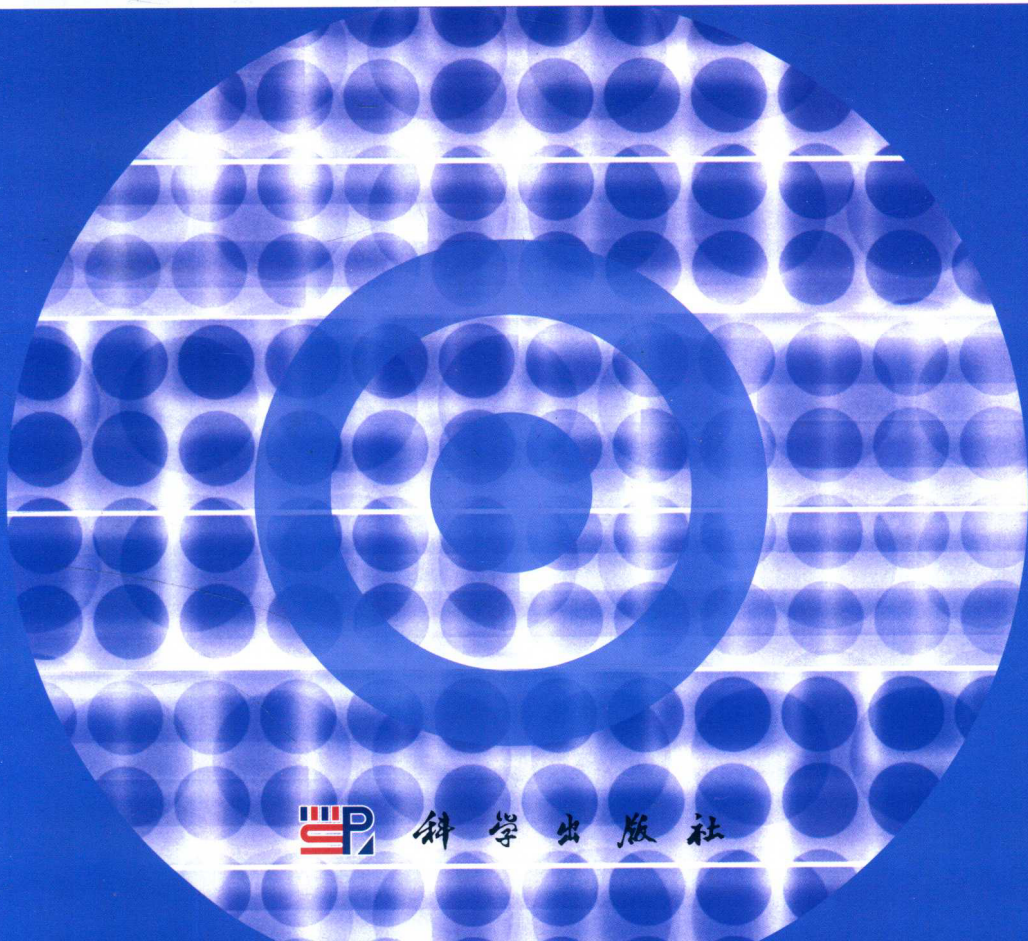


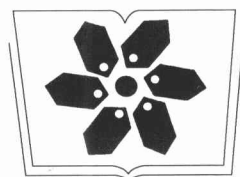
中国科学院科学出版基金资助出版

高分辨率被动微波遥感 ——综合孔径微波辐射成像(上册)

李青侠 陈柯 郎量 靳榕 等 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

高分辨率被动微波遥感

——综合孔径微波辐射成像

(上册)

李青侠 陈 柯 郎 量 靳 榕 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为上下册,涵盖综合孔径微波辐射测量的理论分析、误差校正及定标、综合孔径微波辐射图像重建、天线阵列优化、非规则天线阵综合孔径辐射成像、全极化综合孔径微波辐射成像、超综合孔径微波辐射成像、仿真系统及仿真(包括传统的和镜像的)、实验系统及实验(包括 HUST-ASR 及 SMOS 卫星数据)、镜像综合孔径微波辐射成像、数字波束形成微波辐射成像等。

本书可供从事遥感、深空探测、电子科学与技术、目标探测与制导、地球科学、生物医学等领域的相关科研人员参考,也可作为遥感、电磁场与微波技术、地球科学等学科的教师、研究生和本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率被动微波遥感:综合孔径微波辐射成像. 上册/李青侠等著. —北京:科学出版社,2017. 10

ISBN 978-7-03-054893-1

I. ①高… II. ①李… III. 高分辨率雷达-被动式遥感-雷达成像-研究 IV. ①TN957. 52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255973 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 10 月第一次印刷 印张:22 1/2 插页:6

