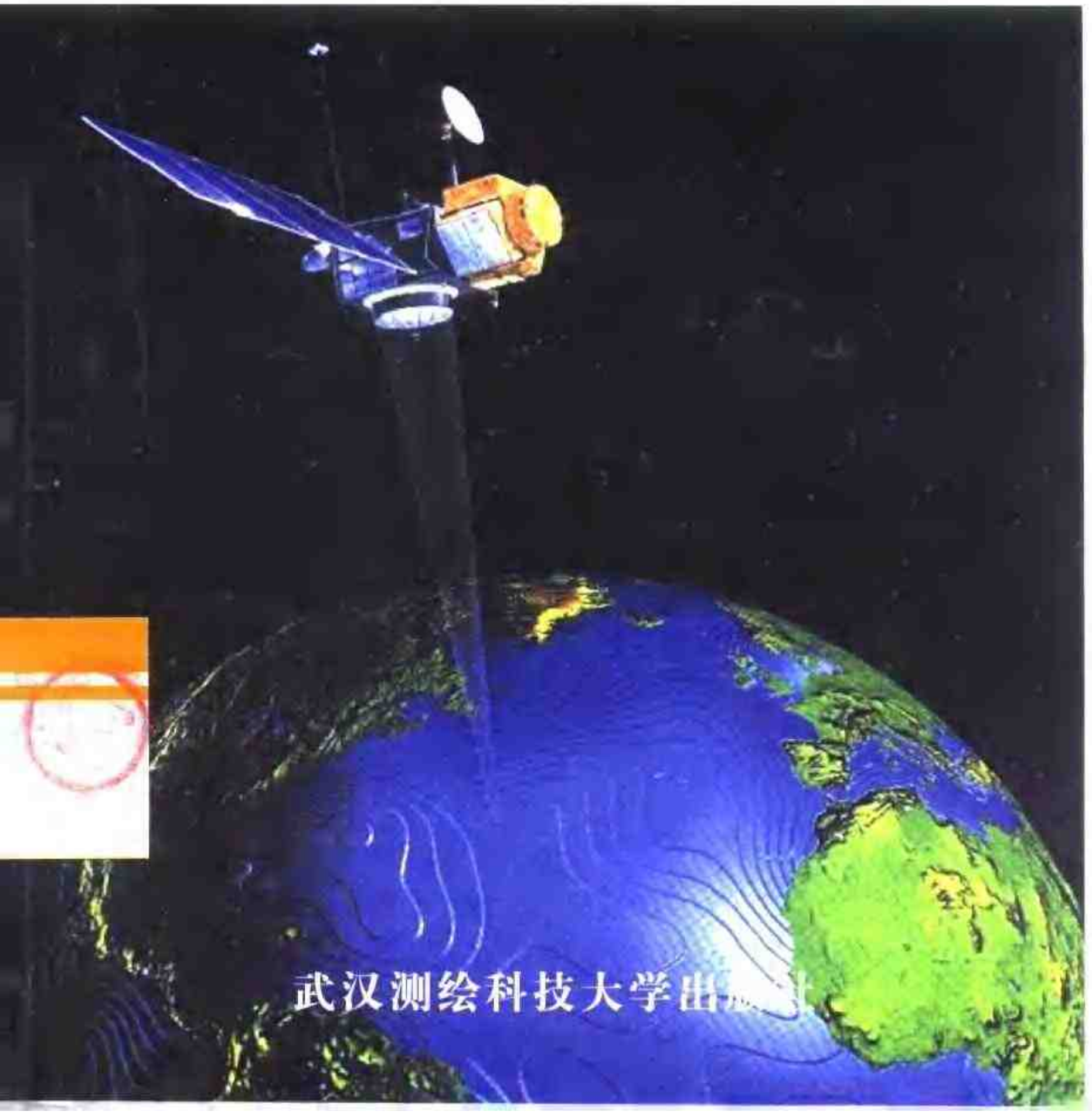
# 微波遥感原理

## 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

HK63/20
北京航空航天大学
★ 藏 书 ★
图书馆

舒 宁 编著

武汉测绘科技大学出版社

C0484408

(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

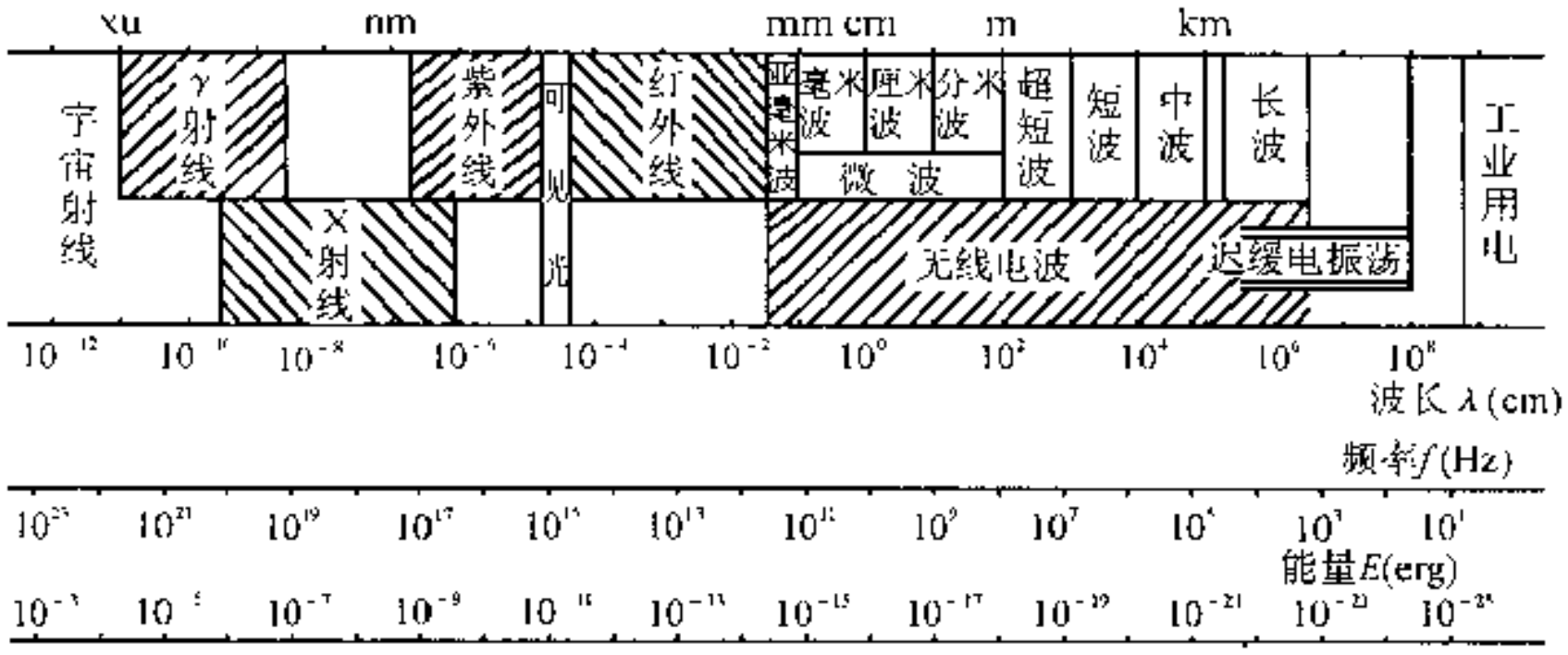
微波是电磁波的一种形式。把微波与可见光、红外线、紫外线、X射线、γ射线及无线电波等按波长大小顺序排列起来，可以得到如图1-1-1(a)的电磁波谱，从中我们可以看到微波实际上也是一种无线电波，它的波长从1mm到1000mm，一般分为毫米波，厘米波，分米波和米波。微波各波段及命名如图1-1-1(b)所示。微波遥感就是利用某种传感器接收地面各种地物发射或反射的微波信号，藉以识别、分析地物，提取所需的信息。在遥感技术体系中，可见光是人们最为熟悉的，无论是航空摄影，还是航天摄影，或者利用某种扫描仪获取反映地面信息的像片或数字图像，为人们认识和发现各类地物及其相互关系起到了重要的作用，在资源与环境的调查研究中产生了越来越大的效益。红外遥感是利用0.76～1000μm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？

