

徐茂松 张风丽
夏忠胜 谢 酬 编著

植被雷达遥感方法与应用



科学出版社

植被雷达遥感方法与应用

徐茂松 张风丽 夏忠胜 谢 酬 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

合成孔径雷达系统具有全天候、全天时获取数据的能力,特别是近年来发射的新型雷达遥感卫星将为多云多雨地区的植被监测提供宝贵数据源。本书系统介绍了新型雷达遥感数据处理技术,包括极化 SAR 数据处理、山区 SAR 图像几何校正、多时相极化 SAR 数据融合等技术;介绍了植被介电模型和散射模型,分析了森林与水稻的极化散射特性及时域变化特征;在此基础上,介绍了基于新型极化 SAR 数据对森林、水稻进行识别和监测的方法,并给出典型的解译标志;最后介绍了融合利用 SAR 与光学数据对地物分类和进行植被信息提取的方法。

本书可供从事微波遥感应用研究、林业与农业遥感监测研究的科研与技术人员以及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

植被雷达遥感方法与应用/徐茂松等编著. —北京:科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-034364-2

I. 植… II. 徐… III. 雷达-遥感技术-应用-植被-环境监测-研究
IV. Q948.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 098115 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012年4月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 272 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

森林是地球上规模最大、生态功能最完善的陆地生态系统,对地球系统中的水循环、碳循环、能量循环和生态平衡起着不可替代的作用,是地球生态系统最重要的维系者。森林一直是我国生态建设的主体。我国《森林法》规定,需要定期进行森林资源调查,调查结果是年度计划制定和有关政策出台的依据,也是动态监测全国森林植被变化、森林火灾、森林虫灾的基础。我国每五年进行一次森林资源一类调查,每十年进行一次森林资源二类调查。森林资源调查的结果是各级人民政府制定中长期规划的必要依据,对国民经济建设和生态环境保护具有非常重要的战略意义。目前,森林资源调查使用的主要是光学遥感数据,但在我国南方,特别是西南地区,气候湿润,多云多雨,限制了光学遥感数据的及时获取,严重影响了森林资源调查任务的按时完成和调查结果的质量。同时,数据获取的时间周期很长,也影响了所获取数据及调查结果在时间上的一致性。

水稻是世界三大粮食作物之一,我国以稻米为主食的人口约占总人口的50%。水稻虽然在我国分布很广,但具有南方多而集中、北方少而分散的特点。及时掌握我国水稻长势状况,对产量进行准确预测,一方面有利于适时制定国内农业政策,另一方面有利于应对国际农产品贸易谈判。同样,多云多雨的气候条件也极大地限制了利用光学遥感技术进行水稻长势和产量监测。

合成孔径雷达(SAR)遥感技术具有全天候、全天时获取数据的能力,能够不受天气条件的限制获取数据。特别是近年来发射的 RADARSAT-2、TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 卫星为多云多雨地区的植被监测提供了高分辨率(1m、3m)和全极化、多极化雷达遥感数据,弥补了多云多雨地区光学遥感数据的不足,保障了遥感数据的时效性和全覆盖,是我国多云多雨地区进行植被监测与调查的新型遥感数据源,但相应的研究方法研究还十分缺乏,亟须跟上。

国家林业局调查规划设计院的徐茂松同志,带领课题组的科研人员,在国家863计划和国防科学技术工业委员会项目的支持下,选择贵州的林场为实验区,基于大量实验数据和资料,开展了新型高分辨率极化 RADARSAT-2 和 TerraSAR-X 数据的处理方法研究,形成了较系统的基于新型高分辨率极化 SAR 数据进行森林和水稻监测的方法,并通过与光学遥感数据的对比与融合,论证了新型雷达遥感数据在南方植被监测中的潜力和效果。今读到他与中国科学院遥感应用研究所、贵州省森林资源管理站的科研人员合作撰写的这部新书,我深感欣慰。他们能够挤出时间来整理自己的研究成果,毫无保留地奉献给读者,是一种对科学

