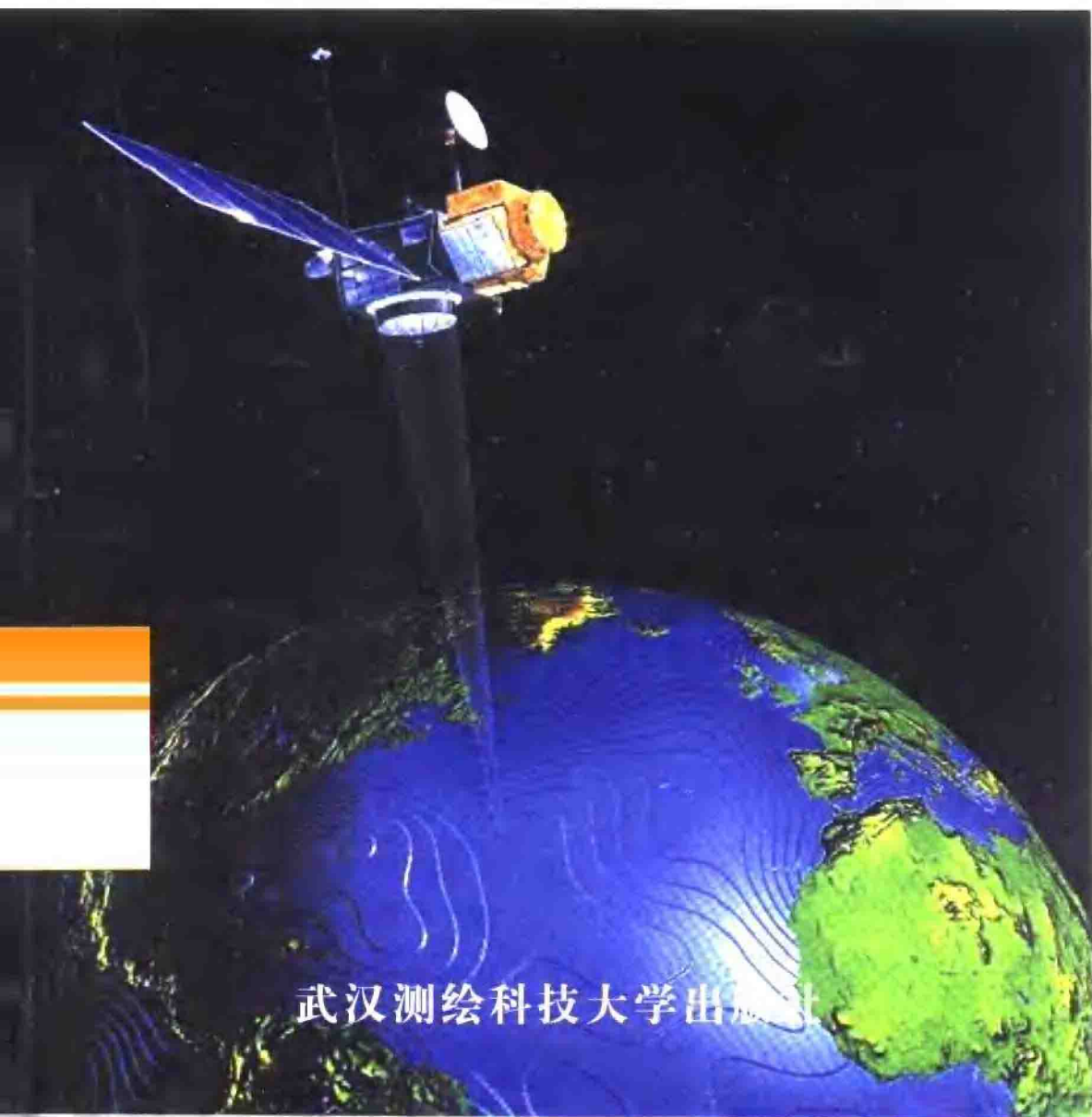


微波遥感原理

Weibo Yaogan Yuanli

舒 宁 编著



武汉测绘科技大学出版社

TP722.6
02

00009782

微波遥感原理

舒 宁 编著

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

内 容 提 要

微波遥感因其穿透力强、全天候工作、可提供多种信息,具有可见光遥感和红外光遥感不可替代的优势,所以近 10 年来,各先进国家竞相发展。

该书介绍微波遥感的成像原理、雷达成像系统、微波图像的几何特点和信息特点,微波图像的校准定标和各种数学模型下的几何校正、雷达图像解析测图、微波图像目视解译和计算机分析、微波图像的应用等知识。

该书可作为摄影测量与遥感专业的必修课教材,可供从事于测量工程、信息工程和环境资源部门的专业技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

微波遥感原理/舒宁编著:—武汉:
武汉测绘科技大学出版社,2000.3

ISBN 7-81030-766-5

I. 微… II. 舒… III. 微波遥感-理论 IV. TP722.6
中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 56016 号

责任编辑:徐 方 封面设计:曾 兵

武汉测绘科技大学出版社出版发行
(武汉市珞喻路 129 号,邮编 430079)
湖北少年儿童出版社印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:12.125 字数:310 千字
2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:20.00 元