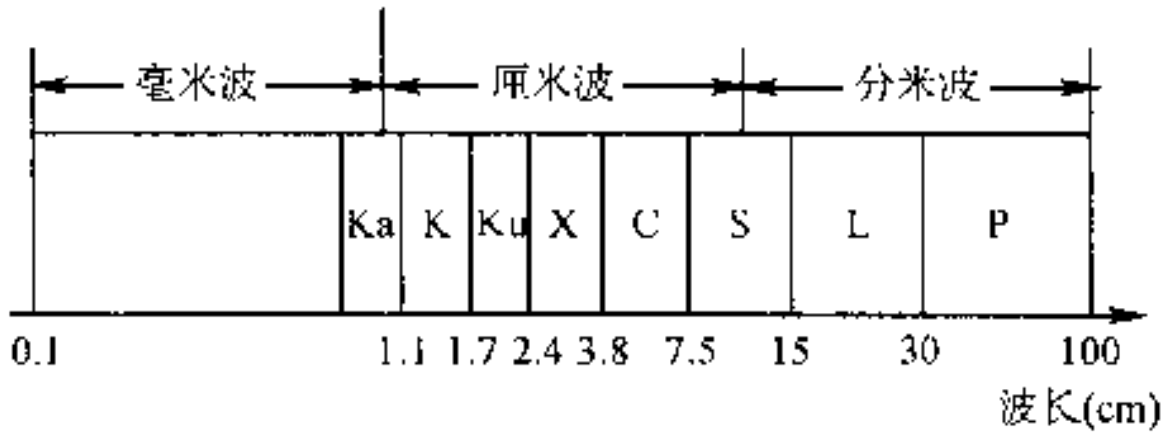
其一，微波能穿透云雾、雨雪，具有全天候工作能力。

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。

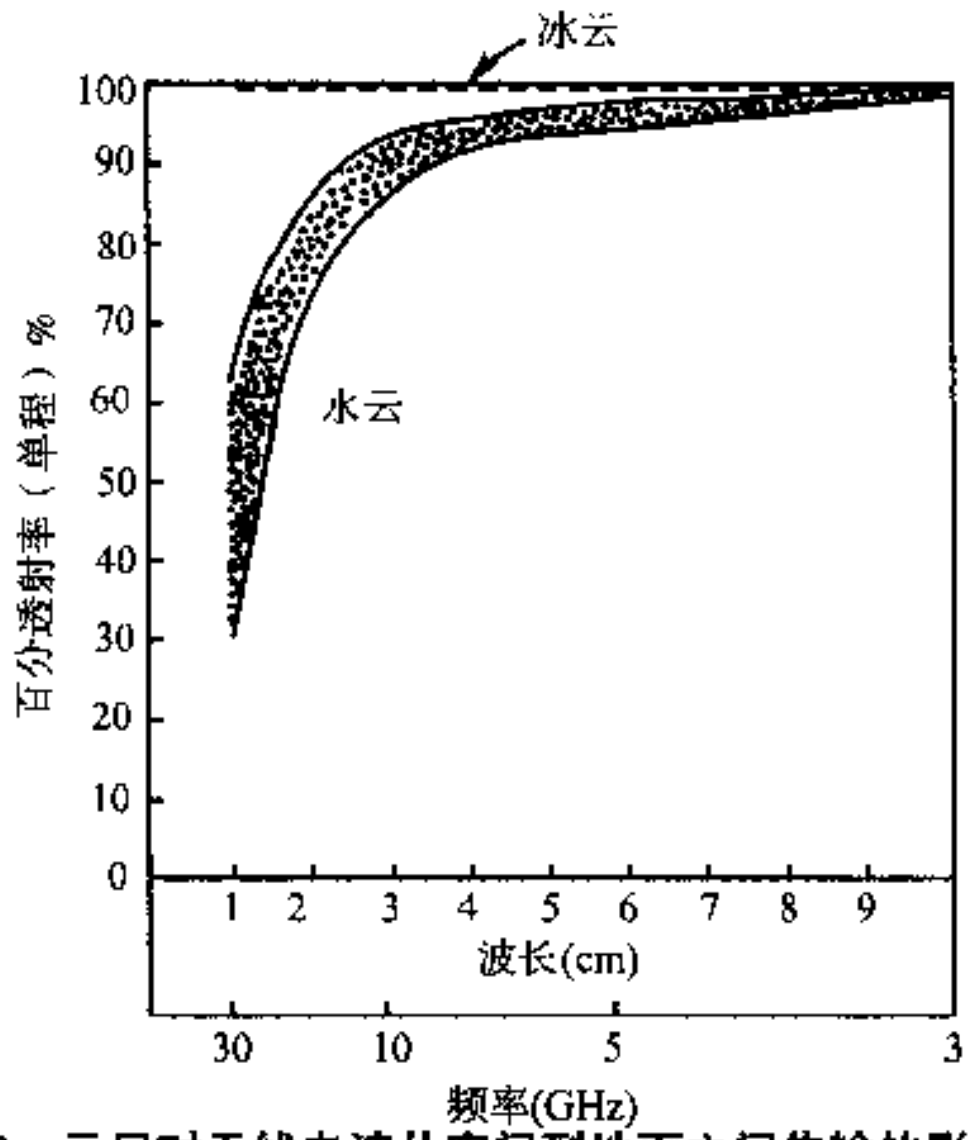



图 1-1-2 云层对无线电波从空间到地面之间传输的影响([2])

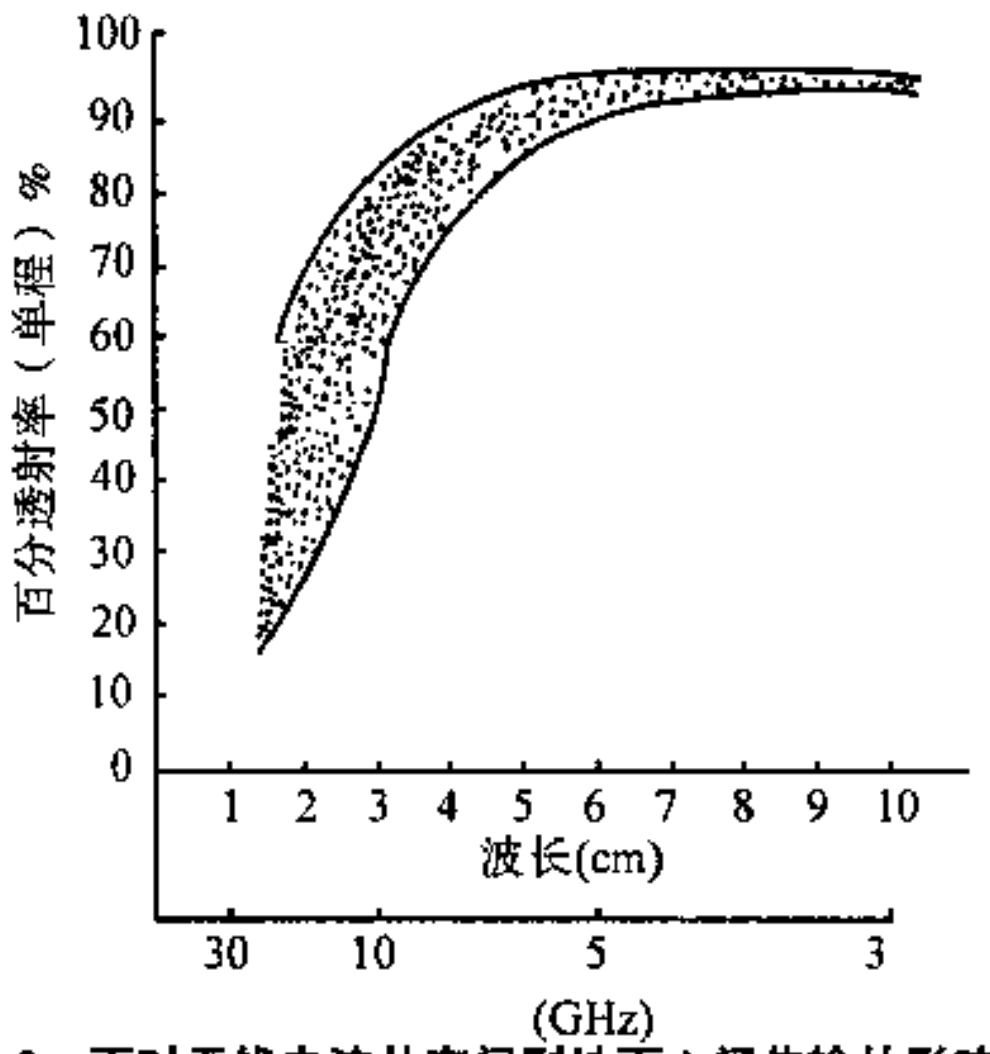



图 1-1-3 雨对无线电波从空间到地面之间传输的影响([2])

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。

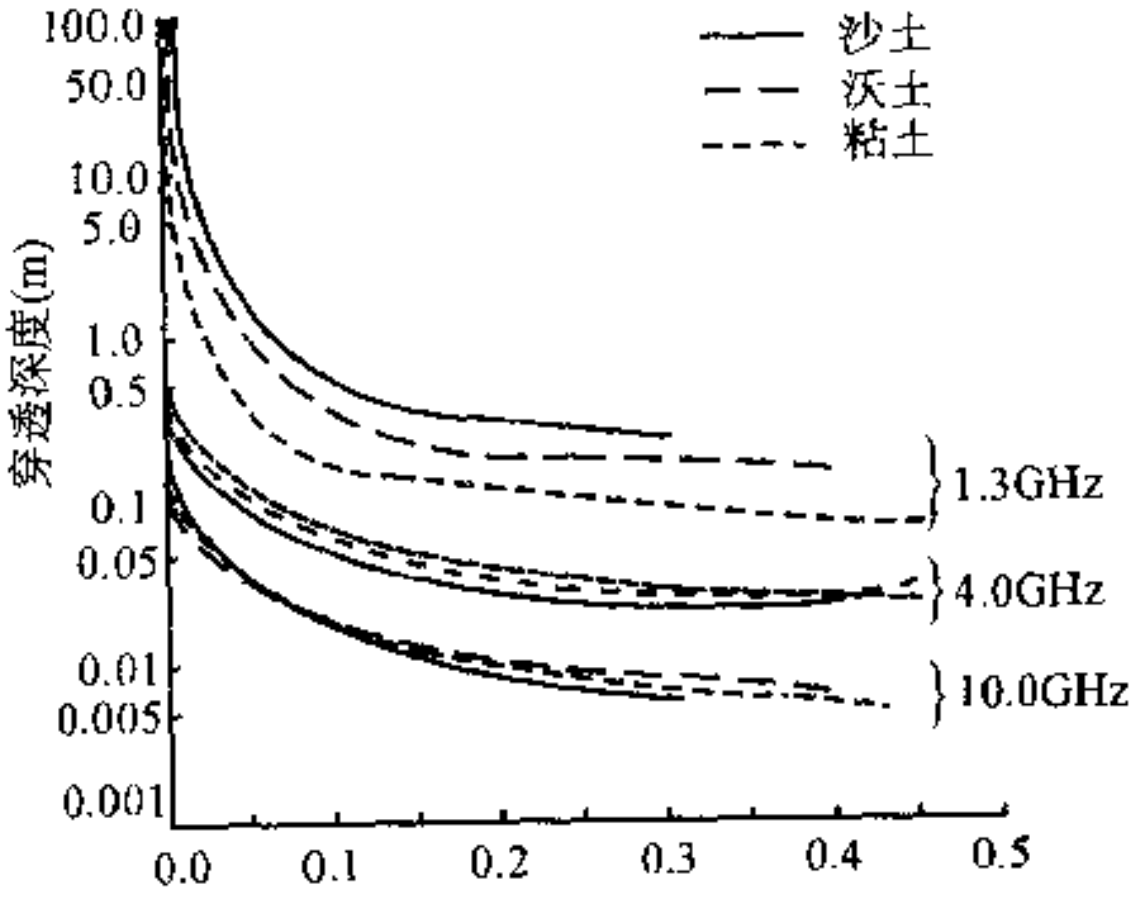



**图 1-1-4　穿透深度与土壤湿度、频率、土壤类型的关系([2])**

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。Hiilsmeyer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，由于可以获取连续的图像，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年美国和巴拿

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，它就能够在周围空间激发磁场；同样，变化的磁场也能够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的。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面改变其传播规律，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)。

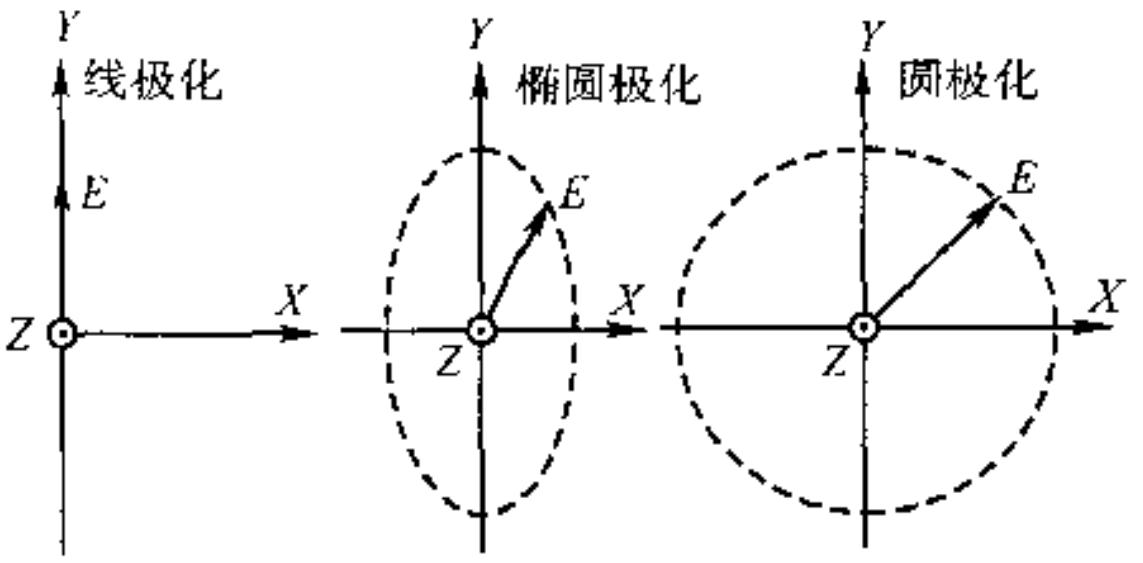



图 1-2-1　线极化、椭圆极化、圆极化示意图([8])

