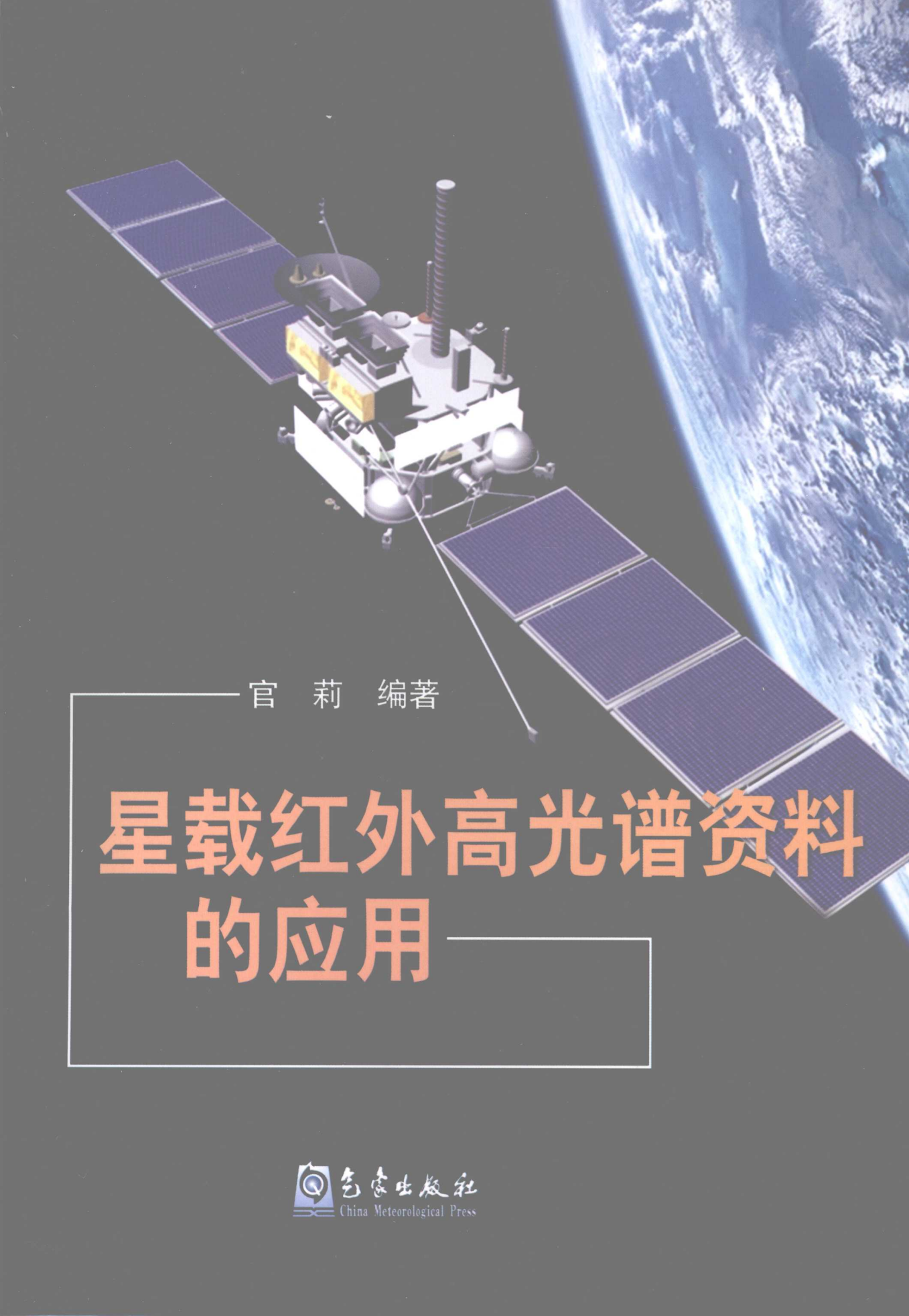




官莉 编著

星载红外高光谱资料 的应用

星载红外高光谱资料的应用

官 莉 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书在介绍地气系统辐射传输方程及卫星红外遥感的基本原理的基础上,以大气红外探测器 AIRS 为例,系统介绍了星载红外高光谱资料在晴空和有云时反演大气温度、湿度垂直廓线和云参数方面的应用。第 1 章简单介绍了地气系统辐射传输方程及卫星红外遥感的基本原理;第 2 章介绍了载在地球观测系统 EOS 上的 AIRS 和 MODIS 仪器;第 3 章介绍了 AIRS 的云检测算法;第 4 和第 5 章则分别介绍了晴空和有云大气条件下大气温度、湿度等垂直廓线及云参数的反演,最后讨论了 AIRS 探测器序列定位误差对其观测值的影响。为便于阅读,最后附加了英文缩略语附录。

本书可供气象工作者、气象类大专院校师生,以及从事气象卫星资料应用方面研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

星载红外高光谱资料的应用/官莉编著. --北京:气象出版社,2008.6

ISBN 978-7-5029-4509-1

I. 星… II. 官… III. 气象卫星-卫星探测-红外光谱学 IV. P412.27 0434.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 080852 号

星载红外高光谱资料的应用

Xingzai Hongwai Gao Guangpu Ziliao de Yingyong

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

电 话:总编室 010-68407112,发行部 010-68409198

责任编辑:郭彩丽 王桂梅

终 审:黄润恒

封面设计:王 伟

责任技编:都 平

责任校对:赵 媛

印 刷 者:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:7

插 页:8

字 数:179 千字

版 次:2007 年 12 月第 1 版

印 次:2007 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1000

定 价:25.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

为了观测并最终预报天气,气象学家需要用到大范围的大气观测资料,如大气温度、气压、湿度、风、云等。卫星红外和可见光云图已能提供天气系统方面的信息,而大气的红外垂直探测资料则能提供水平和垂直方向分布的大气温度、湿度、云高、云量等廓线。

