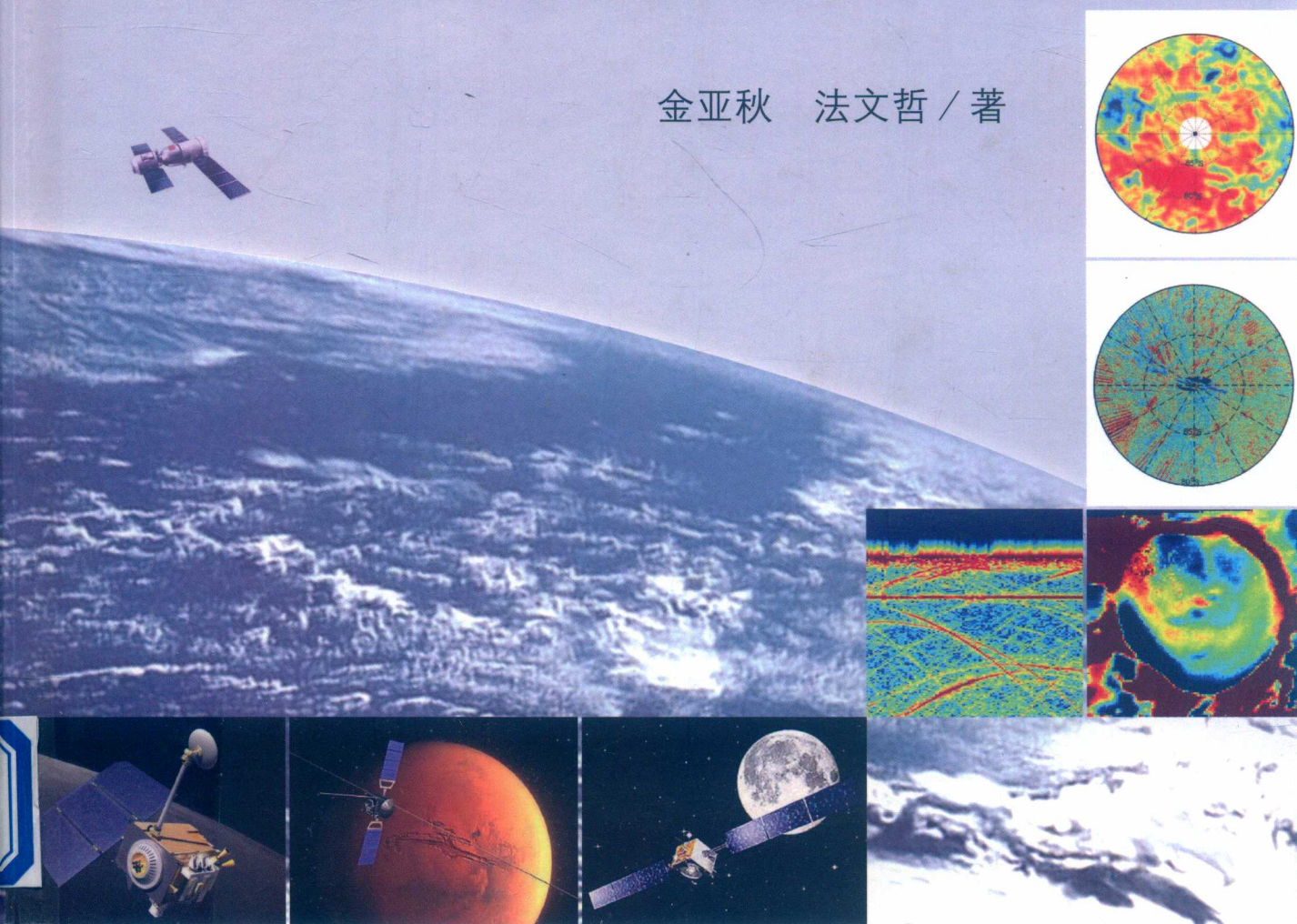


空间微波遥感研究与应用丛书

丛书主编 姜景山 吴一戎 金亚秋

行星微波遥感理论 方法与应用

金亚秋 法文哲 / 著



 科学出版社

空间微波遥感研究与应用丛书

行星微波遥感理论方法与应用

金亚秋 法文哲 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

“行星微波遥感”研究以星载微波遥感手段,探测、感知与反演获取月球、火星、彗星、小行星等天体的物理特征信息。本书总结了作者近十年来在行星微波遥感研究的研究成果。全书共有 15 章。第 1~2 章介绍微波散射辐射传输的遥感理论方法基础,概述微波遥感行星的基本物理特征。第 3~7 章以中国“嫦娥探月”计划为背景,讨论被动微波月球遥感,包括多通道微波辐射亮度温度的分层介质辐射传输理论建模、数值模拟、数据处理、物理温度与月壤厚度的反演、氦 3 含量估算、红外与微波辐射信息融合、毫米波辐射定标等。第 8~13 章讨论高频雷达探测仪和合成孔径雷达的主动微波遥感,包括月球两极永久阴影区水冰的雷达探测、月球与火星分层介质雷达探测模拟、分层介电常数和厚度参数的反演、合成孔径雷达月表面散射成像、小行星非均匀结构逆散射数值模拟与反演等。第 14 章介绍行星大气遥感,以及非均匀场景辐射反演。最后,第 15 章介绍雷达探测仪回波模拟软件。

