



国家重点基础研究发展计划

空间微波遥感 数据验证理论与方法

Theory and Method for Data Validation of
Space-Borne Microwave Remote Sensing

金亚秋 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

空间微波遥感 数据验证理论与方法

Theory and Method for Data Validation of
Space-Borne Microwave Remote Sensing

国家重点基础研究发展计划 2001CB309400 项目专著

金亚秋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者近十年来在空间微波遥感数据验证理论与方法的研究成果,全面地论述了空间微波遥感在数据验证与定量信息获取的理论与方法。

书中介绍了国内外空间微波遥感技术的主要进展,阐述了空间微波遥感信息的基础理论,讨论了多通道数据统计反演-D 矩阵方法的理论基础。接着讨论了大气降水、积雪、土壤湿度、沙暴与沙漠化、植被、海洋的微波遥感,全极化合成孔径雷达 SAR 图像信息的获取与处理技术及其应用示范。

本书可供信息技术、空间与地球科学、国防科技等领域的科研人员以及高等院校相关专业的研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间微波遥感数据验证理论与方法/金亚秋著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016247-1

I. 空… II. 金… III. 航天遥感:微波遥感-数据-验证 IV. TP722.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 105288 号

责任编辑:彭胜潮 姚岁寒 韩 鹏/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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

*

2005 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 11 月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—1 500 字数:372 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

卫星遥感与空对地观测技术是 20 世纪下半叶以来人类认识自身地球环境的最重要的科学技术。近几十年来,多源、多极化、多年连续、多项主动与被动空间遥感计划在国际上都取得了重大进展。在我国中长期科学发展规划中,空间遥感与对地观测技术是一个重要的方向。由于微波的全天候、全天时特点,随着高分辨率成像技术的发展,微波遥感已成为当今空间遥感与对地观测技术的前沿,对于我国经济、社会、科技发展,国家安全与长远利益有着重大的影响。

为占据科学发展前沿,面向我国经济社会可持续发展的重大科学问题,带动我国基础研究与高技术的全面发展,国家 973 计划在加强和发展基础研究、提升我国原始创新能力,形成一批具有世界科学前沿高水平的中国科学家队伍,正在发挥着重要的促进作用。

我很高兴看到,本书的作者多年来在电磁散射辐射传输和空间遥感信息机理的基础研究中做了大量的基础研究工作。他作为国家 973 项目“复杂自然环境时空定量信息获取与融合处理的理论与应用”的首席科学家,总结他本人近年来在遥感数据验证方面的研究成果写成本书。其主要内容已先后在国际学术刊物上发表,得到了国内外遥感学术界的肯定。

我希望从事国家 973 项目科学研究的同志们继承和发扬我国老一辈科学家求实唯真、团结协作、勇于创新的科学精神和艰苦奋斗、积极奉献的优良传统,开拓创新,扎实工作,勇攀高峰,为我国社会主义现代化建设、为人类文明进步做出更大的贡献。

国家科技部部长
中国科学院院士

2005 年 4 月 12 日

前 言

空间遥感是在空间(卫星)平台上用电磁波与地球大气、地表、海洋环境相互作用的散射与辐射来进行观测。它从可见光摄影开始,经过红外热辐射探测,到 20 世纪 70 年代已发展到微波、毫米波遥感。由于微波的全天候特点,能穿过云层,还可能探测地下结构,随着空间分辨率的不断提高,高分辨率合成孔径雷达(SAR)与多通道辐射计成像(如:特别微波成像辐射计 SSM/I)技术的发展,以及多源、多极化、多通道、多视角、多用途、主动与被动、多系列、连续多年的空间遥感计划的进行,已使微波遥感成为空间遥感发展最前沿的技术。微波遥感技术已使以往受昼夜云雾影响的光与红外遥感获取全球环境 35% 的信息增加到全天候地获取全球环境 95% 的信息,凸现了以微波遥感为主的发展态势。微波遥感对于复杂环境时空不同尺度定量信息获取、信息处理与实际应用,以及对于国家安全高科技信息技术等均发挥着重大的作用。空间微波遥感已能进行全球物理水文数据产品的初步的业务性发布,为气象数值预报、灾情监测与预报、全球和区域性环境评估与监测提供了前所未有的科学视野。同时,微波遥感也在国家安全、军事环境监测、背景中标识识别、导弹制导、军事预警、电子对抗等高科技中起着十分重要的作用。

我国幅员辽阔,环境复杂多样,水资源相对匮乏、分布又不均匀,干旱与洪涝、积雪冻土与荒漠、有限的农田与发展高效农业的迫切、地形复杂的西部有待开发、海冰海洋监测,以及资源开发、环境保护与可持续发展等诸多问题,都迫切需要精确了解与掌握中国自然环境时空定量信息及其演变。

