

微波遥感

导论

WEIBO YAOGAN DAOLUN

▶ 苗俊刚 刘大伟 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

微波遥感导论

苗俊刚 刘大伟 编著



机械工业出版社

本书共9章,可分为3个部分,第一部分是关于微波遥感基础内容的介绍,主要包括微波遥感的基本概念、微波遥感的发展过程,以及微波遥感的理论基础——平面电磁波的传播和电磁场与介质的相互作用等内容;第二部分是关于微波遥感技术的介绍,包括微波有源和无源遥感系统等;第三部分是关于遥感图像处理和微波遥感应用等内容的介绍。

通过本书的学习,使学生对微波遥感理论与技术的基本原理和典型遥感器有一定的理解和掌握,并了解微波遥感技术的主要应用领域。本书可作为电磁场与微波技术专业本科高年级学生的教学用书,也可作为从事微波遥感理论与技术研究的专业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

微波遥感导论/苗俊刚,刘大伟编著. —北京:机械工业出版社,2012.9
ISBN 978-7-111-39071-8

I. ①微… II. ①苗… ②刘… III. ①微波遥感 IV. ①TP722.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第154243号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:朱林 责任编辑:朱林

版式设计:纪敬 责任校对:李婷

封面设计:陈沛 责任印制:张楠

唐山丰电印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.75印张·264千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39071-8

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着遥感技术的发展,以及我国高分辨率对地观测重大基础专项的实施,遥感技术尤其是微波遥感技术已经受到我国普遍的高度重视,主要用于满足我国在地球资源、环境、大气、海洋、灾害监测及预报等领域的需求。微波遥感是电子科学与技术专业的一个非常重要的应用领域,国外很多著名高等学府的电子科学与技术专业都开设有微波遥感方向。本书内容方面偏重于一些微波遥感基本原理和技术的介绍,但是作为导论,避免了一些复杂公式和理论的推导,更加强调基础知识的学习,目的是使相关领域的学生和科研工作者对微波遥感有个比较系统的认识,为进一步从事微波遥感研究打下基础。

本书由3个部分组成,共有9章,第一部分(第1~4章)是关于微波遥感基础内容的介绍,主要包括第1章绪论,第2章自由空间中的电磁波,第3章电磁波与媒质的相互作用,以及第4章电磁波与大气的相互作用;第二部分(第5~6章)是关于微波遥感技术的介绍,包括第5章微波有源遥感系统和第6章微波无源遥感系统;第三部分(第7~9章)是微波遥感的应用,主要包括第7章遥感平台,第8章微波遥感数据处理和第9章微波遥感的应用。

本书在北京航空航天大学微波工程实验室多年教学与科研工作总结的基础上编写而成,同时还借鉴了国内外相关高校和科研单位在微波遥感领域的论著和研究成果,剑桥大学出版的W G Rees撰写的《Physical Principles of Remote Sensing》一书对本书的结构体系和部分内容影响较大。美国密歇根大学安娜堡分校F T Ulaby教授撰写的《Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume I》以及美国麻省理工学院J A Kong教授和美国华盛顿大学西雅图分校Leung Tsang教授的著作在本书中得到引用。感谢研究生刘琳、刘凯和吕长春对本书的编写所做的工作。本书的出版得到了“国家自然科学基金资助项目41105007(项目批准号)”的资助。

由于编著者水平的限制,本书在编著内容中的疏漏、不足和错误之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正。

编著者

目 录

前 言	
第 1 章 绪 论	1
1.1 微波遥感的定义	1
1.2 微波遥感的发展过程	2
1.2.1 国内发展	3
1.2.2 国外发展	6
1.3 微波遥感的探测优势	10
1.4 微波遥感的应用	12
参考文献	15
第 2 章 自由空间中的电磁波	17
2.1 电磁波和电磁波谱	17
2.1.1 电磁波	17
2.1.2 电磁场的复数表示法	18
2.1.3 均匀平面波	19
2.1.4 电磁波谱	21
2.2 电磁波的极化	23
2.2.1 极化的形式	23
2.2.2 Poincare 球描述法	25
2.3 电磁波的干涉与衍射	27
2.3.1 电磁波的干涉	27
2.3.2 电磁波的衍射	29
参考文献	31
第 3 章 电磁波与媒质的相互作用	32
3.1 有耗均匀媒质中的平面波	32
3.2 电磁波在分界面的反射和透射	35
3.2.1 电磁波在均匀平面分界面的 反射和透射——TE 波	36
3.2.2 电磁波在均匀平面分界面的 反射和透射——TM 波	37
3.2.3 Snell 定律	38
3.2.4 全反射和全透射	39
3.3 面散射和体散射	40
3.3.1 面散射	41
3.3.2 体散射	47
参考文献	51
第 4 章 电磁波与大气的相互作用	52
4.1 大气的结构组成	52
4.1.1 大气结构	52
4.1.2 大气的气体成分	54
4.2 大气分子的吸收和大气散射	56
4.2.1 大气分子的吸收机理	56
4.2.2 大气的散射机理	62
4.3 电磁波与大气电离层的作用	64
4.3.1 电离层对无线电波的影响	65
4.3.2 电离层对微波波段的影响	66
4.4 大气湍流对电磁波传输的影响	67
4.4.1 大气湍流结构	67
4.4.2 大气湍流的产生	68
4.4.3 大气湍流的谱结构	68
4.4.4 大气湍流的影响	69
参考文献	69
第 5 章 微波有源遥感系统	70
5.1 天线的基本参数	70
5.1.1 立体角	70
5.1.2 天线的辐射方向图	70
5.1.3 波束宽度与波束效率	71
5.1.4 方向性系数和增益	72
5.2 雷达方程	74
5.3 雷达高度计	75
5.3.1 雷达高度计探测的基本工作 过程	76
5.3.2 雷达测高的应用	80
5.4 微波散射计	82
5.4.1 微波散射计探测的基本工作 过程	82
5.4.2 微波散射计的应用	83
5.5 真实孔径雷达	84