随着光学上关键技术的突破,发展高光谱分辨率红外垂直探测器成为可能,目前探测通道已达到几千个。本书以载在地球观测系统(EOS)上的先进的大气红外探测器 AIRS(Atmospheric InfraRed Sounder)为代表,介绍了星载红外高光谱资料的应用,探讨了如何最佳使用如此多通道的红外高光谱资料,展示了很多有益的初步研究成果,这些经验和方法可以延伸用到处理国内外下一代的天基高光谱仪器观测资料上,尤其是应用于我国风云三号和风云四号气象卫星资料处理上。

本书在介绍 AIRS 和 MODIS 仪器的基础上,详细介绍了 AIRS 云检测和晴空、有云大气条件下大气温度、湿度垂直廓线及云参数的反演算法,并用实况观测资料对反演结果进行了检验。

美国威斯康星大学 Allen Huang, Jun Li, Elisabeth Weisz, Kevin Baggett 以及各位同事为本研究和本书的编写提供了大量的有价值的资料,尤其 Allen Huang 教授对本书的内容和结构提出了宝贵的修改意见和建议。

本书的编写出版得到了南京信息工程大学和国家自然科学基金项目(40605009)的资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

官 莉

2007 年 10 月

目 录

前 言

1 地气系统辐射传输方程及卫星红外遥感	(1)
1.1 大气成分和吸收气体	(1)
1.2 大气光谱	(1)
1.3 大气辐射传输方程	(1)
1.4 卫星红外遥感原理及可遥感的物理量	(4)
1.5 大气红外遥感的一些实际问题	(4)
1.6 卫星红外大气垂直探测仪器的现状和未来的发展	(5)
1.7 我国新一代风云气象卫星	(6)
参考文献	(9)
2 EOS 卫星 AIRS 和 MODIS 仪器介绍	(10)
2.1 地球观测系统 EOS Terra/Aqua 卫星	(10)
2.2 EOS 中分辨率光谱成像仪 MODIS 简介	(10)
2.3 EOS 高光谱大气红外探测器 AIRS 简介	(14)
参考文献	(18)
3 AIRS 云检测	(19)
3.1 MODIS 云检测	(20)
3.2 AIRS 和 MODIS 的空间匹配	(21)
3.3 AIRS 的云检测	(23)
参考文献	(26)
4 晴空时大气温度和湿度廓线反演	(27)
4.1 国内外研究现状	(27)
4.2 用特征向量统计反演法反演晴空大气温度、湿度等廓线	(30)
4.3 利用牛顿非线性迭代法反演大气温度、湿度等廓线	(42)
4.4 本章小结	(55)
参考文献	(56)
5 有云时大气温度和湿度廓线反演	(58)
5.1 有云情况下反演问题所面临的挑战	(58)
5.2 等效晴空辐射计算——云订正	(60)

5.3 红外高光谱观测值反演云参数·····	(78)
5.4 AIRS 探测器序列定位误差 ·····	(87)
5.5 红外高光谱资料反演有云时大气温度和湿度廓线的模拟研究·····	(93)
5.6 本章小结 ·····	(102)
参考文献·····	(103)
附录 英文缩略语 ·····	(105)

1 地气系统辐射传输方程及卫星红外遥感

1.1 大气成分和吸收气体

地球大气主要有几类气体组成,有 N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 和 N_2O 等比较稳定的气体,也有 H_2O 和 O_3 等随时空变化较大的气体。另外,还包含气溶胶、云及降水等。

尽管 CO_2 作为定常气体,但由于人类活动及工业排放,其浓度在逐年上升,大气中 CH_4 的含量也有所增加,而且由于生物排放等因素,较长一个时期内将继续增加。

水汽含量尽管不大,但在大气辐射收支中起着重要作用,大气中水汽含量随气压下降而迅速减少,同时水汽也随着纬度的升高而减少。50% 以上的水汽都集中在 850 hPa 以下,90% 以上在 500 hPa 以下。

O_3 分布随时空变化很大, O_3 主要分布在 20~25 km,随着纬度和季节而变。

CO_2 , CH_4 , H_2O 和 O_3 等气体成分在红外波段有不同的吸收特性,在红外区,水汽的吸收几乎遍布整个波段, CO_2 和 O_3 的主要吸收带区在 15, 9.6 和 4.3 μm 。 H_2O , CO_2 和 O_3 是地球大气辐射传输过程中的主要吸收气体,此外 CH_4 和 N_2O 在 7~8 μm 有一些强吸收带(陈渭民 2003)。

1.2 大气光谱

大气中最主要的吸收区域是由 H_2O , CO_2 和 O_3 引起的。一些次要的气体成分(如 CO , CH_4 , N_2O 及 NO)就地球大气系统的热收支而言,并不是重要的吸收气体。 CO_2 在 15 μm 频带即波数在 600~800 cm^{-1} 之间吸收红外光很多。水汽在 6.3 μm (1 200~2 000 cm^{-1}) 以及大于 20 μm 的转动频带吸收红外光。在 800~1 200 cm^{-1} (8~12 μm) 的范围内,除了 O_3 在 9.6 μm 处有吸收带外,大气相当透明,这个区域叫大气窗区。 CO_2 除了在 15 μm 频带以外,在 4.3 μm 处也有吸收作用。