## 二、电磁辐射与微波

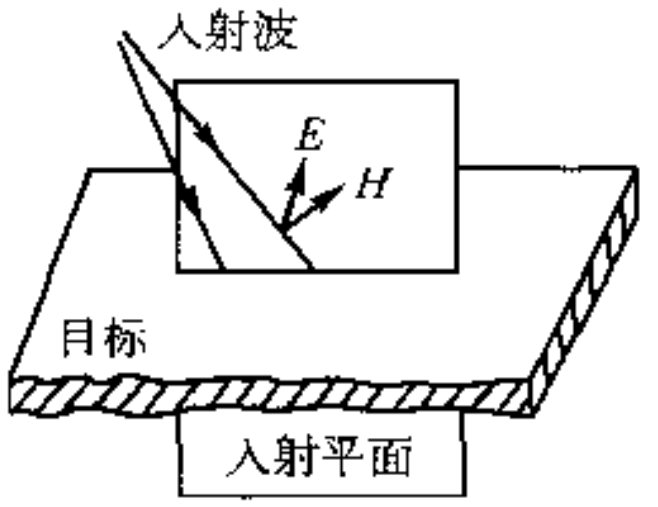



图 1-2-2　极化示意图

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，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 $E = h\upsilon$($h$ 为普朗克常数，$\upsilon$ 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 $\Delta E(\Delta E = h\upsilon')$，这时就产生了电磁辐射。$\Delta E$ 不同，发射出去的电磁波频率也就不同，一般在 $\Delta E$ 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 | $10^{7}\sim10^{5}$ |
| 层内电子的离子化 | X 射线 | $10^{4}\sim10^{2}$ |
| 外层电子的离子化 | 紫外线 | $10^{2}\sim4$ |
| 外层电子的激励 | 可见光 | $4\sim1$ |
| 分子振动，晶体振动 | 红外线 | $1\sim10^{-3}$ |
| 分子旋转和反转 | 毫米波和微波 | $10^{-4}\sim10^{-5}$ |
| 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。

$1\text{eV} = 1.60219\times10^{-12}\text{erg}$　($1\text{erg} = 1\text{dyne}\cdot\text{cm}$, $1\text{dync} = 1\text{g}\cdot\text{cm/s}^2$)

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：

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

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

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

如果表示成辐射亮度，则可写为

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

和

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

上述四个公式都称为普朗克黑体辐射公式，其中 $h=6.626\times10^{-34}$(J)，为普朗克常数，$c$ 为光速，$c=2.998\times10^8$(m/s)，$k=1.381\times10^{-23}$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 $hc/(\lambda kT)<<1$，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

$$e^{hc/\lambda kT} = 1+\frac{hc}{\lambda kT}+\frac{h^2c^2}{2\lambda^2k^2T^2}+\cdots \tag{1-2-5}$$

将此式代入(1-2-1)，有

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

和

$$B_b(\lambda) = 2kT/\lambda^2 \tag{1-2-7}$$

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 $f/T<3.9\times10^8$(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($\lambda\geqslant3$mm)都是成立的，即使波长短到 1mm(300GHz)，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：

$$M_e = \alpha M_b \tag{1-2-8}$$

式中 $M_e$ 为物体在所有的波长下总的辐射通量密度，$\alpha$ 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

$$\varepsilon = \frac{M_e}{M_b} \tag{1-2-9}$$

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 $e_\theta$ 表示地物的定向发射本领，它是与辐射表面的法线成 $\theta$ 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 $e_\theta$ 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 $e_h$，$e_\theta$ 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

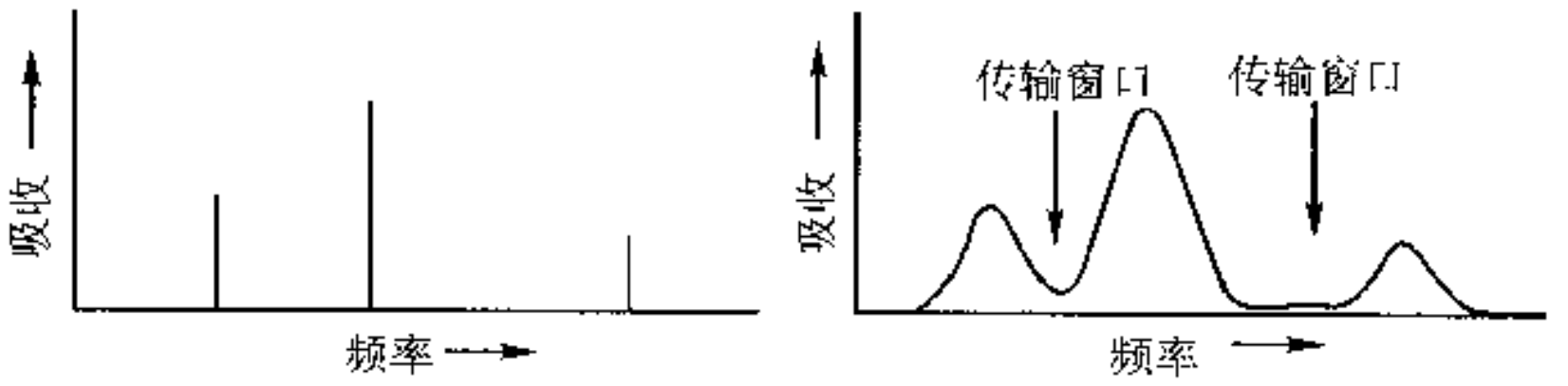
地物发射或反射的电磁波在到达空间传感器之前必须穿过大气层，因而会与大气层中的物质发生复杂的相互作用，使到达传感器的信息已不再完全是原来的信息。大气层的物质包括各种气体与其它微粒，它们与电磁波之间的复杂相互作用主要是不同大气层界面对电磁波的散射和对具有某一波长电磁波的吸收作用，这样造成了传感器所收集到的电磁波信息已是衰减的信号。我们已了解大气对于可见光和红外线的影响，那么，大气对微波的衰减作用究竟如何呢？

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

时,它们的能级会发生变化,这时它吸收或发射某一频率的电磁辐射能量。单个的分子吸收或发射的谱线是一些不连续的谱线。大气中的众多分子的吸收或发射谱线则是由无数不同频率上的谱线所形成的一条连续的谱线(如图 1-3-1)。大气中对微波的吸收作用主要是氧分子和水分子所致,其微波吸收谱线有如图 1-3-2 和图 1-3-3 所示,这一吸收谱线是由氧分子和水分子的转动能级跃迁引起的。




(a) 单个分子吸收谱线　　(b) 气体的吸收谱线

图 1-3-1　单分子和多分子气体的吸收谱([2])

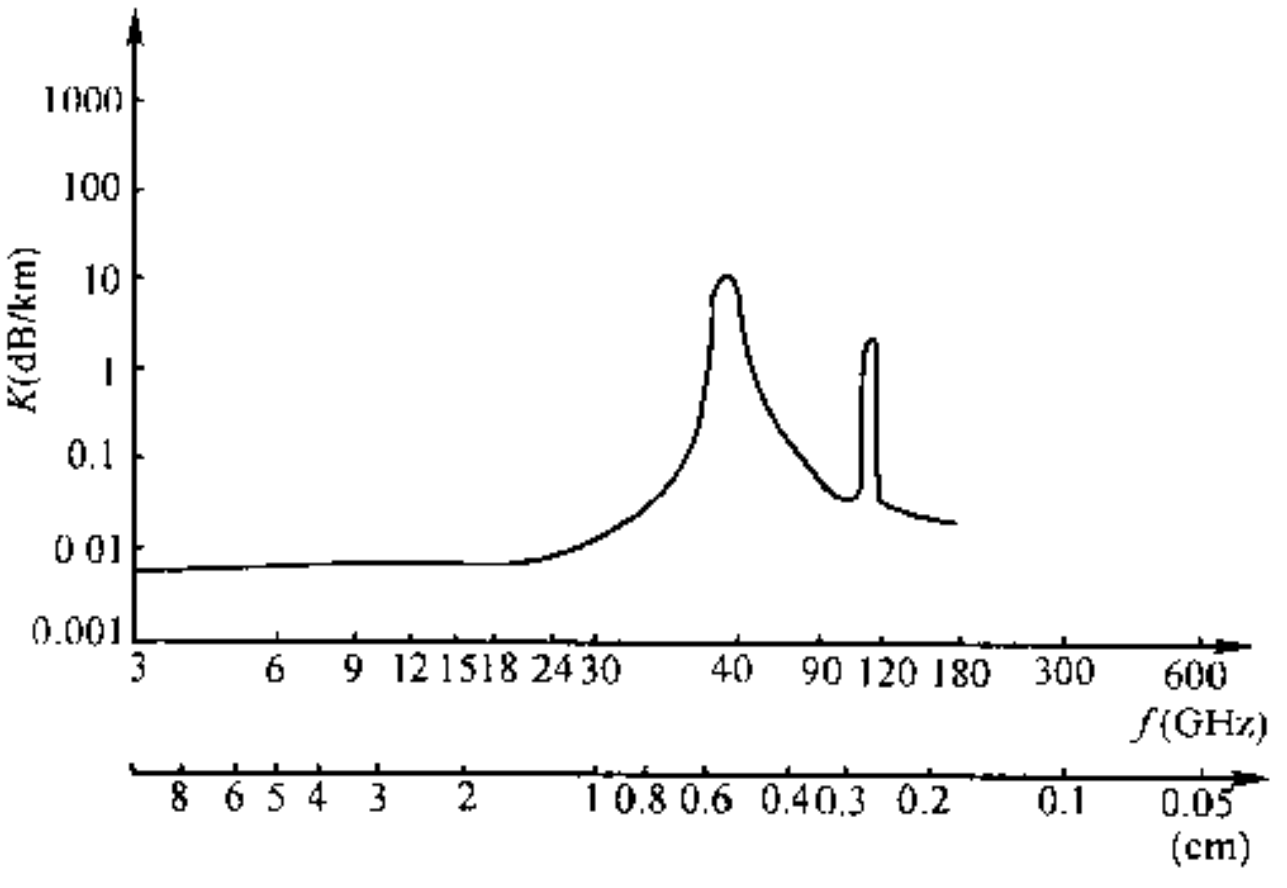



图 1-3-2　不同波长时氧对微波的吸收([2])

氧分子对微波的吸收中心波长位于 0.253cm 和 0.50cm 处,从水分子和氧分子对微波的吸收谱线比较中可以看出,氧分子的吸收作用较强。

根据这些情况,一般可采用 2.06 - 2.22mm、3.0 - 3.75mm、7.5 - 11.5mm和 20mm 以上的波长作为微波遥感的窗口,在这四个波段内大气的吸收作用是很小的。

我们知道,电磁波在大气层的传播过程中会受到微小粒子的散射,这种影响是不可忽视的。大气微粒可分为三大类,即水滴(包括云雾、霾和降水)、冰粒和尘埃,它们的散射因微粒大小和电磁波长的相对关系不同而异。凡微粒直径比波长小得多时,散射截面积与波长的四次方成反比,即电磁波越短,散射越强,这种散射称为瑞利散射。而当微粒直径大于波长时,散射