5.5.1 真实孔径雷达的工作过程	85	7.3.3 遥感卫星的姿态	121
5.5.2 真实孔径雷达的方位向和 距离向分辨率	85	7.3.4 特殊轨道	121
5.5.3 真实孔径雷达图像的特点	86	7.3.5 轨道的衰退和卫星的寿命	125
5.5.4 真实孔径雷达的应用	88	7.3.6 几种常见的遥感卫星	125
5.6 合成孔径雷达	88	参考文献	133
5.6.1 合成孔径雷达的基本工作 过程	89	第 8 章 微波遥感数据处理	135
5.6.2 方位向分辨率分析	90	8.1 数据存储和传输	135
5.6.3 SAR 图像特点	91	8.2 遥感数据预处理	137
5.6.4 SAR 干涉成像仪	93	8.2.1 辐射纠正	137
5.7 成像雷达的应用	94	8.2.2 几何纠正	138
参考文献	95	8.3 图像增强	139
第 6 章 微波无源遥感系统	96	8.3.1 对比度增强	139
6.1 辐射测量基础	96	8.3.2 空间增强	141
6.1.1 普朗克黑体辐射定律	96	8.3.3 小波去噪增强	145
6.1.2 普朗克定律的性质	97	8.4 图像分类	146
6.1.3 功率与温度的对应关系	99	8.4.1 监督分类	147
6.1.4 非黑体的辐射	100	8.4.2 非监督分类	148
6.1.5 大气微波辐射传输方程	102	参考文献	149
6.2 微波辐射计	107	第 9 章 微波遥感的应用	150
6.2.1 微波辐射计接收机组成	108	9.1 陆地微波遥感	150
6.2.2 空间分辨率	108	9.1.1 农业方面的应用	150
6.2.3 温度分辨率	108	9.1.2 林业方面的应用	152
6.2.4 辐射计接收机类型	109	9.1.3 地质方面的应用	155
6.3 微波辐射计定标技术	111	9.2 海洋微波遥感	156
6.3.1 接收机定标	112	9.2.1 海洋表面温度	157
6.3.2 天线定标	113	9.2.2 海面高度测量	157
6.3.3 辐射计整机定标法	114	9.2.3 海面矢量风观测	158
6.3.4 微波辐射计定标中的几个 关键问题	115	9.2.4 海冰的遥感探测	159
参考文献	116	9.2.5 海洋溢油污染监测	159
第 7 章 遥感平台	117	9.3 大气微波遥感	160
7.1 地面遥感平台	117	9.3.1 大气廓线测量	160
7.2 航空遥感平台	117	9.3.2 灾害天气探测	162
7.3 航天遥感平台	118	9.4 外空间微波遥感	163
7.3.1 卫星的发射	118	9.4.1 火星快车探测火星电离层和 壳层结构	164
7.3.2 轨道参数	120	9.4.2 “嫦娥一号”卫星微波探测仪 探测月壤	164
		参考文献	166

第 1 章 绪 论

美国海军研究局的艾弗林·普鲁伊特 (Evelyn L Pruitt, 1960) 是使用“遥感”一词的第一人。1961 年, 在美国国家科学院 (National Academy of Sciences) 和国家研究理事会 (National Research Council) 的资助下, 于密歇根大学 (University of Michigan) 的威罗·兰 (Willow Run) 实验室召开了“环境遥感国际讨论会”。此后, 在世界范围内, 遥感作为一门新兴的独立学科, 迅速地发展起来。

“遥感”一词源于英语 Remote Sensing, 即“遥远的感知”。广义的理解^[1], 泛指一切无接触的远距离探测, 包括对电磁场、重力场、机械波 (如声波、地震波) 等的探测。实际工作中, 如重力、磁力、声波、地震波等的探测都被划为物探 (物理探测) 的范畴。所以, 只有电磁波探测属于遥感的范畴。狭义的理解^[1], 遥感是应用探测仪器, 在不与探测目标相接触的前提下, 从远处把目标物的电磁波特性记录下来, 通过分析, 描述出物体自身性质及其变化规律的综合性探测技术。遥感能提供目标物体三维同步观测数据, 因此, 可以成为促进地球系统科学形成的新手段, 同时也可以为检验地球系统科学模拟的真伪提供最直接最生动的景观图像。

“遥感”^[1]是一个复杂的系统, 它主要由遥感平台、遥感探测器、遥感数据传输、遥感数据地面接收、遥感数据处理、遥感应用等部分组成。其中每个环节都发挥着各自的作用: 遥感平台主要是遥感器所搭载的平台, 主要由运载火箭等装置将遥感平台送入太空, 使遥感器按照预定的轨道进行运转; 遥感探测器主要接收来自探测目标的反射、散射或辐射信息; 遥感数据传输主要通过介质传输或无线通信的方式将所接收的数据传输给卫星遥感地面站; 遥感数据地面接收除可返回式卫星记录的数据磁带, 还可以通过地面接收设备实时跟踪过境卫星, 将卫星数据接收下来 (卫星通信学), 然后对信号进行解码, 将数据记录下来; 遥感数据处理主要是对所接收的遥感卫星初级数据进行一定的预处理, 将遥感数据进行简单的辐射定标和几何纠正; 遥感应用主要是由用户单位根据需要, 结合一定的算法利用遥感数据反演出感兴趣的参数, 用于指导生产、规划等。可见“遥感”科学是集多学科 (包括空间科学、电子学、计算学、物理学、光学以及地球科学等) 于一体的综合性学科。

1.1 微波遥感的定义

微波遥感主要是以外空间、地球和大气为研究目标, 利用微波传感器接收来自研究目标的反射、散射或辐射的微波信号, 利用一定的技术加工处理, 从而获取人们感兴趣的目标信息的一门技术。

微波遥感中, 传感器主要接收微波频段信号, 其频率范围 300MHz~300GHz, 对应波长范围 1mm~1m。波长介于红外频段和无线电波之间, 可与很多对地观测的目标尺寸相比拟。现在常用的微波频段可分为如 Ka、K、Ku、X、C、S、L、P 等波段, 波长依次减小, 如图 1-1 所示。

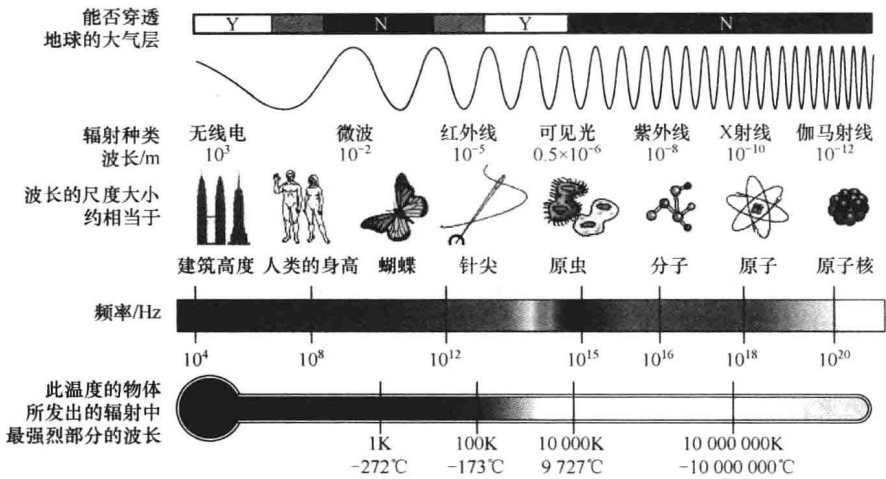


图 1-1 电磁波谱图 (来自于互联网)

