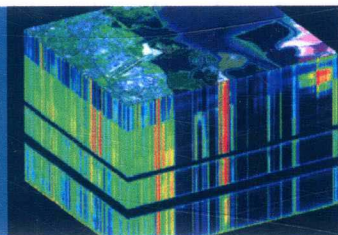


K波段 微波高光谱辐射计系统研究

Research on the K-band Hyperspectral Microwave Radiometer System



谢 衍 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

K

**波段微波高光谱
辐射计系统研究**

Research on the K-band
Hyperspectral Microwave
Radiometer System

谢 衍 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

K 波段微波高光谱辐射计系统研究 / 谢衍著. — 北京 : 中国科学技术出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5046-7406-7

I. ① K… II. ① 谢… III. ① 微波辐射计—研究 IV. ① TP732.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 002958 号

策划编辑 王晓义
责任编辑 王晓义 张津滔
装帧设计 七彩云
责任校对 焦 宁
责任印制 徐 飞

出 版 中国科学技术出版社
发 行 中国科学技术出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010-62173865
传 真 010-62179148
投稿电话 010-63581202
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 720mm×1000mm 1/16
字 数 120 千字
印 张 8
版 次 2016 年 12 月第 1 版
印 次 2016 年 12 月第 1 次印刷
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-7406-7/TP·403
定 价 40.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

序

“微波高光谱”的定义的第一次公开提出是在 2011 年,距今不到 6 年。《K 波段微波高光谱辐射计系统研究》著作付梓,明显在这个有限的时间段内完成的。这种从科学实践到学术理论跨越的高效率,是常人难以理解的。如果我说这位作者仅仅是位“80 后”,是刚从北京航空航天大学毕业的年轻博士,是华东交通大学的教师新锐,你是不是会做出“后生可畏”的惊叹呢?

党和国家激励高端人才培养的政策与措施,创造了人才辈出的有利环境,从谢衍博士的成长历程可见一斑。2007 年,谢衍加入了笔者领导的北京航空航天大学微波工程实验室。而后,他在吸纳国内外研究成果的基础上,围绕着“地基式 K 波段微波高光谱辐射计”这个命题潜心研究和探讨。当初,他研究工作的目的是研制一种高频谱分辨率的微波辐射计,用于验证改善大气廓线的反演性能的可能性。随着微波辐射计的软硬件系统、定标方法和廓线反演方法分别于 2011 年、2012 年和 2013 年相继完成,他也完成了整个硕士和博士阶段的学习与研究。随着 2011 年微波高光谱概念的公开提出,这台微波辐射计的研究也因此被命题为“K 波段微波高光谱辐射计”的研究,更加凸显了这一命题的创新性和前瞻性。

“K 波段微波高光谱辐射计”是拥有 50 个或更多窄带连续频谱通道的微波遥感系统。它的研制成功提供了一种与红外高光谱传感器相同或接近的大气探测新手段,实现了能够在全天候条件下进行大气探测的新型微波遥感系统。这有别于林肯实验室 2012 年研制的机载式微波高光谱辐射计,能够显著提高干燥地区温、湿度廓线的反演精度和垂直分辨率。“K 波段微波高光谱辐射计”为完善微波辐射计系统的研究开辟了一个新的方向。

该书主要通过超宽带多通道接收机、辐射计定标方法和水汽廓线反演方法三个关键技术,阐述了对“K 波段微波高光谱辐射计”进行系统研究的方向和成果。首先,介绍了辐射计的超宽带多通道接收机的原理和概念;其次,针对辐射计的定标方法展开了微波高光谱下的优化研究;再次,针对辐射计的水汽廓线反演方法展开了微波高光谱下的优化研究;最后,通过将水汽廓线反演结果与 TP/WVP-3000 微波辐射计进行对比,验证了本书所设计的 80 个通道的“K 波段微

波高光谱辐射计”，能够在一定程度上改善水汽廓线的反演精度和垂直分辨率，并进一步提出了系统频谱通道数扩展的设计思想。

该书的出版发行，不仅仅反映了谢衍博士个人的辛勤劳动所获得的丰硕成果，更重要的是展现了青年学者锲而不舍的科研精神。此书适用于高校和科研院所的教学和科研，能给更多学者和研究人员提供参考。笔者期待谢衍博士百尺杆头更进一步，不断进取，取得更多、更丰富的研究成果。同时，也期待谢博士争取早日将这项科研成果转化为生产力，为国家做贡献，为人民造福。