字数:454 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着国家经济的高速发展,高分辨率遥感已在测绘、农业、林业、水利、气象、资源环境、城市建设、海洋、防灾减灾、军事等领域得到广泛应用,在经济建设和社会发展中发挥了越来越重要的技术支撑作用。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中将“高分辨率对地观测系统”确定为重大专项。

被动微波遥感具有全天时、准全天候(可穿透云层、浓雾、小雨和烟尘等)的特点,可穿透地表、植被,以及人体等一定深度,在防灾减灾、气象、资源环境、农业、海洋、月球与深空探测、制导、安检、医疗、科学研究等领域有重要应用。

用于被动微波遥感的仪器称为微波辐射计。相较于可见光、红外波段的遥感器而言,微波辐射计的优点是全天候及穿透测量能力,其主要缺点是空间分辨率不高。为了提高微波辐射计的空间分辨率,出现了综合孔径微波辐射测量技术。综合孔径微波辐射测量技术采用稀疏的小口径天线阵列合成一个等效的大口径天线,从而提高空间分辨率,可有效降低系统的体积与重量;其还具有不需要机械扫描而获取观测场景微波辐射图像——即凝视成像的优点,因此也被称为综合孔径微波辐射成像,是提高被动微波遥感空间分辨率的一种可行途径。

本书既包括作者团队在传统综合孔径微波辐射成像方面的创新研究成果,如系统误差分析与校正方法、综合孔径微波辐射图像反演(图像重建)方法,天线阵列优化方法等,也包括原始创新的研究成果,如镜像综合孔径微波辐射测量的概念、原理和方法。为了增强该书的系统性,该书也包括了综合孔径的基本原理。为了提升实用性,该书包含了综合孔径微波辐射成像的仿真及实验方面的内容。希望本书的出版能对我国的环境监测及我国的高分辨率对地观测重大专项的实施有所帮助。

本书共12章。第1章介绍微波辐射、微波辐射测量、微波辐射成像的基本概念,综述微波辐射成像的应用;第2章介绍综合孔径微波辐射成像的基本原理;第3章由靳榕撰写,阐述综合孔径的误差校正及定标方法;第4章由陈柯撰写,阐述综合孔径微波辐射图像重建方法;第5章论述天线阵列优化方法;第6章阐述非规则天线阵综合孔径微波辐射成像;第7章介绍全极化综合孔径微波辐射成像;第8章论述镜像综合孔径微波辐射成像的概念、原理及方法;第9章由郎量进行了修订,介绍将数字波束形成用于微波辐射成像;第10章介绍综合孔径微波辐射成像的仿真;第11章介绍综合孔径微波辐射计成像的实验;第12章由郎量撰写,介绍超综合孔径辐射计干涉测量成像的原理。本书介绍的综合孔径微波辐射成像仿真

及实验数据处理程序代码可以在华中科技大学电子信息与通信学院的网站(<http://eic.hust.edu.cn/>)进入电子工程系(或微波研究中心)网页的研究成果栏目下载。

本书将近十年在朱耀庭教授的领导下,张祖荫教授的指导下,相关的教师 and 研究生经过艰苦努力完成的科研工作中所取得的研究成果进行整理。以下教师 and 研究生参加了综合孔径微波辐射测量的理论分析、仿真及仿真系统开发、实验系统研制及实验。教师包括:郭伟、李青侠、胡飞、陈柯、郎量、张靖、刘玉、黄全亮、桂良启、陈萍等;博士生包括:熊祖彪、吴露露、倪炜、董健、陈良兵、何方敏、朱路、靳榕、贺林峰、易观理、杨宏、卢军、丰励、郑文超、卢海梁、李炎、李育芳、窦昊锋等;硕士生包括:肖小刚、沈尚宇、潘东旺、屈蓉、黄加波、孟芳宇、吴远兴、张婷婷、李杨、黄成丽、胡立辉、朱松、张力、朱丹丹、黄佩、王新强、胡孔勇等。

本书在撰写过程中参考了陈柯、郎量、陈良兵、董健、何方敏、靳榕、张靖、丰励的博士论文。他们对相关研究做出了重要贡献,作者在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的谢意!感谢硕士生胡孔勇、博士生李育芳在 SMOS 卫星数据处理方面所做的工作!

感谢博士生窦昊锋、硕士生陈之薇在校对方面所做的工作!感谢硕士生周骏骁、梁丽霞、李晓楠、徐珍、赵萍、刘畅、何玲、唐芑、刘航、李艳华等在本书编排,特别是公式编辑中所做的工作!

感谢相关探索研究项目、国家自然科学基金(41176156 等)、预研、863 等项目的资助!

感谢家人的支持与宽容!