本书适合空间遥感、空间科学等有关的科技工作者,以及高等院校相关专业师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

行星微波遥感理论方法与应用 / 金亚秋, 法文哲著. —北京: 科学出版社, 2019. 11

(空间微波遥感研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-063045-2

I. ①行… II. ①金… ②法… III. 微波遥感—应用—行星—测绘—研究 IV. ①V11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 245599 号

责任编辑: 彭胜潮 赵 晶 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 26 1/2

字数: 628 000

定价: 218.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《空间微波遥感研究与应用丛书》

编 委 会

主 编 姜景山 吴一戎 金亚秋

副主编 徐 丰 董晓龙 王 宇

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)

陈洪滨 杜 兰 杜 阳 法文哲

洪 文 谷松岩 李 新 廖桂生

林 琿 林明森 龙 腾 卢乃锰

仇晓兰 孙 洪 王 斌 杨 健

杨劲松 张 群

丛 书 序

空间遥感从光学影像开始,经过对水汽特别敏感的多光谱红外辐射遥感,发展到了全天时、全天候的微波被动与主动遥感。被动遥感获取电磁辐射值,主动遥感获取电磁回波。遥感数据与图像不仅是获得这些测量值,也是通过这些测量值,反演重构数据图像中内含的天地海目标多类、多尺度、多维度的特征信息,进而形成科学知识与应用,这就是“遥感——遥远感知”的实质含义。因此,空间遥感从各类星载遥感器的研制与运行到天地海目标精细定量信息的智能获取,是一个综合交叉的高科技领域。

在 20 世纪七八十年代,中国的微波遥感从最早的微波辐射计研制、雷达技术观测应用等开始,开展了大气与地表的微波遥感研究。1992 年作为“九五”规划之一,我国第一个具有微波遥感能力的风云气象卫星三号 A 星开始前期预研,多通道微波被动遥感信息获取的基础研究也已经开始。当时,我们与美国早先已运行的星载微波遥感差距大概是 30 年。

自 20 世纪“863”高技术计划开始,合成孔径雷达的微波主动遥感技术调研和研制开始启动。

自 2000 年之后,中国空间遥感技术得到了十分迅速的发展。中国的风云气象卫星、海洋遥感卫星、环境遥感卫星等微波遥感技术相继发展,覆盖了可见光、红外、微波多个频段通道,包括星载高光谱成像仪、微波辐射计、散射计、高度计、高分辨率合成孔径成像雷达等被动与主动遥感星载有效载荷。空间微波遥感信息获取与处理的基础研究和业务应用得到了迅速发展,在国际上已占据了十分显著的地位。

现在,我国已有了相当大规模的航天遥感计划,包括气象、海洋、资源、环境与减灾、军事侦察、测绘导航、行星探测等空间遥感应用。

我国气象与海洋卫星近期将包括星载新型降水测量与风场测量雷达、新型多通道微波辐射计等多种主被动新一代微波遥感载荷,具有更为精细通道与精细时空分辨率,多计划综合连续地获取大气、海洋及自然灾害监测、大气水圈动力过程等遥感数据信息,以及全球变化的多维遥感信息。

中国高分辨率米级与亚米级多极化多模式合成孔径成像雷达 SAR 也在相当迅速地发展,在一些主要的技术指标上日益接近国际先进水平。干涉、多星、宽幅、全极化、高分辨率 SAR 都在立项发展中。

我国正在建成陆地、海洋、大气三大卫星系列,实现多种观测技术优化组合的高效全球观测和数据信息获取能力。空间微波遥感信息获取与处理的基础理论与应用方法也得到了全面的发展,逐步占据了世界先进行列。

如果说,21 世纪前十多年中国的遥感技术正在追赶世界先进水平,那么正在到来的二三十年将是与世界先进水平全面的“平跑与领跑”研究的开始。

为了及时总结我国在空间微波遥感领域的研究成果,促进我国科技工作者在该领域研究与应用水平的不断提高,我们编撰了《空间微波遥感研究与应用丛书》。可喜的是,丛书的大部分作者都是在近十多年里涌现出来的中国青年学者,取得了很好的研究成果,值得总结与提高。

我们希望,这套丛书以高质量、高品位向国内外遥感科技界展示与交流,百尺竿头,更进一步,为伟大的中国梦的实现贡献力量。

主编 姜景山 (中国工程院院士 中国科学院国家空间科学中心)
吴一戎 (中国科学院院士 中国科学院电子学研究所)
金亚秋 (中国科学院院士 复旦大学)

2017年6月10日

前 言

人类对于宇宙天体的科学探测一直具有极大的探索与研究热情,进入 21 世纪以来,新一轮的月球、火星等地外星球的科学研究计划相继进行。特别是,我国开展了“嫦娥”探月计划,其包括探月绕、落、回 3 个阶段,是我国在太阳行星系等宇宙天体科学探测的重大科学活动的开始,是 21 世纪中国太空科学的一个里程碑。