在多变的国际与周边环境下,对国家安全提出了许多迫切的前所未有的要求。复杂环境中电子系统的运行,如目标识别、导弹制导、军事预警、低飞目标跟踪等,都要求空对地监测关键的环境要素,定量地了解目标与环境特性及其相互作用。

空间遥感技术的进展使人类以前所未有的方式对我们的生存环境获取了大量数据。但是,散射辐射图像数据并不直接等于自然环境的科学信息,大量数据的积累与直接的视觉判读并不等于科学信息的充分获取与全面利用。随着 21 世纪最初 15 年世界上空间遥感计划的进行、计算机和无线通信信息技术的迅速发展,要求空间对环境观测的信息理论与应用技术有更高层次的定量、综合、全面的研究与应用。这要求能阐述空间遥感实际观测,对环境的信息仿真模拟与空间遥感数据图像有一致的验证与应用,要求从数据与图像中提取与处理定量的遥感科学信息,形成定量信息产品、新的科学知识,融合与智能化处理,完成从数据到信息的转化,从而使空对地观测与空间遥感信息技术成为准确、可靠、全面的应用技术。这就是空间遥感数据验证的主要任务。

全天候的空间微波遥感,特别适合连续地、全面地对自然环境的监测与定量信息的获取、对于全球性变化的研究、对全球与中国环境的保护与监测、对中国未来的持续发展与中国国家安全有着十分重要的意义。

在国家重点基础研究规划(973 项目)“复杂自然环境时空定量信息获取与融合处理的理论与应用(2001CB309400)”、国家自然科学基金、航天与国防预研、上海市等有关研究基金的资助下,作者从先后发表的国内外学术刊物论文进行研究成果阶段总结,撰写成本书。本书全面介绍了作者近十年来在空间微波遥感数据验证的理论与方法的一些研究成果,提供该领域的研究人员与研究生了解我国在微波遥感信息理论与方法上的研究进展,为在国际微波遥感科学问题的前沿研究中占有一席之地、发展我们自主创新的基础理论与应用方法,为满足我国在有关微波遥感信息重大与关键问题上的日益增长的需求服务。

本书第一章介绍了空间微波主动与被动遥感技术国内外的主要进展,作为我们研究的背景。

第二章与第三章介绍了空间微波遥感信息的基础理论:矢量辐射传输理论与自然介质的全极化散射理论。

作为在遥感中散射与辐射传输理论建模与数值模拟的主要手段,第二章给出 4 个 Stokes 参数的矢量辐射传输(VRT)方程的基本内容、几种主要的 VRT 理论模型、VRT 方程的几种求解方法的概要。

特别针对全极化测量与全极化合成孔径雷达(SAR)的发展,第三章讨论全极化散射的基本理论,散射矢量、Mueller 矩阵、相干矩阵、信息熵、多视 SAR 的 Stokes 矢量分布、杂波与目标回波的基本概念等。随机粗糙面散射与辐射的理论与解法也在该章中加以阐述。

在星载多通道微波遥感中,如 19~85GHz 七通道防卫气象卫星特别微波成像辐射计(DMSP SSM/I),反演与重构大气与地表特征参数是遥感的最终任务之一。第四章讨论了多通道数据统计反演-D 矩阵方法的理论基础。

第五章主要讨论大气降水的被动微波遥感,给出 SSM/I 通道上非均匀降水的辐射亮度温度的模拟和由 SSM/I 数据得到的大气降水雨强的空间与时间尺度分布。

第六章讨论积雪的微波遥感。积雪的范围、厚度、水当量及其变化,无论对于区域性气象、水资源、陆地水文过程、农田与灾害监测,还是全球气候研究,都是十分重要的。本章提出了与地表状态有关的多通道 SSM/I 散射指数的网格图对积雪厚度的反演及其实例,并发展了由于融化冻结产生非均匀分层积雪散射与热辐射的迭代算法,讨论了主动 SAR 与被动 SSM/I 对积雪遥感数据的相关性与数据分析。

区域与全球尺度陆地土壤湿度的变化对于陆气交互作用平衡和陆地水文研究、改善天气与气候预报、水涝和干旱的监测、农作物生长态势评估等都是十分关键的基本因素。第七章讨论土壤湿度的微波遥感。用 DMSP SSM/I 多年数据构造特征统计分布,获得为大尺度评估和业务需求的中国陆地土壤湿度分布图。特别展示了我国一些地区发生干旱、洪涝时遥感数据的典型个例分析。用卫星 TRMM TMI(热带降雨测量计划微波成像计)实验数据进行了土壤湿度反演验证。还讨论了同时反演地表湿度和地表面粗糙度的遗传算法。