教育部“长江学者”特聘教授
北京航空航天大学微波工程实验室主任

苗俊刚

微波高光谱这个术语的定义公开提出于 2011 年,指拥有约 50 个或更多窄带连续频谱通道的微波遥感系统。其主要研究目的在于发展一种大气探测性能与晴空条件下红外高光谱传感器相同或接近,并能够在全天候条件下工作的微波遥感系统。林肯实验室于 2012 年研制出一种机载式微波高光谱辐射计,它能够显著提高干燥地区温、湿度廓线的反演精度和垂直分辨率,为微波辐射计系统的研究开辟了一个新的方向。

本书的研究思路主要安排如下。

在国内外现有的研究基础之上,研究与实现了一种地基式 K 波段微波高光谱辐射计。研究工作开始于 2007 年,其研究目的是希望通过研制一种高频谱分辨率的微波辐射计,用于验证能否据此改善大气廓线的反演性能。而微波辐射计的软硬件系统、定标方法和廓线反演方法分别于 2011 年、2012 年和 2013 年完成,其研究过程贯穿了笔者整个硕士生和博士生阶段。随着 2011 年微波高光谱概念的公开提出,这台微波辐射计的研究样机也因此被命名为“K 波段微波高光谱辐射计”。

K 波段微波高光谱辐射计能够测量 18—26 GHz 频率范围内连续的大气辐射谱线,并用于反演潮湿地区的水汽廓线。辐射计的频谱通道数为 80 个。K 波段微波高光谱辐射计,使用了一种改进的接收机结构和高光谱下优化的定标与反演方法,从而能够在高灵敏度和绝对精度条件下观测快速的天气变化。通过提取微波高光谱下的大气额外信息,K 波段微波高光谱辐射计不仅能够减少水汽廓线误差,而且还改善了水汽廓线的垂直分辨率。本书围绕超宽带多通道接收机、辐射计定标方法和水汽廓线反演方法三个关键技术开展了 K 波段微波高光谱辐射计的系统研究,主要创新性研究工作如下。

首先,针对辐射计的超宽带多通道接收机开展了深入研究。传统多通道微波辐射计一般选用超外差接收机和多通道直接检波接收机这两种接收机结构。超外差接收机将天线输出的高频信号下变频到低频处理,并通过调谐本振频率的方式进行频段划分;多通道直接检波接收机则直接在射频频段对天线输出信号进行功分、滤波处理,完成频段划分。K 波段微波高光谱辐射计需要获得工作频段内

连续的大气辐射谱线，接收机通道数量远多于传统微波辐射计接收机。若选用超外差接收机结构，系统扫描时间长，不利于观测快速的天气变化；若选用多通道直接检波接收机结构，系统复杂度高，不利于微波辐射计的研制和运载。本书所设计超宽带 80 通道接收机采用了一种改进的二级接收机结构，结合了传统辐射计接收机的几项优点：第一级是超外差接收机结构，通过切换下变频信号进行第一次频段粗分，频段划分按时间顺序串行实现，由于射频前端通道的复用，降低了系统的复杂度；第二级是多通道直接检波接收机结构，通过滤波器组进行第二次频段细分，频段划分同时并行实现，减少了频谱扫描时间。

其次，针对辐射计的定标方法开展了微波高光谱下的优化研究。晴空条件下，K 波段的天顶亮温一般都小于 50 K，此时 K 波段微波高光谱辐射计使用晴空定标方法可以获得更高的定标精度。在该定标方法中，微波辐射计将大气本身作为一个定标冷源来代替传统液氮方法进行定标，通过快速测量几个特定仰角的晴空背景辐射，然后调整定标参数直到辐射计的系统输出符合大气辐射传输方程，同时测量定标热源的辐射温度，从而得到辐射计的准确增益。传统晴空定标方法通常将大气平均辐射温度和大气光学质量等定标参数看作与频率无关的固定值，忽略了大气频率的影响。然而在微波高光谱条件下，定标参数在宽大气频谱和不同天空仰角下存在浮动，其误差将随频率变化而进一步增大，并影响到晴空定标方法的定标精度。K 波段微波高光谱辐射计，采用了一种改进后的晴空定标方法来提高辐射计精度。这种改进方法通过统计近 20 年内北京地区每个月的大气温度廓线、气压廓线和水汽压廓线数据，并基于晴空条件的 Liebe 大气吸收模型 (1993)，修正了微波高光谱条件下晴空定标方法中定标参数在 K 波段内的误差。