卫星技术的发展产生极大地促进了星载遥感技术的发展,20 世纪下半叶卫星技术在地球大气、海洋、陆地水文、目标监测等方面取得了重大的科学应用,它能使人类从太空在广大的空间与时间尺度上多维度地观测地球环境及其变化。全天时全天候多通道微波辐射观测与米级分辨率雷达成像技术已成为星载遥感最主要的前沿科学技术和气象、海洋、水文等地球环境业务应用技术。随着高分辨率多通道主被动微波遥感技术的发展,星载微波遥感定量精细信息科学研究为遥感应用展现了远大的前景。

当我们把目光从地球转向太空行星,类似的“行星遥感”科学问题产生了。我们提出,区分“行星探测”与“行星遥感”在于获取信息的层次不同,遥感更在于内涵信息的反演与感知,而不止于测量值的本身。因此,我们在提出行星与深空探测的科学研究目标时,更倾向于用“行星遥感”一词,包括月球、火星、彗星、小行星等天体的物理特征信息获取的遥感技术。

本书共 15 章,总结了作者近 10 年来在行星微波遥感领域的研究成果。

本书第 1~第 2 章作为基本知识准备,介绍了电磁波散射与辐射传输的空间微波遥感理论方法的基础知识,概述了在空间微波遥感中行星主要的物理特征。

本书第 3~第 7 章讨论被动微波月球遥感,主要以中国“嫦娥”探月计划为背景。

第 3 章讨论多通道微波辐射计遥感测量全月球表面微波辐射亮度温度,以“嫦娥一号”“嫦娥二号”(CE-1、CE-2)4 通道微波辐射计遥感测量全月球表面微波辐射亮度温度,讨论了分层介质辐射传输理论建模、数值模拟、数据处理与月壤厚度的反演,实现月壤中³He 含量的估算。

第 4 章以月球虹湾区域为例,用 CE 微波辐射亮度温度数据,结合以克莱门汀月球侦察轨道器(LRO)为代表的红外辐射探测,由热传导方程、反演月壤层温度廓线及其昼夜变化特征表现。

第 5 章以辐射传输理论建模与数值计算,比较了新生环形山表面物理温度的昼夜变化所表现出的异常分布,以分层辐射传输理论为基础,讨论了月食期间红外辐射“热点”与月夜微波辐射“冷点”的问题。

第 6 章以“嫦娥二号”微波辐射和克莱门汀红外辐射的数据验证,提出用月球赤道表面温度对风云气象地球同步卫星 FY-4M 毫米波频段的辐射亮度温度的热定标。

第 7 章讨论了月球随地球绕太阳公转时月球表面接收的太阳辐照不同,而特别在高纬度区域产生的物理温度季节性变化,用前几章的建模模拟计算,结合 Diviner 红外和“嫦娥二号”数据的验证。

本书第 8~第 13 章介绍主动微波遥感, 主要讨论雷达探测仪和合成孔径雷达对月球表面结构与成分、火星表层特征等的研究。

第 8 章以 Mini-RF SAR 雷达探测为依据, 讨论月球两极永久阴影区水冰存在与否的问题, 建立月球表面层面散射与石块体散射的理论建模和圆极化率数值计算, 对国际上一些似是而非的论点予以了订正。

第 9 章根据“嫦娥三号”着陆点月面的地形地貌及物理特征参数, 基于大尺度起伏粗糙面的 Kirchhoff 近似模型, 进行落月过程中设计多波束雷达回波的数值模拟与下降过程的测高与测速的数值分析。

第 10 章讨论合成孔径雷达对月球陨石坑分布的粗糙面极化散射成像仿真的数值模拟方法。

第 11 章讨论雷达探测仪对月球分层介质的探测原理, 推导了极化散射 Mueller 矩阵与数值仿真、数据验证, 以参数化模型和数值计算方法模拟了月球分层介质雷达探测仪的距离回波, 这一方法为后来的火星研究奠定了基础。

第 12 章讨论雷达探测仪对火星分层介质的探测。火星是离地球最近、与地球最相似的行星。根据国际上已经相继开展的欧洲太空局 (ESA) 火星快车的火星次表面电离层探测先进雷达 (MARSIS)、美国国家航空航天局 (NASA) 火星侦查轨道器浅表层雷达 (SHARAD), 以及中国将进行的火星 VHF、UHF 高频雷达探测, 提出了分层介质雷达探测模拟与分层介电常数和厚度参数反演方法、合成孔径雷达成像等研究。

第 13 章主要讨论围绕小行星运转的雷达观测, 提出矢量有限元边界积分和全差分方法, 对小行星非均匀结构的逆散射成像的数值模拟与非均匀介电结构特征反演进行分析, 也讨论了木卫二的雷达探测方法。

第 14 章介绍太阳系行星大气探测的一些概况, 讨论了非均匀场景辐射反演的方法。

第 15 章介绍了我们的雷达探测仪回波模拟软件, 它能为用户提供友好的参数化界面, 产生表面起伏的环形山地形, 计算雷达回波。

本书各章节内容均选自作者近 10 年来在行星微波遥感领域的研究成果。徐丰教授、叶红霞副教授分别负责第 13 章、第 9 章的研究工作; 复旦大学研究生柳钮涛、刘川、宫晓蕙、苏欢等, 北京大学蔡玉珍、刘甜甜、刘晓峰等参加了本书各章节内容的研究工作, 在此一并致谢。