作用对波长的敏感就不如瑞利散射，其散射截面积与波长的 $n$ 次方成反比（其中 $n=0,1,2$），这种散射称为米氏散射。

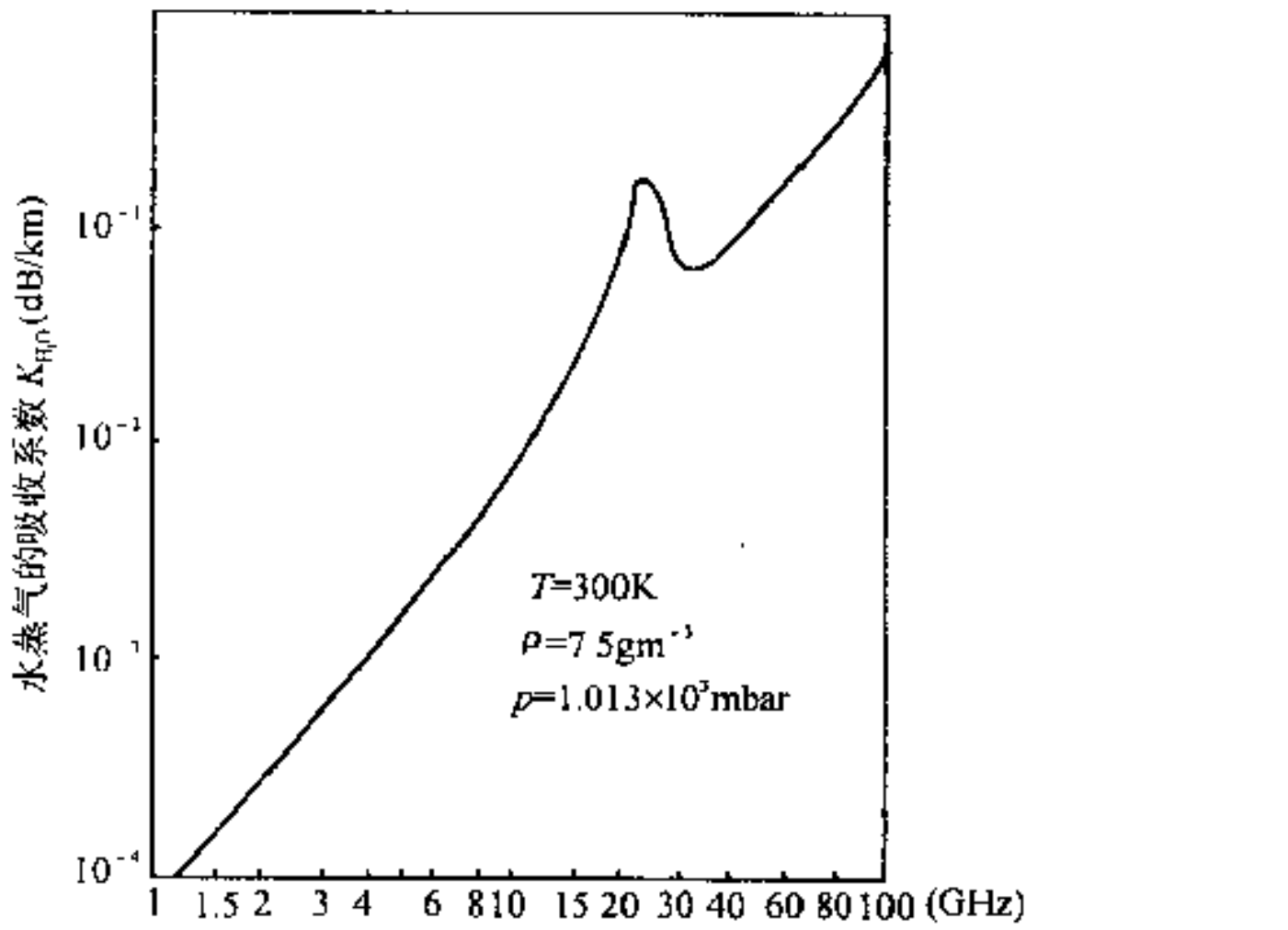



图 1-3-3 水气的吸收谱线([2])

由水粒组成的云粒子一般直径很小，不超过 100 微米，比微波波长要小一两个量级，故对微波的散射满足瑞利散射条件，但这时散射作用比吸收作用小得多，一般可以忽略，故微波在非降水云层中的衰减，主要由水粒的吸收引起，其衰减系数 $K_c$ 为

$$K_c = 4.35M \times 10^{[0.0122\times(291-T)-1]}/\lambda^2(\mathrm{dB/km}) \qquad (1\text{-}3\text{-}1)$$

式中 $M$ 为云层含水量($g/m^3$)。根据该式可见，云的吸收在一定的温度和一定的微波波长之下，与云层含水量成线性关系，图 1-3-4 是按该式计算出的含水量在 $1g/m^3$ 时不同温度下云层衰减系数与微波波长的关系。

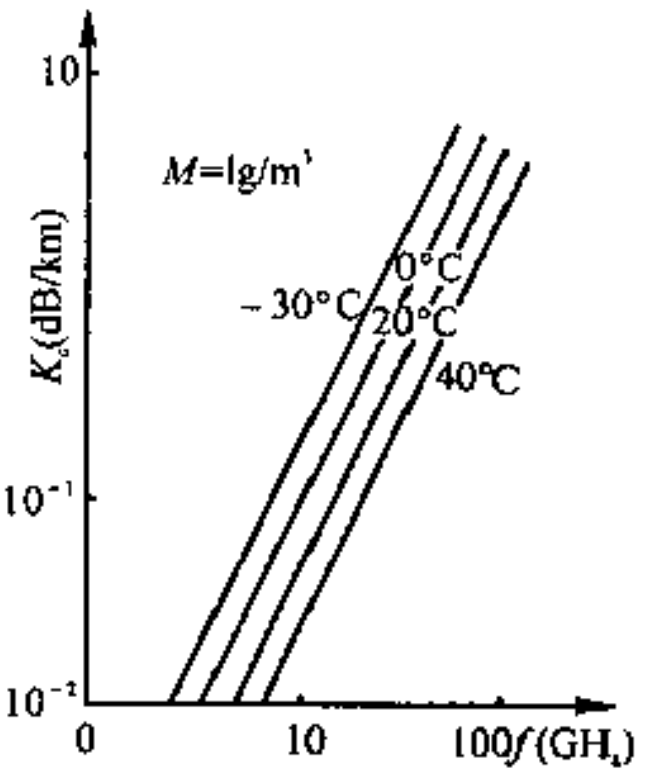



图 1-3-4 水云的衰减系数([2])

降水云层中的粒子主要有雨滴，冰粒，雪花和干湿冰雹等，其直径均大于 100μm，有的可以达到几毫米（如雨滴）、几厘米（如冰雹），它们对微波的散射必须按米氏散射来分析。这时吸收情况十分复杂，散射作用一般是不能忽略的。1970 年，Setzer 得出雨的衰减系数 $K_{er}$ 与降雨率 $R_r$ 的关系曲线，即图 1-3-5。

1971 年 J. E. Paris 对雨的微波吸收和散射作了比较系统的研究，其研究表明，当微波频率小于 10.69GHz（约 2.81cm）时，水滴的散射衰减作用已经逐渐小于吸收；当微波频率为 4.805GHz（约 6.3cm）时，散射作用只有吸

收的十分之一。而当频率大于 10.69GHz 时，水滴的散射作用则完全不能忽略。但如果不是暴雨和大雨，雨滴直径不超过 2.5mm 左右，而频率又不大于 19.35GHz 时，则雨滴的散射作用比吸收小将近十倍，仍可予以忽略。

还应当指出，云层对微波在大气中的传播除了产生吸收和散射效应之外，云层本身也会发射出微波辐射而呈现为亮度温度。这种亮度作为随机干扰噪声叠加在目标亮温上，对目标的微波辐射亮度测量产生影响。频率愈高，这种噪声就愈严重。因此，当目标的发射率较低而微波传感器的工作频段很高时，这种云层干扰噪声的影响就不能忽略，而必须借助于其它波段传感器所获得的资料将这种干扰排除。反之，如果要对云层遥感的话，传感器的工作频率就要尽可能高。

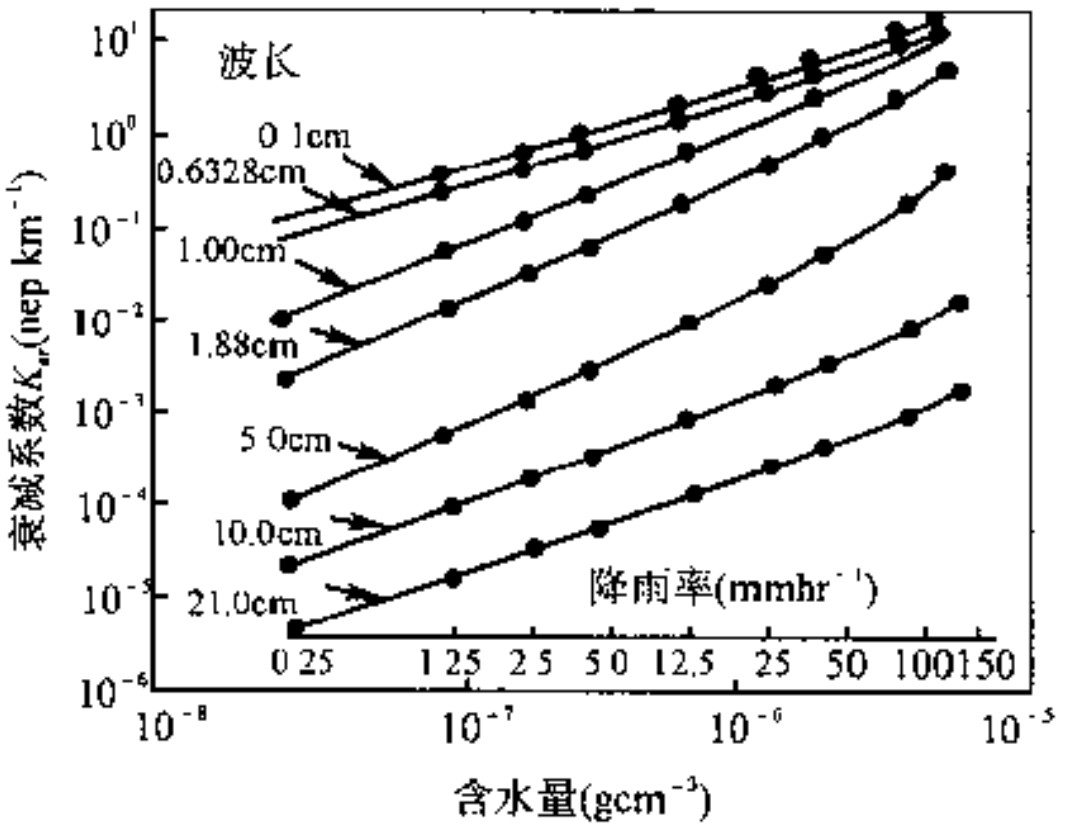



图 1-3-5　雨的衰减系数与降雨率的关系([2])

从以上分析可以看出，在 1～300GHz 的频带内，随着波长愈来愈短，微波与大气的相互作用有两个重要的转变：其一，大气对微波能量传输的衰减作用由很弱到很强；其二，云层微粒和雨微粒对微波的吸收和散射作用(其宏观表现也是衰减)从极轻微到十分显著。正是由于这些性质，使得微波波段具有三个方面的重要使用价值：对于地面与空间的通信和从空间对地面的观测，云雨的影响可减至最小，这是其它波段无法比拟的；如果对云层进行观测，则可得到关于云层含水量和分布范围的信息；即使在有云层的情况下也可进行除云层参数以外的大气性质的测量。

