	108

4.2.2 数值解法	117
4.3 几何光学模型	118
4.4 雪参数的反演	119
4.5 实际问题	121
4.5.1 雪和土壤表面的粗糙度	121
4.5.2 混合雪像元	122
4.5.3 细雪与脏雪	122
4.5.4 借助辅助信息的土壤反演	122
4.5.5 土壤穿透深度	123
4.5.6 土壤湿度状况	124
4.6 小结	125
参考文献	125
第5章 卫星遥感辐射定标	130
5.1 背景	130
5.2 发射后定标方法	131
5.2.1 海洋定标	131
5.2.2 沙漠定标	132
5.2.3 云定标	132
5.2.4 其他	133
5.3 Landsat TM 和 AVHRR 反射波段的定标系数	134
5.3.1 Landsat TM	134
5.3.2 NOAA AVHRR	137
5.4 小结	141
参考文献	142
第6章 光学图像的大气纠正	144
6.1 引言	144
6.2 单视角图像的纠正方法	145
6.2.1 基于定量的方法	145
6.2.2 直方图匹配法	146
6.2.3 暗目标法	146
6.2.4 对比度降低法	148
6.2.5 类型匹配法	148
6.3 多视角图像的纠正方法	154
6.3.1 通过多视角成像光谱辐射计(MISR)的数据估算气溶胶光学厚度	155
6.3.2 从 MISR 数据中反演地表方向反射率	156
6.4 估算整层大气水汽含量的方法	158
6.4.1 概述	158
6.4.2 差分吸收法	160
6.4.3 分裂窗算法	162

6.4.4 单位转换	163
6.5 最新进展	163
6.6 小结	164
参考文献	164
第7章 地形校正方法	169
7.1 引言	169
7.2 余弦校正法	170
7.3 IPW 法	171
7.4 阴影函数运算法则	173
7.5 DEM 数据及其生成	175
7.6 小结	177
参考文献	177
第8章 地表生物物理量的估计	179
8.1 统计方法	179
8.1.1 多光谱植被指数	180
8.1.2 高光谱植被指数	198
8.1.3 空间信号和应用	205
8.1.4 一种实用的统计方法	208
8.2 优化反演方法	209
8.3 遗传算法	211
8.4 查找表法	211
8.5 综合反演法	213
8.5.1 神经网络	214
8.5.2 投影追踪法	215
8.5.3 回归树	215
8.6 不同反演方法的比较	217
8.7 最新进展	218
8.7.1 统计算法	218
8.7.2 优化算法	219
8.7.3 查找表算法	219
8.7.4 应用	219
8.8 小结	220
参考文献	220
第9章 地面辐射平衡估算 I: 宽波段的反照率	229
9.1 引言	229
9.2 宽波段反照率特征	231
9.3 窄波段向宽波段的转换	234
9.3.1 ALI	237
9.3.2 ASTER	237

9.3.3	AVHRR	238
9.3.4	GOES	238
9.3.5	LANDSAT TM/ETM+	239
9.3.6	MISR	240
9.3.7	MODIS	240
9.3.8	POLDER	241
9.3.9	VEGETATION	241
9.4	地表宽波段反照率的直接估算	242
9.4.1	方法	243
9.4.2	研究实例	244
9.5	日循环模型	245
9.6	最新进展	249
9.7	小结	249
	参考文献	250
第 10 章	地表辐射平衡估算 II : 长波	255
10.1	引言	255
10.2	单一波长的辐射传输方程解法	256
10.2.1	热红外辐射传输方程	256
10.2.2	近似解和数值解	257
10.3	逐线方法	260
10.3.1	谱线形状	260
10.3.2	光谱采样	262
10.3.3	连续光谱吸收	263
10.3.4	透过率和辐射亮度估算	263
10.4	波段模型	264
10.4.1	埃尔萨模型	264
10.4.2	统计模型	265
10.5	相关 k 分布算法	265
10.6	大气纠正方法	268
10.7	估算陆面温度的分裂窗算法	269
10.7.1	理论推导	270
10.7.2	代表算法	272
10.7.3	发射率专述	275
10.8	用于温度与发射率分离的多光谱算法	276
10.8.1	参考通道法	277
10.8.2	ADE 算法	277
10.8.3	温度独立光谱指数算法	278
10.8.4	MODIS 昼/夜算法	278
10.8.5	ASTER 算法	279