李青侠

2017 年 6 月于华中科技大学

目 录

(上 册)

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微波辐射测量及应用	2
1.2 微波辐射成像	6
1.2.1 微波辐射成像的方式	6
1.2.2 微波辐射成像的应用	9
1.3 综合孔径微波辐射成像	11
1.3.1 综合孔径微波辐射成像的原理及特点	11
1.3.2 综合孔径微波辐射计的研究概况	13
1.4 本书的内容	18
参考文献	18
第 2 章 综合孔径微波辐射成像原理	29
2.1 引言	29
2.2 微波辐射与亮温	29
2.3 相关干涉测量	31
2.3.1 双天线输出电压的互谱密度	31
2.3.2 功率谱密度与谱亮度的关系	33
2.3.3 双天线输出电压互谱密度的简化	35
2.3.4 复相关接收	36
2.4 综合孔径微波辐射成像原理	39
2.4.1 可见度函数	39
2.4.2 亮温图像重建	42
2.5 综合孔径方向图特性	44
2.5.1 综合孔径阵列因子	44
2.5.2 等效归一化功率方向图	45
2.5.3 采样间隔与栅瓣	47
2.6 综合孔径空间分辨率	48

2.7 综合孔径灵敏度	49
2.7.1 可见度函数的均值	51
2.7.2 可见度函数的相关性	51
2.7.3 图像亮温的噪声方差	55
2.7.4 图像亮温的均值变化	57
2.7.5 图像灵敏度	58
2.8 灵敏度与分辨率之间的关系	61
2.8.1 一维天线阵列	61
2.8.2 二维天线阵列	62
2.9 本书与文献灵敏度计算公式的比较	63
2.9.1 本书展源辐射的灵敏度	63
2.9.2 灵敏度	64
2.9.3 灵敏度对比分析	65
2.9.4 灵敏度的第二种定义	67
2.9.5 灵敏度计算公式的比较	70
参考文献	71
第3章 综合孔径微波辐射计误差模型与校正	72
3.1 引言	72
3.2 系统误差来源及其模型	73
3.2.1 天线误差	74
3.2.2 通道误差	76
3.2.3 AD采样误差	79
3.2.4 误差对综合孔径辐射计成像性能影响仿真	82
3.3 基于可见度误差分类	87
3.3.1 引言	87
3.3.2 可见度函数离散和带限采样的误差分析	88
3.3.3 系统误差分析和模型	92
3.4 综合孔径辐射计内部校正方法	109
3.5 综合孔径辐射计外部校正方法	113
3.5.1 基于人工源的外部校正方法	113
3.5.2 外部场景对消校正法	118
3.5.3 冗余空间校正方法	122
3.5.4 基于天体目标的辅助源校正方法	124
3.5.5 基于阵列旋转的自校正方法	133
3.5.6 基于多种场景的联合校正方法	151

3.5.7 综合孔径辐射计星上外部校正方法小结	164
3.6 综合孔径辐射计的定标	165
3.6.1 整机定标法	166
3.6.2 内部定标与校正	166
3.6.3 综合孔径与实孔径辐射计的联合定标方案	170
参考文献	172
第4章 综合孔径微波辐射图像重建	175
4.1 引言	175
4.2 理想的傅氏反演方法	176
4.3 综合孔径图像重建问题的数学模型	178
4.3.1 综合孔径微波辐射成像过程的数学模型	178
4.3.2 综合孔径图像重建问题的病态性	180
4.3.3 综合孔径图像重建问题的离散化	181
4.4 应用正则化的 G 矩阵反演法	183
4.4.1 图像重建问题的最小二乘解和广义解	183
4.4.2 图像重建问题的 Tikhonov 正则化解	186
4.4.3 正则化 G 矩阵反演法的实验研究	190
4.5 综合孔径图像重建的统计反演方法	199
4.5.1 综合孔径图像重建确定性反演方法面临的困难	199
4.5.2 综合孔径统计反演的基本理论	200
4.5.3 基于高斯先验信息的综合孔径统计反演方法	212
4.5.4 综合孔径多分辨率统计反演方法	225
4.5.5 基于 ℓ_1 先验信息的综合孔径统计反演方法	241
4.5.6 ASR 压缩传感统计反演方法	251
4.6 综合孔径微波辐射亮温图像的指标与质量评估	270
参考文献	276
第5章 天线阵排列优化	279
5.1 概述	279
5.1.1 综合孔径微波辐射计天线阵排列优化概述	279
5.1.2 最优化方法概述	281
5.1.3 组合方法概述	283
5.2 综合孔径微波辐射计天线阵排列优化基础	285
5.2.1 引言	285
5.2.2 阵列参数分析及对系统性能的影响	286
5.2.3 综合孔径微波辐射计天线阵排列优化准则	289