接下来，针对辐射计的水汽廓线反演方法开展了微波高光谱下的优化研究。由于微波高光谱辐射计的频谱通道数量多、数据信息量大，所以相应的大气廓线反演方法所需计算量也将显著增加。对于信息量较大的微波高光谱遥感数据，神经网络算法会在训练其神经单元前，利用主元素分析法对大气亮温矩阵进行频谱上的压缩，避免了微波高光谱条件下大气亮温矩阵的病态性过高导致神经网络的训练失败。然而，这也减少了一部分的高光谱亮温数据，并可能在一定程度上失去高光谱的优势。为充分利用微波高光谱高信息量的特点，不损失有效的遥感信息，K 波段微波高光谱辐射计采用一种微波高光谱下优化的变分方法反演大气水

汽廓线。反演过程使用了晴空定标方法中所统计的往年北京地区大气廓线数据，其中水汽压廓线作为先验的背景数据，而温度廓线和气压廓线基于晴空条件和云雾条件下 Liebe 大气吸收模型（1993），修正了变分方法所需的水汽廓线雅可比矩阵。

最后，通过将水汽廓线反演结果与 TP/WVP-3000 微波辐射计进行对比，验证了本书所设计的 80 个通道 K 波段微波高光谱辐射计能够一定程度上改善水汽廓线的反演精度和垂直分辨率，并进一步提出了系统频谱通道数扩展的设计思想。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 核心概念	1
1.1.1 微波高光谱概念	1
1.1.2 地基微波高光谱的优势	2
1.1.3 大气廓线反演基础	3
1.2 微波高光谱的国外研究现状	6
1.3 微波高光谱的国内研究现状	8
1.4 本书的主要内容	10
第 2 章 系统等效噪声模型及关键指标分析	12
2.1 引言	12
2.2 K 波段微波高光谱辐射计的等效噪声模型	13
2.2.1 热噪声所引起的统计误差	14
2.2.2 系统增益起伏	15
2.2.3 辐射计灵敏度	16
2.2.4 辐射计绝对精度	17
2.3 关键指标分析	18
2.3.1 天线主波束效率和旁瓣贡献	18
2.3.2 噪声系数和增益起伏	19
2.3.3 功率增益	20
2.3.4 射频镜像抑制比	20
2.3.5 本振频率准确度	21
2.3.6 频谱扫描时间	21
2.4 本章小结	21
第 3 章 K 波段微波高光谱辐射计的系统设计	23
3.1 引言	23
3.2 系统简介	24
3.3 硬件结构	25
3.4 天线单元	26
3.5 接收机单元	27
3.5.1 接收机结构	27

3.5.2	射频前端	30
3.5.3	中频模块	39
3.5.4	测试结果	42
3.6	恒温单元及辐射计灵敏度测试	43
3.7	采集控制单元	46
3.8	转动平台	48
3.9	操作界面	49
3.9.1	远程操作界面	49
3.9.2	现场操作界面	52
3.10	本章小结	54
第 4 章	K 波段微波高光谱辐射计的晴空定标方法	56
4.1	引言	56
4.2	基本理论	57
4.3	微波高光谱下的改进	58
4.3.1	平均辐射温度修正	58
4.3.2	大气光学质量修正	61
4.3.3	高光谱定标数据库	62
4.4	天线温度修正	66
4.5	定标迭代流程	67
4.6	定标误差分析	70
4.6.1	平均辐射温度的影响	70
4.6.2	大气光学质量的影响	73
4.6.3	天线方向图的影响	75
4.6.4	接收机线性度的影响	77
4.6.5	黑体定标源的影响	78
4.7	实测结果分析	80
4.8	本章小结	80
第 5 章	K 波段微波高光谱辐射计的水汽廓线反演	82
5.1	引言	82
5.2	变分方法	83
5.3	微波高光谱下的设置	84
5.3.1	背景廓线和背景误差	84
5.3.2	观测误差	86
5.3.3	雅可比矩阵修正	86