本书如有印装质量问题可找承印厂调换

目 录

第一章 微波遥感基础	(1)
第一节 引言.....	(1)
第二节 电磁波理论与微波.....	(7)
第三节 微波与物质的相互作用	(12)
第四节 无线电谱和微波谱	(20)
第二章 微波遥感系统	(23)
第一节 非成像微波传感器	(23)
第二节 成像微波传感器	(25)
第三节 天线、雷达方程和灰度方程.....	(34)
第四节 空间微波遥感系统	(40)
第五节 辐射测量原理	(42)
第三章 微波图像的特点	(49)
第一节 侧视雷达图像参数	(49)
第二节 侧视雷达图像的几何特点	(52)
第三节 侧视雷达图像的信息特点	(57)
第四节 典型地物的散射特性	(72)
第五节 典型地物的亮度温度	(79)
第四章 微波图像的校准、定标与模拟	(88)
第一节 雷达回波的校准	(88)
第二节 雷达图像定标	(91)
第三节 雷达图像模拟	(98)
第四节 辐射计的校准、定标	(103)
第五章 微波图像的几何校正	(107)
第一节 侧视雷达图像的几何变形分析.....	(107)
第二节 侧视雷达图像的构像方程.....	(116)
第三节 微波辐射计图像的构像方程及图像几何变形分析.....	(120)
第四节 普通几何校正方法和利用模拟图像的方法.....	(122)
第五节 利用构像方程的几何校正方法.....	(123)
第六章 微波图像与测量	(130)
第一节 简单的图上测量.....	(130)
第二节 目标点的解析定位.....	(136)

第三节	利用侧视雷达图像的解析测图方法·····	(141)
第七章	微波图像的目视解译和计算机处理·····	(145)
第一节	雷达图像的解译标志特点·····	(145)
第二节	雷达图像中各类地物的解译·····	(146)
第三节	微波辐射计图像解译·····	(151)
第四节	图像变换、彩色合成与目标解译·····	(155)
第五节	计算机处理与识别·····	(157)
第八章	雷达遥感图像的研究与应用·····	(162)
第一节	农业方面的应用·····	(162)
第二节	测绘方面的应用·····	(164)
第三节	海岸带和海洋方面的应用·····	(165)
第四节	森林方面的应用·····	(169)
第五节	地质方面的应用·····	(170)
第六节	水文方面的应用·····	(173)
第七节	土地利用调查·····	(175)
第八节	海冰调查·····	(177)
第九章	微波辐射计图像的研究与应用·····	(180)
第一节	水文、冰雪探测方面的应用·····	(180)
第二节	海洋探测中的应用·····	(181)
第三节	农、林、渔业中的应用·····	(184)
第四节	地质和天文方面的应用·····	(186)
第五节	气象探测和大气科学研究中的应用·····	(187)
第六节	军事上的应用·····	(188)
参考文献	·····	(190)

第一章 微波遥感基础

微波遥感是在 20 世纪 90 年代迅速发展起来的遥感技术。本章分析了微波遥感的优越性和发展历史,介绍了在电磁波基本特征、电磁辐射的产生、电磁辐射的基本原理、电磁辐射传输及其与大气和地面物质的能量交换过程等方面微波的特点,说明了微波波谱与无线电谱的联系。学习本章主要应掌握微波在上述各方面的特点。

第一节 引言

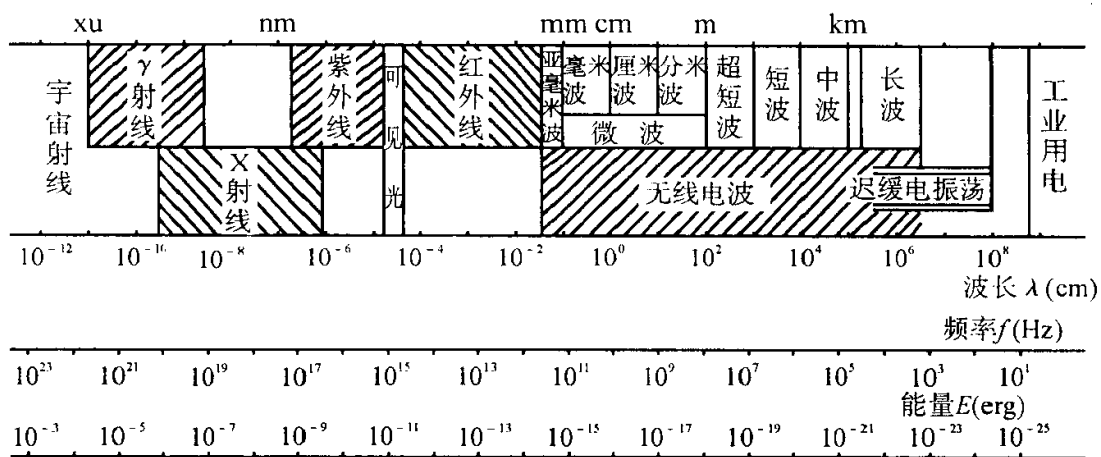
微波是电磁波的一种形式。把微波与可见光、红外线、紫外线、X 射线、 γ 射线及无线电波等按波长大小顺序排列起来,可以得到如图 1-1-1(a)的电磁波谱,从中我们可以看到微波实际上也是一种无线电波,它的波长从 1mm 到 1000mm,一般分为毫米波,厘米波,分米波和米波。微波各波段及命名如图 1-1-1(b)所示。微波遥感就是利用某种传感器接收地面各种地物发射或反射的微波信号,藉以识别、分析地物,提取所需的信息。在遥感技术体系中,可见光是人们最为熟悉的,无论是航空摄影,还是航天摄影,或者利用某种扫描仪获取反映地面信息的像片或数字图像,为人们认识和发现各类地物及其相互关系起到了重要的作用,在资源与环境的调查研究中产生了越来越大的效益。红外遥感是利用 $0.76 \sim 1000\mu\text{m}$ 的红外射线与各类地物的关系来进行资源与环境调查和监测,它为人们认识世界开辟了一条全新的有效途径。微波遥感则是自 20 世纪 60 年代始,现在已引起普遍重视,为各先进国家竞相发展,在 90 年代形成高潮的又一个遥感重要手段。