5.3 基于最小冗余的一维天线阵排列优化方法	290
5.3.1 引言	290
5.3.2 最小冗余线阵排列算法概述	290
5.3.3 基于蚁群优化的排列结构约束搜索方法	293
5.3.4 排列结果及分析	300
5.3.5 任意阵元数 LRLA 排列的解析解	302
5.4 基于最小冗余的二维天线阵排列优化方法	305
5.4.1 引言	305
5.4.2 二维最小冗余阵列排列算法概述	306
5.4.3 一种稀疏矩形平面阵排列方法	312
5.4.4 圆环阵稀疏排列方法	318
5.4.5 基于微粒群算法的圆环阵 UV 覆盖优化	323
5.5 基于灵敏度最优的天线阵排列优化方法	328
5.5.1 引言	328
5.5.2 基于灵敏度最优的天线阵列排列方法	328
5.5.3 地球观测应用中的 MDA 设计	333
5.5.4 增广最大基线思想	337
5.5.5 DF 下界分析	341
5.5.6 仿真验证	342
5.5.7 实验结果	345
参考文献	346

彩图

(下 册)

第 6 章 非规则天线阵综合孔径辐射成像	353
第 7 章 全极化综合孔径微波辐射成像	402
第 8 章 镜像综合孔径微波辐射成像	416
第 9 章 数字波束形成微波辐射成像	485
第 10 章 综合孔径微波辐射成像仿真	498
第 11 章 综合孔径微波辐射计成像实验	519
第 12 章 超综合孔径干涉成像	571
附录	578

彩图

第 1 章 绪 论

温度高于绝对零度 0K 的物体都会产生非相干电磁辐射(即辐射非相干电磁波),物体的这种非相干电磁辐射亦称为热辐射。物体在微波频段的电磁辐射称为微波辐射,或称微波热辐射。用于接收微波热辐射(或者说用于微波辐射测量)的仪器称为微波辐射计。

微波辐射测量具有全天时、准全天候(可穿透云层、浓雾、小雨和烟尘等)的特点,可穿透地表、植被及人体等一定深度,可以提供红外可见光手段不能提供的信息,在地球遥感与灾害监测、月球与深空探测、制导、安检、医疗、科学研究等领域有广泛的应用^[1,2]。微波辐射计不发射信号,也不依赖其他发射源的信号,因此在遥感领域,微波辐射测量亦被称为被动微波遥感。微波辐射计亦被称为被动微波遥感器,由于其不发射信号,因此结构较简单、功耗较低。

相较于可见光、红外波段的仪器而言,微波辐射计的主要缺点是空间分辨率不高。

微波辐射计的空间分辨率通常定义为其天线主波束对应的瞬时视场的大小或尺寸^[1]。瞬时视场也称为分辨单元,是天线主波束照射到地面的面积。微波辐射计的空间分辨率可表达为

$$\Delta x \approx k \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot H \quad (1-1)$$

其中, Δx 为空间分辨率; λ 为工作波长; D 为天线孔径(口径); H 为观测距离(对星载辐射计,其为轨道高度); k 为系数,根据空间分辨率的不同定义和天线的不同类型, k 的取值为 0.8~2。

对于方形孔径天线(孔径电场均匀分布),天线主瓣半功率宽度所对应的空间分辨率, k 取 0.89;天线主瓣零点宽度所对应的空间分辨率, k 取 2。对于方形孔径天线,孔径中间电场强、边缘电场弱,且主波束效率高情形,天线主瓣半功率宽度所对应的空间分辨率, k 取 1.5。

从微波辐射计空间分辨率的表达式可以看出,微波辐射计的空间分辨率由工作波长、天线口径、观测距离决定。微波辐射计的工作波长、观测距离通常由应用确定,例如土壤湿度和海洋盐度遥感的工作波长为 21cm(1.4GHz)、卫星遥感的观测距离就是轨道高度。因此,增大天线口径成为提高空间分辨率的主要途径。然而,增大天线口径面临制造、体积、重量、扫描方面的困难。

为了提高微波辐射计的空间分辨率,出现了综合孔径微波辐射计。综合孔径微波辐射计采用稀疏的小口径天线阵列合成一个等效的大口径天线,从而提高空间分辨率,可有效降低天线的体积与重量,且无需机械扫描即可实现对整个视场的凝视成像,避免大口径天线所面临的困难,为提高被动微波遥感的空间分辨率提供了一种可行的途径。

综合孔径微波辐射计通过若干小口径天线组阵,干涉合成等效的大口径天线,从而提高空间分辨率,因此综合孔径微波辐射计亦称为干涉式综合孔径微波辐射计。综合孔径微波辐射计的测量原理是利用天线对(或称基线)以干涉的方式测量场景微波辐射的空间频域分量,得到不同基线上的可见度函数(空间频率)采样,然后通过反演获得(重建)场景的亮温分布图像。由于综合孔径微波辐射计输出微波辐射图像,因此这种测量原理亦被称为综合孔径微波辐射成像。

综合孔径微波辐射成像的英文为 aperture synthesis microwave imaging 或 synthetic aperture microwave imaging。综合孔径微波辐射计的英文为 aperture synthesis microwave radiometer 或 synthetic aperture microwave radiometer。文献中还有相关的词汇,如 aperture synthesis radiometry(综合孔径辐射测量)、interferometric synthetic aperture microwave radiometry(干涉综合孔径微波辐射测量)、interferometric synthetic aperture radiometer、interferometric radiometer imaging、interferometric radiometer、interferometric synthetic aperture radiometer、synthetic aperture imaging radiometer 等。