5.4 迭代流程	88
5.5 水汽廓线反演	89
5.5.1 实际反演结果	89
5.5.2 廓线误差分析	91
5.5.3 垂直分辨率分析	92
5.6 TP/WVP-3000 廓线性能对比	94
5.7 频谱通道扩展分析	96
5.8 本章小结	98
 第 6 章 总结与展望	 99
6.1 主要结论	99
6.2 主要创新点	100
6.3 未来工作展望	101
 参考文献	 103
索引	111
附录 氧气和水汽的谱线吸收效率	113
后记	116

第1章 绪论

1.1 核心概念

1.1.1 微波高光谱概念

红外高光谱技术在大气遥感方向的应用已经发展了数十年。它能够实现大气红外光谱内数千个窄频谱通道的连续采样，从而提高大气廓线的探测性能。然而，大气中的云雾会大幅降低红外波段中的大气频谱信息，导致红外传感器在非晴朗天气下的工作性能较弱。因此，发展一种大气探测性能与晴空条件下红外高光谱传感器相同或接近，并能够在全天候条件下工作的微波遥感系统具有一定的研究意义。

“微波高光谱”这个术语的定义由林肯实验室于 2011 年提出，指拥有约 50 个或更多窄带连续频谱通道的微波遥感系统。由于大气光谱在红外波段拥有非常丰富的窄带吸收特性，然而在微波波段却较为平滑，因此，微波高光谱所需的频谱分辨率比红外波段要低。随后，林肯实验室又于 2012 年研制了一种机载式微波高光谱辐射计（118.75 GHz 附近 36 个频谱通道和 183.31 GHz 附近 16 个频谱通道）。该辐射计能够显著提高干燥地区温、湿度廓线的反演精度和垂直分辨率，为微波辐射计系统的研究开辟了一个新的方向。

2 K波段微波高光谱辐射计系统研究
Research on the K-band Hyperspectral Microwave Radiometer System

本书在国内外现有的研究基础之上,研究与实现了一种地基式K波段微波高光谱辐射计。研究工作开始于2007年,其研究目的是希望通过研制一种高频谱分辨率的微波辐射计,用于验证能否据此改善大气廓线的反演性能。而微波辐射计的软硬件系统、定标方法和廓线反演方法分别于2011年、2012年和2013年完成,其研究过程贯穿了笔者整个硕士生和博士生阶段。随着2011年微波高光谱概念的公开提出,这台微波辐射计的研究样机也因此被命名为“K波段微波高光谱辐射计”。

K波段微波高光谱辐射计能够测量18—26 GHz频率范围内连续的大气辐射谱线,并用于反演潮湿地区的水汽廓线。辐射计的频谱通道数为80个。K波段微波高光谱辐射计使用了一种改进的接收机结构和高光谱下优化的定标和反演方法,从而能够在高灵敏度和定标精度条件下观测快速的天气变化。通过提取大气微波高光谱中的额外信息,K波段微波高光谱辐射计不仅能够减少水汽廓线误差,而且还改善了水汽廓线的垂直分辨率。

1.1.2 地基微波高光谱的优势

高光谱遥感系统的主要优势之一是具有很高的频谱分辨率,精细的频谱分辨率能够反映待测频谱内的细微特性;它的另一优势是具有很宽的响应带宽,通过测量较宽区间内的大气连续谱,能够得到更多的遥感信息。在大气遥感领域,遥感设备可以利用上述优势来提高大气廓线的廓线精度和垂直分辨率。

高光谱技术现已普遍应用于红外波段,然而红外波段的大气辐射信号会被云层强烈地吸收,导致在湿度接近饱和的情况下产生不连续的响应,微波波段相对红外波段的主要优势之一,在于能够穿透内部液滴尺寸小于微波波长的非降雨云层。当频谱通道带宽被设计为小于大气吸收特性(例如22 GHz附近的水汽吸收峰)时,微波辐射计能够用于分析对流层下的大气廓线变化。微波波段第二个优势,在于相对于红外遥感系统的观测通道,微波辐射计的频谱通道对高度方向上的大气不透明度变化更加敏感,从而能够提高大气廓线反演的垂直分辨率。