一个重要的概念是光谱分辨率,光谱分辨率就是仪器能把附近波数处发出的辐射分辨出来的能力。换句话说,就是能分辨波数 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 的谱线所需要的最小区间值 $\Delta\lambda$ 。当然, $\Delta\lambda$ 越细,仪器越能得到高分辨率的观测值,但即使分辨率为 0.1 cm^{-1} ,也不能分辨每条谱线,因为有些谱线的半宽比 10^{-4}cm^{-1} 还小。

1.3 大气辐射传输方程

考虑一个在局地热力平衡下的非散射介质,辐射光束通过这个介质时会放出辐射。假设吸收气体的温度与浓度和水平方向无关,也就是假设大气是成层的(plane-parallel, strati-

fied), 所有的物理量都只是高度的函数, 并忽略地球曲率的影响, 把地面看作是平面的。

在红外辐射中, 散射过程可以忽略, 因此辐射传输方程为

$$\frac{dI_\nu}{k_\nu \rho dS} = -I_\nu + B_\nu(T), \quad (1.1)$$

其中 I_ν 是辐射值, k_ν 是吸收系数, S 是辐射光束所经过的路径, B_ν 是普朗克(Planck)函数, ρ 是吸收气体密度(廖国男 1985)。

设 θ 为入射光路 S 和 z 轴的夹角, 如图 1.1 所示, 当光路为向上时, $dS = \sec\theta dz$; 当光路为向下时, $dS = -\sec\theta dz$ 。此时, 定义法线光程坐标 u 为

$$u = \int_z^\infty k_\nu \rho dz, \quad (1.2)$$

即

$$du = -k_\nu \rho dz, \quad (1.3)$$

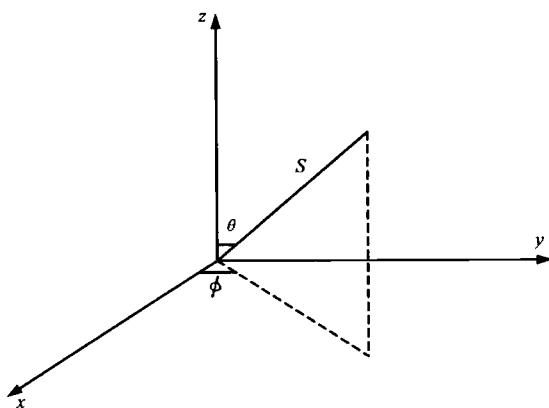


图 1.1 坐标

若用法线光程坐标, 则光路向上和向下时的辐射传输方程分别为

$$\cos\theta \frac{dI_\nu^\uparrow}{du} = I_\nu^\uparrow - B_\nu(T) \quad (1.4)$$

和

$$\cos\theta \frac{dI_\nu^\downarrow}{du} = I_\nu^\downarrow + B_\nu(T). \quad (1.5)$$

卫星观测到的是向上辐射, 因此主要考虑(1.4)式, 将(1.4)式两边乘以 $e^{-u \sec\theta}$, 并两边积分, 考虑到在大气外层 $u = 0$ 得

$$I_\nu^\uparrow(0, \theta) = I_{\nu_s} e^{-u_s \sec\theta} + \int_0^{u_s} B_\nu(T) e^{-u \sec\theta} \sec\theta du, \quad (1.6)$$

定义 $\tau = e^{-u \sec\theta}$, 则(1.6)式变为

$$I_\nu^\uparrow(0, \theta) = I_{\nu_s} \tau_{\nu_s} - \int_0^{\tau_s} B_\nu(T) d\tau_\nu. \quad (1.7)$$

在实际应用中,通常采用气压坐标,根据静力方程式和混合比的定义,有

$$\rho dz = -\frac{q}{g} dp, \quad (1.8)$$

则

$$\tau_\nu = e^{-\int_0^p g^{-1} k_\nu q dp}. \quad (1.9)$$

此时,将(1.7)式改写为

$$I_\nu = B_\nu(T_s)\tau_{\nu_s} - \int_0^{p_s} B_\nu(T) d\tau_\nu, \quad (1.10)$$

式中 p_s 是地表气压。

方程(1.10)反映在某一波数 ν 上观测到的上行辐射强度。但是卫星感应器(例如辐射计)只能分辨有限的带宽 $(\bar{\nu} - \Delta\nu/2, \bar{\nu} + \Delta\nu/2)$, 其中 $\bar{\nu}$ 为带宽的中心波数。令 $\Phi(\bar{\nu}, \nu)$ 表示仪器响应函数,则在此波数区间中,辐射计所测量出来的辐射强度为

$$I_{\bar{\nu}} = \int_{\Delta\nu} \Phi(\bar{\nu}, \nu) I_\nu d\nu. \quad (1.11)$$

其中 $\Phi(\bar{\nu}, \nu)$ 已作归一化处理,即 $\int_{\Delta\nu} \Phi(\bar{\nu}, \nu) I_\nu d\nu = 1$, 将(1.10)式代入(1.11)式得

$$I_{\bar{\nu}} = \int_{\Delta\nu} \Phi(\bar{\nu}, \nu) B_\nu(T_s) \tau_{\nu_s} d\nu - \int_{\Delta\nu} \Phi(\bar{\nu}, \nu) \int_0^{p_s} B_\nu(T) \frac{\partial \tau_\nu(p)}{\partial p} dp d\nu. \quad (1.12)$$