本书中综合孔径微波辐射成像的英文用 aperture synthesis microwave imaging(ASMI),简称为 aperture synthesis imaging(ASI);综合孔径微波辐射计的英文用 aperture synthesis microwave radiometer(ASMR),简称为 aperture synthesis radiometer(ASR)。

1.1 微波辐射测量及应用

物体由大量的原子和分子组成,存在大量带电粒子。电荷的上下振动(电偶极子)及电荷沿某一轴旋转(磁偶极子),或者原子和分子能级的跃迁都会产生电磁波,即电磁辐射。由于物体内部大量原子和分子的电磁辐射以非相干的方式叠加,形成物体的电磁辐射。物体电磁辐射具有非相干的特点,其频谱非常宽,扩展到整个电磁波段,具有“似噪”(白噪声)的特点。从能量转换的角度看,物体中带电粒子热运动的能量转变为辐射能,所有物体在温度高于绝对零度时都会辐射电磁能(电磁波),因此物体的电磁辐射亦称为热辐射。

物体在微波频段的电磁辐射称为微波辐射,或称微波热辐射。由于是电磁辐射频谱的一段,微波辐射亦具有非相干、“似噪”的特点。物体的微波辐射与物体表

面和内部结构、极化特性、介电常数、温度分布等有关。某些物质在特定的频率上会有共振吸收峰,因此在这些频率上有很强的微波辐射信号,利用这个特性可以进行遥感,如利用大气中氧气的谐振吸收频率,可以遥感大气的温度分布;利用大气中水汽的谐振吸收频率,可以遥感大气中的水汽分布,或对这些物质进行探测,如探矿等。

对非相干微波辐射的测量,即微波辐射测量是微波辐射测量学的研究内容。微波辐射计是测量微波辐射的仪器,是经过定标的高灵敏度的接收机^[1,2]。微波辐射计的灵敏度定义为可检测出的最小输入亮温变化量,也称为亮温分辨率或辐射分辨率。

微波辐射测量学最早也是最成功的应用是射电天文,后被应用于地球遥感与灾害监测、目标探测、制导、月球与深空探测、安检、医疗、科学研究等领域。

(1) 地球遥感

微波辐射测量的一个主要应用是地球遥感领域。长期以来,由于人类过度的开发活动,全球环境面临气候恶化、生态破坏、资源紧缺的威胁,这些全球性环境与资源问题涉及许多变量,对此需要将地球作为一个整体来认识,对全球大气、海洋、陆地进行长期持续的监测和研究。有关国际组织和许多国家都在组织和实施利用遥感技术进行全球环境监测与保护的科学计划,其中规模最大的要算“地球观测(EOS)”计划和“行星地球使命(MTPE)计划”,它们将在极地轨道和地球同步轨道上建立一个空间平台网络,发射多颗卫星对地球环境现象进行长期持续性的全球范围的同步观测。除此之外,还有欧洲空间局的极轨道平台(EPOP)和日本的极轨道平台(JPOP),这两个平台也是以美国为中心的国际合作的大型地球观测卫星。这些平台上都搭载了相当数量的微波辐射计^[3]。为了推动我国遥感技术研究和应用的发展,中国科学技术部(MOST)和欧洲空间局(ESA)在对地观测领域开展了大型科技合作项目“龙计划”,该合作研究涉及农业、水灾监测和水资源管理、森林制图、海洋领域研究、地形测量、旱情监测、空气污染监测、臭氧监测、海洋水色研究等诸多遥感应用领域^[4]。

地球表面有近三分之二是海洋,其中部分被冰雪覆盖。在海洋、大气、陆地能量交换中海洋有决定性的作用,获取海洋环境的信息是研究全球气候的基础。利用微波辐射计能够监测海面温度、海面风速、海水盐度;在海冰覆盖区域,微波辐射计能够探测海冰分布、海冰表面温度,鉴别海冰类型;微波辐射计还可以用来测定海水的石油油膜污染,有油膜漂浮的海面亮温往往比周围海面高数十度,因此用辐射计很容易发现;利用微波辐射计可以观测的参数还有海流位置、海况与涌浪、风暴潮、上升流、水汽^[5-10]。海洋监测和研究将在海洋资源开发和利用、灾害性海况监测与预报、海洋动态模拟和海面污染监测等应用中发挥重要作用。

微波辐射计在大气遥感中又称为大气探测仪,通过选择在氧气和水汽吸收线

附近的频率,可以给出大气温湿廓线及其他一些有关大气的信息^[10-14]。这些资料将在天气研究和数值天气预报中得到越来越多的应用。微波辐射计还可以测量云中含水量和雨中含水量,为人工影响天气提供参考。此外,还可以测量大气污染,监控污染排放。