为什么微波遥感这么具有吸引力,它究竟具有什么优越性呢?

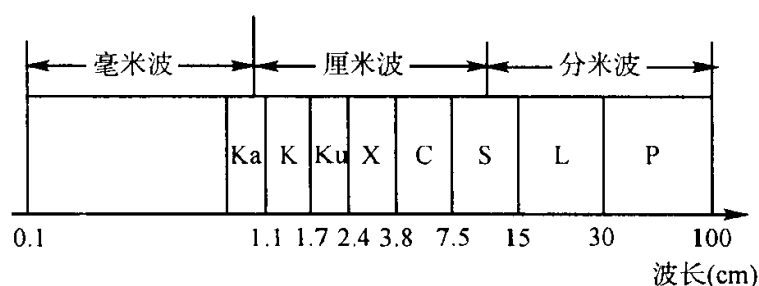
其一,微波能穿透云雾、雨雪,具有全天候工作能力。

图 1-1-2(该图下方标题的后面所附[2]表示该图出自文献[2],后面的图表凡需说明出处时均这样表示)说明微波的云层透射率随波长而变化的情况,冰云对任何波长的微波都几乎没有什么影响,这对于经常有 40%~60% 的地球表面被云层复盖情况来说无疑具有重要的意义,因为可见光和红外传感器对于云层复盖是无能为力的。

图 1-1-3 是雨对微波影响的情况,当波长为 3cm,大雨倾盆的地区对微



(a) 电磁波谱



(b) 微波波段划分

图 1-1-1 电磁波谱与微波波段各种无线电波的波长和波段

波的影响已经很小,这就是说,任何恶劣的天气条件都无碍于微波传播。

微波遥感分为主动和被动方式。其被动方式与可见光和红外遥感一样,由某种传感器如微波扫描辐射计接收地面地物的微波辐射。然而微波的运用常取主动方式,即由传感器发射微波波束,再接收地物反射回来的信号,因而它不依赖于太阳辐射,不论白天黑夜都可以工作,故称全天时。红外线虽然也可以在夜间工作(如热红外扫描仪接收夜间地物的热辐射),但它受大气衰减的影响很大,遇到云雨影响更大。微波则不然,这是其长处之一。

其二,微波对地物有一定穿透能力。

一般说来,微波对各种地物的穿透深度因波长和物质不同有很大差异,波长越长,穿透能力越强。图 1-1-4 表示了不同波长的微波对不同土壤的穿透能力,由该图可见,同一种土壤湿度越小,穿透越深。微波对干沙可穿透几十米,对冰层能穿透 100m 左右,但对潮湿的土壤只能穿透几厘米到几米。

波长较短的微波虽然穿透能力差些,也能提供可见光或红外线不能观测到的信息,而目前航天微波遥感所用微波波段一般是 C 波段(波长为 3.8

-7.5cm)和 L 波段(15-30cm),都具有一定穿透能力,故可适用于地质勘探和军事目标探测。

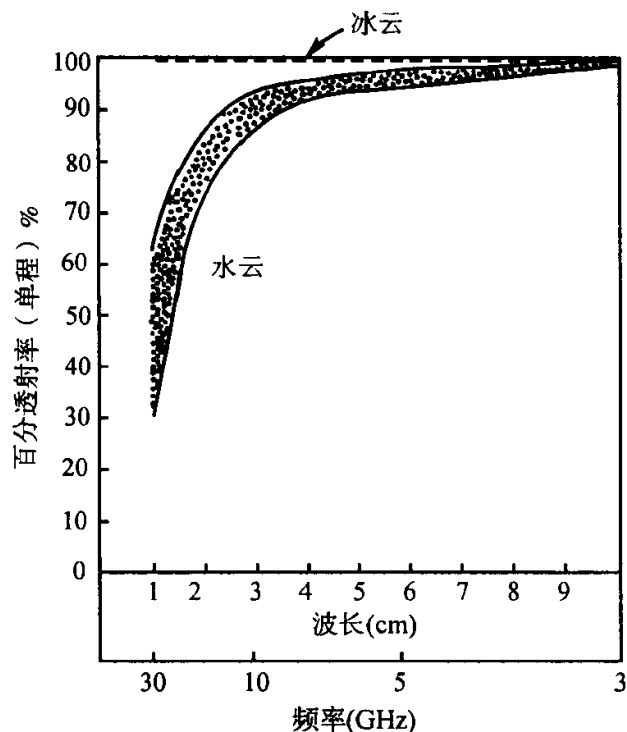


图 1-1-2 云层对无线电波从空间到地面之间传输的影响([2])