监测我国西北沙漠和沙尘暴是我国自然环境监测与保护的一个重要课题。第八章讨论了我国西北沙漠的 SSM/I 数据特点,提出了监测我国沙尘暴与沙漠化的几个特征指数与个例分析,并试验了特征指数 Getis 空间自相关统计。

第九章讨论植被与农田的微波遥感。讨论了中国东北和华北平原农田区域微波辐射

特征及其特征指数随生长季节的时间性变化。提出了主动与被动微波遥感的人工神经网络模型反演农作物生物量参数,并进行了隔年生生物量预估与实测的比较。以机载 AirSAR 遥感为例,提出同时反演非均匀分布的复杂地表植被生物量和土壤湿度的迭代算法。

第十章讨论有关海洋遥感的几个问题,用 DMSP SSM/I 反演海面风速,讨论 DMSP SSM/I 与欧洲 ERS 散射计对海洋观测的相关性,用 SSM/I 与 SAR 联合对我国中纬度渤海海冰的监测,以及用 SAR 反演浅水下地表高程的反演方法。

第十一章给出用 SSM/I 多通道数据组合的各种经验性公式,计算得到 SSM/I 产品的 FORTRAN 程序和判据逻辑。产品包括单天或多天平分的全球陆地与海面上降雨、陆地积雪判据、地表温度、大气水汽、极化指数、散射指数等。

第十二章讨论具有温度、介电分布廓线的非均匀月壤层微波辐射传输的权重函数与穿透深度,模拟多层月壤岩的多层密集粒子介质辐射传输的辐射亮度温度的建模与计算,并以此结果为理论模拟观测,研究我国探月工程中月壤厚度等参数反演等可予以实施的方法。

随着航天飞机 SIR-C SAR 和加拿大雷达卫星-2 全极化 SAR 的实验与运行,全极化 SAR 的研究已成为 SAR 研究的前沿。从第十三章至第十五章讨论有关全极化 SAR 图像信息的获取与处理。

第十三章用全极化散射 Mueller 矩阵解得到同极化极大值对应的极化角 ψ 迁移,为三个散射 Stokes 参数的函数。用 ψ 迁移以及图像形态学细化算法得到 SAR 图像中线性纹理的水平方位,来确定水平方位与射程方位的地表面坡度。由一次飞行的全极化 SAR 图像,求解 Poisson 方程,给出地表面数字地面高程的反演。

第十四章讨论多时相 SAR 图像产生差值增强、减弱与不变三类区域的双阈值期望极大化与 Markov 随机场算法,进行城市地区多年变化区域的自动分类检测。

第十五章研究全极化 SAR 图像数据中不同地表状态下散射指数、相干矩阵特征值、信息熵 H 与同极化、交叉极化测量的关系。提出目标散射矢量“直序展开”特征参数和去取向转换,定义新参数集 u, v, H ,进行复杂陆地表面的分类,并与传统的 $\alpha-H$ 分类做了比较。

可见光、红外、微波等遥感系统的运行促进了多源数据与信息融合的研究。多源信息融合将多源数据信息合成,产生比单源信息更准确的判断与评估。第十六章讨论了陆地卫星 Landsat 红外遥感与欧洲 ERS SAR 微波遥感数据融合,对我国城市复杂地表分类的人工神经网络与遗传算法,对我国滩涂典型地物信息的提取与分类方法,以及对江口淤泥质潮滩水边线信息提取的应用研究。

作者主持的国家 973 项目在立题与研究过程中得到了徐冠华、陈述彭、童庆禧、赵柏林四位院士的大力推荐,得到了国家科技部、国家自然科学基金委员会、上海市科委、国家教育部、复旦大学各领导单位的大力支持,我们深表感谢。

本书总结的研究成果只是我们在空间微波遥感数据验证方面研究工作的一个阶段性成果。随着我国经济与综合国力的不断加强,空间遥感与空对地观测将成为我国科学技术发展的一个重要方面。通过世界各国与我国空间微波遥感技术的发展和全球性区域性研究的深入,有大量的问题要求我们深入研究。我们相信,在我国科学工作者一代接一代人不懈的努力下,我们一定能在空间微波遥感的前沿研究与应用上更上一层楼。