假如,频道宽度 $\Delta\nu$ 小得可以用平均的 Planck 函数 $B_{\bar{\nu}}(T)$ 来代替 $B_\nu(T)$ 而不致引起太大的误差,那么,上式可以改写为

$$I_{\bar{\nu}} = B_{\bar{\nu}}(T_s) \tau_{\nu_s} - \int_0^{p_s} B_{\bar{\nu}}(T) \frac{\partial \tau_{\bar{\nu}}(p)}{\partial p} dp, \quad (1.13)$$

其中

$$\tau_{\bar{\nu}}(p) = \int_{\Delta\nu} \Phi(\bar{\nu}, \nu) \tau_\nu(p) d\nu. \quad (1.14)$$

利用红外辐射原理,根据(1.13)式的解从气象卫星来探测大气。在这个方程中,上行的辐射依赖于 Planck 函数、透过率函数。Planck 函数中包含了表层温度和气温信息,而透过率函数依赖于吸收气体的吸收系数以及密度垂直分布。显然,观测到的辐射强度含有大气温度和气体成分垂直分布的信息。

从方程(1.13)可以看出,一旦知道了表层温度、大气温度分布和气体成分的垂直分布,并且有了一个快速计算大气透过率的模式,则很容易计算到达卫星感应器的地气系统辐射量,这就是正问题的求解;反之,如果知道了卫星仪器在不同频带上所观测的辐射量,而去推求大气温度及吸收气体的分布,这就是求解反问题,即反演问题。求解反问题要比求解正问题复杂得多。

1.4 卫星红外遥感原理及可遥感的物理量

曾庆存(1974)对可遥感的物理参数进行了分析,提出了可采用的两种遥感方法,其中以频谱法最常见,即固定天顶角,测量不同波数 ν (也叫不同通道)的 I_ν 。本文的研究内容就是基于频谱法。

那么,卫星红外观测的辐射量中,究竟包含了哪些信息或物理参数呢?对辐射传输方程(1.13)作进一步分析:①出现在 Planck 函数中的有表层温度 T_s 及大气温度垂直分布 $T(p)$;②出现在 τ 中的有 k 及 q ,其中 k 是气压 p 及气温 T 的函数。另外,还包含表面气压 P_s ,在一些比较复杂的情况下,还包含云量、云高,表面比辐射率,太阳比辐射率等信息。在实际处理中,表面气压可以从地形资料中算出,其误差一般不会太大。

把遥感的参数如 $T(p)$ 和 $q(p)$ 统一记作 $f(p)$,则 I_ν 就是 $f(p)$ 的非线性泛函数。要解决的问题就是从(1.13)式中求解 $f(p)$,如大气温度垂直分布,水汽垂直分布,地表温度及云量、云高等。

1.5 大气红外遥感的一些实际问题

进行遥感总有一定的目的,为此就会对遥感提出种种要求,就需要研究在原理上能否满足这种要求?如何满足?例如,现代数值天气预报对温度和水汽的垂直分辨率、水平分辨率及精度都有一定要求,就需要研究利用卫星遥感所能达到的遥感精度、范围、垂直分辨率等,研究怎样选择最优通道及采用怎样的反演方法以得到最优的反演结果。

为了达到实用的目的,除了一些遥感技术上的问题外,还必须解决以下一些实际问题:

- (1)该方法是否包含被遥感的信息?遥感方程的解是否唯一、稳定?
- (2)大气如何分层?
- (3)如何快速计算大气透过率以达到实时处理卫星资料的目的?
- (4)给定一套卫星观测通道,有几个独立的参数能够被反演?
- (5)需要多少通道,如何选择这些通道才能得到最优的反演结果?
- (6)如何开发一套高效的反演方法才能实时得到最优的反演结果?

这些问题是相互联系的,下面对每一个问题作进一步的分析讨论。从1.4节的分析可知,卫星红外观测到的辐射量中包含大气温度分布,大气水汽分布,云量、云高等信息,在以后的表达中,按习惯将辐射量记为 R ,即有 $R=R(T(p), q(p), P_c, N, T_s, \dots)$,其中 P_c 为云顶高度, N 为云量。由于辐射传输方程是一个积分方程,根据有关理论,该方程的解是不稳定、不唯一的,必须在求解过程中加入一些附加条件,如初始猜值(first guess),才能得到稳定的解,这样,求解的精度与初始猜值的选取就有关系,如何得到各种遥感情况下的初始猜值以及如何提高反演的精度呢,由于很难从方程(1.13)中解出大气温度、湿度廓线的连续形式,因此必须将大气分层,以便解出这些大气层上的各个物理参数。一般来说,大气分层越细,则越能刻划大气温度、湿度廓线的结构,也使得方程的截断误差变得越小;但另一方面,却使大气透过率的计算变得越来越复杂,同时要反演的参数增加而使反演过程更不稳定,因此大气分层要根据具体实际情况而定。大气透过率的计算是反演的基础,目前有许多精确