执著追求的热情体现。书中针对高分辨率极化雷达遥感的特点,系统介绍了新型雷达遥感数据处理技术与信息提取方法,结合森林资源调查与水稻监测的实际需求,运用大量的数据和图表,介绍了两种典型植被类型的极化散射特性与时域变化特征,并结合具体应用目标,详细阐述了应用方法和实验结果。这是一本极具科学价值的著作,对致力于雷达遥感方法与应用领域的科技人员有很高的参考价值,同时也为从事植被遥感研究的高校师生提供了重要的植被雷达遥感方法与应用依据。

值此著作出版之际,我非常愿意将其推荐给广大读者,希望该书能为我国多云多雨地区的森林资源调查和农业监测提供前沿技术,缓解南方多云多雨地区遥感数据源的瓶颈问题,推动雷达遥感技术在我国植被监测中的应用。



2011年11月

前 言

合成孔径雷达(SAR)系统最早诞生于 20 世纪 60 年代初,迄今为止,已取得了许多突破性的进展并广泛应用于诸多领域。SAR 系统的全天时、全天候对地观测能力使其在植被监测中具有突出优势,并能获取光学遥感不敏感的参数信息。最早的 SAR 系统通常是单波段、单极化,不能获取关于散射过程的完整信息,难以准确实现地表参数的定量反演。随着新型极化和高分辨率雷达遥感技术的发展,这种状况将会大为改善。目前,日本的 ALOS PALSAR、德国的 TerraSAR-X 以及加拿大的 RADARSAT-2 都具有极化测量能力,并且 TerraSAR-X 和 RADARSAT-2 都能获取最高达 1m 分辨率的数据,这将极大地带动新型雷达遥感研究和应用。极化 SAR 数据利用极化散射矩阵形式表达目标特性,其处理和信息提取较为复杂,我国在这方面的研究起步较晚,专门针对植被的研究则更少。高分辨率 SAR 数据可以反映地物目标的精细结构特征,但同时也对数据处理、信息提取等提出了更高的要求。

在国家 863 计划(2007AA12Z146)的支持下,作者开展了利用高分辨率和极化 SAR 数据进行森林识别分类的方法研究,在国防科学技术工业委员会(后简称国防科工委)项目(2008AA101105)的支持下,开展了利用极化 SAR 数据进行水稻监测的方法研究。《植被雷达遥感方法与应用》一书就是作者相关研究成果的总结,从基本理论、技术方法到应用实例全面阐述新型雷达遥感技术在森林和水稻监测中的应用,以供相关领域的科研人员参考。

本书共 7 章。第 1 章主要阐述雷达遥感基本原理,包括电磁波基本理论、SAR 基本原理以及极化雷达遥感基本原理等内容。第 2 章主要介绍新型雷达遥感卫星以及雷达遥感在森林和水稻监测中的应用现状。第 3 章主要介绍新型雷达遥感数据处理技术,包括极化 SAR 数据处理技术、山区 SAR 图像几何校正技术、多时相极化 SAR 数据融合以及 SAR 与光学数据融合技术等。第 4 章阐述植被介电模型与散射模型,并基于散射模型和地面测量数据分析了森林和水稻的后向散射特性及时域变化特征。第 5 章介绍利用 RADARSAT-2 极化数据进行森林识别和区分不同森林类型的方法、基于极化 SAR 数据对雪灾影响进行监测的方法以及基于极化 SAR 数据的水稻识别方法。第 6 章介绍典型地物、不同森林类型和水稻的极化 SAR 图像解译标志。第 7 章介绍融合利用 SAR 与光学数据对地物进行分类以及进行植被信息提取的方法。

本书各章主要执笔人:第 1 章为张风丽、徐茂松;第 2 章为徐茂松、万紫、李坤;