微波遥感按探测类型的不同可以分为有源遥感和无源遥感。

在微波有源遥感方式下,传感器接收的信号是传感器本身发射的信号经过目标物的反射或散射后返回的信号,也可称为主动微波遥感。所接收的信号通常包含幅度和相位信息,因此可以利用探测到的幅度和相位信息获取地表物理参数。通常我们所接触的微波有源遥感系统有真实孔径雷达(Real Aperture Radar, RAR),合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、微波散射计(Microwave scatterometer)、微波高度计(Microwave altimeter)等。在微波有源遥感应用中经常会用到合成孔径雷达和微波散射计等。

在微波无源遥感方式下,传感器(微波辐射计 Microwave radiometer)只接收来自目标物的发射和辐射信号而不主动发射信号,也可称为被动微波遥感。微波无源遥感器件通常体积小、重量轻,具有很好的隐蔽性(只接收不发射),成本也较低。由于微波无源遥感接收到的数据是目标的亮温信息,具有极高的温度分辨率,所以可以通过分析亮温揭示出目标物的热特性。但是目标亮温信息并不容易理解,需要借助复杂的物理模型还原目标的真实情况。然而随着微波技术以及遥感机理模型的发展和完善,微波无源遥感越来越被人们所重视。

按工作方式不同,微波遥感可以分成微波成像遥感和非成像遥感。

微波成像传感器可以将接收到的目标电磁辐射信号转换成(数字或者模拟)图像,主要有微波辐射计、侧视雷达和合成孔径侧视雷达。微波非成像传感器接收的目标电磁辐射信号不能形成图像,而是得到包含目标物特性的数据产品,如微波散射计和雷达高度计等。

除此之外,根据遥感平台的不同,微波遥感可以分为机载微波遥感和星载微波遥感,其中星载微波遥感仪器多用在対地观测以及海洋遥感遥测方面,并已经取得了巨大的社会效益和经济效益。

1.2 微波遥感的发展过程

国际上微波遥感发展的历史已有 50 余年,在这 50 余年里,随着航天技术、电子技术和信息技术的发展,微波遥感技术,特别是星载微波遥感技术都得到了迅速的发展,已成为对地观测和空间探测的重要手段。随着相关理论及技术的发展,微波遥感技术及其应用已形成

较完整的技术和理论体系, 成为一个重要的科学技术领域。微波遥感的需求越来越广泛, 它带动了一些前沿科技的发展, 产生了重大的社会效益和经济效益。

1.2.1 国内发展

我国的遥感事业起步并不算晚, 于 20 世纪 70 年代末、80 年代初已经形成规模, 基本上与我国国民经济的改革开放同步发展。在短短 20 年间我国的遥感事业从小到大, 从遥感技术的引进、跟踪、吸收到现在的技术和人才输出, 实现了跳跃式发展, 在国际上占据了一席之地, 发挥着重要的作用^[2]。

在国家的科技攻关计划中, 一直将微波遥感列为重点研究领域。特别是经过“七五”国家攻关计划后, 国内科学家们在硬件方面已研制成功了合成孔径雷达、真实孔径雷达、微波散射计等主动式微波传感器和多种频率的微波辐射计。在“八五”期间又研制出了机载微波高度计。除研制出高分辨率的高度计外, 我国从 20 世纪 80 年代起还开始进行了扫描型海陆兼容高度计(即合成孔径成像高度计)的预研工作, 在一段时间研究的基础上, 提出了多模态综合功能微波传感器的物理思想, 经多年的概念性研究形成了完整的系统方案, 并已于 20 世纪 90 年代初转入工程样机研制阶段, 目前已完成初样研制。除此之外, 我国还抓紧进行星载合成孔径雷达和星载微波成像仪的研制工作。从频段覆盖上看, 在 X 波段上已形成了各种类型传感器硬件组合, 辐射计的频段已覆盖由 L 波段到 W 波段的频率区间。

在硬件研制的同时, 我国还注重微波遥感探测基础研究, 获得了大量真实地物散射、辐射特性数据, 建立了一定规模的特征库。基于此特征库研究了地物微波特征和介电特性等。对于不同应用领域, 建立了相应的分析和理论模型, 开展了不同领域的实际应用研究, 如海洋、大气、地质、农林等方面。近年来, 我国在利用微波遥感对突发性灾害进行实时监测方面取得了较明显的成果, 获得了较大的社会效益和经济效益^[3]。

合成孔径雷达是一种二维微波遥感成像雷达, 能够实现全天候、远距离、高分辨率成像, 自动目标识别、先进的数字处理能力等特点也成为其拥有广泛用途的原因。20 世纪 70 年代中期, 中国科学院电子学研究所率先开展了对 SAR 技术的研究, 1979 年研制成功了机载 SAR 原理样机, 获得我国第一批雷达图像。直至 1994 年完成了“机载实时成像器”863 项目, 系统吞吐量在载机最大飞行速度时达到 1 帧/3min, 每帧图像 35km。自“八五”、“九五”以来, 根据国家的迫切需要和国际上 SAR 技术发展趋势, 我国安排了雷达及其 SAR 成像处理技术相配套的工程任务(其中包括机载高分辨率雷达系统), 部署了 SAR 定标技术。近年来, 在比较成熟的单基 SAR 研究基础上, 我国科学家们又完成了非同步条件下的双基 SAR 成像, 此项技术已达到国际先进水平, 其中双基 SAR 非同步采集与处理技术为国际首创。

以此为开端, 我国相继立项启动了风云三号、海洋二号、探月工程等加载各种性能的微波传感器的轨道飞行任务^[4]。其中“风云三号”配置的有效载荷多(装载有可见光、红外扫描辐射计、红外分光计、微波温度计、微波湿度计、中分辨率光谱成像仪、微波成像仪、紫外臭氧总量探测仪、紫外臭氧垂直探测仪、地球辐射探测仪、太阳辐射监测仪和空间环境监测仪等 11 台有效载荷), 研制起点高, 技术难度大, 卫星总体性能将接近甚至达到欧洲正在研制的 METOP 和美国即将研制的 NPP 极轨气象卫星水平。它是新一代极轨卫星, 其主要特点有: 第一, 能够实现对大气性能的三维探测, 卫星上由于加载有先进的微波探测仪器和红外垂直探测仪, 不仅可以获取云层和大气的表面特性, 还可以了解大气温度、湿度的垂直分