计算大气透过率的模式,但这些模式一般基于逐线计算,计算起来极慢,在实际资料处理中不能应用,因此必须发展一套快速计算大气透过率的模式,方法之一就是利用统计法,即利用精确模式对一套大气廓线样本的透过率进行计算,然后建立大气透过率与大气温度、湿度廓线等参数之间的统计关系,并将此统计关系公式用到反演中,当然这样的快速模式比起精确模式来,误差较大,然而减少快速计算大气透过率模式的误差,是反演问题中很关键的一步。由于观测通道间存在相关性,给定了一套通道后,该套通道一般只包含有限的独立信息片,一般地,一套通道中有多少相互独立的信息片,就意味着该套通道包含有多少“有效信息量”,曾庆存(1974)指出,并不能无条件地不断提高测量精度和增加通道数目而无限准确地间接推断出气温垂直分布,高光谱分辨率垂直探测器一般有几千乃至上万个通道,就频谱覆盖范围而言,这些通道基本上提供了所能遥感的信息,是否所有的通道都要用来求解物理参数呢?多少通道最合适呢?如何选取这些通道呢?有了高质量的卫星观测资料,如何发展一套快速有效的反演方法,使得在实时卫星观测资料处理中能得到大气各物理参数?本书研究的重点在于解决这个问题。

1.6 卫星红外大气垂直探测仪器的现状和未来的发展

自 20 世纪 60 年代美国发射第一颗气象卫星至今,卫星红外遥感技术取得了很大的发展,特别是在大气垂直探测仪器的研制方面。目前,业务上使用的大气垂直探测器主要是能够提供全球资料的装载在 NOAA 系列卫星 TIROS-N 上的先进泰罗斯业务垂直探测器 Advanced TIROS Operational Vertical Sounder,简称 ATOVS,携带 ATOVS 的第二和第三颗气象卫星 NOAA-16 和 NOAA-17 分别于 2000 年 9 月和 2002 年 6 月发射成功。NOAA-16 和 NOAA-17 奇偶号一对卫星构成双星观测系统,奇数号为上行(Ascending)卫星,偶数号为下行(Descending)卫星。先进泰罗斯业务垂直探测器(ATOVS)是泰罗斯业务垂直探测器(TOVS)的改进型,ATOVS 由三个仪器组成:①高分辨率红外探测器 3 型(HIRS/3);②高级的微波探测器 A 型(AMSU-A);③高级的微波探测器 B 型(AMSU-B)。ATOVS 共有 40 个通道,其中 HIRS/3 有 20 个通道,AMSU-A 有 15 个通道,AMSU-B 有 5 个通道,主要用于改进大气温度和湿度的垂直探测,同时也具备探测地表参数的能力。HIRS/3 波段分布在 $3.7\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间,由 20 个通道组成,其中 19 个红外通道,1 个可见光通道,星下点视场是直径为 $17.4\ \text{km}$ 的圆(Li 等 2000)。

另一类仪器是安装在极轨平台上的先进的高分辨率红外垂直探测器。2002 年 5 月 2 日,地球观测系统(EOS)第二颗卫星 Aqua 成功发射,其上携带的大气红外探测仪——AIRS(Atmospheric InfraRed Sounder)是代表,采用红外光栅阵分光技术,按 NASA 设计要求,2 378 个通道覆盖 $650\sim 2\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 红外光谱区域,其光谱分辨率($\nu/\Delta\nu$)高于 1 200,辐射测量绝对精度优于 0.2 K,真正实现了高光谱高精度红外探测。AIRS 由 2 378 个通道组成,是一个扫描探测器,扫描宽度约 $1\ 650\ \text{km}$,星下点分辨率约为 $13\ \text{km}$,垂直分辨率为 $1\ \text{km}$,由于 AIRS 具有高测量精度和高光谱分辨率的特点,被用来探测精细的大气温度、湿度廓线、臭氧总含量等(Aumann 等 2003)。

美国下一代地球静止环境卫星 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)上也将装有类似的高光谱红外探测仪器。GIFTS(Geostationary Imaging Fourier

Transform Spectrometer)为 NASA 新世纪计划地球观测 EO-3 使命中搭载的高光谱、高空间分辨率红外干涉探测仪,运行分为两个阶段:第一阶段在美国上空进行试验;第二阶段为业务卫星,运行在印度洋上空,将实现大气的四维观测,约 1 500 通道(Huang 等 2000)。

欧洲 METOP 极轨气象卫星携带有高光谱大气红外干涉探测仪 IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer),它采用迈克尔逊干涉技术实现高光谱卫星观测。在 $3.62\sim 15.50\text{ }\mu\text{m}$ 红外光谱范围内,IASI 进行连续观测,而且每个通道的光谱分辨率相等(0.25 cm^{-1}),共有 8 460 个通道。

高光谱红外探测仪 HES(HES—Hyperspectral Environmental Suite),即 ABS 高级基线探测器(Advanced Baseline Sounder)将装载在未来的美国下一代静止业务气象卫星 GOES—R 及后续卫星上,按照目前的计划 GOES-R 将于 2012 年发射(Gurka 等 2004)。HES 有两个探测波段,具体性能指标见表 1.1。图 1.2 展示了红外多光谱、高光谱探测器的发展历程,图 1.2 中 GEO 为静止卫星,LEO 为低轨道卫星,其中 O 代表业务运行卫星,E 为试验卫星。