我们相信, 随着太空科学技术的发展, 对于行星遥感信息感知及其科学知识的深化将提出更高的要求。未来多源多模式的行星与深空遥感探测技术、多维度遥感数据的精度与高时空分辨率、遥感目标物理化学特征参数的认识与准确的确定等, 将得到更进一步提高, 人类对行星与深空宇宙的科学认识也会有更深入的进展。在太空行星遥感探测的前景之下, 本书的出版是抛砖引玉的一个开头。

我们期望, 本书的出版能促进我国开展行星与深空探测科学任务和科学目标的研究。在中国空间遥感发展战略和对外星体探测中, 勾画遥感信息的研究, 实现从行星探测到行星遥感信息感知的科学任务的转化, 这将极大地促进行星遥感科学目标的实现, 丰富人类对于天体宇宙的认识。

目 录

丛书序

前言

第 1 章 行星微波遥感概述	1
1.1 微波遥感发展历史与前沿	1
1.2 行星微波遥感历史与现状	4
1.3 微波遥感基本理论	23
参考文献	37
第 2 章 行星表面基本物理特征	42
2.1 太阳系天体简介	42
2.2 表面地质过程	46
2.3 表层物质介电特性	52
2.4 表面构造形态	62
2.5 表面风化层特性	79
2.6 月壤层热物理基础	90
参考文献	98
第 3 章 月球表面微波热辐射遥感与月壤厚度反演	104
3.1 “嫦娥一号”“嫦娥二号”卫星微波辐射计简介	104
3.2 月球表面辐射亮度温度分布特征	106
3.3 月球表面微波热辐射建模	115
3.4 月壤厚度反演	124
3.5 月壤中 ^3He 含量定量估算	131
参考文献	140
第 4 章 月壤层物理温度分布反演	144
4.1 虹湾地区月壤物理温度反演	145
4.2 月球两极微波辐射亮度温度分布	157
4.3 月壤物理温度廓线分布	160
4.4 月壤层有效介电常数反演	168
参考文献	173
第 5 章 红外辐射热点与微波辐射冷点	176
5.1 不同类陨石坑的微波与红外热辐射	176
5.2 微波辐射冷点与红外辐射热点的辐射传输	181
5.3 IR 热点和 MW 冷点的数值模拟	187

参考文献	190
第 6 章 风云卫星毫米波月面辐射定标	192
6.1 月球表面物理温度及 Diviner 数据验证	193
6.2 赤道定标区域 37 GHz 辐射亮度温度与 CE-2 数据	196
6.3 FY-4M 毫米波热辐射定标仿真	199
参考文献	204
第 7 章 月球极区温度季节性变化数据验证	206
7.1 太阳入射角的实时变化的模型	206
7.2 Diviner IR 数据验证	209
7.3 CE-2 微波辐射亮度温度数据验证	218
参考文献	221
第 8 章 月球永久阴影区水冰的探测	223
8.1 KA-SPA 两层模型	224
8.2 月球 PSR 内部水冰反演	231
8.3 双向射线追踪的月球粗糙表面 CPR 仿真	237
参考文献	250
第 9 章 “嫦娥三号” 雷达测高测速设计模拟	252
9.1 雷达配置及相关参数	253
9.2 月球表面粗糙面的电磁散射建模与计算	256
9.3 雷达回波仿真与平台下降速度反演	259
参考文献	272
第 10 章 月球表面 SAR 成像模拟	273
10.1 非均匀起伏月球表面地形的模拟与剖分	273
10.2 SAR 回波计算与成像算法	280
10.3 表面 SAR 成像模拟	284
附录 A 球面波入射时三角面元积分因子 I_A 的推导	291
参考文献	293
第 11 章 月球次表层雷达探测	296
11.1 月壤层脉冲回波模拟	297
11.2 月球表面雷达探测仪回波数值模拟	307
附录 A KA 近似下表面与次表面散射场	323
参考文献	326
第 12 章 火星分层介质的雷达遥感	328
12.1 火星的雷达探测	330
12.2 火星表层雷达回波的数值模拟	332
12.3 火星表面介电常数反演	342
12.4 火星南极表面介电常数反演	348
12.5 火星分层结构的参数反演	351

12.6 火星表面季节性流体的雷达探测	360
参考文献	366
第 13 章 小行星的雷达探测	370
13.1 小行星的光学观测	370
13.2 非均匀小行星的 FE-BI 散射模拟	372
13.3 逆散射成像算法	376
13.4 ADMM 加速算法	378
13.5 仿真数据验证	382
13.6 FAST 对木卫二的雷达探测设计	386
参考文献	392
第 14 章 行星大气的遥感探测	394
14.1 太阳系内行星大气	394
14.2 非均匀场景热辐射反演	397
参考文献	401
第 15 章 雷达探测仪成像软件	402
15.1 雷达探测仪回波模拟软件介绍	402
15.2 程序文件	410
参考文献	411