10.8.6 一种优化算法	281
10.9 计算宽波段发射率	283
10.10 地表能量平衡模型	284
10.11 发射率和 LST 研究的最新进展	286
10.12 小结	286
参考文献	287
第 11 章 四维数据同化	292
11.1 引言	292
11.2 同化算法	293
11.2.1 背景	293
11.2.2 连续校正法	294
11.2.3 最优插值	297
11.2.4 变分算法	298
11.2.5 空间统计分析法	301
11.2.6 扩展卡尔曼滤波	301
11.3 最小化算法	303
11.3.1 最速下降法	303
11.3.2 共轭梯度法	304
11.3.3 牛顿-拉斐森法	304
11.3.4 拟牛顿法	305
11.4 水文学中的数据同化	307
11.5 作物生长模型中的数据同化	308
11.5.1 背景	308
11.5.2 实例分析	309
11.6 小结	311
参考文献	311
第 12 章 真实性检验与空间尺度转换	314
12.1 真实性检验的基本原理	314
12.2 真实性检验的方法	315
12.2.1 直接相关观测	315
12.2.2 算法与产品间的相互比较	324
12.2.3 NASA EOS 的真实性检验计划	325
12.3 空间尺度转换技术	326
12.3.1 升尺度的方法	326
12.3.2 降尺度方法	329
12.4 小结	338
参考文献	339
第 13 章 遥感应用	343
13.1 遥感和生态过程模型相结合方法	343

13.1.1	策略 1:遥感数据驱动生态过程模型·····	344
13.1.2	策略 2:用遥感数据验证生态模型的预测值 ·····	344
13.1.3	策略 3:通过遥感数据同化来限制生态过程模型 ·····	345
13.1.4	策略 4:遥感数据辅助分析、理解生态模型 ·····	346
13.2	农业应用·····	347
13.2.1	遥感与精准农业·····	347
13.2.2	农业决策支持案例 ·····	350
13.2.3	干旱监测 ·····	352
13.2.4	作物估产 ·····	357
13.3	“城市热岛”效应·····	363
13.4	碳循环研究·····	364
13.4.1	背景 ·····	364
13.4.2	“自下而上”法 ·····	365
13.4.3	实证案例 ·····	367
13.5	地气相互作用·····	369
13.6	小结·····	371
	参考文献·····	371
	缩略词·····	379

第1章 绪 论

简介:本章介绍了光学遥感的背景知识和基本概念。光学遥感的波长范围在可见光与热红外之间($0.4\sim 14\mu\text{m}$)。本章基本包括两个部分,第一部分(1.1节,1.2节)论述了书中广泛用到的各种辐射变量;后一部分(1.3节)简要描述了一个遥感建模系统的主要组成部分,它将遥感数据和陆地表面变量联系起来。本章也可以看成是本书其他章节的指南。有一些后面没有详细介绍的内容会在本章介绍。

1.1节中把所有的从光学遥感数据反演陆地表面变量的定量模型划分为三类:统计型、物理型和混合型,并简要论述了它们主要的特性。1.2节定义了一些基本的物理概念并且对数字值(DN)到一系列物理变量的转换做了说明,这部分将在第2章做更进一步的阐述。1.3节论述了遥感建模系统的主要组成部分,此系统也是物理模型的基础。同时还介绍了前向建模和反演方法。

1.1 光学遥感中的定量模型

传统意义上,所有的光学遥感模型都可分为两类:统计型和物理型。统计模型是基于陆地表面变量和遥感数据的相关关系,优点在于容易建立并且可以有效地概括从局部区域获取的数据;但是,拓展后的模型一般都是有地域局限性的,也不能解释因果关系。

另一方面,物理模型遵循遥感系统的物理规律。它们也可以建立因果关系。如果初始的模型不好,通过加入最新的知识和信息就可以知道应该在哪个部分改进模型。但是建立和学习这些物理模型的过程漫长而曲折。模型是对现实的抽象;所以一个逼真的模型可能非常复杂,包含着大量的变量。

在遥感研究中有一个新的趋势,就是建立统计与物理模型结合的混合模型,可以突出它们的优点而避免缺点。

所有用来估算陆地表面变量的三类定量模型将在第8章中做系统介绍,还有个别模型在其他章节中也会提到。所有的遥感定量模型都利用以下5种特性:光谱、空间、时间、角度和极化。因为本书的范围所限,我们将不讨论基于极化特性的模型。

通过各种定量模型,陆地表面可以用连续变量(如叶面积指数,反射率)和分类变量(如土地覆盖)来描绘。范围所限,我们只讨论连续变量,本书不包括大量的图像分类算法和应用(如土地覆盖和利用及变化制图)。