布结构,这对天气预报特别是对数值天气预报有十分关键的作用;第二,能实现高分辨率全球观测,对全球气候和自然灾害监测有重要价值,风云三号卫星有很强的星上存储能力,可以存储观测到全球数据,同时,我国气象局已经和瑞典进行合作,在北极地区建立了数据接收业务,可以获取全球观测资料,并传输到北京;第三,实现了全天候和全天时观测工作,风云三号卫星不受白天和黑夜的限制,也不受各种天气状况的影响,可以在各种条件下工作,提供 24h 的观测服务,这对遥感科技工作而言,是一个极大的改进。

在海洋探测方面,由于其对我们赖以生存的地球产生不容忽视的影响,对海洋遥感技术的研究和海洋测量也显得尤为重要。现在国际上主要使用微波散射计来获取海洋信息,它属于主动雷达系统,其原理是,不同风速下引起海面粗糙度变化,对雷达后向散射系数的不同响应以及多角度观测间接地反演海表风场信息。此外,散射计也可用于土壤含水量反演,植被覆盖和海冰覆盖率变化监测。与国外相比^[2],国内在散射计研究方面还存在一定差距,散射计研究也未在遥感界引起足够的关注。就传感器而言,我国第一个多模态微波遥感器(M³RS)于 2002 年 12 月,由神舟四号(SZ-4)送入太空。作为多模态微波遥感器载荷之一的散射计 CN/SCAT 的成功运行在我国散射计研究领域具有里程碑意义,CN/SCAT 采用了独特的笔形波束圆锥扫描体制,虽然获取的数据有限,但成功反演了海面风场,证明了其观测的有效性,为我国后继星载微波遥感器(海洋二号卫星)的研究和应用打下基础。

自 20 世纪 90 年代初,我国提高了对星载微波遥感器的重视程度,除 921 工程和气象卫星用微波遥感器研制外,在 863 航天领域立项微波遥感器前沿技术。2006 年中国遥感卫星一号的成功发射开启了我国航天微波遥感全模态工作模式,多模态微波遥感器上天,有力地促进了我国以微波遥感器为主要载荷的一系列应用卫星的发展。在随后的几年间,我们国家又相继发射了多颗遥感卫星,微波遥感技术已覆盖海洋、农业、气象等各个方面。

以上主要介绍了主动式的雷达观测手段,能够获得目标物的反射系数。而微波辐射计则是通过被动遥感方式来测量目标物的热辐射信息。因此,在某种程度上微波辐射图像能与雷达图像形成很好的互补。一般来说,在雷达图像中看到较暗的部分,在微波辐射图像中则很可能是亮的部分,反之亦然。例如,针对防雷达侦察而进行伪装的目标在微波辐射图像中往往是可见的。微波辐射计还可以多频、多极化、多视角获取多方位的目标信息。微波辐射计有多种类型,主要有全功率微波辐射计、Dicke 型微波辐射计、零平衡 Dicke 型微波辐射计、负反馈零平衡 Dicke 型微波辐射计、双参考温度自动增益控制微波辐射计、Graham 型微波辐射计、数字增益自动补偿微波辐射计等^[5]。

微波辐射计的发展和其他微波遥感技术器件的发展一样,经历了从陆基(含地面与船载平台)、机载(含飞机、导弹、气球平台)到星载(含卫星、飞船、航天飞机平台),从试验到应用的发展过程。

2002 年 12 月,神舟四号飞船发射成功,其主载荷为多模态微波遥感系统,包括了多频段微波辐射计(Multi Frequency Microwave Radiometer, MFMR)、雷达高度计、雷达散射计和合成孔径雷达,实现了我国星载微波遥感器的突破。MFMR 是以功能性验证和应用试验为主要目的的空间对地观测微波遥感系统,主要用于探测土壤水分、降水、大气水汽含量、积雪分布、海面温度等。MFMR 采用了 5 个频段(频点包括 6.6GHz, 13.9GHz, 19.35GHz, 23.8GHz 和 37.0GHz)、双极化(其中 6.6GHz, 19.3GHz 和 37.0GHz 为双极化水平、垂直极化)、全功率辐射计体制,以及集中供电与统一数据管理设计方案,探测数据通过卫星上的数据管理单

元传送至卫星公用分析系统,并下传至地面接收分析系统。其中,13.9GHz 辐射计与雷达散射计共用一个接收机前端和天馈系统,采用圆锥扫描成像的方法;而 6.6GHz, 19.35GHz, 23.8GHz 和 37.0GHz 则采用多频共体馈源、公用偏置抛物面技术以及主反射器 40° 角斜入射和不扫描方案,这些频段共用孔径形成多频段同轴辐射,偏置抛物面将辐射流信号聚焦到馈源口径上,再通过波导器件将不同频率、不同极化的信号分开,最后馈入各自响应频段的接收机^[6]。

风云三号卫星装载有 3 个微波辐射计,分别为微波温度计 4 通道、微波湿度计 5 通道、微波成像仪 10 通道。微波温度计的探测任务主要是全天候探测大气温度垂直分布;微波湿度计全天候探测大气湿度垂直分布、水汽含量、云中液态水含量、降水等;微波成像仪全天候探测全球降水、全球云的液态水含量和云水相态、全球植被、土壤湿度和海冰覆盖。

2007 年,我国发射的“嫦娥一号”月球探测卫星上搭载的有效载荷包括微波探测仪分系统、空间环境探测分系统、有效载荷数据管理分系统等。微波探测仪分系统由 3.0GHz、7.8GHz、19.3GHz 和 37.0GHz 共 4 个频段的微波辐射计组成,主要用于对月壤的厚度进行估计和评测,这也是国际上首次采用被动微波遥感手段对月表进行探测。

另一方面,微波辐射计所接收的电磁信号是不包含相位信息的随机噪声信号,所以微波辐射计不能像 SAR 那样通过对不同位置上接收的信号进行相干分析以实现孔径综合,提高空间分辨率。因此,空间分辨率低成为制约微波无源遥感应用发展的主要因素,因此提高空间分辨率也成为微波无源遥感技术研究和发展的主要方向之一。

干涉式综合孔径成像的发展成为提高星载微波辐射计空间分辨率的有效技术手段。国内对干涉式综合孔径成像技术的研究工作起步于 20 世纪 90 年代中期。1999~2001 年期间,中科院空间中心国家 863 计划微波遥感技术实验室在 863 计划的支持下研制了一台 6 单元、4° 角分辨率的 C 波段一维综合孔径微波辐射计样机,并于 2001 年 4 月机载校飞成功。在接下来的三年中,在 863 计划主题的支持下,空间中心研制了一台 8 单元,2° 角分辨率的 X 波段一维综合孔径微波辐射计,并于 2004 年 4 月通过校飞试验成功获取了高空间分辨率的机载微波辐射图像^[7]。通过这两台设备的研制,我们已经基本掌握了干涉式综合孔径微波成像的相关关键技术。