第 1 章 行星微波遥感概述

星载微波遥感起源于 20 世纪 70 年代,由于微波能穿透云层植被,还可探测浅层地表,因此具有全天候、全天时的观测能力。随着空间分辨率的不断提高,微波遥感已成为空间遥感最前沿的技术之一,在对气象、海洋、地球水文等地球环境遥感监测等领域发挥着重大的作用。近年来,主被动微波遥感技术也已经被推广应用到月球、行星、小行星、彗星等太阳系天体的探测中,为认识太阳系天体的起源与演化提供了微波遥感蕴含的独特的物理信息。

本章首先介绍空间微波遥感的基本原理、发展历史、前沿趋势。通过对行星微波遥感技术进行了分类,并对太阳系天体探测中的主被动微波遥感探测历史与研究现状进行了系统性综述。最后,作为行星微波遥感的理论基础,重点讲述了与行星有关的微波遥感理论基础,主要包括粗糙面散射理论与微波矢量辐射传输理论。

1.1 微波遥感发展历史与前沿

空间遥感是指利用搭载在空间平台上的传感器,接收电磁波与目标物体相互作用的散射与辐射信息,以对目标物体进行远距离探测与信息感知的卫星探测技术。空间遥感可追溯到 20 世纪 60 年代,在经历了可见光摄影、热红外辐射探测之后,70 年代末发展到微波遥感 (Ulaby et al., 1986; 金亚秋, 2005)。与传统的可见光、红外遥感相比较,微波遥感具有全天候、全天时的工作能力,在复杂的气象条件和无太阳照射的条件下都能工作,能穿透云层,也能穿透植被,能探测浅层土壤和干燥地表下的目标,对于遥感目标的物理特性有独特的观测能力。

遥感通过波(电磁波、声波)与远距离目标的相互作用来获得遥感目标的各类特征信息。微波一般泛指频率在 300 MHz 到 300 GHz (波长 1 m 到 1 mm) 的电磁波。微波遥感可分为主动微波遥感与被动微波遥感两类。

主动微波遥感传感器主要是指雷达,根据工作模式和功能可以分为微波散射计、雷达高度计、侧视机载雷达 (side-looking airborne radar, SLAR)、气象雷达、合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR)、逆合成孔径雷达 (inverse SAR, ISAR)、干涉合成孔径雷达 (interferometric SAR, InSAR) 等。通过距离向脉冲压缩和方位向运动合成达到米级高分辨率的 SAR 成像技术是近 20 年空间遥感与对地观测技术最重要的进展之一。被动微波遥感传感器主要包括微波成像辐射计 (radiometer)、微波探测仪 (sounder) 等 (Ulaby et al., 2014)。

被动微波遥感不发射电磁波,只接收目标的热辐射,其观测量是微波热辐射的辐射亮度温度,主要与遥感目标的物理特征有关,如目标的介电常数、温度、湿度、形状、大小等。主动微波遥感的雷达发射电磁波,通过接收遥感目标反射、散射的回波来获取遥感目

标物理特征信息,如目标的介电特性、形状、大小、取向、种类等。电磁波的技术参数有幅度、频率、相位、极化、时延。由雷达回波特征参数可以反演获取与感知遥感目标的各类物理与几何特征信息。

主动微波雷达遥感系统按照工作模式与应用目的可以分为雷达高度计、微波散射计、合成孔径雷达等。前两者是非成像雷达,后者为成像雷达。雷达高度计是通过发射与接收电磁波信号之间的时延来测量卫星平台到地表之间距离的一种测距雷达,其采用的波长一般为 C、X、Ku、Ka 等波段的波长(频率分别为 5.4 GHz、9.6 GHz、13.6 GHz、26.5 GHz 左右)。雷达高度计主要用于海洋遥感中测量海面高度、有效波高、海面风速等,典型的雷达高度计有美国海洋卫星 SeaSat ALT (13.56 GHz),欧洲遥感卫星 ERS-1/2 RA (13.8 GHz)、环境卫星 Envisat RA-2 (13.575 GHz),法国航天局和美国国家航空航天局(NASA)合作的 TOPEX/Poseidon (5.3 GHz、13.6 GHz)、Jason-1/2 雷达高度计 (5.25 GHz、13.575 GHz) 等(Ulaby et al., 2014)。近年来,采用多普勒分辨技术、双天线配置的新型雷达高度计(如多普勒雷达高度计、干涉雷达高度计)能有更高的空间分辨率与测高精度,其也开始在海洋遥感中得到应用。微波散射计是用于精确测量目标雷达散射系数的雷达。微波散射计基于测量到的后向散射系数,来研究遥感目标的散射特性,通常采用多角度、多方向、多极化的观测方式,试图解决反演的不确定性问题。微波散射计在海洋遥感中主要用于测量海面风场等,典型的微波散射计有美国海洋卫星 SeaSat SASS (14.6 GHz, HH/VV 极化)、欧洲资源卫星 ERS-1/2 AMI (5.3 GHz, VV 极化)、日本先进地球观测系统 ADEOS NSCAT (14 GHz, HH/VV 极化)与 ADEOS II SeaWinds (13.4 GHz, HH/VV 极化)等(Ulaby et al., 2014)。中国在“海洋二号”中也开始有了微波高度计、微波散射计的遥感测量。