目 录

序

前 言

第一章 空间微波遥感技术进展	(1)
1.1 微波被动遥感	(1)
1.2 微波主动遥感	(3)
参考文献	(4)
第二章 空间微波遥感信息理论基础——矢量辐射传输	(6)
2.1 矢量辐射传输(VRT)理论	(6)
2.2 晴空大气 VRT 和一层植被 VRT 方程	(11)
2.3 VRT 解法	(13)
参考文献	(22)
第三章 空间微波遥感信息理论基础——全极化散射	(24)
3.1 全极化散射的 Mueller 矩阵和相干矩阵	(24)
3.2 SAR 多视图像 4 个 Stokes 参数统计特性	(27)
3.3 环境杂波与目标回波的极化零值	(30)
3.4 随机粗糙面的散射	(32)
参考文献	(36)
第四章 多通道统计反演 - D 矩阵	(39)
4.1 统计 D 矩阵的组成	(39)
4.2 计算模型的程序逻辑和应用结果	(41)
参考文献	(43)
第五章 大气降水遥感	(44)
5.1 被动微波遥感大气降水	(44)
5.2 非均匀大气降水层的热辐射	(45)
参考文献	(50)
第六章 积雪的遥感	(51)
6.1 被动微波遥感对积雪的识别	(51)
6.2 多通道 SSM/I 散射指数的网格图对积雪厚度的反演	(54)
6.3 非均匀分层积雪散射与热辐射	(58)
6.4 积雪的主动与被动遥感的相关	(60)
6.5 多层强起伏随机介质 - 积雪的散射与辐射	(62)
参考文献	(66)

第七章 土壤湿度遥感	(68)
7.1 多时相观测的极化指数距平统计与中国陆地土壤湿度分布图	(68)
7.2 距平异常指数 K 分布与地表湿度反演	(76)
7.3 地表面粗糙度和土壤湿度多维参数同时反演的遗传算法	(79)
参考文献	(84)
第八章 沙暴与沙漠化的遥感	(85)
8.1 中国西北沙漠的 SSM/I T_B 数据	(85)
8.2 中国沙尘暴与沙漠化的监测与 SDI 指数	(88)
8.3 沙漠化监测的 DI 指数	(91)
8.4 Getis 空间自相关统计	(92)
参考文献	(93)
第九章 植被遥感	(94)
9.1 SSM/I 对农田的遥感	(94)
9.2 人工神经网络模型反演植被生物量参数	(96)
9.3 主动遥感非均匀地表植被生物量和土壤湿度	(101)
参考文献	(107)
第十章 海洋遥感	(109)
10.1 海面风速的被动微波遥感	(109)
10.2 被动 SSM/I 与主动 ERS SAR 观测海洋	(115)
10.3 SAR 与 SSM/I 对中国渤海海冰的监测	(121)
10.4 SAR 图像反演浅海水下地形	(127)
参考文献	(134)
第十一章 SSM/I 数据产品 FORTRAN 程序与判据	(136)
11.1 SSM/I 产品 FORTRAN 程序	(136)
11.2 判据与流程图	(159)
第十二章 多通道微波辐射计对月壤层的遥感	(166)
12.1 月壤辐射传输的权重函数与穿透深度	(166)
12.2 多层月壤月岩的微波辐射模拟	(170)
12.3 月壤厚度的反演	(175)
参考文献	(179)
第十三章 全极化 SAR 图像对数字地面高程的反演	(180)
13.1 地面起伏的全极化散射与图像纹理	(180)
13.2 完整多重网格算法求解 DEM 的 Poisson 方程	(184)
参考文献	(187)
第十四章 多时相 SAR 对陆地变化的遥感	(189)
14.1 EM 算法估计变化分类的先验、条件概率	(190)
14.2 双阈值的 EM 算法	(191)
14.3 Markov 随机场对空间结构相关的变化分类	(192)

14.4 城市变化识别实例	(195)
参考文献	(198)
第十五章 全极化 SAR 数据对地表的分类	(199)
15.1 不同地表状态下散射指数与熵的变化	(199)
15.2 目标全极化散射的去取向分析	(204)
15.3 全极化散射数据图像的分类	(217)
参考文献	(226)
第十六章 多源数据融合对地表的分类	(228)
16.1 Landsat 与 ERS-2 数据融合 BP-ANN/GA 算法对地物特征的分类	(228)
16.2 Landsat 与 ERS 数据融合提取崇明东滩典型地物信息与分类	(236)
16.3 Landsat 与 ERS SAR 多源遥感数据提取长江口淤泥质潮滩水边线信息	(242)
参考文献	(249)

第一章 空间微波遥感技术进展

上世纪下半叶起,人类开始探索从空间探测地球环境的新思路,把认识自身地球环境的视点移向了太空。随着卫星技术、计算机等信息技术的发展,空间遥感从20世纪60年代开始的单项科学实验,经过光学摄影、红外探测和微波毫米波技术的发展,在90年代已形成多源、多通道、多极化、多年连续的多项国际空间遥感。由于微波能全天时、全天候监测地球大气、陆地与海洋,能穿过云层、植被,甚至干燥浅地表,微波遥感已成为空间遥感与对地监测的最前沿技术。主要的技术进展包括了被动遥感的多通道、多极化的微波成像辐射计和主动遥感的高分辨率合成孔径成像雷达(SAR)、全极化SAR与干涉SAR(IN-SAR)技术。