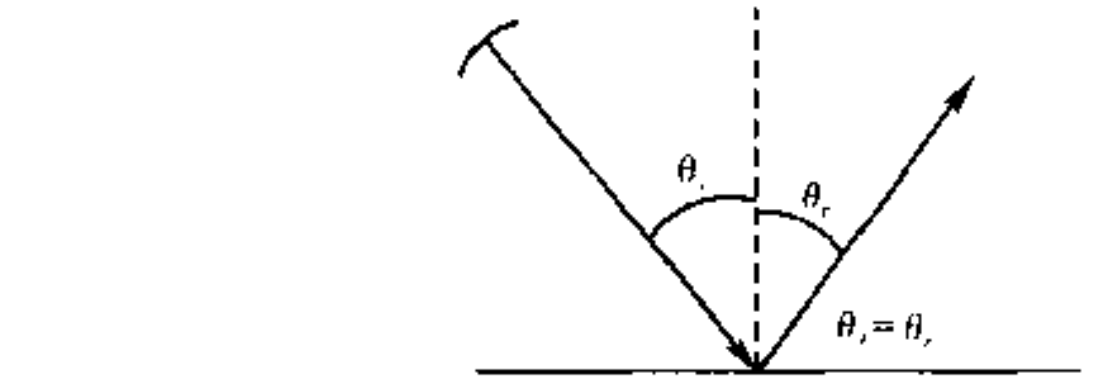
## 二、微波与地物

入射电磁波与地表面各类地物发生相互作用的过程中，在地物表面产生镜面反射或漫反射(或称为散射)，并由透射或绕射进入表层以下，在部分或全部被吸收后，可能部分或全部再辐射出去(即发射)。通常把地物表面的反射，散射，透射，吸收和发射仅仅作为表面现象处理。更全面的分析则还应考虑表面以下介质的作用，因为即便是金属，不光其表面产生反射，也还有电磁波的透入，只不过其透入的深度有限，随波长而异。这样在表面以下物质与电磁波发生相互作用的积累就构成地物对电磁波相互作用的一个组成部分。

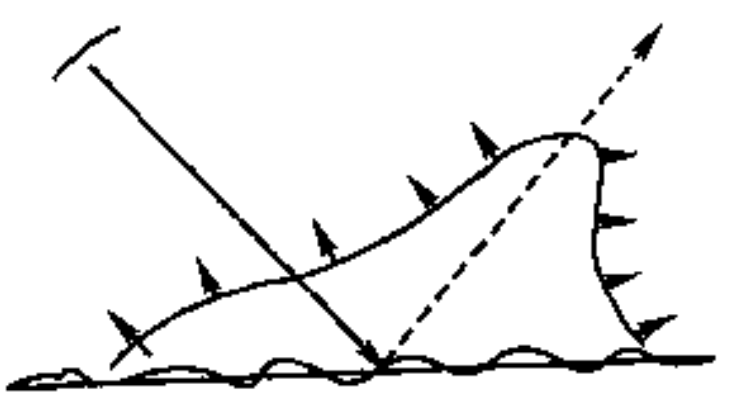
按物理学的理论来分析，入射电磁波会促使地物表面的自由电荷和束

缚电荷产生振荡运动，这种振荡运动转而辐射出次级场，或者深入到第二介质(透射，绕射)，或者返回初始介质(反射，散射，发射)，或者这两种情况同时发生，这就是电磁波与地物的相互作用的基本现象。

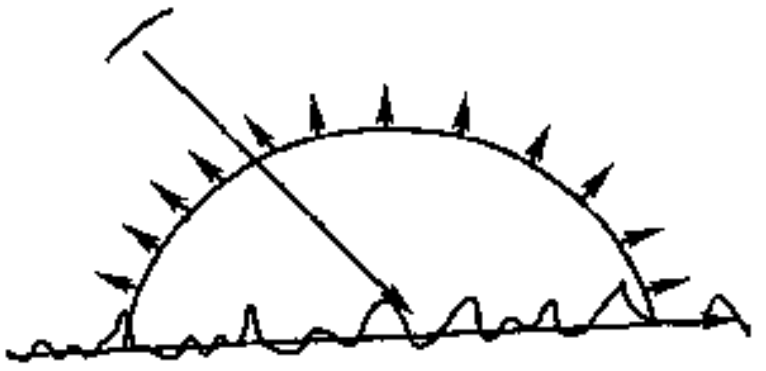
一般说来，若地物表面是光滑的，入射电磁波将产生反射，波束垂直地物表面，反射波就按逆入射方向返回。而当地物表面是粗糙面时，入射电磁波就会产生散射，即向各方向漫反射，顺着入射方向的散射分量称为前向散射，逆入射方向的散射分量称为后向散射。在地物表面只是有些粗糙，还不是很粗糙时，即中等粗糙程度的情况下，还存在如同光滑表面的较强镜面反射分量，但如果表面相当粗糙，则各方向的散射分量强度近乎相同。图 1-3-6 即各种表面的反射和散射情况。




(a) 完全光滑表面



(b) 稍粗糙表面



(c) 十分粗糙表面

**图 1-3-6　表面的几种类型([8])**

对于光滑表面，反射电磁波服从斯涅耳定律，即入射角等于反射角，反射波的极化方式与入射波相同。但在粗糙表面，由于漫反射电磁波的散射服从朗伯余弦定律，这时在镜面反射方向的一部分保持相干特征，称为相干散射分量，其余方向上的散射分量则称为非相干分量。一部分散射波的极化方式与入射波相同，另一部分则是正交极化状态。

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。如电磁波对介质的穿透深度定义为

$$d = 1/\alpha = \sqrt{1/(\omega\mu\sigma)} \qquad (1\text{-}3\text{-}2)$$

式中 $\alpha$ 为介质的衰减常数，单位为 dB/m，$\omega$ 是电磁波的角频率，$\mu$ 是介质的磁导率，单位为 H/m，$\sigma$ 是介质的电导率，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%。例如对于铜来说，由于 $\sigma = 5.80 \times 10^7 \mathrm{s/m}$，$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \mathrm{H/m}$，1.0GHz 的微波对它的穿透深度为 2μm 左右，所以，一般可以认为金属和其它良导体对微波来说都是不透明的。

具有任意极化的电磁波都可以分解为 TE 波和 TM 波两个分量。TE 波是电场矢量垂直于入射平面的极化波，即水平极化波。TM 波则是电场矢量平行于入射平面的极化波，即垂直极化波，当这两种波入射到两种均匀介质的光滑界面上时，产生反射和折射，如图 1-3-7 所示。介质 1 的介电特性由 $\mu_1$ 和 $\epsilon_1$ 表征，$\epsilon$ 为介质的介电常数，单位为 F/m，介质 2 的介电特征用 $\mu_2$ 和 $\epsilon_2$ 表征，$\theta_1$ 为入射角，$\theta_2$ 为折射角，TE 波和 TM 波的反射系数 $R_h$ 和 $R_v$ 分别为

$$R_h = \frac{\eta_2 \cos\theta_1 - \eta_1 \cos\theta_2}{\eta_2 \cos\theta_1 + \eta_1 \cos\theta_2}$$
$$R_v = \frac{\eta_1 \cos\theta_1 - \eta_2 \cos\theta_2}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \tag{1-3-3}$$

式中 $\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}$，$\eta_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2}$ 分别为两种介质的本征阻抗，它们的传输系数 $T_h$ 和 $T_v$ 分别是

$$T_h = \frac{2\eta_2 \cos\theta_1}{\eta_2 \cos\theta_1 + \eta_1 \cos\theta_2}$$
$$T_v = \frac{2\eta_1 \cos\theta_1}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \tag{1-3-4}$$

以上式(1-3-3)和式(1-3-4)称为斯涅耳公式。

如果令 $k_1$、$k_2$ 分别为电磁波在两类介质中的传播矢量，由于在界面上的切向分量连续，相位相等，于是可以得斯涅耳折射定律：

$$k_2 \sin\theta_2 = k_1 \sin\theta_1 \tag{1-3-5}$$

如果当电磁波由介质 1 入射到介质 2 时，$k_1 > k_2$，由斯涅耳折射定律，$(k_1/k_2)\sin\theta_1 > 1$，这时不存在折射角，也就是说入射波将不会进入介质 2 而在界面上产生全反射。

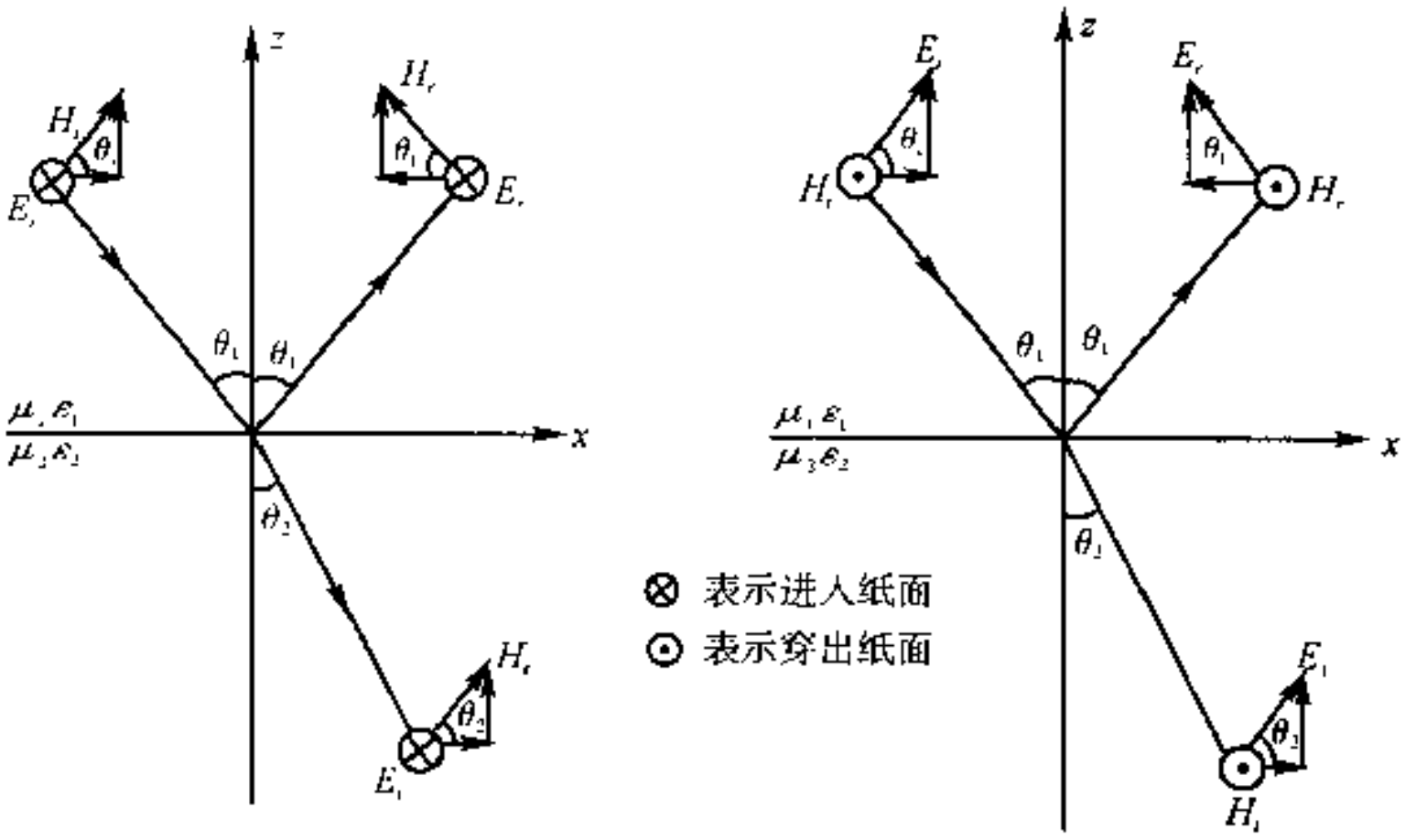
特殊的情况是，对于 TM 波，当入射角为某一角度 $\theta_B$ 时，入射电磁波将全部透过两种均匀介质的界面，进入第二种介质，毫无反射，这时的入射角 $\theta_B$ 称为布儒斯特角，于是由(1-3-3)式，令 $R_V = 0$，有

$$\sqrt{\epsilon_2} \cos\theta_B = \sqrt{\epsilon_1} \cos\theta_2$$

又由斯涅耳折射定律

$$\sqrt{\epsilon_1} \sin\theta_B = \sqrt{\epsilon_2} \sin\theta_2$$

故




(a)TE波　　(b)TM波

图 1-3-7　*TE* 波和 *TM* 波的反射和折射([2])

$$\mathrm{tg}\theta_B = \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_1}$$