全极化参量微波辐射计也是微波无源遥感技术的新发展,它的一个重要应用是用于海面风场矢量的微波遥感测量。将微波辐射全极化参量用于目标分类和识别,尚需要进行大量的理论和基础试验研究,然而根据极化参量在雷达目标探测、分类和识别中的成功应用可以预见,全极化参量微波辐射计的出现必将为微波无源遥感开辟新的应用领域。

我国政府十分重视包括微波遥感在内的遥感技术的发展。在国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)11 个国民经济和社会发展重点领域及 68 项优先主题中,与遥感技术发展有密切关系的占了相当大的比重。在重点领域及优先主题中,与遥感有关或遥感可以发挥重要作用的几乎涉及全部领域和主题,其中关系最为紧密的有能源、水和矿产资源、环境、农业、交通运输业、信息产业及现代服务业、城镇化与城市发展、公共安全和国防。这说明我国政府十分重视发展包括微波遥感在内的遥感技术,今后十几年微波遥感的发展将处于最好时机。

目前我国微波遥感的发展仍处于研究和部分应用阶段,在有些应用中已初见成效;然而在仪器种类、性能指标等方面有待改进。在地物微波谱特性方面研究,电磁波与地物相互作用及波在非均匀介质中传播,微波遥感数据定标、校准处理,以及基于微波遥感数据的各种

应用研究有关理论模型的建立等方面尚需进行大量的、深入的研究工作。

1.2.2 国外发展

进入 21 世纪, 全球面临着资源短缺、自然灾害、全球变暖、海平面上升等关系着人类生存的重大问题。为了更好地掌握地球动态, 发达国家纷纷把发展新一代微波遥感器列入空间对地观测计划中。微波遥感的发展已经经历了 50 余年, 并且在理论和技术上又具备了一定的积累, 基本上已经形成了一个较完整的技术科学体系。在气象研究、海洋研究和一些陆地及国家安全应用中, 微波遥感已经成为主导手段。在已发射的各种地球轨道卫星和深空探测器中, 近一半的平台上载有微波遥感探测设备。

在气象方面, 1960 年 4 月, 世界上首颗气象卫星 (TIROS-1) 在美国卡纳维拉尔角发射升空, 开启了气象预测的新维度。TIROS-1 是一个极轨运行卫星, 重 270lb^{\ominus} , 携带有两台摄像机和两台录像机。此后, 美国国家航空航天局 (NASA) 一共发射了 10 颗 TIROS 卫星。在整个 20 世纪 60 年代, 由于遥感技术的不断发展和创新, TIROS 系列卫星从搭载摄像机这样简单的成像器件发展到微波成像仪, 不仅空间分辨率大大提高, 而且实时观测能力也有了很大进步。到 1965 年, 气象学家将 450 幅 TIROS 图像拼接成首张全球视野的世界气候图。同 TIROS 功能一样, NASA 于 1975 年发射的首颗地球静止轨道运行环境卫星 (GOES) 进入距地球 35 887km 的太空。它能与地球的旋转同步, 并与其他极轨运行卫星一起, 为美国气象预测提供了更强大的工具。

在海洋遥感方面^[8], 1978 年 NASA 发射的海洋卫星上搭载的 SASS 微波散射计是具有 4 根天线的扇形波束散射计, 双极化, 4 个波束分别沿 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 方位角指向卫星轨迹, 入射角的变化范围为 $25^\circ \sim 55^\circ$, 提供 500km 扫描刈幅, 50km 分辨率, 风速观测范围为 $4 \sim 26\text{m/s}$, 风速准确度为 2m/s , 重复观测周期为 3 天。

欧洲航天局 (ESA) 分别于 1991 年和 1995 年发射 ERS-1、ERS-2 两颗卫星, 其搭载的微波有源装置 (AMI) 都具有微波散射计模态。AMI 使用了 3 根扇形波束天线, VV 极化, 3 个波束的方位角分别为 45° 、 90° 、 135° , 前、后视波束入射角变化范围为 $22^\circ \sim 59^\circ$, 中间波束入射角变化范围为 $18^\circ \sim 51^\circ$, 扫描刈幅为 500km, 分辨率为 50km。AMI 风速测量范围为 $4 \sim 24\text{m/s}$, 风速准确度为 2m/s , 风向准确度为 20° ^[9]。

NSCAT 是 NASA 继 SASS 后发射的星载微波散射计, 于 1996 年升空, 卫星平台为 ADEOS。与 SASS 相比, NSCAT 提高了空间分辨率, 解决了风向模糊问题。该微波散射计的每一边都采用 3 根扇形波束天线 (中间天线具有双极化), 分别在 45° 、 115° 、 135° 3 个方位角向海表 (地表) 发射 8 个波束, 前、后视波束采用 VV 极化, 入射角处于 $22^\circ \sim 63^\circ$ 之间, 中间波束采用双极化, 入射角处于 $18^\circ \sim 51^\circ$ 之间。NSCAT 以 600km 的扫描刈幅, 每天为 77% 的全球海洋覆盖面积提供空间分辨率为 25km 的数据^[10]。

NASA 于 1999 年和 2003 年发射了两部 SeaWinds 微波散射计, 分别搭载于 QuickSCAT 和 ADEOS-2 卫星。SeaWinds 不同于以往任何微波散射计, 因为它采用的是笔形圆锥扫描天线, 双极化, 入射角减少到两个, 分别为 46° 和 54° , 提供 1 800km 的扫描刈幅, 每天可以覆盖全球海洋面积的 90%, 空间分辨率为 25km ^[11, 12]。作为迄今为止较先进的微波散射计系统,

[⊖] 1lb = 0.4536kg。

SeaWinds 已经为人类提供近 10 年的观测数据。

ESA 在经过多次推迟后, 终于于 2006 年 10 月将搭载 ASCAT 的 Metop-1 卫星送入太空, ESA 计划发射 3 颗 Metop 卫星。ASCAT 借鉴以往 AMI 散射计的研发经验, 因散射计左右两边都采用了 3 根扇形波束天线, 扫描刈幅增加到 1 100km, 入射角变化范围为 $25^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 分辨率为 $25\text{km}^{[13]}$, 其代表了欧洲散射计的最高水平。