1.1 微波被动遥感

从20世纪60年代末算起,星载微波遥感已有30多年的历史。20世纪70年代,美国雨云卫星系列Nimbus-5、6搭载了电扫描微波辐射计(ESMR),特别有影响的是Nimbus-7的10通道双极化SMMR(Specific Meteorology Microwave Radiometer)。其较低的频率6.6GHz通道适合于中等植被覆盖条件下陆地地表湿度的研究,较高的频率37GHz通道适合于地表散射信息的获取,比如植被、风驱海面等。

1987年7月开始(卫星F-8)持续运行至今的美国防卫气象卫星计划(DMSP)上,载有7通道(垂直与水平极化的19.35GHz, 37GHz, 85.5GHz和垂直极化的水汽通道22.235GHz)的特种微波成像仪SSM/I(Special Sensor Microwave/Image)。首次纳入的85.5GHz特别适合于大气降水与地表散射信息的获取。空间分辨率分别为50km(19GHz), 30km(37GHz), 15km(85GHz), 53°入射角(Hollinger 1989)。目前运行有两颗卫星F-13, F-14,是目前被动微波遥感数据最稳定并容易获取的定标后的数据资源。

自1991年11月DMSP F-11上另载有5通道的SSM/T-2(Special Sensor Microwave Temperature Sounder),在水汽通道183.31GHz附近3个通道,另有大气窗91.655GHz和150GHz两个通道,主要做大气水汽的探测。图1-1是DMSP SSM/I F-13在85GHz垂直极化通道上的全球辐射亮度温度。由多通道的辐射亮度温度的探测,获取各类气象、水文等特征信息已开始有了初步的业务产品发布。

1997年美国和日本联合的热带降雨测量任务TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)搭载的微波成像仪TMI(Microwave Imager)由5个频点(10.65GHz, 19.35GHz, 21.3GHz, 37.0GHz和85.5GHz)9个极化通道(除21.3GHz只有垂直极化外,其余均为双极化通道),主要是强化降水天气系统的研究。

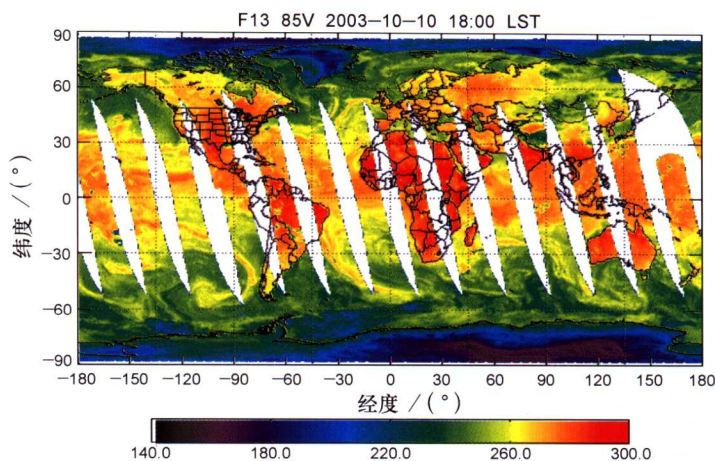


图 1-1 DMSP SSM/I T_{885} 数据(2003 年 10 月 10 日)

2002 年开始的地球观测系统 EOS-PM Aqua 卫星和先进对地观测卫星 ADEOS-II(Advanced Earth Observing Satellite - II)上载有多通道先进微波扫描辐射计 AMSR - E(Advanced Microwave Scanning Radiometer),共有双极化 10 通道(6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89 GHz)。空间分辨率分别约为:56 km(6.925 GHz), 38 km(10.65 GHz), 21 km(18.7 GHz), 24 km(23.8 GHz), 12 km(36.5GHz), 5.4 km(89 GHz), 55° 入射角。AMSR有可能成为 SMMR 和 SSM/I 新的替代仪器。此外,还有自 1998 年开始的 NOAA 先进微波探测计(AMSU - A, Advanced Microwave Sounding Unit),共有 15 个通道(23.8, 31.4 GHz, 50.3 ~ 57.29GHz 和 89 GHz),主要探测从地面至 40 km 高层大气的温度廓线。

圆锥扫描微波成像与探测仪 CMIS(Conical Scanning Microwave/Sounder)是计划搭载在美国极轨环境业务卫星系统 NPOESS 上的微波遥感仪器,CMIS 继承了 SSM/I、TMI 和 AMSR 等通道特点,从低频 6GHz 到高频 183GHz 共有 77 个通道,用以反演大气温度和湿度廓线、海面风速和地表参数等。