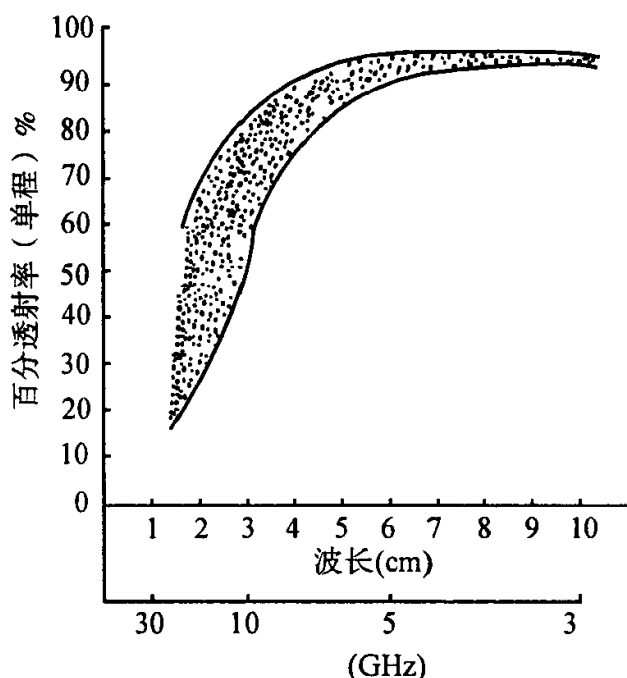


图 1-1-3 雨对无线电波从空间到地面之间传输的影响([2])

其三,微波能提供不同于可见光和红外遥感所能提供的某些信息。

例如,微波高度计和合成孔径雷达具有测量距离的能力,可用于测定大地水准面。再如,由于海洋表面对微波的散射作用,可利用微波探测海面风力场,有利于提取海面的动态信息。主要用于海洋探测的海洋卫星 SEASAT-A 上微波传感器占 80%,说明微波在这方面的重要应用,而可见光和红外线是替代不了的。

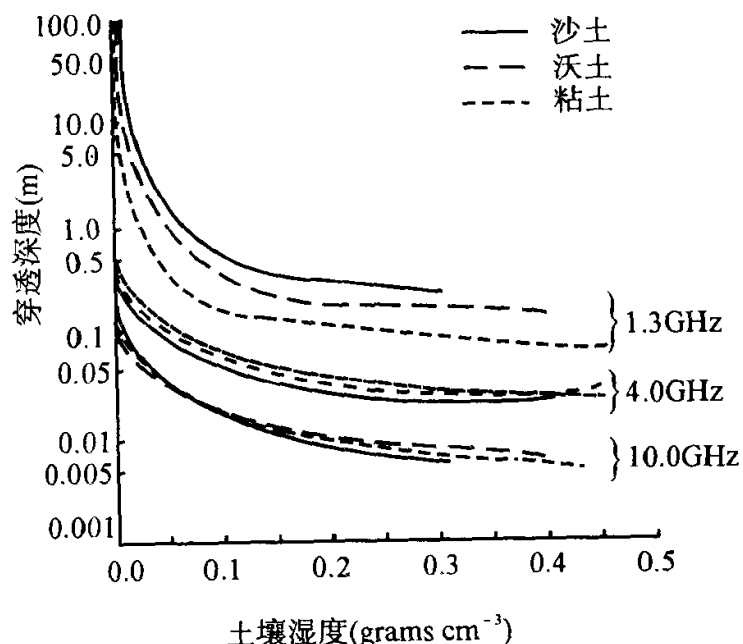


图 1-1-4 穿透深度与土壤湿度、频率、土壤类型的关系([2])

其四,微波遥感的主动方式即雷达遥感不仅可以记录电磁波振幅信号,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,其精度可以达到几米,这就是干涉测量。利用干涉测量技术,可以对地形变化(如地震、地壳运动)进行监测。目前雷达干涉测量已得到广泛应用。

微波遥感也有其不足之处。例如,除合成孔径侧视雷达图像外,一般说来,微波传感器的空间分辨率比可见光和红外传感器低,其特殊的成像方式使得数据处理和解译相对困难些,与可见光和红外传感器数据不能在空间位置上一致,不像红外与可见光传感器可以作到同步获取同一地物的信息,两类图像中的相应像元在空间位置上可以做到一致(如 TM 图像各波段)等等。但这些不足比起其上述长处来讲,是常常可以忽略的,何况目前航天微波遥感所获取的图像空间分辨率也达到了 10~20m,随着人们对微波遥感广泛利用和开发,图像处理和解译的技术和能力也会不断提高,因而所说不足也会渐渐不成其为不足了。

微波主动式传感器获得的图像常称为雷达图像,这是因为成像微波遥感常采用真实孔径雷达和合成孔径雷达,都是由雷达发展而来。所谓雷达,其英文原名是 RADAR,它借助发射无线电波,接收目标的反射信号以进行探测,当将探测到的各种目标信息及其它特征信息显示在一幅图像上时就形成了微波遥感图像。