全透射现象只是对 *TM* 波才存在,对于 *TE* 波,不存在全透射。

当电磁波入射到粗糙的地物表面时,如前所述,被散射的电磁波既有镜面的反射分量,又有漫反射分量,这时斯涅耳定律和斯涅耳公式已不再适用。

皮克(Peake)在对电磁波与地物表面的相互作用作了深入详细的研究之后,提出了微分散射系数和表面极化发射率等概念。

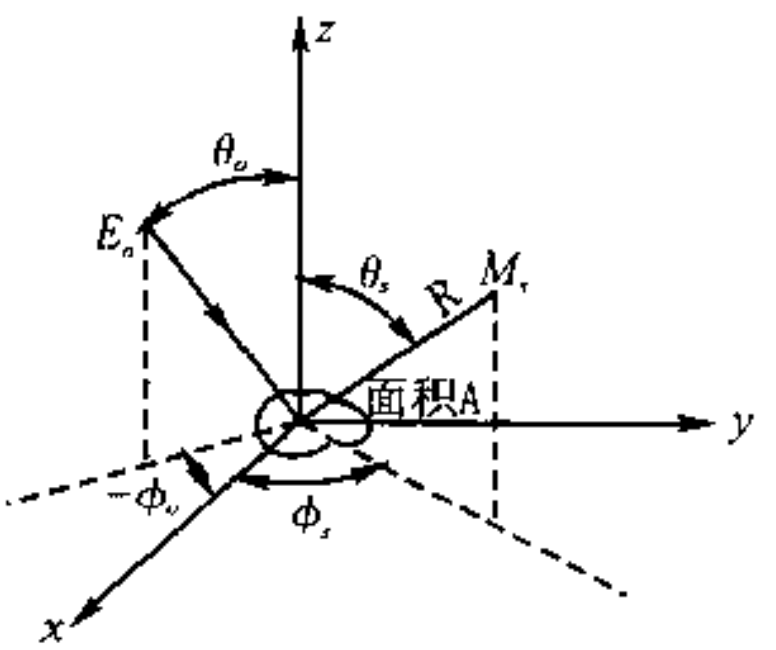



图 1-3-8　入射和散射场的几何关系([2])

如图 1-3-8 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 $S_o(\mathrm{W/m^2})$从$(\theta_o,\varphi_o)$方向上入射到表面面积为 $A$ 的某地物上,在$(\theta_s,\varphi_s)$方向上与地物相距间 $R$ 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

$$\gamma(\theta_o\varphi_o\theta_s\varphi_s) = \frac{4\pi R^2 S_s}{S_o A\cos\theta_o} \tag{1-3-6}$$

$A\cos\theta_o$ 是 $A$ 在$(\theta_o\varphi_o)$方向上的投影面积,(如图 1-3-9 所示),故 $\gamma$ 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 $\sigma^o$ 为

$$\sigma^o(o,s) = \frac{4\pi R^2 S_s}{S_o A} \tag{1-3-7}$$

这里 $o$ 代表入射场方向,$s$ 代表散射场方向。

对于粗糙地物表面，散射的镜面分量的极化方式与入射波的极化相同，漫反射分量的极化方式一部分与入射波相同，另一部分为正交极化。为了反映不同分量的不同极化方式，散射系数 $\gamma_{ij}$ 中下标 $i$ 表示入射波的极化方式，$i$ 为 $H$ 或 $V$，$H$ 为水平极化，$V$ 为垂直极化，$j$ 表示散射的极化方式，同样有 $j$ 为 $H$ 或 $V$。一般 $\gamma_{ii}$ 表示同极化微分散射系数，$\gamma_{ij}$ 表示正交极化微分散射系数。

皮克根据基尔霍夫辐射定律和地物表面对于入射波的散射极化性质，给出了用表面微分散射系数 $\gamma_{ii}(o,s)$ 和 $\gamma_{ij}(o,s)$ 表示的表面极化发射率：

$$l_i(o) = 1 - \frac{1}{4\pi}\int[\gamma_{ii}(o,s) + \gamma_{ij}(o,s)]\mathrm{d}\Omega \qquad (1\text{-}3\text{-}8)$$

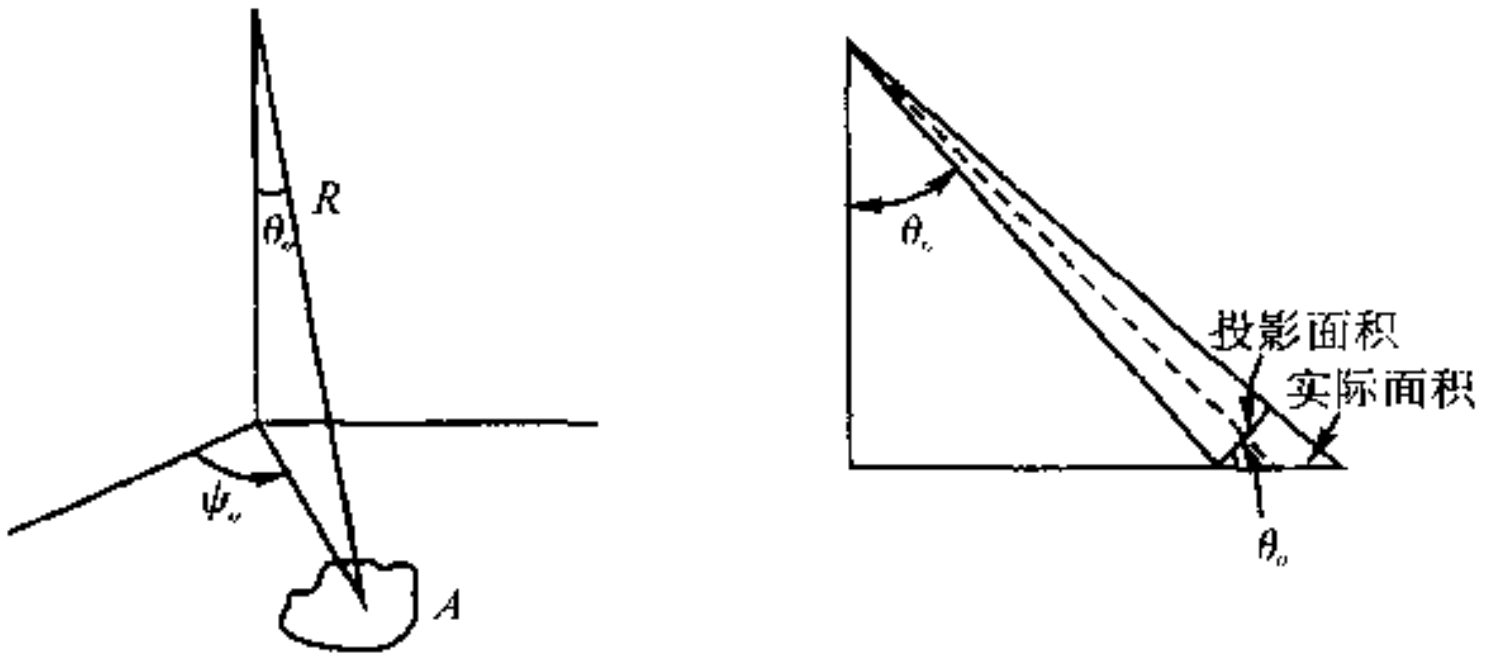



图 1-3-9　$\sigma^0$ 和 $\gamma$ 的几何关系([2])

按照朗伯的观点，粗糙的地物表面对于入射波的散射服从余弦定律，即单位实际面积的散射系数与入射角余弦和散射角余弦的乘积成正比：

$$\sigma^0_{ii}(o,s) + \sigma^0_{ij}(o,s) = \gamma_o\cos\theta_o\cos\theta_s \qquad (1\text{-}3\text{-}9)$$

式中 $\gamma_o$ 是与散射表面的介电特性有关的常数，这就是朗伯余弦定律，根据(1-3-7)式，(1-3-9)式可写为

$$\gamma_{ii}(o,s) + \gamma_{ij}(o,s) = \gamma_o\cos\theta_s \qquad (1\text{-}3\text{-}10)$$

将此式代入(1-3-8)式，由 $\mathrm{d}\Omega = \sin\theta_s\mathrm{d}\theta_s\mathrm{d}\varphi_s$，粗糙表面的发射率为

$$l_i(\theta_o,\varphi_o) = 1 - \frac{1}{4\pi}\int_{\varphi_s=0}^{2\pi}\int_{\theta_s=0}^{2\pi}\gamma_o\cos\theta_s\sin\theta_s\mathrm{d}\theta_s\mathrm{d}\varphi_s$$