陆地参数中可以通过微波辐射计测量的有土壤水分含量、植被和雪盖等^[15,16]。土壤湿度是水文学、气象学及农业科学研究领域的一个重要参数。大面积土壤湿度的监测是农业水管理,以及农作物旱情监测的一个重要内容,而区域尺度乃至全球尺度的土壤信息是陆面过程模式研究必不可少的一个参量,对改善区域及全球气候模式预报结果起着重要的作用。

为了更加有效地提供重要信息,微波辐射测量系统针对不同物理参数的测量,使用不同的工作频率,对此已做了大量研究^[16-23],各物理参数对应的观测频率如表 1-1 所示。此外,为了满足应用要求,微波辐射计应当具有较高的分辨率,如星载辐射计对地观测通常要求数十千米量级的空间分辨率^[24,25]。

表 1-1 微波辐射测量不同应用下的参考观测频率

观测参数	观测频率/GHz	
	关键频率	其他重要频率
海洋遥感	海面温度	6 10、18、21
	海水盐度	1.4 6、18、37
	海面风速	10 18
	海冰	18、37 10、90
大气遥感	大气温度垂直分布	50~60、118、425 21、37、90
	大气水汽含量	18、21 37
	大气湿度垂直分布	183、380 21、50~60、160
	大气云中含水量	37 21、90
陆地遥感	土壤湿度	1.4 6
	积雪	18、37 90

星载微波辐射计作为全球性观测的重要工具之一,已经在地球科学领域发挥了重要作用。在众多遥感卫星中,装载有微波辐射计的地球观测卫星有^[2]1972 年发射的雨云-5(Nimbns-5)卫星,星载的微波辐射计 ESMR 观测海冰;1978 年美国发射的雨云-7 号(Nimbns-7)卫星安装了多通道微波扫描辐射计(SMMR),提供 10 通道测量海冰;1987 年发射的国防气象卫星(DMSP)的特别微波辐射计成像(SSM/I)数据,是当前应用较多的星载微波被动遥感数据,广泛应用于海冰和积雪的识别、空间分布及其辐射特征时间序列变化的监测研究^[26];1992 年由美国发射的 TOPEX/POSEIDON 卫星,用于海洋面起伏测量,海洋环流研究;1994 年由加

拿大发射的 RADARSAT 卫星,包括一个高级甚高分辨率辐射计,主要用于海洋和陆地资源调查、海况及灾害监测预报;1996 年由美国发射的 EPTRMM 卫星,含有一个多通道微波辐射计,用于热带雨林勘查;1996 年由美国为地球观测计划服务的 EOS-1 卫星,含有一个高分辨率多频微波辐射计,用于研究大气、海洋与陆地相互作用和人类活动的相互影响,以及地球资源调查;1997 年由日本发射的 JPOP 卫星,包含有改良型微波辐射计,任务同 EOS-1 卫星;由美国国家航空航天局(NASA)发射的水色卫星携带的 AMSR-E 探测器(地球观测系统微波扫描辐射计),使用更多的频段,能提供更高的空间分辨率和测量精度^[27];2009 年 11 月由欧洲空间局发射的 MIRAS 二维综合孔径辐射计,用于全球海水盐度和土壤湿度观测^[28,29]。

中国“神州”四号飞船上的主载荷——多模态微波遥感器是我国第一次进入太空的微波遥感器,其中包含一个覆盖 6.6~37GHz 的五通道微波辐射计,其天线采用了国内首创的宽带共馈源技术,使辐射计的 4 个频段共用一个反射面和馈源。该辐射计用于测风,并可以获得海洋与陆地的亮温分布图^[30]。

中国 2011 年 8 月 16 日发射的海洋二号(HY-2)卫星装载了扫描微波辐射计和校正微波辐射计,扫描微波辐射计主要用于获取全球海面温度、海面风场、大气水蒸气含量、云中液态水含量、海冰和降雨量等,工作频率 6.6GHz、10.7GHz、18.7GHz、23.8GHz、37GHz;校正微波辐射计主要用于为高度计提供大气水汽校正,工作频率为 18.7GHz、23.8GHz、37GHz。

中国 2008 年、2010 年、2013 年成功发射了三颗“风云三号”(FY-3)气象卫星,装载的微波辐射计包括微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)、微波成像仪(MWRI),用于遥感观测大气温度廓线、湿度廓线、雨率、云含水量、水汽总量、土壤湿度、海冰、海温、冰雪覆盖等;微波温度计是 4 通道微波辐射计,工作频率范围 50~57GHz;微波湿度计是 5 通道微波辐射计,工作频率范围 150~183GHz;微波成像仪是 10 通道微波辐射计,工作频率 10~89GHz。