合成孔径雷达(SAR)在距离向和方位向分别使用脉冲压缩技术和多普勒分辨技术对遥感目标进行高分辨率成像观测,其在气象、海洋、农业、测绘、城市规划、灾害监测、目标识别等领域有着非常广泛的应用。早期的星载 SAR 采用单一频率、单极化,如 SeaSat SAR (1.275 GHz, HH 极化)、ERS-1/2 SAR (5.3 GHz, VV 极化)、日本地球资源卫星 JERS-1 SAR (1.275 GHz, HH 极化)等。1994 年 NASA 喷气推进实验室(JPL)进行了航天飞机 SIR-C/X-SAR 多通道(L、C、X 波段)全极化实验,开启了多波段、多模式、多极化 SAR 技术对地观测的序幕。之后,各航天大国都实施了星载 SAR 对地观测计划,如 2002 年欧洲太空局(ESA) Envisat-1 ASAR (Advanced SAR, 5.3 GHz, HH、VV 极化),1995 年、2007 年加拿大航天局的雷达卫星 Radarsat-1 SAR (5.3 GHz, HH 极化)、Radarsat-2 SAR (5.3 GHz, 全极化),日本的先进陆地观测卫星 ALOS 1.2 PALSAR (1.27 GHz, 全极化),2007 年德国宇航中心(DLR)的 TerraSAR-X (9.6 GHz, 全极化)和 TanDEM-X,2012 年中国的“环境一号”卫星 HJ-1C (3.2 GHz, VV 极化)等。近年来,用于目标高程重构的干涉合成孔径雷达(InSAR)、运动目标监测的逆合成孔径雷达(ISAR)、双站 SAR (bistatic SAR, BiSAR)、层析 SAR (TomoSAR)等也逐渐成为 SAR 技术发展的热点。

与主动微波雷达遥感相比,被动微波遥感空间分辨率低、覆盖范围广、重访周期短,可以长期提供稳定连续的观测数据源。按照工作方式,被动微波遥感系统可分为微波辐射计和微波探测器。微波辐射计一般以固定的观测角度对地表以圆锥扫描的方式进行观测,极化方式以双极化为主,频率一般选择在微波大气窗口附近,如 6.9 GHz、10.6 GHz、

18.7 GHz、22.2 GHz、36.5 GHz、85 GHz 等。微波辐射计通过测量大气与地表海面的微波热辐射,来反演大气温度廓线、大气水汽廓线、降水量与雨强、土壤湿度、地表温度、积雪厚度与雪水当量、海面温度与海水盐度、海面风速等。从20世纪70年代初起,典型的星载微波辐射计包括美国雨云卫星系列 Nimbus 5、Nimbus 6 单频段电扫描微波辐射计(electronic scanning microwave radiometer, ESMR)、Nimbus 7 的10通道双极化扫描多通道微波辐射计(scanning multichannel microwave radiometer, SMMR),1987年开始持续运行的美国防卫气象卫星 DMSP (F8-F16) 7通道特别微波辐射成像仪(special sensor microwave imager, SSM/I),1997年美国和日本的热带降雨测量任务 TRMM 的微波成像仪(TRMM microwave imager, TMI),2002年地球观测系统水卫星 EOSAqua 和先进地球观测卫星 ADEOSII 上的双极化10通道先进微波扫描辐射计(advanced microwave scanning radiometer-EOS, AMSR-E),以及2012年全球变化观测计划 GCOM-W1 上搭载的 AMSR-2 (金亚秋,2005; Ulaby et al., 2014)。

微波探测仪以垂直方式沿着航迹方向进行观测,其频率通常选择在大气水汽吸收峰 183 GHz 与氧气吸收峰 58 GHz、119 GHz 附近。由于频率选择在大气吸收峰附近,微波探测仪接收到的热辐射主要来自于大气,通常用于研究大气的温度与湿度廓线、水汽柱总量等。根据探测目的,微波探测仪也称为微波湿度计、微波温度计。从20世纪70年代开始,典型的星载微波探测仪包括 Nimbus 5 五通道雨云 E 微波谱仪(NEMS)、Nimbus 6 五通道扫描微波谱仪(SCAMS)、1979年 DMSP F04 五通道的微波温度传感器(special sensor microwave-temperature, SSM/T)与1991年 DMSP F-11 SSM/T-2,1998年 NOAA15 及 MetOp 等系列搭载的先进微波探测仪(advanced microwave sounding unit-A/B, AMSU-A/B),2011年和2017年美国 Soumi-NPP 和 NOAA-20 搭载的最新的(advanced technology microwave sounder, ATMS) (金亚秋,2005; Ulaby et al., 2014)。