微波被动遥感对于水特别敏感,因此在区域和全球性水圈遥感中起着十分重要的作用。比如,探测大气温度、水汽廓线,大气降雨、大气可降水量、云中液态水含量;反演海面风场(风速、风向)、台风、海冰的监测;获取陆地面温度、土壤湿度、积雪深度与水当量、干旱、洪涝、沙漠,陆地水文与地理环境、植被生物量、农作物生长评估及其在空间尺度上的分布与时间尺度上变化等。近年来,4 个 Stokes 参数的全极化辐射计及其对海风矢量、海冰等研究也正在开展。

我国风云系列气象卫星将在第二代极轨气象卫星风云 3 号(FY-3,图 1-2)上载有微波遥感仪器,其中有 10 通道的微波成像辐射计(双极化)(图 1-2 左上角,图 1-3)。在中国海洋卫星(HY)1 号之后,将有微波遥感的海洋 2 号卫星,载有微波辐射计、散射计和高度计等。所采用的频率分别与 SSM/I 以及海洋卫星 SeaSat 类似。在 2003 年的神州 4 号上也已有了多模态微波遥感器的科学实验。在我国探月计划也将进行多波段微波辐射计探测月壤层的研究。风云 4 号也有计划在 118.75GHz, 424.763GHz 通道上作大气温度探测,在 183.31GHz, 380.197GHz 通道上作大气湿度探测等。

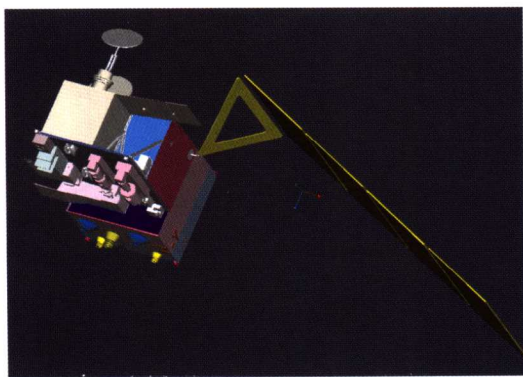


图 1-2 风云三号卫星



图 1-3 风云 3 号 10 通道微波辐射成像计

1.2 微波主动遥感

星载微波主动遥感主要包括散射计、海面高度计、雷达、合成孔径雷达(SAR)、干涉 SAR(INSAR)等。1978 年 Seasat 载有单一频率的散射计(14.6 GHz)和 SAR(L 波段, hh 极化, 25m 空间分辨率), 1991 年与 1994 年开始的欧洲 ERS-1, 2 上载有散射计(5.3GHz, vv 极化, 空间分辨率 45km)、雷达高度计(13.8GHz, 分辨率 16~20km)。1997 年开始的 TRMM 载有 Ku 波段降雨雷达, 与被动遥感的辐射计一起主要探测雨强、降水分布等。

特别重要的是 20 世纪 90 年代以来的极化 SAR 高分辨率成像技术在遥感应用中的广泛开展。如: 1994 年进行的航天飞机 SIR-C/X-SAR 多通道(L、C、X 波段)全极化 SAR 观测, 图 1-4 给出三通道极化合成的美国纽约的 SAR 观测图像。利用多频段、多极化 SAR 观测获取地表特征信息与分类是目前 SAR 遥感信息研究的重点。在 SIR-C 之后, 有欧洲空间局(ESA) ERS-1, 2 SAR(5.3GHz, vv 极化), 2002 年 3 月 ESA 的 Envisat-1 ASAR(Advanced SAR, C 波段、vv, hh 极化, 空间分辨率 30m), 日本 JERS SAR(1.275GHz, hh 极化, 35.21°入射角, 18m 空间分辨率), 加拿大 Radarsat-1 SAR(C 波段 5.3GHz、hh 极化、8m 空间分辨率), 以及 2006 年的 Radarsat-2 全极化 SAR(C 波段、3m 分辨率)等。也有不少机载 SAR 的研究任务, 如美国 JPL 的全极化 AirSAR(P、L、C、X 波段), 欧洲 EmiSAR(全极化, L、C 波段)等。通过多通道(频率、极化)的合成, 来获取与处理信息。



图 1-4 SIR-C 纽约 L 波段(红色 hh 极化,绿色 hv 极化)与 C 波段(蓝色 hv 极化)合成图像
(1994 年 10 月 10 日)

利用 SAR 两次相干观测的相位信息提取地表三维信息(地面高程、地面形变等),形成了干涉 SAR(INSAR)技术,极大地拓展了机载与星载 SAR 的应用领域,比如 2000 年 2 月美国 NASA 的航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM, Shuttle Radar Topography Mission, C、X 波段),在 Radarsat-2 中也将充分考虑 INSAR 应用。