地球静止轨道微波大气探测是未来的发展趋势^[31],高分辨率微波辐射计是其中的关键技术之一,对全世界来说都是一个难题,美国、欧洲、中国等都在进行相关的研究,但距卫星应用还有距离,目前还处于探索之中。

(2) 目标探测与制导

微波辐射计的军事应用主要是用以对地面、水上、空中金属目标进行侦察、搜索、预警和定位,以及地对地巡航导弹、弹道导弹和空对地导弹的末端制导上等。其主要依据是金属目标的发射率为零,仅反射天空或者地面的辐射,因此金属目标很容易与周围环境区分开来。此外,微波辐射计不发射信号,隐蔽性强,因此微波辐射计被用作导弹逼近目标处于最后阶段时的主要传感器^[2]。

目标探测,特别是隐身目标探测是微波辐射计在军事上一个新兴应用领域。

现代军用飞机、舰船等通过使用吸波涂层减小雷达散射截面来达到隐身的目的,此时雷达的探测能力大幅降低。根据黑体辐射理论,一种物体的吸收率越高,其发射率就越高,就越容易被辐射计探测到。由于隐身飞机具有极大的威慑力,国内多家单位都在研究微波辐射计用于隐身目标探测的可行性及分析探测性能^[32-34]。

(3)其他应用

中国探月卫星嫦娥一号(CE-1)、嫦娥二号(CE-2)上装载了4通道微波辐射计,用于探测月壤物理参数。微波辐射计还应用于交通、违禁物品检查、生物医学工程等民用领域。在交通方面,毫米波辐射成像系统可用于低能见度天气条件下显示机场跑道,引导飞机安全着陆,也可用于低能见度天气条件下汽车和轮船防撞^[35,36]。在违禁物品检查方面,利用人体和武器的毫米波辐射特性不同,可以发现隐匿武器^[37,38]。此外,微波辐射成像系统由于不发射电磁波,不会对人体造成任何伤害,在生物医学领域也得到广泛应用^[39,40]。

在上述应用中,绝大部分都需要获得场景的微波辐射图像。

1.2 微波辐射成像

在微波辐射测量应用中,为了得到一个区域的微波辐射的分布,需要对场景进行成像。例如,卫星平台上微波辐射计天线进行一维扫描,利用卫星的运动实现另一维成像。

测量场景各点的微波辐射强度,并按空间位置显示出来,就得到场景的微波辐射图像。测量(获取)场景微波辐射图像即为微波辐射成像。微波辐射成像的研究内容包括原理、方法、技术等。

1.2.1 微波辐射成像的方式

微波辐射成像的主要方式有实孔径机械扫描成像、焦平面成像、相控阵成像、综合孔径成像、运动扫描成像等。

(1)实孔径机械扫描成像

实孔径机械扫描成像使用较少的接收机,通过机械运动使天线扫过视场(field of view, FOV)获得图像信息。机械扫描时,通过天线系统的机械旋转或在角度上的摆动而改变天线波束的指向。比较常见的机械扫描方式有整个天线结构都作角度扫描的简单方式;保持天线在一固定的位置上,借助来回转动反射面实现扫描的方式;固定反射面,旋转馈源构成抛物环的扫描方式^[1,2]。

在该成像方式下,系统的分辨率由天线的物理尺寸决定,因此提高分辨率的唯一途径只能通过扩大天线的尺寸。在1.4GHz观测频率时要达到所需的几十千米级的分辨率,天线的物理尺寸将要超过10米。在早期,这种大口径天线的质量和

体积对于星载平台是不可接受的,笨重的大口径天线的扫描也是一个难题,而且受飞行器驻留时间的限制,扫描难以提供足够的灵敏度。

随着天线技术的发展,特别是轻量的网状反射面可展开大天线^[41-45]及薄膜反射面大天线^[46-50]的发展,结合单通道扫描成像成本低、接收机结构简单的特点,这种成像方法在一些应用场景中仍然具有竞争力,如美国 JPL 实验室为 HYDROS 任务设计的辐射计就是采用网状反射面可展开天线及来回转动反射面的扫描方式成像^[51,52]。

(2) 焦平面成像

毫米波焦平面阵列成像与红外焦平面阵列成像相类似,属于非相干、直接成像方法,是将多元单片式探测器阵列置于较大口径的抛物反射面,如卡塞格伦天线、透镜天线的焦面,利用馈源阵列的偏焦,把收集到的目标、背景的毫米波辐射能量聚焦于馈源阵列上,这样可以产生多个不同指向的高增益固定波束覆盖一维视场,实现在同一时间内比较多个波束接收能量的差异,从而提高辐射计的温度灵敏度和成像的数据速率。接收到的信号经过通道的辐射接收机转换成视频信号,经成像处理输出,能够快速显示场景的毫米波热辐射图像^[53]。