第3章为谢酬、万紫、李晓芳;第4章为张风丽、李坤、刘龙;第5章为谢酬、徐茂松、夏忠胜、李晓芳;第6章为徐茂松、王雪军、张风丽、李坤;第7章为徐茂松、夏忠胜、王雪军。全书最后由徐茂松、张风丽定稿。感谢香港中文大学陈劲松教授提供的宝贵资料,感谢加拿大空间局(Canadian Space Agency, CSA)SOAR(Science and Operational Applications Research)项目为本研究提供的 RADARSAT-2 数据。

限于作者的知识水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 雷达遥感基本原理	1
1.1 电磁波理论与微波遥感	2
1.1.1 电磁波的基本性质	2
1.1.2 电磁散射与地物散射	4
1.2 SAR	6
1.2.1 雷达方程	7
1.2.2 SAR 原理	8
1.2.3 SAR 信号处理与数字成像	9
1.2.4 雷达系统参数与地物参数	11
1.3 极化雷达与目标极化特性	18
1.3.1 极化波	18
1.3.2 目标极化散射特性的表征	25
1.3.3 自然地物基本散射类型及极化散射矩阵	30
参考文献	33
第 2 章 新型雷达数据和植被雷达遥感方法与应用现状	35
2.1 新型雷达遥感卫星	35
2.1.1 加拿大 RADARSAT-2 卫星	35
2.1.2 德国 TerraSAR-X 卫星	37
2.1.3 意大利 COSMO-SkyMed 卫星	40
2.2 雷达遥感在森林监测中的应用现状	41
2.2.1 森林的生态学意义	41
2.2.2 我国森林分布与特点	42
2.2.3 雷达遥感在森林监测中的应用	43
2.3 雷达遥感在水稻监测中的应用现状	45
2.3.1 水稻分布与估产区划	48
2.3.2 水稻物候历、品种及生长期	51
2.3.3 雷达遥感在水稻监测中的应用	56
参考文献	59

第3章 新型雷达遥感数据处理技术	65
3.1 极化 SAR 数据处理技术	65
3.1.1 极化 SAR 数据预处理	65
3.1.2 极化目标分解	67
3.1.3 极化 SAR 分类	72
3.2 基于 DEM 的山区双视向 SAR 数据几何校正技术	78
3.2.1 星载 SAR 影像正射校正	78
3.2.2 星载 SAR 影像地形辐射校正	84
3.2.3 SAR 影像双视向信息补偿	89
3.3 多时相极化 SAR 融合技术	93
3.3.1 高精度配准	93
3.3.2 融合权重计算	94
3.3.3 多时相极化 SAR 数据融合与结果分析	94
3.4 极化 SAR 与光学数据融合技术	96
3.4.1 多源遥感数据融合方法概述	96
3.4.2 融合效果评价	99
3.4.3 TerraSAR-X、多时相 RADARSAT-2 与光学图像的融合	100
参考文献	102
第4章 植被散射模型及散射特性分析	106
4.1 植被散射模型	106
4.1.1 植被介电模型	106
4.1.2 植被散射模型	109
4.2 森林后向散射特性模拟与分析	124
4.2.1 森林后向散射特性模拟	125
4.2.2 雷达系统参数对森林后向散射的影响	125
4.2.3 森林后向散射时域特征	133
4.3 水稻散射特性模拟与分析	136
4.3.1 水稻后向散射的 Monte-Carlo 模拟	136
4.3.2 雷达系统参数对水稻后向散射的影响	138
4.3.3 水稻散射特性时域特征	140
4.4 森林与水稻极化响应及时域变化特征	144
4.4.1 森林与水稻的极化响应特性	145
4.4.2 森林与水稻极化响应特性时域变化规律	145
参考文献	148