微波遥感也可以采用被动工作方式,这主要是微波辐射计的工作方式。用天线接收地面各类地物的微波辐射信号,也可以形成图像。微波辐射计目前也成为重要的微波遥感工具。

1946 年迪克首次提出一个实用开关式的辐射计,后来的辐射计都是在

迪克式辐射计基础上改进发展起来的。这一发展十分迅速,现在已研制出噪声注入控制零平衡反馈辐射计、双参考温度自动增益控制辐射计和成像辐射计。单频段的辐射计已发展为有两频段以上的多频段辐射计。原来只具有单一用途的辐射计已发展到具有多用途。天线从一般固定的抛物面天线发展到先进的扫描式相控阵天线。接收机系统也从原来体积、重量都很大的电子管辐射计发展到微型集成式辐射计,其温度分辨力已从最初的数 K 提高到 0.02K。

雷达散射计是用来定量测试各类地物散射系数的装置,雷达经过定标后也可以当作散射计。第二次世界大战期间,美英等国的一些研究机构如麻省理工学院的辐射实验室等,就利用雷达装置进行散射系数的量测。

美国海军研究实验室 50 年代制造的四频率系统得到了广泛应用,这个四频率系统有四个工作频率,即 0.428GHz、1.2GHz、4.4GHz 和 8.8GHz,是具有窄波束的脉冲雷达系统,波束可以指向不同的仰角,这样就可以量测到散射系数随不同入射角而变化的曲线,该系统 1965 年经改善,可以获取合成孔径雷达图像。

最早的无线电实验是在接近于微波波段的频率上进行的。赫兹在 1886 年采用频率为 200MHz 的谐振器以实验验证了麦克斯韦的电磁理论,他还证实了可以接收各种物体的反射。Hilsmeyer 第一个证实了雷达可以检测舰船。美国海军研究实验室 A. H. Taylor 等人从 1922 年研制雷达,1923 年研制脉冲雷达,在 1934 年第一次尝试用脉冲雷达检测目标,其工作频率为 60MHz。这时英国也在研究脉冲雷达。

早期的成像雷达是在阴极射线管上显示图像的,而且只能显示或暗或亮两种状态,后来在 50 年代研制出机载侧视雷达 SLAR 后,由于可以获得连续的图像,而这种图像的应用基本上是靠地面的判读员,而不是靠机上的领航员,就必须将图像记录下来,以带回来供判读用,这样就产生了胶片记录的雷达图像。这时才有了多个灰度级的雷达图像。

1965 年到 1966 年,美国利用 SLAR 获得了其国土的大约 50 万 km^2 的图像,由于当时天线固定在与机身平行的方向,有 15m 长,可以得到分辨力较高的图像。

从 1952 年 Wiley 研制出一种“多普勒波束锐化”系统,到 1961 年公布由美国密执安大学和一些公司的研究成果,新型的成像雷达——合成孔径雷达问世,这种雷达只须较小的天线就可以获得很高分辨力的图像,使具有较高分辨力的航天成像雷达有可能实现。

在此期间,法国、英国和前苏联也开展了类似的研究工作。

SLAR 最初用于地质研究,人们还发现它可以在土地利用、水资源和植被调查等方面加以应用。第一次利用雷达图像测绘是 1967 年美国 and 巴拿

马政府在多云山地的测绘计划,所采用的系统是西屋公司的真实孔径雷达 AN/APQ-97,1969 年该系统成为商品,广泛应用于世界各地的测绘。不久,合成孔径雷达 GEMS 也开始投放市场。

70 年代,美国密执安环境研究所和喷气推进实验室研制出 1.25GHz 和 9GHz 的合成孔径雷达系统,具有多极化的功能,这样的多频率、多极化雷达成像系统是对雷达遥感的重大贡献。

早期合成孔径雷达图像都是用类似于产生全息图像的光学系统来进行的。后来才提出采用电子技术处理方案,随着大规模集成电路的发展,电子处理器得到广泛运用。

雷达最初主要用于军事,第二次世界大战期间,军队广泛使用的雷达 B 型扫描仪和平面位置显示器所显示的图像就是最初的雷达图像,当时主要利用这种图像搜索发现目标,或进行导航等工作,雷达用于地球科学则是 60 年代的事情。

自 1967 年美国第一次用双频道微波辐射计测量金星表面温度以来,微波传感器开始用于空间遥感。在美国、前苏联等国发射的许多宇宙飞行器和气象卫星上,不断地进行了利用微波传感器的尝试。1968 年前苏联发射“宇宙—243”卫星,第一次用微波辐射计进行对地球的微波遥感。1972 年以后,美国又相继发射“雨云”气象卫星系列,“天空试验室”和“海洋卫星—A”等,进行了一系列空间微波遥感试验。特别是 1978 年“雨云—7”卫星和“海洋卫星—A”的发射成功,标志着微波遥感技术进入了一个新的阶段。“海洋卫星—A”是一颗综合性微波遥感卫星,它装载了多波段微波扫描辐射计,微波高度计,微波散射计和合成孔径侧视雷达,获得了大量有价值的数据,其中微波高度计测量大洋水准面的精度据称已达到 7cm,超过了 10cm 的设计指标,从而把微波遥感技术推进了一大步。

80 年代期间,美国于 1981 年 11 月在哥伦比亚航天飞机第二次飞行时装载了成像雷达 SIR—A,1984 年利用航天飞机又将 SIR—B 载入太空,由于这些微波遥感成像系统提供了大量的地面的数据,甚至从撒哈拉沙漠的图像中解译出古尼罗河道,取得了举世瞩目的成绩,为推动微波遥感的进一步发展奠定了基础。