我国微波遥感的气象卫星“风云三号”在1992年开始立项讨论,国家卫星气象中心组织专家工作组,在当时提出了多通道微波遥感大气与地表海洋的参数化理论建模与数据数值模拟(金亚秋,1992)。2002年,我国“神舟四号”进行了多模态微波遥感辐射计实验,包括微波辐射计、微波散射计、雷达高度计。2011年,我国“海洋二号”卫星上搭载了雷达高度计(5.25 GHz、13.58 GHz)、微波散射计(13.256 GHz, HH/VV 极化)、扫描微波辐射计(6.6 GHz、10.7 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、37 GHz,其中23.8 GHz V 极化,其余通道 H 与 V 极化)(Jin and Fa, 2010)。我国“风云三号” A/B 极轨气象卫星上搭载了微波成像辐射计(MWRI, 10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz、89 GHz, V/H 极化)、微波湿度计(MWHS, 150 GHz V/H 极化, 180 ± 1 GHz、 180 ± 3 GHz、 180 ± 7 GHz)、微波温度计(MWTS, 50.30 GHz、50.60 GHz、54.94 GHz、57.29 GHz, 4通道),在 FY-3C/D 星上分别增加了 57.29 GHz 和 118.75 GHz 附近的多频点观测通道(Dong et al., 2009; Jin et al., 2010)。我国后续的“风云四号”静止轨道气象卫星上也计划在世界上首次搭载微波探测仪,中心频率为 57.29 GHz、424.763 GHz,其以更高的时间分辨率对大气的温度与湿度信息进行观测。

经过50多年的发展,多源、多极化、多频率、多角度、多模式、多用途主被动微波遥感技术已经是空间遥感发展的最前沿的技术之一。由于微波遥感特有的全天候、全天时优势,其在陆地、海洋、大气遥感中得到了非常重要的应用,在气象预报、海洋预报、资

源调查、土地利用、环境监测、灾害预报、全球变化等领域中得到广泛的应用。同时,微波遥感也在国家安全、战场环境监测、军事目标识别、导弹制导与预警、电子对抗等军事领域得到了重要的应用(金亚秋, 2005)。

1.2 行星微波遥感历史与现状

对太阳系天体的探测,有助于了解太阳系的起源、演化与现状,能够为人类社会的发展提供新能源,并能长远地推动人类社会科学技术整体实力的发展。对太阳系天体的探测可追溯到 20 世纪 50 年代,这时卫星遥感还处于萌芽时期。1958~1976 年,美国和苏联展开了以月球探测为中心的空间科技竞赛,掀起了第一轮月球探测高潮。之后,美国、苏联、欧洲太空局等航天大国和组织相继开展了火星、水星、金星等行星探测计划。21 世纪初,世界各航天大国都制定并实施了月球、火星等探测计划,标志着新一轮深空探测高潮的到来。我国 2007 年 10 月 24 日成功发射“嫦娥一号”探月卫星,是我国空间科学的一个新的里程碑。目前,我国“嫦娥一号”“嫦娥二号”“嫦娥三号”探月工程已经顺利实施,探月三期工程、首次火星探测工程等也已立项,后续的月球、火星、小行星、木星、冰卫星探测计划也处于论证中。

对太阳系天体探测的方式一般包括地基天文观测、飞越观测、绕飞观测、样品采回分析、着陆探测。其中,地基观测、飞越观测、绕飞观测属于远距离观测,主要以遥感观测作为探测手段,与样品分析、着陆探测相比较,遥感技术可对天体表面大范围进行观测。以往世界各航天大国的深空探测计划以可见光、红外、 γ 射线、X 射线、中子谱仪等探测手段为主,由于受电磁波穿透深度的影响,这些遥感手段最多只能探测行星表面或浅表层(不超过 1 m 量级),无法给出表层以下的物理特征信息。在现有的认知范围内,太阳系大部分固体天体表面不存在液态水(地球除外),表面物质一般为低损耗介质,较低频率的电磁波可以穿透到表面以下数米到数百米深的次表层,由此可能获得表面尘土、土壤层等所覆盖的次表层结构等信息。因此,21 世纪初迅速发展的微波遥感技术被广泛应用到月球、火星、木星、小行星、彗星等天体的遥感探测中。

1.2.1 行星探测中的微波遥感传感器

雷达硬件一般包括发射机、发射/接收天线、接收机/数据处理系统。根据工作模式与探测目的,行星雷达遥感系统可分为地基雷达、星载 SAR、雷达探测器、探地雷达、干涉雷达、双站雷达等。雷达通过测量天体表面散射/反射的回波,或者进行成像观测,来获得天体的大小、形状、旋转、表面高程、表面粗糙度、介电常数、石块丰度、次表层结构,以及天体运动的距离与轨道等。行星被动微波遥感系统包括地基射电望远镜、微波成像辐射计、微波探测器。被动微波遥感通过测量天体表面与/或大气的热辐射,反演获取行星大气或天体表面物质物理温度、介电常数随深度变化等信息,其是了解行星表面温度场与物质热物理特性的一个有效手段。表 1.1 与表 1.2 分别给出了截至目前已有的太阳系行星雷达系统与被动微波遥感系统的性能参数与探测的科学目标。