表 1.1 HES 超光谱红外干涉探测仪

波段	光谱范围(cm^{-1})	光谱分辨率(cm^{-1})
1	650~1 200	0.625
2	1 650~2 250	0.625

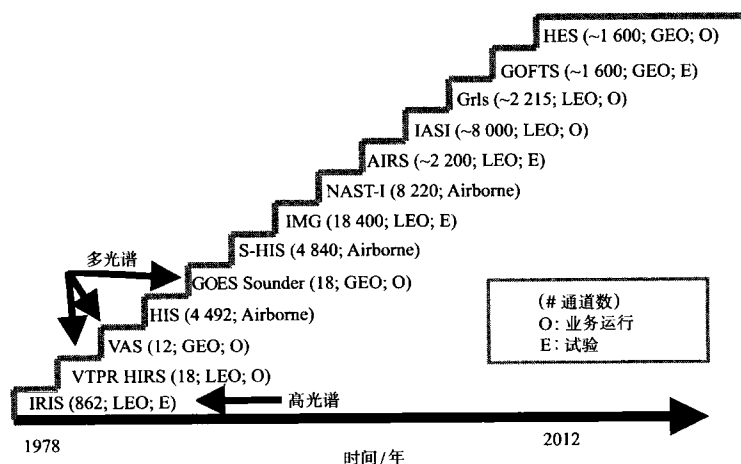


图 1.2 红外多光谱、高光谱探测器的发展历程

1.7 我国新一代风云气象卫星

我国早在 20 世纪 70 年代就开始发展自己的气象卫星,截止到目前,已发射了七颗气象卫星,分别实现了极轨卫星和静止卫星的业务化运行,是继美国、俄罗斯之后第三个同时拥有极轨气象卫星和静止气象卫星的国家。下面将简单介绍我国新一代风云气象卫星研发进

展、有效载荷及探测仪器性能。

1.7.1 风云三号气象卫星

风云三号(简称 FY-3)是在风云一号卫星基础上发展起来的我国新一代极轨气象卫星,是列入国家“九五”型号研制计划的我国第二代极轨气象卫星,计划发射试验试用星 2 颗,业务系列星 6 颗,使用到 2020 年。FY-3 01 批试验卫星已于 1999 年正式立项研制,目前已转入正式样星研制阶段,按照工程进展和计划,首颗卫星 FY-3A 将于 2008 年发射,轨道高度 836 km,重约 2 200 kg。风云三号 02 批卫星为业务星,从风云三号第三颗星开始,将形成由上午星、下午星和低倾角降水测量星三星组网对地观测新格局,其中 FY-3/AM 为上午星, FY-3/PM 为下午星, FY-3/RM 是低倾角降水测量星。

目前,星载微波仪器多是被动遥感,被动微波探测大气具有如下优点:①可以有效地减小云层对探测结果的影响;②微波辐射与目标温度呈现线性关系,为参数反演提供了便利;③地球大气中氧气的均匀恒定简化了温度反演过程。但同时有局限性:无法有效地获取准确的云雨大气降水结构信息,天线口径限制了观测像元的空间分辨率。因此,风云三号测雨卫星则满足了大气探测对主动微波的需求,倾角为 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$,主要星载观测仪器有测雨雷达 PR、覆盖较宽频段的微波辐射计、可见近红外辐射成像仪、闪电成像仪等,设计寿命 2~3 年。

风云三号卫星,是我国首颗高性能综合探测卫星,其探测性能将比风云一号(简称 FY-1)有显著的提高。FY-1 主要携带仪器为可见光和红外扫描辐射计,而 FY-3 则首次携带 11 台探测仪器,具有光谱范围广(紫外、可见、红外和微波, FY-1 仅可见光和红外)、探测通道多(共 99 个光谱通道, FY-1 只有 5/10 个通道)和空间分辨率高(5 个通道分辨率达到 250 m)等特点。在功能上和技术上向前跨越了一大步,具有获取全球、全天候、多谱段、三维、定量探测和地表、海洋及空间环境参数的能力,并与美国的新一代气象与环境监测卫星——NPOESS(National Polar Operational Environment Satellite System)、欧洲的新一代极轨气象卫星——METOP(Meteorological Operational Satellite)相当,世界气象组织已将 FY-3 卫星纳入新一代世界极轨气象卫星网,可提供高密度覆盖的全球观测。下面具体列出 FY-3 卫星装载的 11 台探测仪器:

(1) 可见光红外扫描辐射计——VIRR(Visible and InfraRed Radiometer)。

(2) 红外分光计——IRAS(InfraRed Atmospheric Spectrometer):26 通道的大气红外探测器,选择在 $15\ \mu\text{m}$ 大气吸收带和 $6.7\ \mu\text{m}$ 水汽吸收带的通道。采用滤光片的工作方式,扫描观测不同高度的地球大气结构,可以测量晴空条件下大气的温度结构和水汽的三维分布,与微波温度计和微波湿度计结合将获取三维大气温度、湿度廓线。

(3) 微波成像仪——MWRI(MicroWave Radiation Imager)。

(4) 微波温度辐射计——MWTS(MicroWave Temperature Sounder)。

(5) 微波湿度辐射计——MWHS(MicroWave Humidity Sounder)。

(6) 中分辨率光谱成像仪——MERSI(Medium Resolution Spectral Imager):10 个可见光波段,空间分辨率为 250 和 1 000 m;7 个近红外波段,空间分辨率为 250 和 1 000 m;2 个短波红外波段,空间分辨率为 1 000 m;1 个热红外波段,空间分辨率为 250 m。

(7) 臭氧总量探测仪——TOU (Total Ozone Unit)。

- (8) 紫外臭氧垂直探测仪——SBUS(Solar Backscatter Ultraviolet Sounder)。
 - (9) 地球辐射收支探测器——ERM(Earth Radiation Measurement)。
 - (10) 太阳辐照度监测仪——SIM (Solar Irradiation Monitor)。
 - (11) 空间环境监测器——SEM (Space Environment Monitor)。
- 表 1.2 给出了每种仪器的基本特征和探测能力(Dong 等 2005)。