雷达与 SAR 对于大气降雨、大气可降水量、云中液态水含量,海面风场、台风、海冰的监测,陆地土壤湿度、积雪、干旱洪涝灾害、陆地水文、植被与农作物生长监测等都有重要的应用。同时,还可在土地利用、地质资源与探矿、地下目标探测、大地河口与海岸监测、城市发展管理、海流与海面污染、海面舰船或地面目标的识别等民用和国防技术中有十分重要的关键性的应用。全极化 SAR 与 INSAR 图像还可以用来反演森林树木高度、地面数字高程、地面形变、各类地表的分类等。此外,逆合成孔径雷达 ISAR、双站 BiSAR 等研究也正引起关注。

我国在神舟 4 号多模态微波传感器中包括了辐射计、散射计与高度计的科学实验,海洋 2 号卫星将载有微波散射计和高度计等。在机载和星载 SAR 的研制上也正取得重要进展,机载 SAR 已取得十分良好的空间分辨率图像,全极化 SAR 的研制也在进行中。

高分辨率的主动微波遥感对于地表目标形状等物理特征及其同极化和交叉散射十分敏感。如何从多通道(频率、极化等)主被动遥感数据图像中提取和处理定量科学信息,完成从数据到信息、信息到知识的转化是遥感信息科学的本质任务。

参 考 文 献

- 陈述彭,童庆禧,郭华东. 1998. 遥感信息机理研究. 北京:科学出版社
姜景山. 2001. 空间科学与应用. 北京:科学出版社
金亚秋. 1993. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京:科学出版社

- 金亚秋. 2004. 空间遥感科学与对地观测信息的获取与处理, 中国科学院 2004 年高技术发展报告: 110 ~ 117. 北京: 科学出版社
- 徐冠华等. 1999. 迎接“数字地球”的挑战. 遥感学报, 3(2): 85 ~ 89
- 周秀骥. 1985. 大气微波遥感原理. 北京: 科学出版社
- Evans D. L. , Farr, T. G. van Zyl, J. J. Zebker H. J. 1988. Image radar polarimetry: analysis and application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(5): 714 ~ 789
- Hollinger J. 1992. *DMSP SSM/I Calibration/Validation*, Washington D C: Naval Research Lab
- Jin Y. Q. 1994. *Electromagnetic Scattering Modeling for Quantitative Remote Sensing*, Singapore: Word Scientific
- Jin Y. Q. 2005. *Theory and Approach of Information Retrievals from Electromagnetic Scattering and Remote Seusing*, Germany: Springer
- Jin Y. Q. , Chen Y. and Wu Z. 2004. Retrievals and applications of remote sensing information from multi-disciplinary researches, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Newsletters*, (3): 7 ~ 11

第二章 空间微波遥感信息 理论基础——矢量辐射传输

2.1 矢量辐射传输(VRT)理论

地球环境的自然介质比如大气、云雨、湍流、植被、农田、积雪、风驱海面、海冰等组成成分及其物理介电等特性是非均匀与随机分布的。遥感是用雷达或辐射计等电磁波与各类地表环境相互作用的散射与辐射传输得到测量与成像,定量地研究地球环境中电磁散射与辐射传输是空间遥感信息获取与处理的科学基础,它包括机理研究、理论建模、数值模拟、数据验证、参数反演等正逆两方面的问题。

随机介质一般可分为离散的散射粒子(如雨滴、树叶、树干、冰晶粒子等随机分布的散射体)、连续的随机介质(如湍流、植被或积雪层等看作为介电常数为连续随机起伏的介质),和随机粗糙表面。散射粒子大小、形状、介电特性、单位体积中的散射粒子数量稀疏或密集、均匀或群聚、空间取向的分布;或者介电常数各向同性或异性的随机起伏、起伏方差、起伏的相关函数及其相关长度等,以及多层、多成分、空间非均匀、粗糙界面等,作为随机介质物理特征的描述。研究极化电磁波在这些物理模型中的散射和传播,给出定量的电磁散射与辐射传输数值模拟结果,及其与极化、频率、视角和随机介质物理特征参数的函数关系,这就是随机介质中的电磁波理论。

随机介质中电磁波理论的基本方法大致上可分为:矢量辐射传输(VRT)理论、波散射的解析理论和随机粗糙面的散射理论。

VRT理论是研究极化电磁散射强度在随机介质中散射、吸收和传输的微分-积分方程方法。它从能量守恒在散射介质中的传输方程出发,包括吸收和多次散射以及辐射源的贡献。其物理意义明确,更重要的是能数值求解多次散射。标量的辐射传输(RT)理论首先是Schuster在1905年为解释恒星谱中吸收和发射线而提出来的(Chandrasekhar 1960)。在这之后,主要讨论点散射元的标量RT理论在天体物理、中子扩散输运理论、燃烧室热辐射的工程热物理(黄祖洽1987,杜书华1989),以及大气红外和微波辐射、云和降水的雷达观测、光传播等问题中得到相当广泛的研究和应用(周秀骥1991)。20多年来,随着航天遥感和对地监测技术的发展,研究地球自然环境的主动和被动遥感中极化电磁辐射的VRT理论得到了深入和广泛研究,取得了十分重要的理论与应用成果(Ishimaru 1978, Tsang *et al.* 1985, Jin 1994a)。