1.2 基本概念

1.2.1 数 字 值

早期的遥感统计模型总是利用数字值来直接估计地表特征变量。DN 就是我们购买得到的数据。但是 DN 是经过量化得到的整数,不是一个物理量。虽然在海洋学等一些低反射率情况下要求非线性的量化,但遥感中应用的大多数量化系统是线性的,典型的是 6~12bits。DN 可以是这个范围中的任意一个整数

$$DN \in [1, 2^Q] \quad (1.1)$$

其中, Q 是一个整数,代表 bit 数。例如,一个 8bits ($Q=8, 2^8=256$) 的线性量化系统均匀地把传感器响应的动态范围划分为 255 阶,从 1~256(或从 0~255)。如果采用 10bits 或 12bits 的量化,相同的传感器响应也会产生完全不同的 DN。很明显, Q 值越大,辐射测量的精度越高。表 1.1 所示为几个常见卫星传感器系统的量化级数,包括美国陆地卫星系统的专题制图仪(thematic mapper, TM),法国 SPOT(systeme pour l'observation de la terre, SPOT)卫星系统,先进的高分辨率辐射计(advanced very high-resolution radiometer, AVHRR),私营的 IKONOS 卫星,中分辨率成像波谱辐射计(moderate-resolution imaging spectro-radiometer, MODIS)以及中分辨率成像分光光度计(medium-resolution imaging spectrometer, MERIS)。

表 1.1 几个常见的陆地应用传感器系统的量化级数

传感器	TM	SPOT	AVHRR	IKONOS	MODIS/MERIS
Q	8	8	10	11	12

1.2.2 辐 亮 度

现在我们认识到为了估算辐亮度(radiance)(有时也称为强度)等陆地表面变量,DN 必须转化为物理量。辐亮度描述的是单位立体角和单位面积上的能量。立体角的含义将在 1.2.3 节中叙述。光谱(单色)辐亮度是指单位立体角,单位面积上和单位波长上的能量。典型的单位是 $W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$,其中 sr(球面度)是立体角的单位, μm (微米)是波长单位。注意文献中可能会有不同的单位,知道这些单位的转换关系非常重要。特别地,热红外遥感中波长($\lambda: \mu m$)通常用波数 ν 来表示,它是波长的倒数($1/\lambda$)。按照惯例,波数用厘米的倒数来表示,数值上等于 $10^4/\lambda$,其中 λ 的单位是 μm 。比如, $10\mu m$ 处波长的波数是 $1000cm^{-1}$ 。要把辐亮度的单位从 $W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}/cm^{-1}$ 转换为 $W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$,就必须乘上 $\nu^2/10^4$ 。

通常数字值和辐亮度是线性关系,而且大多数遥感数据提供者们都为用户提供转换系数。传感器接收一定波长范围(波段)内的辐亮度,但是这些转换系数通常只是用来生成光谱辐亮度以避免波段宽度不同的影响。这些转换系数一般都包含在图像数据的头文件(或者元数据)中。确定转换系数的过程叫做传感器定标。在遥感中这是一个很重要的过程,因为许多传感器在卫星发射到太空后性能会退化,发射前的转换系数很少能保持有

效。关于传感器定标将在第 5 章详细讲述。

1.2.3 立 体 角

辐亮度的方向性可以利用立体角(Ω)来描述,它是二维空间角量测的扩展。由于大部分传感器以一定的方向来观测地球表面,理解角度相关性是非常重要的。

如图 1.1 所示,半径为 r 的一个圆的两半径所夹的角 β 为

$$\beta = \frac{l}{r} (\text{rad}) \quad (1.2)$$

整个圆周的周长为 $2\pi r$,所以整个圆周对应的弧度是 2π ,立体角 Ω 的定义是球半径为 r 的球面被一个圆锥所截取的球面表面积与球半径的平方的比。

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

球的表面积是 $4\pi r^2$,它对应的立体角是 $4\pi \text{ sr}$ (球面度)。因此,上半球或下半球的立体角是 $2\pi \text{ sr}$ 。

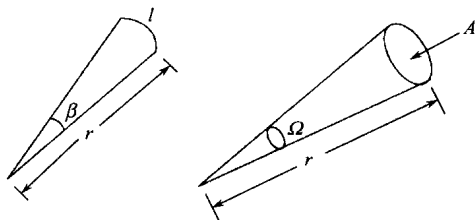


图 1.1 平面角(β)和立体角(Ω)

立体角经常用极坐标下的天顶角和方位角来表示。用 θ 代表天顶角(从物体表面的垂直或水平方向度量的夹角), φ 表示方位角(图 1.2),一个立体角的微分就可以用公式表示为