表 1.2 FY-3 卫星遥感仪器基本特征和探测能力

仪器	通道 (个)	光谱范围	扫描点/ 扫描线	星下点分 辨率(km)	探测目的
扫描辐射计 (VIRR)	10	0.43~12.5 μm	2 048	1.1	云、气溶胶,水汽总量,云特性,植被,地面特征,表面温度,冰雪等
红外分光计 (IRAS)	26	0.69~15.5 μm	56	17	大气温、湿廓线, O ₃ 总含量等
微波温度计 (MWTS)	4	50~57 GHz	15	50~75	大气温度廓线
微波湿度计 (MWSH)	5	150~183 GHz	98	15	水汽,表面特征
中分辨率光 谱 成 像 仪 (MERSI)	20	0.41~12.5 μm	2 048/ 8 192	1.1 km/ 250 m	海洋水色,气溶胶,水汽总量,云特性,植被,地面特征,表面温度,冰雪等
微波成像仪 (MWRI)	12	10.65~150 GHz	240	15~70	降雨率、云含水量、水汽总量、土壤湿度、海冰、海温、冰雪覆盖等
臭氧总量探 测仪(TOU)	6	308~361 nm	31	50	O ₃ 总含量
紫外臭氧垂 直 探 测 仪 (SBUS)	12	250~340 nm	240	200	O ₃ 垂直分布
太阳辐照度 监测仪 (SIM)	100~ 1 400	0.2~50 μm			太阳辐射照度
地球辐射测 量(ERM)	4	0.2~3.8 μm 0.2~50 μm	150	2°×2°	地球辐射总量、地球辐射亮度、地球辐射收支
空间环境监 测器(SEM)					测量空间重离子、高能质子、中高能电子、辐射剂量;监测卫星表面电位与单离子翻转等;卫星正常运行和故障分析所需空间环境参数

风云三号应用系统将建设成自动化程度更高、稳定性更好,数据获取、处理和共享服务能力更强的规范化的实时业务系统,同时具备兼容接收处理国外新一代极轨气象卫星(如 NPP/NPOESS、METOP 等)数据的能力。

FY-3 业务产品包括:Level 1 级业务产品;单轨、多轨镶嵌业务产品;大气和云业务产品;陆表和海表特征业务产品;空间天气业务产品;其他还有大气和云特性试验产品,陆表、海表和空间环境试验产品等。如此多的 FY-3 产品能广泛应用于天气预报、气候预测、自然灾害和环境监测、军事气象和专业气象服务等各个方面,并发挥重要作用,为天气分析预报,特别是中期

数值天气预报提供全球范围温度、湿度、气压、云量、辐射等参数;监测自然灾害发生发展和全球生态环境变化;研究探索全球气候变化规律,为气候诊断和预测提供所需的地球物理参数;为军事气象和航空、航海等专业气象服务提供全球或区域卫星数据和导出产品。

1.7.2 风云四号气象卫星

风云四号(简称 FY-4)是我国第二代静止气象卫星,卫星姿态稳定方式为三轴稳定。主要发展目标是:大大提高观测的时间分辨率和区域机动探测能力;提高扫描成像仪性能,以加强中小尺度天气系统的监测能力;发展大气垂直探测和微波探测,解决高轨大气三维立体遥感;发展闪电成像观测,加强雷电预警预报;发展极紫外和 X 射线太阳观测,加强空间天气监测预警。

风云四号卫星计划发展光学和微波两种类型的卫星。我国幅员辽阔,国土东西经度超过 60° ,随着我国资源和安全对信息领域扩大的需求,光学星按照东、西双星进行空间轨道布局(双星运行),分别命名为 FY-4-EAST 和 FY-4-WEST,对覆盖我国西部、印度洋、红海和中东地区并西接欧洲,东边覆盖我国中东部、扩大到广大太平洋地区进行气象探测。微波探测卫星布局在能够覆盖我国国土为主的空间轨道位置是最佳选择(单星运行)。

目前风云四号卫星处于型号背景研究阶段。计划在 2014 年发射风云四号卫星第一颗星,重 3 200 kg,有效载荷有成像辐射计、大气垂直探测器、闪电成像仪、太阳 X 射线成像仪和空间环境监测器。FY-4 采用三轴稳定平台,使得在高轨道卫星上装载大气垂直探测仪成为可能。FY-4 干涉式大气垂直探测仪将摒弃滤光片技术,直接采用干涉分光技术,是我国红外高光谱探测技术的一种跨越,技术难度很大! FY-4 闪电成像仪覆盖中国及邻近陆地和海洋区域,对闪电进行连续观测成像,提供实时、连续、可靠的闪电观测数据,实现对中国及邻近区域闪电的业务化监测、预警和预报。FY-4 极紫外和太阳 X 射线成像仪可用于监测太阳活动的类型、耀斑、日冕物质抛射 CME 和冕洞等。

参考文献

- 陈渭民. 2003. 卫星气象学. 北京:气象出版社.
- 廖国男. 1985. 大气辐射导论. 北京:气象出版社.
- 曾庆存. 1974. 大气红外遥测原理. 北京:科学出版社.
- Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, *et al.* 2003. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **41**: 253-264.
- Dong C H, Zhang W J. 2005. Progress on the new generation of Chinese meteorological satellites and some applications. *Proc. of SPIE*, **5890**:94-101.
- Gurka J J, Schmhit T J. 2004. Baseline instruments planned for the GOES-R series. *13th Conference on Satellite Meteorology*, Boston, MA, American Meteorological Society, P1.5.
- Huang H L, Revercomb H E, Thom J, *et al.* 2000. Geostationary Imaging FTS (GIFTS) data processing: measurement simulation and compression. *Proc. of SPIE*, 103-114.
- Li J, Wolf W, Menzel W P, *et al.* 2000. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurement: The algorithm and validation. *J. Appl. Meteor.*, **39**:1248-1268.
- Strow L L, Hannon S E, De Souza-Machado, *et al.* 2003. An overview of the AIRS radiative transfer model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **41**:303-313.