$$= 1 - \frac{\gamma_o}{4\pi} \qquad (1\text{-}3\text{-}11)$$

此式说明粗糙表面的发射率在所有方向都相同，这种粗糙表面称为朗伯表面。

# 第四节　无线电谱与微波谱

第一节中图 1-1-1 告诉我们，微波包含在无线电波中，这里将无线电谱和微波谱作进一步介绍。

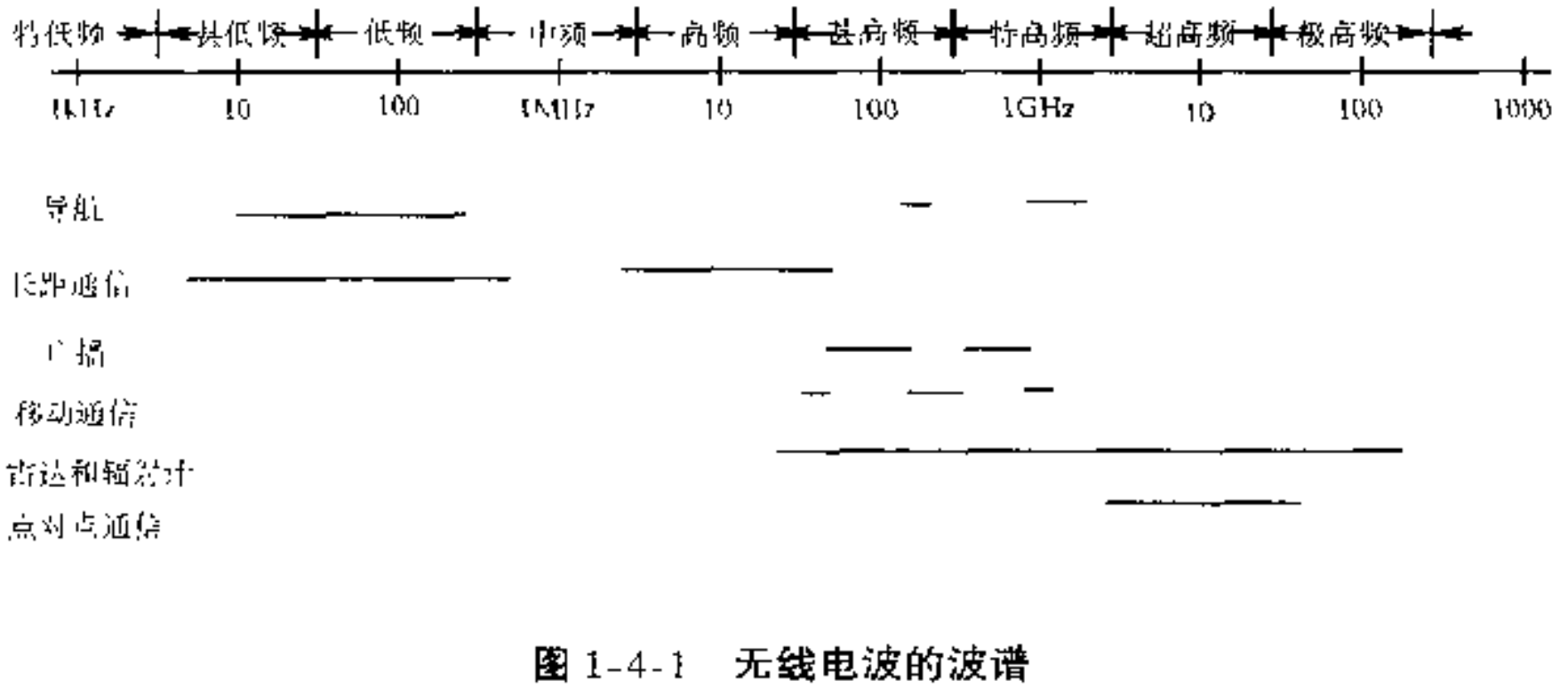



**图 1-4-1　无线电波的波谱**

无线电的频率分布如图 1-4-1 所示，它的频率范围是从 1kHz 到 1000GHz，其中按国际电信联盟(ITU)的规定又划分为一些频段。1kHz 到 3kHz 为特低频(SLF)。3kHz 到 30kHz 为甚低频(VLF)，该频段主要用于海底通信和 Omega 导航系统。30kHz 到 300kHz 的低频(LF)适用于某些类型的通信和罗兰 C(LoranC)定位系统。由 300kHz 到 3000kHz 的中频(MF)包括了 500kHz 到 1500kHz 的标准广播频段，低于 500kHz 的频段部分用于某些海洋通信，高于 1500kHz 的部分也可用于通信。

3MHz 到 30MHz 的高频(HF)段主要用于远程通信和远距离短波广播，这个频段受电离层反射作用大，受其吸收作用小，某些雷达系统如用以测量海洋波的特性的远程雷达也利用了高频段。

30MHz 到 300MHz 的甚高频(VHF)主要用于电视和视距内调频广播，也用于与飞机等的通信。

300MHz 到 3000MHz 的特高频(UHF)广泛用于雷达，也用于成像雷达如海洋卫星上的合成孔径雷达。微波辐射计通常以 1.665GHz 作为工作频段。这一频段也有用于电视广播、与飞机和车辆的移动通信的。

3GHz 到 30GHz 的超高频(SHF)大部分用于遥感雷达系统，遥感雷达的频率集中在 9～10GHz、14～16GHz。遥感辐射计主要集中在若干点频上，如 4.995、10.69、15.375 和19.35GHz。卫星通信用到 4GHz、6GHz 附近的频段和 11～13GHz 中的一些频段以及更高的频率上。无线电通信，各类地面雷达和船用雷达也用到这一频段。水蒸汽的一个主要吸收频率接近于

22GHz，因此 22GHz 附近的频段专门用于大气辐射观测。

30GHz 到 300GHz 的极高频(EHF)段大部分利用得不多，因为在 60GHz 附近存在强烈的氧气吸收，30GHz 到 40GHz 的频段部分用得比较广泛。遥感雷达工作频率为 32GHz 到 36GHz、50GHz 到 60GHz 的多频率辐射计用于观测大气温度的剖面分布。射电天文学运用的频率位于 31.4GHz、37GHz 和 89GHz。这些频率也可以用于遥感辐射计。某些军用成像雷达用到 95GHz 附近频段。

图 1-4-2 为较详尽的微波谱。国际上通行将 0.3GHz 到 300GHz 作为微波频段，它是无线电的一个部分，为无线电中的特高频、超高频和极高频。图 1-4-2 中用字母命名的各微波波段在表 1-4-1 中更清楚地表示出来。各波段还有分波段，如 K 波段的低频率部分称为 Ku 波段，其频率范围通常认为从 10.9GHz 到 22GHz，高于 22GHz 的频率称为 Ka 波段。除了 Q 波段和 V 波段，都用于雷达。遥感雷达所用频率是全球管理无线电会议(WARC)按国际基准决定的，1979 年规定的频率分配如表 1-4-2 所示。

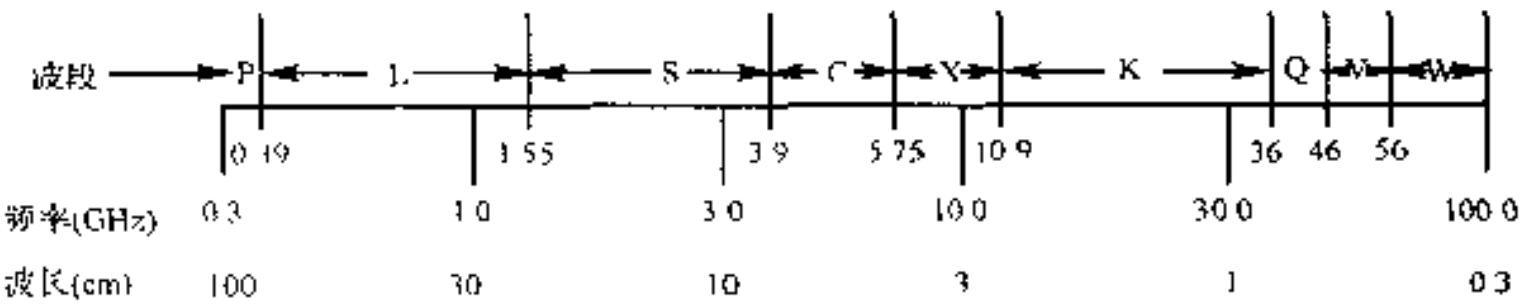



**图 1-4-2 微波的频段**

**表 1-4-1 波段名称(GHz)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| *P* | 0.225—0.390 | *K* | 10.90—36.0 |
| *L* | 0.390—1.550 | Q | 36.0—46.0 |
| *S* | 1.550—4.20 | *V* | 46.0—56.0 |
| *C* | 4.20—5.75 | *W* | 56.0—100 |
| *X* | 5.75—10.90 | | |

**表 1-4-2 用于遥感的雷达频率分配(GHz))**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1.215—1.300 | 3.1—3.3 | 5.25—5.35 | 8.55—8.65 |
| 9.50—9.80 | 13.4- 14.0 | 17.2—17.3 | 24.05—24.25 |
| 35.5—35.6 | 78.0—79.0 | | |

**其它分配举例**

| | |
|---|---|
| 雷达高度计 | 4.2—4.4 |
| 多普勒导航器 | 8.8，13.25—13.40 |
| 气象雷达 | 5.6—5.65，9.3—9.5 |
| 海岸雷达 | 5.35—5.65，9.0—9.2，10.0—10.55 |
| 船用雷达 | 5.46—5.47，9.3—9.5，14—14.3 |
| | 24.25—25.25，31.8—33.4 |

**思考题：**

1. 微波辐射与红外辐射有什么不同？
2. 微波电磁辐射是如何产生的？
3. 试绘出水平极化波和垂直极化波。
4. 波长 8mm 相当于多少 GHz 频率？频率为 90GHz 的波其波长是多少？
5. 试总结分析大气对微波的吸收和散射作用。

# 第二章　微波遥感系统

本章介绍用于微波遥感的传感器和主要的航天微波遥感平台。

在海洋，陆地和大气微波遥感应用中，常用的有效的传感器包括下列五种：1）散射计，2）高度计，3）无线电地下探测器，4）微波辐射计，5）侧视雷达。

以上五种当中，只有微波辐射计和侧视雷达可用于成像，其它则不能。这里首先将非成像传感器作一简要介绍，然后着重介绍辐射计和侧视雷达，主要阐述这两类微波成像传感器的工作原理，并以天线的有关概念和参量为基础，分析了雷达波束从发射到接收，并形成图像的基本原理，即雷达方程和灰度方程的有关内容。这是雷达遥感的基本理论。本章还介绍了辐射测量的基本概念和原理。

学习本章要掌握微波成像传感器的工作原理及有关的理论。其中合成孔经侧视雷达的概念是一个难点和重点。

## 第一节　非成像微波传感器

### 一、微波散射计

一般只要能精确测量目标信号强度的雷达，都可称之为散射计。大多数雷达在校准之后，都能作为散射计使用。

微波散射计原理和设计与常规雷达基本相同，如图 2-1-1 所示，一般微波散射计的组成部分包括：1）微波发射器，2）天线，3）微波接收机，4）检波器和数据积分器。

微波散射计的功能是测量地物表面（或体积）的散射或反射特性，也就是说，它主要用于测量目标的散射特性随雷达波束入射角变化的规律，也可用于研究极化和波长变化对目标散射特性的影响。

在雷达散射测量中，系统噪声是主要的误差来源。数年前已经能制成可测量最小散射系数为 $-30$(dB)的雷达散射计，大多数目标的散射系数都可以用这样的散射计量测出来。

由散射计发射的波束入射角可以在 0°到 90°的范围内调整，但是一般都不能在整个角度范围工作，特别是机载散射计，在掠射情况下，由于作用

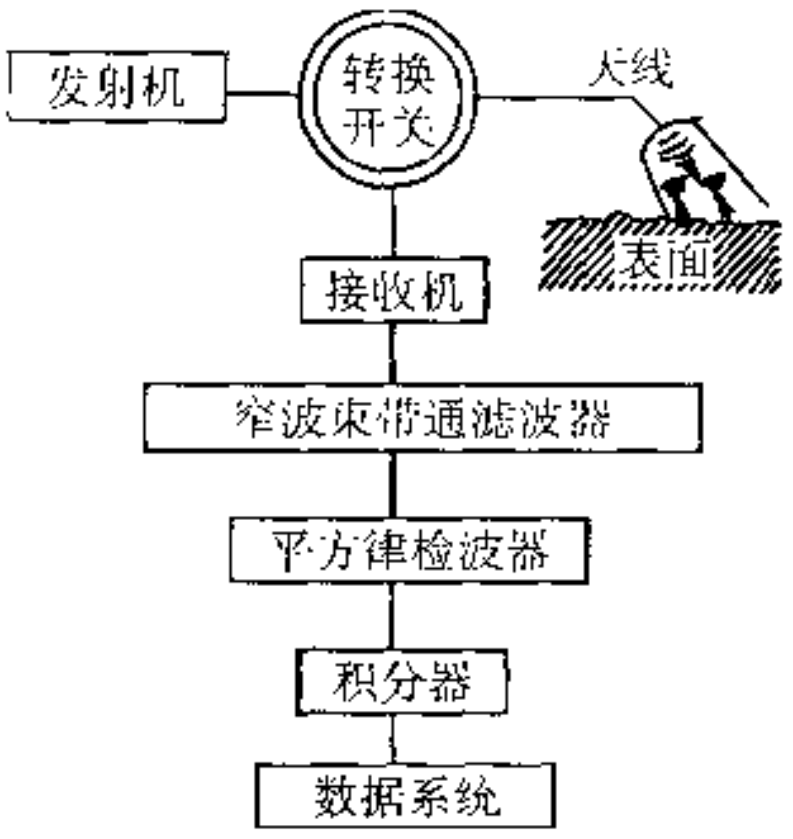



**图 2-1-1　微波散射计组成([6])**

太远,收到的回波信号十分微弱,因而无法工作。

微波散射计可以发射水平极化波,然后同时接收垂直和水平两种极化波,它还可以先发射一种极化波,再发射另一种极化波,而每次都接收两种极化波,所以对具体研究地物目标在各种情况下的散射特性是十分有利的。