第 5 章 基于极化 SAR 数据的植被类型识别与分析	152
5.1 不同地物的 SAR 数据识别与分类	152
5.1.1 不同地物各种极化方式下的后向散射系数	153
5.1.2 不同地物类型极化响应图对比分析	154
5.1.3 不同地物类型极化分解分析	154
5.1.4 不同地物的 Whisart 监督分类	162
5.2 不同森林类型的识别与分类	163
5.2.1 不同森林类型的后向散射特性分析	163
5.2.2 不同森林类型极化响应图分析	164
5.2.3 不同森林类型极化分解分析	167
5.2.4 不同森林类型极化分解图	167
5.2.5 不同森林类型的监督 Whisart 分类结果	171
5.3 不同树种类型的识别与分类	172
5.3.1 不同树种位置分布	172
5.3.2 不同时相森林树种后向散射值分析	172
5.3.3 不同树种极化响应特征分析	174
5.4 基于极化 SAR 数据的雪灾影响监测	175
5.4.1 雪灾对森林造成的破坏与其他正常树种不同时相后向散射值比较	176
5.4.2 雪灾对森林造成的破坏与其他树种极化响应分析	176
5.4.3 雪灾对森林造成的破坏区域提取	177
5.5 基于极化 SAR 数据的水稻识别	178
5.5.1 基于 Pauli 基分解的水稻识别	178
5.5.2 基于 Cloude-Pottier 分解的水稻识别	179
5.5.3 基于极化分解变量组合优化的水稻识别	182
参考文献	184
第 6 章 典型森林类型极化 SAR 图像解译标志	185
6.1 SAR 图像解译的影响因素	185
6.1.1 色调	185
6.1.2 纹理	186
6.1.3 形状与形态	186
6.1.4 尺寸与规模	186
6.1.5 阴影	187
6.1.6 模式	187
6.2 典型地物识别标志	187
6.3 森林识别标志	190

6.3.1 不同森林类型识别标志	190
6.3.2 不同树种识别标志	191
6.3.3 小结	196
6.4 水稻识别标志	197
参考文献	199
第7章 SAR与光学数据融合地物分类与植被信息提取	201
7.1 基于SAR与光学融合图像的地物分类	201
7.1.1 基于支持向量机的分类	202
7.1.2 基于面向对象方法的分类	205
7.2 基于SAR与光学融合图像的森林信息提取	209
7.3 基于SAR与光学融合图像的森林破坏监测	213
参考文献	215

第 1 章 雷达遥感基本原理

遥感是在现代物理学(包括光学技术、红外技术、微波技术、激光技术和全息技术等)、空间科学、电子计算机技术、数学方法和地球科学理论的基础上建立和发展起来的一门新兴的、综合性的交叉学科,是一门先进的、实用的探测技术。迄今为止,遥感已在资源勘探、环境监测和军事侦察方面得到了广泛的应用。按应用领域,遥感可分为地质遥感、地貌遥感、农业遥感、林业遥感、水文遥感、测绘遥感、环保遥感、灾害遥感、城市遥感、土地利用遥感、海洋遥感、大气遥感和军事遥感等(陈劲松等,2010)。

雷达(radar)即无线电探测与测距(radio detection and ranging),雷达系统最早由军方研制,一般用来探测硬目标,后发展成为将地形地貌作为主要探测目标的雷达遥感技术。真实孔径雷达(RAR)是最早的成像雷达系统,其方位分辨率受天线尺寸的限制。随着理论研究的深入,天线设计、信号处理及计算机软硬件的发展,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)开始出现并以其独特优势得到了蓬勃发展(郭华东,2000)。雷达是主动微波传感器,主动发射能量,不依赖于太阳光及光照条件,可以全天时、全天候获取数据。成像雷达使用的电磁波波长范围通常为 $1\sim 100\text{cm}$,可以穿透云层,在一定云雨天气情况下工作。只有当波长小于 2cm 时,电磁波透过云霾的能力才受影响;雨对波长大于 4cm 的电磁波影响很小。雷达不依赖于光照和天气条件成像的特点使其具有不同于光学传感器的独特优势,在一定条件下,较长波长的电磁波对地物还具有穿透性。