现役在轨的散射计有采用笔形波束的 SeaWinds 和采用扇形波束的 ASCAT。与扇形波束散射计相比, 笔形波束散射计具有天线容易安装和搭载, 观测覆盖面积大, 克服了扇形波束散射计特有的星下点盲区等优点。同时由于入射角减少到两个, 使得散射计物理模式函数的构建得以简化^[11, 12]。因此, 我国“海洋二号”卫星散射计也采用笔形波束天线^[14]。

在国际微波遥感技术的发展中, 发展最为迅速和最有成效的遥感器之一就是合成孔径雷达 (SAR)。SAR 是 20 世纪 50 年代提出并研制成功的一种微波遥感设备, 它能不受光照和气候条件的限制, 实现全天时、全天候对地观测, 还可以透过地表和植被获取地表下信息。这些特点使它在各个领域的应用都具有独特的优势, 因此受到世界各国的高度重视和支持。

20 世纪 70 年代密歇根环境研究所 (ERMI) 和美国国家航空航天局喷气推进实验室 (JPL) 研制出 1.25GHz 和 9GHz 多极化合成孔径雷达。1978 年 6 月 27 日 JPL 发射了载有 SAR 的海洋卫星, 标志着合成孔径雷达已成功进入太空对地观测的新时代, 也标志着星载 SAR 由实验室研究向应用研究的关键转变。1981 年 11 月 12 日, NASA 在肯尼迪航天中心利用哥伦比亚号航天飞机将 SIR-A 送上太空, 该任务为期 3 天, 于 1981 年 11 月 14 日降落在位于加州的爱德华兹空军基地。SIR-A 是一部 HH 极化 L 波段合成孔径雷达。它对非洲撒哈拉沙漠中地下古河道进行的测绘引起巨大震动。它是构成 NASA (OSTA-1 空间和陆地科学实验舱) 的一个组成部分, 主要目的是作为地球探测的科学平台让人们更多地获取地表信息。

SIR-C/X-SAR 是在 SIR-A 和 SIR-B 基础上发展起来的, 于 1994 年 4 月由 NASA 利用航天飞机将其送上太空。SIR-C/X-SAR 引入了很多新技术, 是当时最先进的航天雷达系统, 这主要表现在: 其是第一部运行在地球同步轨道高度上的多波段成像雷达, 它共有 3 个波段, 由美国研制 L 和 C 波段 SAR, 德国、意大利研制 X 波段 SAR; 它还是第一部运行在地球同步轨道高度上的高分辨率, 全极化 (HH、HV、VH 和 VV) 成像的雷达 (X-SAR 只有 VV 极化); 由于采用相控阵天线, 其下视角和测绘带都可在大范围内改变。该系统今后将随航天飞机多次飞行, 主要用于环境监视和资源勘探等商业目的^[15]。

欧洲航天局 (ESA) 分别于 1991 年 7 月和 1995 年 4 月发射了地球遥感卫星 ERS-1 和 ERS-2, 其中的 SAR 系统采用了 C 波段, VV 极化。ERS 是性能比较好的系统, 其中的 ERS-2 接替已超过设计寿命 1 年多的 ERS-1 的工作, 并与 ERS-1 构成重复轨道干涉测量, 获取高精度地面高程数据。

加拿大的 Radarsat-1 于 1995 年 11 月发射成功, 是世界上第一颗商用雷达卫星。它虽然也是 C 波段, 单极化 (HH), 但采用了电扫描天线, 并具有多种工作模式。

特别值得指出的是, 美国的“长曲棍球” (Lacrosse) 军用雷达卫星, 在 1988~2005 年间已先后发射了 5 颗, 其分辨率已从最初的 1m 提高到 0.3m, 这在当时是分辨率最高的天基合成孔径雷达。

另外, 前苏联于 1991 年发射了“钻石 1” (Almaz-1) 雷达卫星, 日本于 1992 年发射了

JERS-1 雷达卫星。这两颗卫星虽然都有一定的故障或性能不佳,但均为后续的研究工作奠定了基础。日本于 2003 年以一箭双星方式成功发射了光学卫星和雷达卫星各一颗。接着 2005 年 12 月 13 日,日本发射了 L 波段的 ALOS (Advanced Land Observation Satellite) 雷达卫星。ALOS 具有扫描和条带两种模式,可获得多极化图像,它是 JERS-1 及先进地球观测卫星 (ADEOS) 的后继星。相控阵型 L 频段合成孔径雷达 (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar, PALSAR) 是 ALOS 卫星载有的 3 个遥感器之一, PALSAR 是一种主动式微波遥感器,它不受云层、天气和昼夜影响,可全天候对地观测性能,比 JERS-1 卫星所携带的 SAR 遥感器更优越。该遥感器具备高分辨率、扫描式合成孔径雷达 (ScanSAR)、不同极化方式的 3 种观测模式,从而能获取比普通 SAR 更宽的地面幅宽。

ESA 在 ERS 的基础上加以改进,于 2002 年发射了 Envisat 卫星,其星载雷达 ASAR 为 C 波段,多极化,多模式,采用分布式 T/R 组件及相控阵技术。目前,一些发达国家正在筹划和研制新的可长期进行观测的各种技术先进的雷达卫星。目前已经发射的 SAR 卫星包括:加拿大的 Radarsat-2,德国的 SAR-Lupe 和 TerraSAR 以及以色列的 TecSAR 等,都是技术性能更为先进的雷达卫星。美国正在发展的天基雷达计划是为美国空军实施的一项具有空间力量增强战略的计划。天基雷达计划是一个由 8~10 颗成像卫星组成的星座,星上的主要有效载荷是合成孔径雷达,且具有地面运动目标指示 (GMTI) 的功能。俄罗斯正在研制一颗名为“秃鹰 E” (Kondor-E) 的 S 波段小型雷达卫星。“秃鹰 E”卫星重量仅 800kg,由于采用了重量极轻的 6m 折叠式抛物面天线,有效载荷重仅有约 250kg,信号带宽 200MHz,分辨率约为 12m,卫星轨道为 800km 高的极地轨道。SAR-Lupe 项目是德国第一个专用成像侦察卫星项目。SAR-Lupe 项目由 5 颗卫星组成,该卫星的 SAR 成像仪有 2 种工作模式:条带成像 (Strip-Map) 模式和聚束成像 (Spotlight) 模式,分辨率高达 0.5m (相关媒体报道其分辨率低于 1m)。TerraSAR-X 是一颗商用雷达成像卫星,重 1 023kg,信号带宽 300MHz,聚束模式高分辨率图像产品的地面分辨率为 1.3m×1.3m,卫星设计寿命 5 年。德国航空航天中心最近还启动了对 TanDEM-X 雷达卫星的研究工作,这颗卫星是第二颗 TerraSAR-X 卫星,它与第一颗 TerraSAR-X 卫星在轨道上一前一后飞行,用来为德国军方提供数字高程模型。意大利将建的 COSMO-SkyMed 星座是一个低轨道、军民两用地球观测卫星星座,由 4 颗 X 波段工作的合成孔径雷达成像卫星组成。卫星重约 1 700kg,设计寿命 5 年,雷达工作在 X 波段 (9.6GHz),波长 3.1cm。加拿大 Radarsat-2 在几乎保留了 Radarsat-1 的所有优点的基础上采用了更先进的技术,功能更强大,如投入运行,将成为世界上最先进的商用 SAR 卫星。Radarsat-2 采用多极化工作模式,大大增加了可识别地物或目标的类别。根据采用的不同工作模式,可为用户提供 3~100m 分辨率雷达图像,相应的成像幅宽范围为 10~500km。以色列的 TecSAR 项目是一项雷达卫星上技术验证项目, TecSAR 卫星的有效载荷能以宽覆盖 (扫描 SAR) 模式、各种条带模式和若干聚束模式工作。