VRT理论今后进一步的发展,包括密集分布粒子散射相干的VRT理论(DVRT),群聚非均匀分布粒子VRT理论(CVRT),三维VRT方程,电磁辐射与散射粒子非线性相互作用下的VRT,如气溶胶粒子蒸发和热发光中激光和高功率微波传输、超宽带脉冲的VRT,以及发展数值方法求解更复杂的物理模型的VRT等,提取VRT中定量的物理的信

息知识,均是当今研究 VRT 的前沿方向。

随机粗糙界面往往在物理模型中是以边界条件出现的。现有的随机粗糙面散射理论大致上可分为两大类:一类是近似的可数值求解的方法,如适用于大尺度随机起伏的 Kirchhoff 近似(KA),及其在高频近似下的稳相解;小尺度起伏的微扰法(SPA);以及独立地叠加这两种尺度起伏的双尺度。这类方法可数值求解,以定量地解释粗糙面产生散射的物理现象。但是其近似适用范围、理论基础以及实际应用中的一些问题,有一定的限制,也有待于进一步的研究。近年来,用计算机数值方法来验证和发展粗糙面散射的理论和方法,也日益引起人们的注意。此外,还有全波法、相位微扰法等。另一类是严格的方法,但主要还限于解析形式上的讨论,如积分方程法、变分法、Green 函数法、Fourier 变换法等,还没有实际的数值上的应用。发展二维的随机粗糙界面散射的计算机数值方法,结合粗糙界面散射和随机介质体散射的更为完善的理论方法和数值结果分析,将对随机粗糙面散射的研究和应用产生十分直接的推动。

1. VRT 方程的成分

在介电常数为 ε 的背景中,电磁波

$$\bar{E}_i(\bar{r}) = (\hat{v}_i E_{v0} + \hat{h}_i E_{h0}) e^{ik_i \cdot \bar{r}} \equiv \hat{e}_i E_0 e^{ik_i \cdot \bar{r}} \quad (2-1)$$

以 $(\pi - \theta, \phi)$ 入射在一个体积 v 、介电常数 ε_s 的散射粒子上(磁导率 μ 均假定为真空中的 μ_0),这里下标 i 表示入射。水平和垂直极化矢量分别定义为

$$\hat{h} = \frac{\hat{z} \times \hat{k}}{|\hat{z} \times \hat{k}|} = -\hat{x} \sin \phi + \hat{y} \cos \phi \quad (2-2a)$$

$$\hat{v} = \hat{h} \times \hat{k} = \hat{x} \cos \theta \cos \phi + \hat{y} \cos \theta \sin \phi - \hat{z} \sin \theta \quad (2-2b)$$

传播波矢 $\bar{k}$ 写成

$$\bar{k} = k \hat{k} = k(\hat{x} \sin \theta \cos \phi + \hat{y} \sin \theta \sin \phi + \hat{z} \cos \theta) \quad (2-2c)$$

由波动方程得到

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E}(\bar{r}) + k^2 \bar{E}(\bar{r}) = i\omega\mu \bar{J}_e(\bar{r}) \quad (2-3)$$

其中散射源项 $\bar{J}_e(\bar{r}) = -i\omega\varepsilon[\varepsilon_{sn}(\bar{r}) - 1]\bar{E}(\bar{r})$, $\bar{r} \in V$ 以及 $\varepsilon_{sn}(\bar{r}) = \varepsilon_s(\bar{r})/\varepsilon_0$,
则散射场 $\bar{E}_s(\bar{r})$ 为

$$\begin{aligned} \bar{E}_s(\bar{r}) &= \int_v d\bar{r}' \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot i\omega\mu \bar{J}_e(\bar{r}') \\ &= \frac{e^{ikr}}{4\pi r} k^2 \int_v d\bar{r}' (\hat{v}_s \hat{v}_s + \hat{h}_s \hat{h}_s) [\varepsilon_{sn}(\bar{r}') - 1] \bar{E}(\bar{r}') e^{-ik_s \cdot \bar{r}'} \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中无界空间 3 维并矢 Green 函数

$$\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') = (\bar{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla) \frac{e^{ik|\bar{r} - \bar{r}'|}}{4\pi |\bar{r} - \bar{r}'|} \quad (2-5)$$