植被是我国重要的生态系统类型之一。森林一直是我国生态建设的主体,我国每五年进行一次森林资源一类调查,每十年进行一次森林资源二类调查。目前,森林资源调查所使用的主要遥感数据源是 SPOT 5 和 LANDSAT TM。但在我国南方,特别是西南地区,气候湿润,多云多雨,限制了光学遥感数据的及时获取,严重影响了森林资源调查任务的按时完成。水稻是世界三大粮食作物之一,据 2010 年统计数据,中国水稻种植面积约占世界水稻种植面积的 18.82% ,居世界第二位,水稻总产量约占世界水稻产量的 29.46% ,居世界之首。我国水稻的主产区主要分布在长江流域以南地区,晴天日数都在 50 天以下,即水稻生长区为少晴多云地区。因此及时掌握我国水稻长势状况,对产量进行准确预测,一方面有利于适时制定国内农业政策,另一方面有利于应对国际农产品贸易谈判。遥感技术是水稻长势和产量监测的重要手段,但在这些地区,常规光学遥感数据的获取要困难得多。

SAR 成像不受天气条件限制,对南方多云多雨地区的植被监测具有得天独厚的优势。SAR 系统的发展经历了单波段单极化雷达遥感、多波段多极化雷达遥感、极化干涉雷达三个发展阶段,本书主要探讨新型雷达遥感技术在植被监测中的应用技术与方法。只有理解雷达遥感的基本原理,才能更好地对雷达数据进行解释和分析,改善植被监测的效果。本章主要介绍雷达遥感基本原理,其中许多内容参考了 Ulaby 和 Elachi(1990)、郭华东(2000)、王超等(2008)、陈劲松等(2010)的著作。

1.1 电磁波理论与微波遥感

所谓电磁波,就是以波动形式在空间传播并传递电磁能量的交变电磁场。电场和磁场总是不可分离地联系在一起,既不会有与磁场分离的纯电波,也不会有与电场分离的纯磁波。在自由空间中传播的电磁波一般是平面波,它是一种电场和磁场相互垂直的横波。电磁波具有波长或频率、传播方向、振幅和极化面(亦称偏振面)四个基本物理量。只要这四个物理量确定了,一个平面电磁波就被完全确定了。一般来说,振幅是指电场振动的幅度,它表示电磁波传递的能量大小;极化面是指电场振动方向所在的平面。电磁波的传播是能量存在的一种形式,下面主要结合微波来了解电磁波的基本特征。

1.1.1 电磁波的基本性质

电磁波主要是指光波、热辐射、微波、无线电波等由振源发出的电磁振荡在空间的传播。在电磁波中,电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场矢量 $\mathbf{H}$ 相互垂直,并且都垂直于电磁波的传播方向,如图 1.1 所示。根据麦克斯韦理论,空间任何一处都存在着场,也就存在着能量。变化的电磁能够在其周围激发磁场,而变化的磁场又会在它的周围感应出变化的电场。这样,交变的电磁和磁场是相互激发并向外传播的。

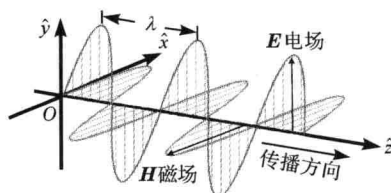


图 1.1 电场、磁场和传播方向

在均质、各向同性媒质中的均匀平面电磁波,由麦克斯韦方程组可知,矢量电场具有以下形式,即

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos[(\omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) + \varphi_0] \quad (1.1)$$