在微波有源遥感不断更新的过程中,微波无源遥感也在国际上得到越来越多的重视。自 1978 年第一台星载微波探测仪 (Microwave Sounding Unit, MSU) 投入业务运行以来,国外发射了许多装载有微波辐射计的各类遥感卫星,比较典型的有:美国 NOAA (诺阿) 系列和国防气象卫星 (DMSP) 系列气象卫星,日本先进微波辐射计卫星 (AMSR) 系列海洋卫星以及俄罗斯载有 MTVZA 辐射计的一系列对地观测卫星。

微波辐射计一直是美国 NOAA 系列气象卫星的主要有效载荷,发射了近 10 颗。1998 年,

新研制的先进微波探测单元 (Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU) 取代 MSU 成为 NOAA 气象卫星的微波遥感载荷。到目前为止, 载有 AMSU 的卫星已发射了 3 颗。MSU 有 4 个 50~60GHz 探测通道, 用于探测大气垂直温度分布, 扫描方式为垂直于飞行方向的圆周扫描 (以下简称圆周扫描)。AMSU 的观测频率为 23.8~183GHz, 主要用于大气垂直温度和湿度廓线的探测, 一共有 20 个探测通道。AMSU 有 A1、A2 和 B 等 3 个独立的模块, 使用 4 副天线进行接收, 扫描方式为圆周扫描。正在研制的 AMSU 的后续型号 ATMS 的观测频率也是 23.8~183GHz, 有 22 个探测通道, 并进行了一体化设计, 天线的集成度有所提高, 采用两副天线进行接收, 先采用频率选择表面技术进行初步频率分离, 再用双频馈源进行二次分离, 扫描方式也为圆周扫描。

美国国防气象卫星系列共发射了 6 颗装载有微波辐射计的卫星, 装载过的微波辐射计有 SSM/T-1、SSM/T-2 和 SSM/I 3 种。SSM/T-1 有频率为 50~60GHz 的 7 个探测通道, 用于探测大气垂直温度分布, 扫描方式为圆周扫描; SSM/T-2 有 5 个通道, 工作频率在 91~183GHz, 用于探测大气垂直湿度分布, 扫描方式为圆周扫描; SSM/I 有 7 个工作频率在 19~89GHz 的通道, 用于对地表的成像观测, 扫描方式为圆锥扫描。

SSMIS 是为美国国防气象卫星研制的新一代微波辐射计。SSMIS 有许多新的并且是独一无二的特性, 其中最为突出的就是它综合了 SSM/T-1、SSM/T-2 和 SSM/I 的功能, 并进行了一体化设计。SSMIS 已于 2003 年 10 月 18 日发射成功。它的观测频率为 19.3~183GHz, 有 24 个探测通道, 扫描方式为圆锥扫描。

日本 AMSR 系列微波辐射计中用于海洋观测的微波辐射计的种类较多, 主要用来测量海洋表面温度、表面风速、大气中水蒸气、云中含水量和降雨量等液态水含量、海冰年代和覆盖。AMSR 和 AMSR-E 都是多频率和双极化, 用于对地球进行整体观测。AMSR 的观测频率为 6.9~89GHz, 有 14 个观测通道, 主反射面直径达 2m, 可以提供较高的地面分辨率, 扫描方式为圆锥扫描。AMSR-E 的观测频率为 6.9~89GHz, 有 12 个观测通道, 与 AMSR 相比少了在 50GHz 附近的通道, 天线主反射面直径为 1.6m, 扫描方式为圆锥扫描。该设备的主要作用是为了获得理解地球上水和能量的循环机理, 和与水相关的地球物理参数的全球性连续的记录。此外, 接近实时的包括应用在天气预报模型和渔业上的卫星数据, 将对许多活动十分有用。将两个辐射计混合应用增加了观测的几率。它同样提供了许多地球物理参数每天的变化信息, 并且具有观测迅速变化的天气现象的能力。

由于综合孔径辐射计在稀疏天线阵列和无需机械扫描即可成像方面的优势, 从 20 世纪 80 年代末 ESTAR 研制成功开始, 美国和欧洲的几个微波遥感主要研制单位就开始了大量的探索性的工作。

ESTAR 是世界上第一台采用干涉式综合孔径技术的机载微波辐射计。ESTAR 工作在 L 波段 (1.4GHz), 是一个 5 单元 7 基线的一维系统, 角分辨率约 8° 。该系统自 20 世纪 80 年代末研制成功以后, 在 90 年代利用 NASA 的 P-3 猎户座巡航机做了大量的机载成像及应用试验, 其中包括以测量土壤湿度为主要目的的 Washita92、Washita94、SGP97 和 SCP99 等实验^[16~18]; 以测量海水含盐度为主的 Delaware Coastal Current Experiment 和 Gulf Stream Experiment 等实验^[19]。

MIRAS 的概念 1994 年由欧洲航天局提出, 并于 1998 年被确定为欧洲航天局 SMOS 计划的主载荷。MIRAS 是典型的二维综合孔径微波辐射计, 也工作在 L 波段 (1.4GHz), 采用

Y形天线阵列稀疏方案,是目前复杂程度最高的综合孔径辐射计系统。

GeoSTAR是2002年NASA的IIP项目资助的一个地球静止轨道星载毫米波综合孔径辐射计计划。GeoSTAR是在毫米波段(50GHz)采用二维综合孔径技术,面向气象应用,实现高空间分辨率的全天候的大气温度及湿度探测。