90 年代,微波遥感发展到了新的重要阶段。欧洲空间局于 1991 年发射的 ERS—1 卫星和日本于 1993 年发射的 JERS—1 标志着这一广泛应用微波遥感阶段的到来。1995 年加拿大又发射 RADARSAT,这表明到 20 世纪末,微波遥感已与可见光、红外遥感并驾齐驱,为人类认识世界和改造世界发挥重大的作用。

这里需要指出的是,我们以航天微波遥感的进程来描述微波遥感的发展过程,但其中机载微波遥感的研究、发展和应用更加深入、广泛,因为它总

是航天微波遥感发展的先驱。

我国的微波遥感技术工作起步虽晚,也已有 20 年的历史,已先后成功地研制出微波辐射计、微波扫描仪、微波高度计、微波散射计、真实孔径侧视雷达和合成孔径侧视雷达等微波传感器,通过机载合成孔径雷达获得的图像地面分辨率达 10m 左右。此外在利用微波传感器进行大气探测、土地资源调查、地质矿产调查和海洋污染监测等方面开展了许多试验研究,为微波遥感技术的发展奠定了良好的基础。目前我国正在考虑发展星载微波遥感技术以努力跟上国际微波遥感的步伐。

第二节 电磁波理论与微波

我们知道,空间任何一处只要存在着变化的电场,它就能在周围空间激发磁场;同样,变化的磁场也能在它的周围空间激发电场。这种电场和磁场能量不断地相互转化,就能形成随时间而变化的交变电磁场并以波动的形式在空间传播。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。这四个物理量一旦确定,一个平面电磁波就被完全决定了。一般说来,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。下面结合微波简要回顾一下电磁波的基本特征。

一、电磁波的基本特征与微波

微波是电磁波的一种形式,因此了解电磁波的一些基本特征也即对微波基本特征的了解。

1. 叠加原理

当空间同时存在由两个或两个以上的波源所产生的波时,每个波并不因其它的波的存在而改变其传播规律,仍保持原有的频率(或波长)和振动方向,按照自己的传播方向继续前进,而空间相遇点的振动的物理量则等于各个独立波在该点激起的振动的物理量之和。这就是波的叠加原理。叠加原理适用于遥感中所使用的各种电磁波。

根据这一原理,也可以把任何复杂的波动看成很多简单的较易理解的

波形叠加的结果。最常见的简单的波形是正弦波或简谐波。人们已经在数学上证明了任何复杂波形都可以用无穷个具有适当振幅、频率和相位的正弦波叠加而成。

2. 相干性和非相干性

由两个(或两个以上)频率、振动方向相同,相位相同或相位差恒定的电磁波在空间叠加时,合成波振幅为各个波的振幅的矢量和。因此,会出现交叠区某些地方振动加强,某些地方振动减弱或完全抵消的现象。这种现象称为干涉。产生干涉现象的电磁波称为相干波。电波天线正是利用电磁波的相干性制成的。

如果两个波是非相干的,则叠加后的合成波振幅是各个波的振幅的代数和,交叠区不会出现振动强弱交替的现象。

一般说来,凡是单色波都是相干的。微波雷达发射的电磁波和激光器产生的激光就是这样。从远处两个靠得较近的物体反射回来的波是高度相干的。因而用这类电磁波的遥感器进行成像时,获取的图像上有的地方可能没有接收到任何功率,有的地方从这两个物体接收到的反射功率则可能是其中一个物体的平均反射功率的四倍。正因为波的相干性,微波雷达图像的像片上会出现颗粒状或斑点状的特征,这是一般非相干的可见光像片所没有的,也是对解译很有意义的信息。

3. 衍射

如果电磁波投射在一个它不能透过的有限大小的障碍物上,将会有一部分波从障碍物的边界外通过。这部分波在超越障碍物时,会改变方向绕过其边缘达到障碍物后面,这种使一些辐射量发生方向改变的现象称为电磁波的衍射。

遥感器所接收的电磁辐射通量的方向和数量在遥感中是极其重要的。正是这种辐射通量构成了我们所研究的目标与遥感器之间联系的纽带。遥感器所接收的辐射通量的数量、性质和方向就成为远离遥感器目标存在的根据。因此在测量目标辐射通量的方向和性质时,就不得不考虑电磁波衍射效应的影响,因为当电磁波到达遥感天线孔径被切割或截获时要发生衍射。

4. 极化

前面已提到在自由空间中传播的电磁波又是平面波,它是一种电场和磁场相互垂直的横波,如图 1-2-1 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。所谓极化,即电磁波的电场振动方向的变化趋势。线极化是电场矢量方向不随时间变化的情况,它

又分为两个方向的极化,即水平极化和垂直极化。水平极化是指电场矢量与入射面(例如侧视雷达发射的很窄的垂直于地面的扫描波束所形成的一个平面,如图 1-2-2 所示)垂直,而垂直极化则是指电场矢量与入射面平行。若发射和接收的都是水平极化(或垂直极化)电磁波,则得到同极化 HH(或 VV)图像,若发射和接收的电磁波是不同极化的电磁波,则所得图像为交叉极化图像(HV 或 VH)。一般说来,有四种极化图像。同一地物对不同极化波的反映是不一样的,比如,表面光滑的地物其 HH 回波强度大于 HV。不同的地物在某一极化图像中的亮度可能比较接近(如日光熔岩、皮斯迦熔岩和冲积扇在 HH 图像中差异不大),而在另一种极化图像中却可能很易区分出来(如前述三种地质体在 HV 图像中的差异都很大)。