式中, $\mathbf{r}$ 为位置矢量, 亦可用 (x, y, z) 表示, $\mathbf{r} = x\hat{a}_x + y\hat{a}_y + z\hat{a}_z$, $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ 为三个坐标轴单位矢量; t 为时间。可以看出电场随时间作正弦变化, 称之为时谐电磁场。角频率 $\omega = 2\pi f$, f 为载频; $\mathbf{K} = k\hat{s}$, $\hat{s}$ 为传播方向, 其中 $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ 是电磁场在介电常数为 ϵ 、磁导率为 μ 的媒质中的波数; φ_0 为初始相位。

微波遥感是利用微波频段的电磁波为信息传播媒介对目标进行探测的遥感方法。微波的波长为 $1 \sim 1000\text{mm}$, 表 1.1 是微波波段的划分与命名。需说明的是, 不同国家、不同部门的划分方式并不完全相同。微波是电磁波的一种形式, 因此对电磁波的一些基本特征的了解即是对微波基本特征的了解。

表 1.1 微波波段的划分

雷达频率波段	波长/cm	频率/MHz
P	136~77	220~390
UHF	100~30	300~1 000
L	30~15	1 000~2 000
S	15~7.5	2 000~4 000
C	7.5~3.75	4 000~8 000
X	3.75~2.40	8 000~12 500
K _u	2.40~1.67	12 500~18 000
K	1.67~1.18	18 000~26 500
K _a	1.18~0.75	26 500~40 000
毫米波	<0.75	>40 000

微波电磁波同样具有波的叠加、相干、衍射和极化等特性, 这里主要对极化进行介绍。电场的极化用来描述给定位置电场矢量的方向随时间的变化, 定义为空间某点处固定位置电场方向矢量的终点随时间变化形成的轨迹。假定电场沿 z 轴正向传播, 由于电场矢量和磁场矢量都与传播方向正交, 故此电场仅有 x, y 分量, 据电场叠加原理, 两个不同振幅、不同相位相互正交的电磁波可以合成任意极化波。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z, t) &= \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \\ &= \mathbf{E}_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \hat{a}_x + \mathbf{E}_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_2) \hat{a}_y \end{aligned} \quad (1.2)$$

$\varphi_1 = \varphi_2$ 时是线极化波, 当 $\mathbf{E}_{0x} = \mathbf{E}_{0y}$, $|\varphi_1 - \varphi_2| = \frac{\pi}{2}$ 时是圆极化波, 更一般的情况下为椭圆极化波。如图 1.2 所示, 在 z 方向传播的均匀平面波, 电场必在 xy 平面内, 且垂直于 z 轴, 电场矢量的顶端在 xy 平面内画出一条轨迹曲线。当这一轨迹为直线时, 称线极化平面波, 或简称极化波。当轨迹曲线为圆形或椭圆形时, 称