20 世纪 90 年代以来,随着单片毫米波集成电路(MMIC)的迅速发展,以焦平面阵列接收机为核心的毫米波“凝视”成像技术正日趋成熟。这种高性能的成像系统可以简化乃至取消复杂的机械扫描装置,同时具有高灵敏度和实时成像等引人注目优点。其典型代表有美国 Millivision 公司的工作在 94GHz 的 32×32 元手持式焦平面阵列辐射计^[54];TRW 公司研制于 W 频段的 1×4 元直接检波式辐射计接收机,以及为飞行器自动着陆而研制的 89GHz 的 40×26 元 PMMW 成像仪样机^[55];Lockheed Martin 公司的 1×34 元 PMMW 成像仪样机^[56]。国内许多单位也开展了毫米波段焦平面的研究,但由于工艺线等原因的限制进展比较缓慢。

(3) 相控阵成像

相控阵成像利用电子扫描替代机械扫描,天线由二维阵列单元组成,每个接收单元都与一个移相器相连,通过控制接收单元的相位和幅度,实现天线波束在视场的扫描。由于相控阵是通过电子方式控制波束的扫描,省去机械扫描运动,减小了由机械运动带来的误差。

设计相控阵的关键是如何控制各阵元之间的相位差。最常用的方法是在各阵元加移相器,如莫斯科国立大学的系统使用铁氧体移相器来控制波束扫描,但这项技术只适用于小口径天线及小视场,还不适于大口径宽视场^[57];Trex Enterprises 公司使用其他方法来实现相位控制,其关键部件是一个可称为相位处理器的器件,由固定时延传输线构成,传输线选择悬置带状线,其优点是带状线的宽度不均匀对其波导波长影响较小,并且电磁场的泄漏和互耦较小^[58,59]。此外,还有注锁相控阵^[60-62],可大量减少使用甚至不使用移相器,而是通过耦合注锁振荡器阵列来控

制各阵元的相位,以达到控制波束方向的目的。尽管目前实现毫米波相控阵被动成像仍然有许多关键技术需突破,但许多研究机构都投入了大量人力和物力,是成像系统的一种发展趋势^[63-67]。

(4) 综合孔径成像

19 世纪 70 年代末,为了提高工作频率为 1.4GHz 的辐射计的分辨率,以满足广大地球物理用户在土壤湿度、海水盐度等方面的需要,地球科学工作者产生了将综合孔径技术引入到地球遥感领域的设想^[68]。80 年代末期,Ruf 等根据地球观测的基本规律开始了实质性研究,并研制出世界上第一个综合孔径辐射计——ESTAR^[69]。随后美国和欧洲的多家单位开始了大量的探索性工作,并相继研制出以欧洲空间局的 MIRAS^[28,29]及 NASA 的 GeoSTAR^[70,71]等为代表的综合孔径微波辐射计系统或样机。特别值得指出的是,MIRAS 已于 2009 年 11 月 2 日成功发射升空,并传回第一幅全球微波辐射图像,成为人类第一个在轨的星载综合孔径微波辐射计。

除了上述具有代表性的综合孔径辐射计外,国外还有芬兰赫尔辛基技术大学研制的 HUT-2D^[72-77]、美国密歇根大学研制的 STAR-Light^[78,79]、NASA 提出的 MeoSTAR^[80]和 CESAR^[81],以及韩国的 sub-Y^[82]形阵系统等。

在国内,关于综合孔径辐射计的研究单位有华中科技大学^[83-85]、南京理工大学^[86]、中国科学院空间中心^[87,88]、中国电子科技集团十所^[89]、北京理工大学^[90],以及北京航空航天大学^[91,92]等。中国科学院空间中心是国内最早综合孔径辐射计实验系统的研制单位,于 1999~2001 年期间研制了国内首台 6 单元的 C 波段一维综合孔径辐射计样机^[87],此后又研制了一台 8 单元的 X 波段一维综合孔径辐射计样机^[88],并进行了机载实验。华中科技大学已于 2005 年成功研制出工作在 8mm 波段的 16 单元一维综合孔径辐射计,并进行了多次地面成像实验,获得了高质量的综合孔径辐射图像^[83-85]。北京航空航天大学在 2008 年研制了 8mm 波段的二维综合孔径辐射计系统 BHU-2D,采用 10 单元 T 形阵列^[91]和圆形阵列^[92],并给出了实验图像。

(5) 运动扫描成像

利用运动平台对场景实现扫描成像,例如我国的嫦娥一号卫星沿南北飞行完成一维扫描,月球的自转形成二维扫描,这种方式获得了全月的微波辐射图像。运动成像实质上是机械扫描成像,只不过微波辐射计的天线不动,平台运动对场景实现机械扫描成像。

平台运动成像可以与其他成像方式结合使用。在星基对地遥感中,采用一维天线机械扫描,另一维借助卫星的运动来实现对地表场景的二维微波辐射成像;或者一维采用焦平面,另一维利用平台运动扫描;或者一维采用综合孔径,另一维利用平台运动扫描。