微波辐射计一般采用地基、机载和星载三种常用的安装方式。然而,低对流层内的星载微波遥感数据存在较大的误差;机载式微波辐射计则会受到使用

时间（起飞时间）和空间（飞行路线）的限制；地基微波辐射测量的优势，在于对于低对流层具有更高的探测精度，并且能够对局部区域实现连续不间断的观测，从而弥补其他两种监测方式的不足，是气象监测中有效的补充手段。此外，地基微波辐射计是相对稳定的设备，它能够长时间连续无人运行，且仅需最小的维护量，使它们适合用于作为自动化遥感系统的一部分。

综上所述，地基式微波高光谱辐射计能适用于各种环境条件的工作，获取对流层内更高廓线精度和垂直分辨率的大气廓线，并将其应用在天气预报、监测机场结冰、估计和预测无线通信连接的衰减以及水汽密度测量等领域。

1.1.3 大气廓线反演基础

微波辐射计利用观测大气分子的吸收特性来获取垂直高度上的气象参数分布，即大气廓线。微波波段的大气谱线是由气体分子的转动跃迁所产生的，主要包括来自氧气、水汽和云液水的贡献。其中，氧气作为均匀混合气体，可以用于分析大气的温度廓线。在此基础上观测水汽的发射特性，即可进行大气湿度廓线分析。典型的微波波段地表大气吸收率如图 1-1 所示，图中所设地表

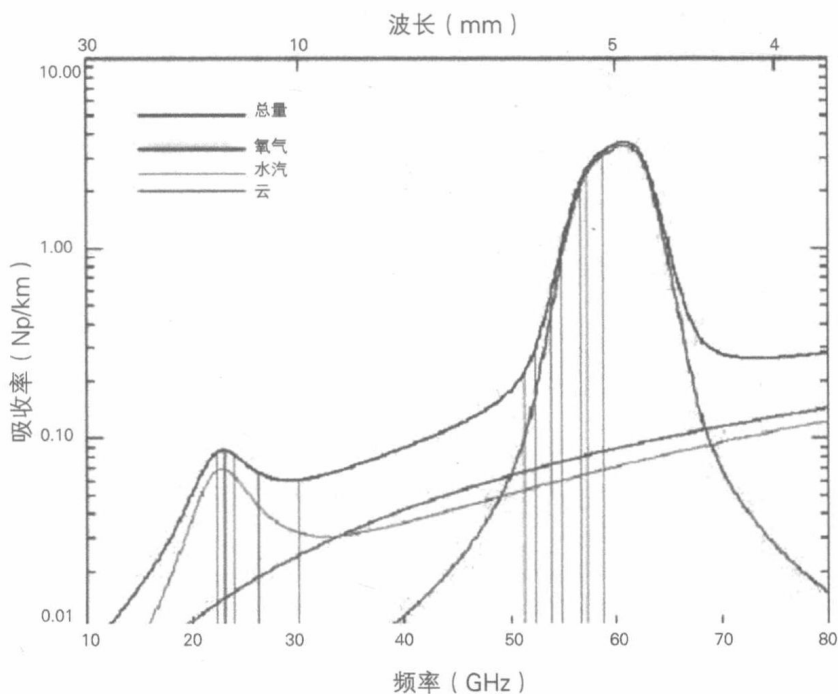


图 1-1 微波波段内来自氧气、水汽和云液水的贡献大气吸收率

温度为 288.15 K、地表气压为 1013.25 hPa、相对湿度为 100%、水汽密度为 0.2 g/m^3 。在 22.235 GHz 附近有一个水汽吸收峰，它来自水汽分子的电偶极子在单一的振动状态引起的转动跃迁。而水汽吸收率随着频率的增加则来源于非谐振水汽连续谱的贡献。K 波段的大气吸收特性相对较弱，所以其光学厚度较薄。即使在水汽吸收峰中心，地表接收的大气向下辐射也可以表示为完整大气层发射率的积分函数，而这个函数又取决于不同大气高度下的温度和水汽压强。若将微波辐射计的频谱通道设计在 22.235 GHz 附近，此时大气吸收率也相对最高，这将提高低空水汽廓线测量的灵敏度。