圆极化波或椭圆极化波。当对着传播方向观测即朝源方向看时,如果 E 的旋转是逆时针的,称极化是右旋,否则是左旋。

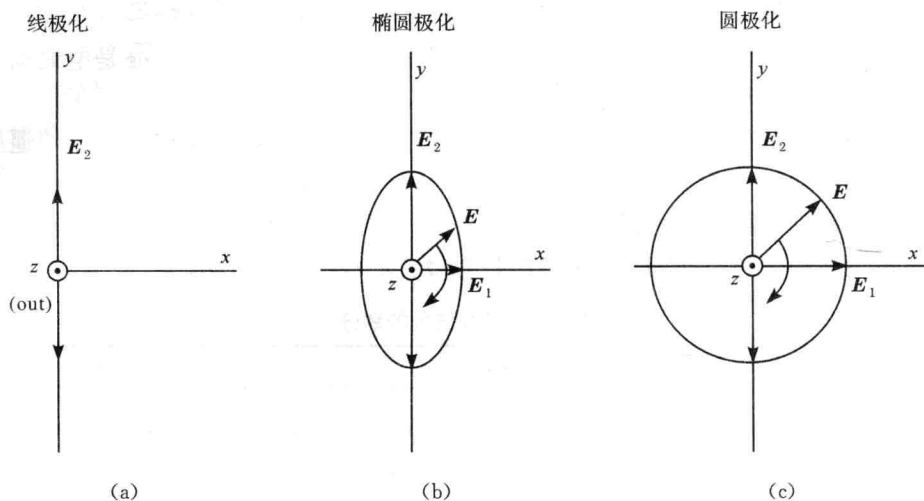


图 1.2 线极化(a)、椭圆极化(b)、圆极化(c)示意图

雷达遥感中现有系统主要采用线极化波,在极化雷达中采用两个正交的线极化通道同时收发信号,可以通过计算合成任意极化状态收发时的雷达数据。在雷达遥感中,通常设计成垂直发射或水平发射的极化波,同理,雷达可接收垂直或水平极化的电磁波。线极化是电场矢量方向不随时间变化的情况,可分为水平极化和垂直极化。水平极化指电场矢量与入射面(如由雷达发射的垂直于地面的扫描波束形成的平面)垂直,而垂直极化指电场矢量与入射面平行。用 HH 表示雷达图像中的水平发射和水平接收, VV 表示垂直发射和垂直接收, HV 表示水平发射垂直接收。当接收的极化方式与发射的极化方式相同时,所生成的雷达图像称为同极化图像,当接收的极化波与发射的极化波相反时,称为交叉极化图像。交叉极化是由目标的多次散射造成的,因此,交叉极化的后向散射比同极化的后向散射弱。地物对不同极化波的反映是不一样的,不同的地物在某一极化图像中可能比较接近,但利用其他极化图像却可能很容易区分。

1.1.2 电磁散射与地物散射

实际地物的反射有三种形式:镜面反射、漫反射(朗伯体反射)、方向反射(非朗伯体反射)。若地物表面光滑,入射电磁波将产生镜面反射,如果波束垂直地物表面,反射波就按逆入射方向返回。而当地物表面粗糙时,入射电磁波就会产生散射,即向各方向漫反射,顺着入射方向的散射分量称为前向散射,逆入射方向的

散射分量称为后向散射。在地物表面只是有些粗糙、还不是很粗糙时,即中等粗糙程度的情况下,还存在如同光滑表面的较强镜面反射分量,但如果表面相当粗糙,则各方向的散射分量强度近乎相同。图 1.3 所示为各种表面的反射和散射情况。

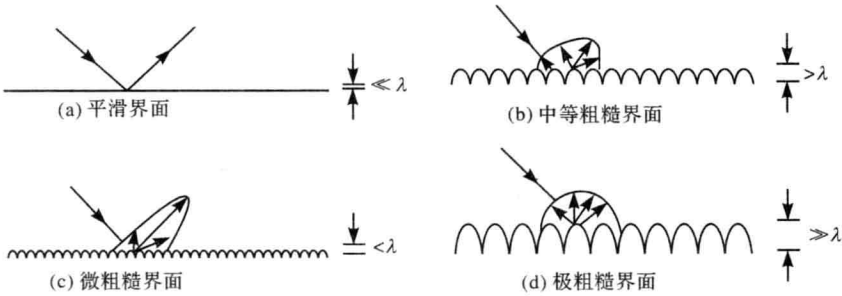


图 1.3 表面反射的几种类型

λ 为入射电磁波波长

地物表面之所以产生这三种反射形式,主要与地物表面的光滑程度有关。地物表面通常分成光滑和粗糙两大类。依据瑞利准则,判断粗糙程度的条件如下。

若 $h < \frac{\lambda}{25 \cos \theta}$, 则认为地物表面是光滑的;

若 $h > \frac{\lambda}{4 \cdot 4 \cos \theta}$, 则认为地物表面是粗糙的;

若 $\frac{\lambda}{25 \cos \theta} < h < \frac{\lambda}{4 \cdot 4 \cos \theta}$, 则认为地物表面是中等粗糙的。