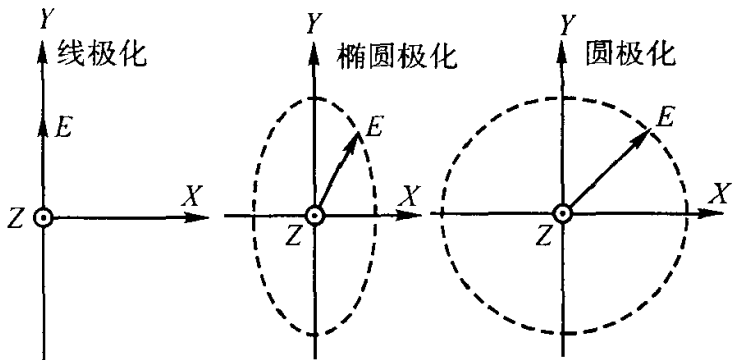


图 1-2-1 线极化、椭圆极化、圆极化示意图([8])

二、电磁辐射与微波

电磁辐射是电磁能以波的形式由物体向外发射的过程,那些能够发射电磁辐射的物体都是电磁辐射源。太阳、地球、月亮及其它星球都在太阳系的环境中,

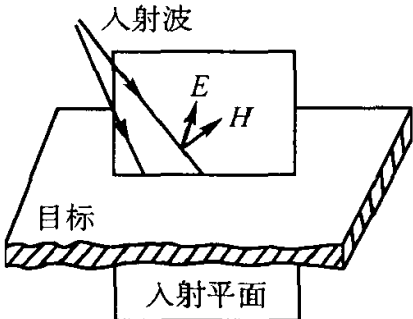


图 1-2-2 极化示意图

不过这些辐射源之中,太阳是主要的,因为包括地球在内的所有行星的辐射能量都与太阳有关。遥感主要收集地面物体反射和发射的电磁能量,借以获得地物的信息。地物反射和发射的电磁辐射都来自太阳的辐射能。除了这些天然电磁辐射源以外,激光和雷达发射机等都是人工电磁辐射源。所有电磁辐射的产生则是与物质内部的微粒的运动分不开的。

物质都是由分子和原子构成的。当没有外界的光和热等作用时,物质内部微粒各种形式的运动处于一种稳定的状态,这些运动主要包括原子内部电子围绕原子核在其固定轨道上的运动,原子核在平衡位置上的振动和分子围绕其质量中心的转动。在稳定运动状态下,这些运动具有一定的能量 $E = h\nu$ (h 为普朗克常数, ν 为频率),且不因不停的运动而衰减。然而

当物质受到外来刺激,如与其它微粒碰撞或接收到外来能量时,物质内部微粒的运动状态就会发生变化,由低能级的基态跃迁到更高能级的激发状态,电子运动的轨道可能发生变化,原子和分子振动能级和转动能级也发生改变。但是,处于激发态的粒子是十分不稳定的,一般在 10^{-8}s 内就要向基态转化。或者与另一粒子发生碰撞,将能量传递给它,或者跃迁到较低能级,同时释放出多余的能量 $\Delta E (\Delta E = h\nu')$,这时就产生了电磁辐射。 ΔE 不同,发射出去的电磁波频率也就不同,一般在 ΔE 为 10^{-4}eV 到 10^{-5}eV 时,即产生微波辐射,表 1-2-1 说明不同电磁辐射能量所对应的电磁波和物质内部的运动状态。

表 1-2-1 物质内部不同的运动状态所对应的电磁辐射([2])

物质内部状态	对应的电磁波	电磁能量(eV)
原子核内部的相互作用	γ 射线	$10^7 \sim 10^5$
层内电子的离子化	X 射线	$10^4 \sim 10^2$
外层电子的离子化	紫外线	$10^2 \sim 4$
外层电子的激励	可见光	$4 \sim 1$
分子振动,晶体振动	红外线	$1 \sim 10^{-3}$
分子旋转和反转	毫米波和微波	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
电子自转与磁场的相互作用		
核自转与磁场的相互作用	米波	10^{-5}

* eV 是用来度量微观粒子能量的一种单位,它等于一个电子通过电势差为 1 V 电场时所获得(或减少)的能量。

$$1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-12}\text{erg} \quad (1\text{erg} = 1\text{dyne} \cdot \text{cm}, 1\text{dyne} = 1\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2)$$

热能所产生的热辐射是一种重要的电磁辐射,因为热能的本质是物质微粒的无规则运动的功能,这种无规则运动引起微粒间的碰撞,使得电子轨道运动、原子或分子的振动和转动发生变化,微粒进入高能运动状态,在其重又转变为低能运动状态的过程中,就发射出电磁波,热能也就因此转化为电磁能。所以在一定条件下,任何物体都能向外发射电磁辐射,而这种因热运动所引起的电磁辐射通常被称为热辐射,一般只要温度在 0K 以上,一切物体都会发射出由这一温度所决定的热辐射。而从表 1-2-1 可以知道,物质微粒运动状态的很微小的变化就能产生微波辐射。