表 1.1 行星雷达遥感探测计划

雷达类型	传感器	探测计划/实验室	时间	探测天体	频率	分辨率	科学目标
地基雷达	Haystack, Pleasanton, El Campo, Millstone Hill	MIT 林肯实验室	1940~1960 年	月球	7.89 GHz、8.33 GHz、380 MHz、430 GHz	—	月球与类地行星表面回波
	金石	加州理工喷气推进实验室	1958 年	月球、类地行星、小行星、冰卫星	8.6 GHz	5~10 km, ~1 km	月球与太阳系天体雷达回波与成像
	阿雷西博	康奈尔大学	1963 年 11 月 1 日	月球、类地行星、小行星、冰卫星	430 MHz、2.38 GHz	2~5 km, ~400 m, 20 m	月球与太阳系天体雷达回波与成像
	金星雷达制图仪	金星先驱者轨道器	1978 年 5 月 20 日	金星	1.757 GHz	7×23 km	金星表面高程、图像
合成孔径雷达	金星雷达	金星 15/16	1983 年 6 月 2 日/7 日	金星	3.75 GHz	1~2 km	金星表面高程、图像
	麦哲伦雷达	麦哲伦	1989 年 5 月 4 日	金星	2.385 GHz	150 m	金星表面高程、图像
	卡西尼雷达	卡西尼	1997 年 10 月 15 日	土星、土卫六	13.78 GHz	0.35~1.7 km	土卫六表面雷达影像与物理特性
	微型合成孔径雷达 (Mini-SAR)	印度月船-1	2008 年 10 月 22 日	月球	2.38 GHz	150 m	月球表面物理特性、极区水冰
行星探测仪	微型合成孔径雷达 (Mini-RF)	月球侦察轨道器 (LRO)	2009 年 6 月 18 日	月球	2.38 GHz、7.8 GHz	150 m, 30×15 m	月球表面物理特性、极区水冰
	阿波罗雷达探测仪实验	阿波罗 17	1972 年 12 月 7 日	月球	5 MHz、15 MHz、150 MHz	月球次表层结构；表面高程廓线；表面图像	
	月球雷达探测仪	日本月神 (Kaguya)	2007 年 9 月 14 日	月球	5 MHz	月球次表层结构；行星际辐射	
	火星次表层和电离层探测先进雷达 (MARSIS)	火星快车	2003 年 6 月 2 日	火星	1.8 MHz、3.0 MHz、4.0 MHz、5.0 MHz	5~10 km (顺轨), 15~30 km (交轨), 150 m (垂向)	火星浅表层水冰；火星次表层地质结构；表面特征；火星电离层特征
行星探测仪	浅表层雷达 (SHARAD)	火星勘测轨道飞行器 (MRO)	2005 年 8 月 12 日	火星	20 MHz	0.3~1 km (顺轨), 3~7 km (交轨), 15 m (垂向)	火星浅表层水冰；火星次表层地质结构；表面特征
	次表层探测雷达 (SSR)	中国首次火星探测轨道器	2020 年	火星	15 MHz、40 MHz	0.3~1 km (顺轨), 5~8 km (交轨), 15、7.5 m (垂向)	火星浅表层结构；次表层水冰；表面高程

续表

雷达类型	传感器	探测计划/实验室	时间	探测天体	频率	分辨率	科学目标
雷达探测仪	冰卫星探测雷达 (RIME)	木星冰卫星探测计划 (JUICE)	2022 年	木星二	9 MHz	0.3~1 km (顺轨), 1~10 km (交轨), 30~90 m (垂向)	木星二冰壳厚度, 冰壳结构
	欧罗巴海洋与浅表层探测雷达 (REASON)	Clipper	2020 s	木星二	9 MHz、60 MHz	15 m, 100 m	木星二冰壳厚度, 冰壳结构
	测月雷达	“嫦娥三号”	2013 年 12 月 2 日	月球	60 MHz、500 MHz	3.75 m, 0.3 m	月海北部次表层结构与月球表面介电特性
	测月雷达	“嫦娥四号”	2018 年 11 月	月球 (背面)	60 MHz、500 MHz	3.75 m, 0.3 m	月球背面南极艾肯盆地次表层结构与月球表面介电特性
探地雷达	月壤结构探测雷达	“嫦娥五号”	2019 年	月球	2 GHz	5 cm	样品采集区月壤结构
	火星次表层水冰沉积观测 (WISDOM)	ExoMars	2020 年	火星	0.5~300 GHz		着陆区次表层三维地质结构; 火星表面物质介电常数; 着陆区沉积岩特性
	斯坦福-阿波罗双站雷达	阿波罗 14, 15	1971 年 1 月 31 日 1971 年 8 月 7 日	月球	2.38 GHz 258.6 MHz	—	月球表面粗糙度; 月壤介电常数
	克莱门汀双站雷达	克莱门汀	1994 年 1 月 25 日	月球	2.38 GHz	5 km	月球南极水冰
双站雷达	微型合成孔径雷达-阿雷西博双站雷达	月球侦查轨道器	2013 年	月球	2.38 GHz	~100 m	月球表面双站散射特性, 月球极区水冰
	无线电波传输探测彗核实验 (CONSERT)	罗塞塔	2004 年 3 月 2 日 /2014 年 8 月 6 日	彗星 67P/楚留莫夫-格拉西门克	90 MHz	~3 cm	彗星 67P 内部结构, 介电常数
	火星快车-地球双站雷达	火星快车	2016 年 4~6 月	火星	8.3 GHz、2.3 GHz		火星表面粗糙度与介电常数
	Haystack 雷达		1972 年	月球	7.84 GH	1~2 km	月球表面高程
干涉雷达	金石雷达		1999 年	月球	2.38 GHz	~100 m	月球表面高程