在低对流层条件下，51.5—67.9 GHz 频率范围内氧气谱的 33 根转动谱线压力展宽合并成了一个强吸收带。由于氧气谱线强度和密度的影响，导致该吸收带中心的大气吸收率非常强，此时大气的 $1/e$ 穿透深度只有 300 m 左右。当工作频率远离该强吸收带的中心频率时，大气吸收率也随之减少。例如拥有 51 GHz 频谱通道的微波辐射计就可以观测到 10 km 以内的大气辐射。微波频段内不同频谱通道之间的吸收率变化，提供了大气廓线反演的基础。

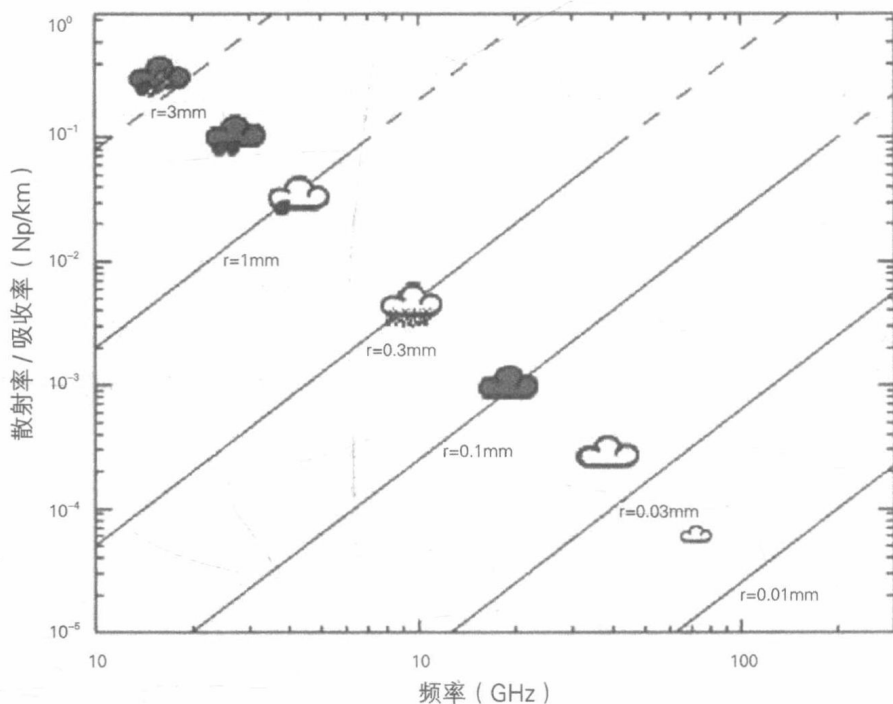


图 1—2 微波波段内大气散射率与吸收率之比，其中 r 为颗粒横截面半径。

包括典型的天气条件，如积雨云、微雨、小雨、大雨、暴雨等

云液水对大气吸收率的影响来源于非谐振连续谱的贡献,其发射率在30—50 GHz 大气窗口的辐射信号中起主要作用,同时还保证了大气光学厚度较薄。微波频段的频谱通道对云液水的总含量很敏感,但缺乏其垂直分布上的信息。

大气辐射通过不均匀介电性能的介质时会发生散射。由于液态水的吸收率相对很强,所以只有当液态水颗粒大小(半径 r)满足瑞利散射准则($2\pi r \leq \lambda$)时,大气散射现象才会变得明显。大气中水滴的散射效率取决于颗粒大小和辐射频率,如图1-2所示。在微波波段中当空气中的水汽凝结大于0.1 mm时(例如雨滴、雪花和冰雹),无法忽略大气散射的影响。而雾霾和云滴的颗粒尺寸较小,其大气散射特性相对吸收特性可以忽略。