由上述准则可知,地物表面的粗糙程度与入射电磁波的波长 λ 和入射角 θ 有关。

当电磁波入射到粗糙的地物表面时,被散射的电磁波既有镜面的反射分量,又有漫反射分量。皮克(Peake)在对电磁波与地物表面的相互作用做了深入详细的研究之后,提出了微分散射系数的概念。如图 1.4 所示,电磁波的入射场与散射场存在一定的几何关系,当电磁波以功率密度 $S_o (W/m)$ 从 (θ_o, φ_o) 方向上入射到表面面积为 A 的某地物上,在 (θ_s, φ_s) 方向上与地物相距 R 处的散射波功率密度为 S_s ,皮克定义这个表面的微分散射系数为

$$\gamma(\theta_o, \phi_o, \theta_s, \phi_s) = \frac{4\pi R^2 S_s}{S_o A \cos \theta_o} \quad (1.3)$$

式中, o 代表入射场方向, s 代表散射场方向。 $A \cos \theta_o$ 为 A 在 (θ_o, φ_o) 方向上的投影面积,故 λ 也称为单位投影面积的散射系数,而单位实际面积的散射系数 σ° 为

$$\sigma^\circ(o, s) = \frac{4\pi R^2 S_s}{S_o A} \quad (1.4)$$

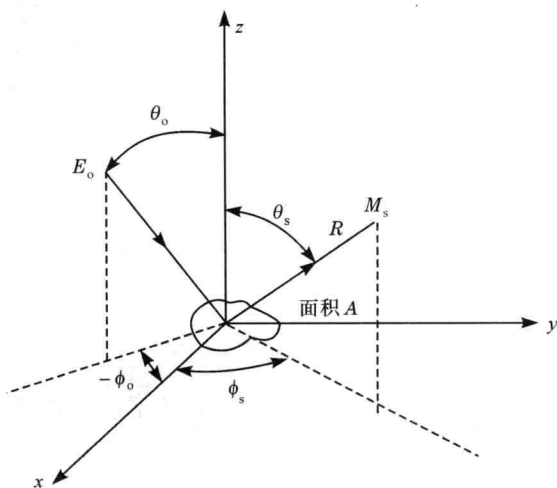


图 1.4 入射和散射场几何关系

除了反射和散射现象以外,还有部分电磁波能渗入地物内部,产生透射。一般说来,当电磁波在地物内部的介质中传播时,将引起能量损耗。电磁波对介质的穿透深度定义为

$$d = 1/a = \sqrt{2/(\omega\mu a)} \quad (1.5)$$

式中, a 为介质的衰减常数,单位为 dB/m(分贝/米); ω 是电磁波的角频率; μ 为介质的磁导率,单位为 H/m; σ 为介质的电导率,单位为 s/m。

穿透深度的物理意义是,当入射电磁波在有耗介质中传播的距离为 d 时,其场强将减小到它在介质表面时的数值的 $1/e$,即 37%,而功率将降低到介质表面入射功率的 $1/e^2$,也就是 13.5%。

1.2 SAR

早期的雷达主要用于目标探测与跟踪,20 世纪 50 年代早期,出现了侧视雷达系统(side looking airborne radar, SLAR),即只能观测飞行平台左(或右)侧下方一定角度范围。侧视雷达按其天线工作方式的不同,可分为真实孔径雷达(real aperture radar, RAR)和 SAR 两类。RAR 是最早的成像雷达系统,其方位分辨率受天线尺寸的限制。RAR 系统主要依靠使用尽可能长的天线长度来获得尽可能高的方位分辨率,实际上,由于 RAR 的方位分辨率还受飞行平台的高度及观测角的影响,因此 RAR 只适用于机载。随着天线设计、信号处理及计算机软硬件的发展,SAR 开始出现,并逐步取代了真实孔径雷达。SAR 系统采用了与 RAR 完全不同的技术来获得方位向的高分辨率,即采用了合成孔径的思想——采用小孔径