2 EOS 卫星 AIRS 和 MODIS 仪器介绍

2.1 地球观测系统 EOS Terra/Aqua 卫星

1999 年 12 月 18 日 美国成功地发射了地球观测系统(EOS)的第一颗先进的极地轨道环境遥感卫星 Terra(EOS-AM1),该试验卫星自北向南(降交点)10:30(LT 当地时间)全球云量最少时过境赤道,主要目的是观测地球表面。这颗卫星是美国国家宇航局(NASA)地球行星使命计划总数 15 颗卫星的第一颗,也是第一个提供对地球—大气整体观测的系统。它的主要目标是从系列极轨空间平台上实现对太阳辐射、大气、海洋和陆地的综合观测,获取有关大气、海洋、陆地、冰雪圈和太阳动力系统等信息,进行土地利用和土地覆盖研究、气候季节和年际变化研究、自然灾害监测和分析研究、长期气候变率和变化研究以及大气臭氧变化研究等,进而实现对大气和地球环境变化的长期观测和研究的总体战略目标。

EOS 卫星系统的先进性在于它先进的观测仪器系统。Terra 卫星共载有 5 个有效遥感载荷:

- (1) 中分辨率成像光谱仪(MODIS)。
- (2) 高级的星载热发射和反射辐射计(ASTER)。
- (3) 云和地球辐射能量系统观测仪器(CERES)。
- (4) 多角度成像光谱辐射计(MISR)。
- (5) 对流层污染测量仪(MOPITT)。

2002 年 5 月 4 日 EOS 的第二颗卫星 Aqua(下午轨道 EOS—PM1)发射成功,是在全球云量最多时进行观测,Aqua 自南向北(升交点)当地时间 13:30 过境赤道,主要用于水循环观测,以云、降水和土壤湿度为主要观测对象。Aqua 卫星上承载的仪器有:

- (1) 中分辨率成像光谱仪(MODIS)。
- (2) 高级的微波探测装置(AMSU)。
- (3) 高级的微波成像仪器(AMSR)。
- (4) 红外大气探测器(AIRS)。
- (5) 微波湿度探测器(MHS)。

Terra 和 Aqua 可提供每天的全球观测资料。

2.2 EOS 中分辨率光谱成像仪 MODIS 简介

本节主要介绍美国 EOS(地球观测系统)Terra/Aqua 卫星主要观测仪器——MODIS(中分辨率成像光谱仪),概括了 MODIS 资料的预处理技术和 MODIS 可生成的标准产品及资料格式,简单介绍了 IMAPP(International MODIS/AIRS Preprocessing Package)软

件包。

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是 EOS-AM 和 EOS-PM 系列卫星上载有的一种主要探测仪器,也是 Terra 平台上唯一进行直接广播的对地观测仪器。MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱频道,分布在 $0.4\sim 14\ \mu\text{m}$ 的电磁波谱范围内,波段范围和主要用途见表 2.1(King 等 2003)。MODIS 36 个频道包括:对陆表及云边

表 2.1 MODIS 仪器特性和主要用途

频道	波长(μm)	光谱范围	主要用途	分辨率/m
1	0.620~0.670	可见光	陆地、云边界	250
2	0.841~0.876	近红外		250
3	0.459~0.479	可见光	陆地、云特性	500
4	0.545~0.565	可见光		500
5	1.230~1.250	近红外		500
6	1.628~1.652	近红外		500
7	2.105~2.155	可见光		500
8	0.405~0.420	可见光	海洋水色、	1 000
9	0.438~0.448	可见光	浮游生物、	1 000
10	0.483~0.493	可见光	生物地理、	1 000
11	0.526~0.536	可见光	化学	1 000
12	0.546~0.556	可见光		1 000
13	0.662~0.672	可见光		1 000
14	0.673~0.683	可见光		1 000
15	0.743~0.753	可见光		1 000
16	0.862~0.877	近红外		1 000
17	0.890~0.920	近红外	大气水汽	1 000
18	0.931~0.941	近红外		1 000
19	0.915~0.965	近红外		1 000
20	3.660~3.840	热红外	地球表面和云顶温度	1 000
21	3.929~3.989	热红外		1 000
22	3.929~3.989	热红外		1 000
23	4.020~4.080	热红外		1 000
24	4.433~4.498	热红外	大气温度	1 000
25	4.482~4.549	热红外		1 000
26	1.360~1.390	近红外	卷云、水汽	1 000
27	6.535~6.895	短波红外		1 000
28	7.175~7.475	短波红外		1 000
29	8.400~8.700	短波红外		1 000
30	9.580~9.880	短波红外	臭氧	1 000
31	10.780~11.280	长波红外	地球表面和云顶温度	1 000
32	11.770~12.270	长波红外		1 000
33	13.185~13.485	长波红外	云顶高度	1 000
34	13.485~13.785	长波红外	大气温度	1 000
35	13.785~14.085	长波红外		1 000
36	14.085~14.385	长波红外		1 000