所有的物体都能吸收电磁辐射,吸收能力越强,其辐射能力也就越强。其中“黑体”是一种理想的吸收体和发射体,它能吸收全部外来的电磁辐射,而在一切温度下发射出最大电磁辐射。虽然这种物体并不存在,但却可由人工方法制造出来,进行电磁辐射基本规律的研究。

从上面的分析和表 1-2-1 可以知道,微波辐射和红外辐射都是热辐射,只是物质内部的运动状态不同,黑体辐射的基本定理对这两种辐射都是适用的。

黑体按波长而异的电磁辐射定律即普朗克辐射公式是:

$$M_b(\lambda) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1-2-1)$$

若按频率分布,则由 $f = c/\lambda$, $df = (c/\lambda^2)d\lambda$ 及 $M_b(f)df = M_b(\lambda)d\lambda$ 有

$$M_b(f) = \frac{2\pi h f^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (1-2-2)$$

如果表示成辐射亮度,则可写为

$$B_b(f) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (1-2-3)$$

和

$$B_b(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1-2-4)$$

上述四个公式都称为普朗克黑体辐射公式,其中 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ (J),为普朗克常数, c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8$ (m/s), $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K (K 为绝对温度度数),为玻尔兹曼常数。

当辐射波长很长(或温度很高)时, T 足够大,使得 $hc/(\lambda kT) \ll 1$,考虑到这一因素,将(1-2-1)式分母中 $e^{hc/\lambda kT}$ 一项按级数展开,即

$$e^{hc/\lambda kT} = 1 + \frac{hc}{\lambda kT} + \frac{h^2 c^2}{2\lambda^2 k^2 T^2} + \dots \quad (1-2-5)$$

将此式代入(1-2-1),有

$$M_b(\lambda) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \quad (1-2-6)$$

和

$$B_b(\lambda) = 2kT/\lambda^2 \quad (1-2-7)$$

这就是瑞利—金斯辐射公式,它是在波长相当长的情况下适用的公式,因而在微波遥感中十分有用。它表明在某一波长范围内,辐射亮度与绝对温度的一次项成正比,这就是以物体的绝对温度作为热辐射能量度量的缘由。

如果允许瑞利—金斯公式相对于普朗克公式的误差小于 1%,即 $\lambda T > 0.77$ (mK) 或 $f/T < 3.9 \times 10^8$ (HzK),则可推出该公式对于微波的适用范围,即在 $T = 300$ K (常温下的地物) 时, $\lambda > 2.57$ mm 或 $f < 117$ GHz,这就是说,瑞利—金斯公式对目前所使用的全部微波波段 ($\lambda \geq 3$ mm) 都是成立的,即使波长短到 1 mm (300 GHz),相对误差也不会超过 3%。

对于一般物体的辐射,一般用相同温度下的黑体辐射来表示,即所谓基尔霍夫定律:

$$M_e = \alpha M_b \quad (1-2-8)$$

式中 M_e 为物体在所有的波长下总的辐射通量密度, α 是其吸收率, M_b 是

相同温度下黑体的辐射通量密度,该式若写成下式

$$\epsilon = \frac{M_e}{M_b} \quad (1-2-9)$$

则表示物体的发射率,可见物体的发射率等于其吸收率。对于瑞利-金斯公式,一般物体的辐射亮度只要在黑体的相应公式中加上这样一个吸收率或发射率系数即可。

由(1-2-9)式定义的发射率是半球发射率,它给出了辐射体在球面空间内的发射本领,为区别起见,有时也可写成 e_h 。但是,地物的发射率也可能随测量方向而变,特别是表面磨光的金属。因此,我们用 e_θ 表示地物的定向发射本领,它是与辐射表面的法线成 θ 角的小立体角内所测到的发射率。当 $\theta=0$ 的特殊情况时的发射率叫做法向发射率,用 e_n 表示。由于大多数遥感器都是探测辐射源规定方向上的一个小立体角内的辐射通量,所以 e_θ 和 e_n 就显得特别重要。对于磨光金属来说, e_h 比 e_n 大 20% 左右。但是除了磨光金属和光滑表面外,通常 e_h , e_θ 和 e_n 三者之间的差别不大,往往可以不加区分,这时就用 e 来表示物体的发射本领。

第三节 微波与物质的相互作用

一、微波与大气

地物发射或反射的电磁波在到达空间传感器之前必须穿过大气层,因而会与大气层中的物质发生复杂的相互作用,使到达传感器的信息已不再完全是原来的信息。大气层的物质包括各种气体与其它微粒,它们与电磁波之间的复杂相互作用主要是不同大气层界面对电磁波的散射和对具有某一波长电磁波的吸收作用,这样造成了传感器所收集到的电磁波信息已是衰减的信号。我们已了解大气对于可见光和红外线的影响,那么,大气对微波的衰减作用究竟如何呢?

一般说来,大气衰减作用的程度与大气成分及其物理性质有关,与电磁波长有关,一般电磁波频率越高(即波长越短),大气衰减作用越显著,相反,频率越低,或波长越长,大气衰减可忽略不计。

大气对微波的衰减作用主要有大气中水分子和氧分子对微波的吸收,大气微粒对微波的散射。

我们知道气体分子所具有的能量有几种形式,即平移动能,与轨道有关的电子能量,振动能量及转动能量。当分子与周围的电磁场发生相互作用