在微波波段内,晴空条件下的大气辐射传输模型可以描述为所有氧气谱线和水汽谱线的吸收率积分模型,而非晴空条件下的额外大气吸收率(例如液态水的贡献)将根据经验公式加入吸收率总量中。大气辐射传输模型一般不考虑大气散射的影响,这是因为只有当迎来中强度以上的降雨并带来大颗粒的水滴或冰时,大气的散射现象才会明显影响到微波辐射计的观测准确性。

正向模型是大气辐射传输模型的重要组成部分,它用于将大气廓线转换为辐射计的观测亮温。正向模型需要将大气廓线离散化为可计算量级的不同变量(例如常用的温度廓线、湿度廓线和液态水廓线),并对不同大气高度进行平均计算。正向模型是所有大气廓线反演技术的基础。

通过观测不同频率或不同仰角下的大气吸收特性,微波辐射计可以据此反演大气温度廓线和湿度廓线。使用频率扫描的大气廓线反演原理是基于本节所述的大气吸收率的频率特性。而使用单个频谱通道(60 GHz附近的氧气强吸收带)进行大气仰角扫描则能够反演大气边界层的温度廓线,这是由于该频段的大气吸收率会随着仰角而产生明显变化。

然而,微波辐射计的大气廓线反演本质上是一个病态方程的求解过程,即不存在能够符合正向模型的大气廓线的唯一解,这将导致大气廓线的反演结果对观测过程中引入的噪声非常敏感,而常用的解决方法是在反演过程中使用先验信息。这些先验信息可以包括往年气候统计数据(来自其他大气遥感设备)、短期天气数据(来自数值天气预报模型)和微波辐射计自身的以

往噪声数据等。

1.2 微波高光谱的国外研究现状

20 世纪 60 年代开始, 国外开展了在微波和红外波段地球大气遥感的研究工作。随后进行了星载大气遥感系统的研究, 例如 1972 年关于星载红外遥感系统对大气温度的探测研究和 1973 年安装于 Nimbus 5 卫星的星载微波辐射计。不同频谱波段具有不同的大气物理特性, 比如在微波波段的相对强的穿透云雾的能力和在红外波段的相对尖锐的大气谱加权函数, 特别是在波长接近 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的短波区域, 普朗克的非线性特性使得大气温度的灵敏度能够进一步增加。

红外高光谱遥感技术在过去的 15 年内已发展的比较成熟, 它能够实现大气红外光谱内数千个窄频谱通道的连续采样: 2002 年安装于 EOS AQUA 极轨卫星上并发射成功的红外大气探测器 (AIRS) 是世界上第一台星载红外高光谱大气遥感仪器, 在红外波段 $3.7\text{--}15.4\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内拥有 2378 个频谱通道; 而 2006 年安装于 Meteor-A 极轨卫星并发射成功的干涉式红外大气探测仪 (IASI), 在红外波段 $3.6\text{--}15.5\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内拥有 8461 个频谱通道。上述类似的红外传感器作为美国极轨运行环境卫星系统 (NPOESS) 和第三代气象卫星系统的一部分, 通过使用红外高光谱测量大幅度改善了大气探测性能, 包括带来了更好的垂直分辨率。

微波波段的被动式大气观测研究开始于 20 世纪 60 年代, 前苏联发射了配置有 4 通道 (3.5、8.8、22.2 和 37.0 GHz) 微波辐射计的宇宙 234 卫星, 它们用于观测大气的水蒸气含量和液态水含量。美国也在 1972 年发射的 Nimbus 5 卫星上装载了 6 通道 (19.3、22.2、31.4、53.6、54.9 和 58.8 GHz) 微波辐射计, 它们用于探测大气降水率、大气垂直温度和水汽含量。从 1978 年起, 美国、日本先后发射的 TIROS-N、Nimbus-7、Seasat-A 和 GEO、MOS-1B 等卫星均安装了多通道扫描式微波辐射计 (SMMR)。此后, 美国和俄罗斯又各自发射了多种型号的星载大气微波辐射计, 其中比较先进的有美国的 SSMI/S 微波辐射计和俄罗斯的 MTVZA-OK 微波辐射计: SSMIS 共有 24 个通道, 观测频率为 23.8—183.0 GHz; MTVZA-OK 共有 30 个通道, 观测频率为 6.9—183.0 GHz。1993 年,