近年来,对地球静止轨道(GEO)毫米波综合孔径辐射计的研究也渐渐成为研究的热点,除了前面所提到的GeoSTAR,欧洲航天局也开展了类似的前期预研工作。目前在地球静止轨道卫星对大气只有红外的探测手段,而红外传感器在多云的天气情况下无法获取有效的观测数据。因此,利用干涉式综合孔径技术填补目前在地球静止轨道上微波大气探测手段的空白变得非常有吸引力。除了上面所提到的遥感领域的应用,干涉式综合孔径技术在其他某些领域也同样获得了很好的应用。如在毫米/亚毫米波段,采用干涉式综合孔径技术提高被动成像的分辨率之后,可以利用毫米波的穿透性以及被动成像方式的隐匿性及对人体安全等特性,进行一些传统的由主动雷达、红外光学或X射线探测手段所完成的应用,如进行军事侦察或安检、导航、医疗方面的成像应用^[20]。

2011年1月初,从德国RPG公司又传来喜讯,对微波辐射计的研制又有两大改进:公司研发和技术人员成功开发了可调变容二极管波导滤波器技术;同时还优化了微波辐射计的扫描镜,进一步提高了仪器垂直分辨率。

纵观国内外40年来微波遥感技术的发展,对于人类赖以生存的地球是息息相关的,加之航天微波观测技术也取得了很大的发展,带动了一系列科技领域的发展,其频率已经扩展到亚毫米波段,其航天运行模式中的分布式空间系统,特别是编队飞行技术将成为重要的体制。空间微波观测在未来也将发挥巨大的作用。

1.3 微波遥感的探测优势

遥感是凭借电磁波不接触目标物体而获得状态信息的,因而电磁波与目标物之间的相互作用规律变得至关重要。遥感技术发展至今,其中可见光和红外波段遥感技术已经非常成熟,特别是在摄影成像方面发挥了重要作用,但是由于其波长长,在碰到尺寸很小的物体时容易被反射而受到阻碍,另一方面,可见光、红外遥感技术只能获得目标物相应频段的光谱信息,这些远远不能代表物体的所有状态信息。因此,微波遥感应运而生。前面我们已经介绍过,微波频段频率从300MHz~300GHz,范围大,对应波长从1mm~1m,可与很多对地观测的物体尺寸相比拟。

1. 能够全天候、全天时工作

可见光遥感只能在白天工作,红外遥感虽然能在夜间工作,但无法穿透云雾获得地表信息。因为电磁波通过大气层时,碰撞到大气粒子后将发生散射,其能量要衰减。由于微波的波长较长,根据瑞利散射原理,散射的强度与 λ^{-4} 成正比,可知微波的散射比红外要小得多,因此在大气中衰减很小,特别对云层、雨区的穿透能力很强,不受烟、雾、云、雨的限制,实现全天候、全天时的特点。地球上将近一半的地区经常被云层覆盖,尤其在占地球表面71%的海洋上,气候变化很大,常被云层遮蔽。在这种情况下,唯有微波遥感才能担此大任。

2. 对地物有一定的穿透能力

当电磁波照射到目标体表面时,通常会有一部分电磁波能量进入目标体内部,这就是电

微波的穿透性。将电磁波振幅衰减到 $1/e$ 倍时的穿透深度定义为电磁波的穿透深度。对于相同的目标体,选择不同的微波波长,其穿透深度差别很大,例如波长较长的微波,可穿透冰层深度上百米甚至是数公里,而波长较短的微波,其穿透冰层深度往往要低一些,这主要是由于目标体内的介质不纯,导致波长较短的微波产生的散射较大,因此电磁波衰减的很快导致其穿透能力要明显弱一些。对于不同的目标体,相同波长的微波穿透目标体的深度也不同,对于电导率小的目标体,微波穿透深度较大,而对于电导率较大的目标体,微波穿透深度较小,例如微波在电导率较大的金属良导体中的穿透深度通常远远低于 1mm 。此外,由于微波波段范围很大,还可以利用微波遥感对有遮掩的军事目标、地下军事设施和矿藏等进行勘测。

3. 对某些地物具有特殊的波谱特征

由于被测目标表面的辐射特性和散射特性与目标参数和系统参数有关,使得微波遥感能提供其他波段遥感所不能提供的某些信息,从而更好地识别目标。许多地物之间在微波波段的辐射和散射能力差别很大,因此可以比较容易地分辨出目标物的特性。另外,微波波段的最长与最短工作波长之比(倍频程)大于实际使用的最长红外波长与最短可见波长之比,也使微波遥感能得到更多信息,使对地面目标的识别更容易。在无法用可见光和红外遥感识别地物时,可选择用微波的“色调”作为地面性质差异的判据。

微波在介质内传播时会发生体散射,其特性主要取决于介质的不均匀性和电磁波的穿透深度。散射强度正比于介质的平均介电常数,散射的方向取决于分界面的粗糙度、介电常数的不连续性相对波长不均匀性的几何尺寸。地球上的植被、土壤和积雪等都不是均匀介质,是产生显著体散射现象的介质。因此利用微波遥感对这些介质的特性进行探测,比可见光、红外遥感更有利。

4. 多极化

除了波长特性外(不同频率),微波还表现出不同的极化状态。对微波遥感而言,不同的极化状态,所探测的目标体的特征也不尽相同。极化表示空间某点电磁波电场矢量随时间变化的振动方向,可以表示为 $\vec{E} = E_v \hat{v} + E_h \hat{h}$ 电磁波的极化也可以用 Stokes 矢量表示,它包含垂直极化分量 $I_v = \frac{|E_v|^2}{\eta}$ 、水平极化分量 $I_h = \frac{|E_h|^2}{\eta}$ 、两个正交极化分量复相关的实部 $U = \frac{2}{\eta} \text{Re}\langle E_v, E_h^* \rangle$ 和虚部 $Q = \frac{2}{\eta} \text{Im}\langle E_v, E_h^* \rangle$ 。利用不同极化电磁波照射目标后,截获具有不同极化方式的回波,通过研究回波性质可以得到更多的信息量。在微波有源遥感如雷达目标探测中,通常可引入后向散射矩阵、Mueller 矩阵以及协方差矩阵来表征目标回波相位和极化特征。在微波无源遥感如微波辐射计探测中,通常可以利用 Stokes 参量中的不同极化分量来表征目标的热辐射的极化特性。

5. 探测准确度高

微波有源遥感(主动微波遥感)不仅可以记录电磁波振幅信息,而且可以记录电磁波相位信息,由数次同侧观测得到的数据可以计算出针对地面上每一点的相位差,进而计算出这一点的高程,其准确度可达米级,并且微波对海水非常敏感,所以微波很适合海面动态情况(海浪、海面风等)观测。微波无源遥感如利用微波辐射计测量土壤温度和海水盐度,也可以达到较高的精度,从而避免了大量人力、物力和财力的消耗。