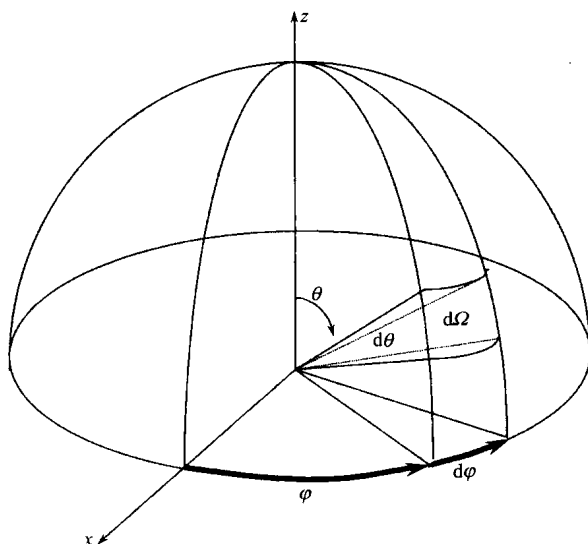


图 1.2 天顶角(θ)、方位角(φ)和立体角(Ω)图解

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

其中, $\mu = \cos\theta$ 。注意天顶角 θ 的范围是 $0 \sim 180^\circ$ 。文献中 $0 \sim 90^\circ$ (即 $0 \leq \mu \leq 1$) 一般表示上半球, $90^\circ \sim 180^\circ$ (即 $-1 \leq \mu \leq 0$) 表示下半球。本书也按照这个定义。但是这种定义是随意的, 在其他文献中也会有恰好相反的定义。方位角的范围是 $0 \sim 360^\circ$, 也就是 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。

需要指出的是观测天顶角和在遥感文献中经常使用的传感器的扫描角是不相等的。这种差别可以在图 1.3 中看到。如果地球被假定为一个球体, 这两个角的相互关系可以很容易的表示为

$$\sin\theta = \frac{R_0 + h}{R_0} \sin\alpha \quad (1.5)$$

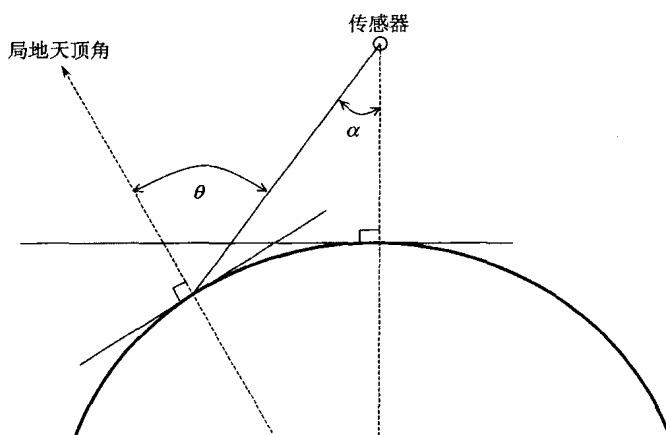


图 1.3 传感器扫描角(α)和观测天顶角(θ)关系

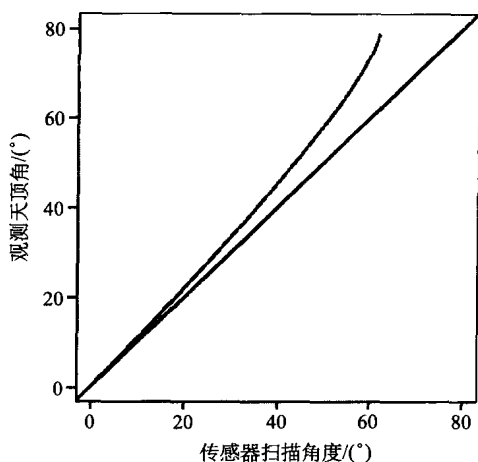


图 1.4 本地观测天顶角和传感器扫描角的数值对比

其中, R_0 是地球半径, $R_0 = 6378\text{km}$, h 是地球表面以上的卫星轨道高度。遥感卫星典型的轨道高度从 $600 \sim 900\text{km}$ (例如, 陆地卫星 4 和 5 的轨道高度 $h = 705\text{km}$; 前 3 颗 SPOT 卫星的轨道高度 $h = 832\text{km}$; IKONOS: $h = 681\text{km}$; Aqua: $h = 705\text{km}$)。对于 $h = 700\text{km}$, 本地观测天顶角和传感器扫描角的相互关系如图 1.4 所示。很明显, 地球表面一点的观测天顶角 θ 总是比传感器扫描角 α 大, 并且传感器扫描角越大, 它们之间的差就越大。

1.2.4 辐照度

辐照度(E)的定义是辐亮度(L)在半球空间上总的立体角的积分, 包括天顶角 θ 和方位角 φ