大多数散射计只用一个载频工作,为了在更大的频率范围内测量地物的散射特性,以更深入研究目标对于各种频率微波的散射特性,必须使散射计具备在多种频率下工作的能力。美国 KANSAS 大学(堪萨斯)已研制出这种散射系统。

## 二、雷达高度计

图 2-1-2 是雷达高度计的基本结构。其工作原理是,按定时系统的指令,发射机发出调制射频波束,经转换开关导向天线,由天线将波束射向目标,然后还是由天线收集向天线方向发射或散射回来的那部分能量,再由转换开关引向接收机,将返回的信号进行处理后提供输出数据,以决定往返双程传播的时延,因为传播速度是已知的,由时延测量即可计算目标的距离。

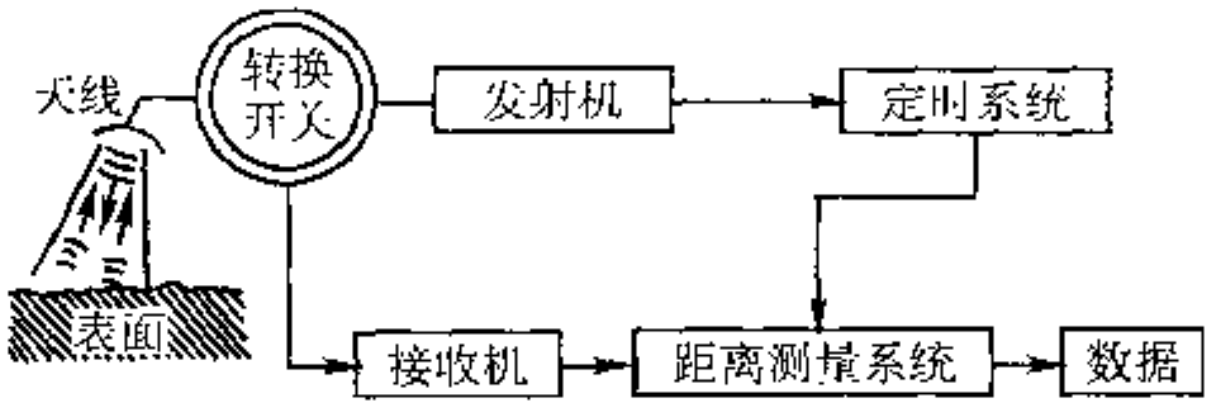



**图 2-1-2　简化的雷达高度计的方框图([6])**

为了准确地测量地表面高度变化,必须要求定时系统在测量期间具有良好的稳定性,保证测量是可重复的,由于平台的姿态和高度变化可能引入很大的量测误差,因此还必须设法修正由于姿态和高度变化带来的误差。

雷达高度计系统可能达到的量测精度，有赖于测量高度计的类型和工作频率以及特殊的系统设计。

在飞机和宇宙飞行器的导航和着陆系统中，雷达高度计已起到重要的作用。现在，它还可用于测量海浪高度。

### 三、无线电地下探测器

无线电地下探测器是测量地下层及其分界的一种装置，其工作原理包括以下几方面：

1)对于某些地物，低频率波束可以穿透其表面。

2)探测器接收到的反射功率可以检测出来。

3)能实现足够的距离分辨力。

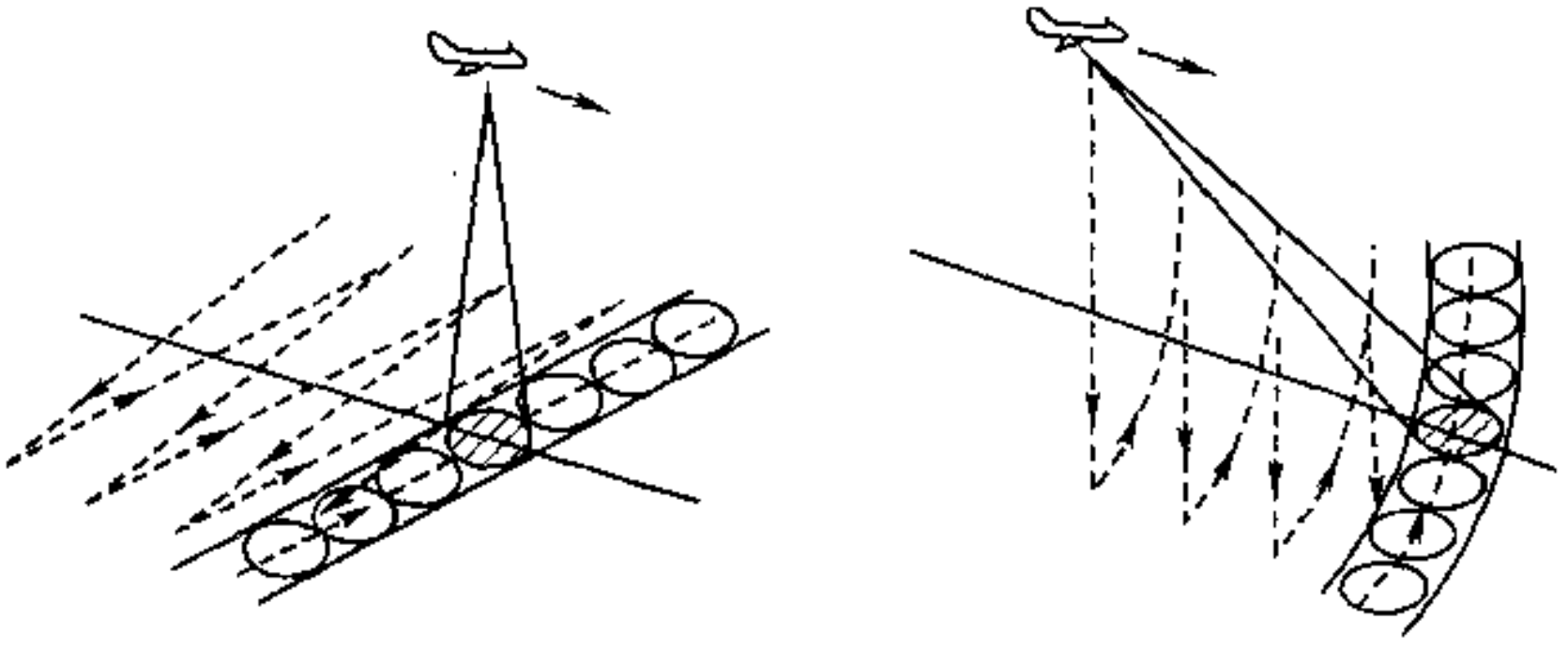
这种装置一般仅适于在飞机工作，由于在空气和地面交界处通常具有强烈的反射，必须设法排除强烈反射的影响，如调整入射角等。

## 第二节　成像微波传感器

### 一、微波辐射计

微波辐射计可用于记录目标的亮度温度。将它放在地面平台上时，它可以记录一个观测单元的亮度温度。如果安装在飞行器上，则可以记录沿飞行方向的一条亮度温度曲线，而当将辐射的天线设计成扫描方式，就可以获得一个扫描区域的亮度温度数据，或一条沿着飞行方向，具有一定宽度的带状区域的亮度温度图。天线扫描有两种方式，一种是机械方式，比如让天线摆动，或者让天线的反射器摆动，另一种是电控方式。它并不像散射计，高度计那样发射雷达波束，因而工作方式如同红外扫描仪，只是所接收的是地物目标发射的微波信号。图 2-2-1 为微波辐射计天线的两种不同扫描方式，天线在每一瞬间接收来自地面一个近乎圆形或椭圆形地块内地物的微波辐射信号，通过天线来回扫描，随着飞行器的前进，获得扫描地带上各种地物的信号，并形成图像。

辐射计天线接收的辐射能量来自地面物体的发射辐射和反射辐射。正如第一章所述，根据瑞利—金斯公式，物体发射的功率与温度成正比。如果温度一定，物体发射的功率最大值等于相同温度下黑体所发射的功率。如果将天线放进一个由理想吸收材料制成的暗箱内，由于这种理想吸收材料几乎没有反射，是理想的发射材料，其绝对温度为 $T_b$，则被天线所接收的功



(a) 垂直扫描　　(b)倾斜扫描

**图 2-2-1　辐射计天线波束的扫描方式**

率 $P$ 为

$$P = kT_bB \tag{2-2-1}$$

其中 $k$ 为玻耳兹曼常数，$B$ 为辐射计带宽。这里实际上将暗箱作为黑体，由该式引出了辐射测量温度的定义，它表征了从实际地物发射的功率。一般说来，物体的发射特性用辐射测量亮度温度 $T_B$ 表征，即

$$T_B = P_B/(kB) \tag{2-2-2}$$

$P_B$ 为物体在整个带宽 $B$ 内发射的功率，$T_B$ 通过量测 $P_B$ 而得。如果与物体处于同一环境下的黑体具有恒定的温度 $T_b$，则该物体的发射率为 $e = T_B/T_b$。$e$ 的变化范围在 0 到 1 之间，对于理想的无发射物体，$e=0$，对于理想的发射物体即黑体，$e=1$。

对于实际辐射计天线接收到的功率 $P_A$，同样可以定义天线的辐射测量温度 $T_A$。

$$T_A = P_A/(kB) \tag{2-2-3}$$

在一般情况下，$T_A$ 表示入射到天线的所有方向上按天线方向图加权的全部辐射的积分，它还包括大气的影响和天线自身发射的影响。

辐射计表面上仅仅是一种接收机，但它与雷达或通信中的接收机不同，其一，物体发射是相位非相干的自然辐射，它可以扩展到整个电磁波谱，而雷达接收机所接收的输入信号则可能是相位相干，并近于单色。其二，关于接收机输出端的信噪比 $S_n$，雷达接收机为要提取接收信号中的信息，必须使 $S_n >> 1$。而辐射计的待测信号 $P_A$ 通常比接收机的噪声功率小得多，因此，辐射计是一种高灵敏度的接收机，它能精密地测出很小的输入信号电平。

图 2-2-2 是一种全功率辐射计的结构和定标的示意图，它由天线、检波前放大组合件、检波器、积分器(低通滤波器)和显示组合件构成。简单而

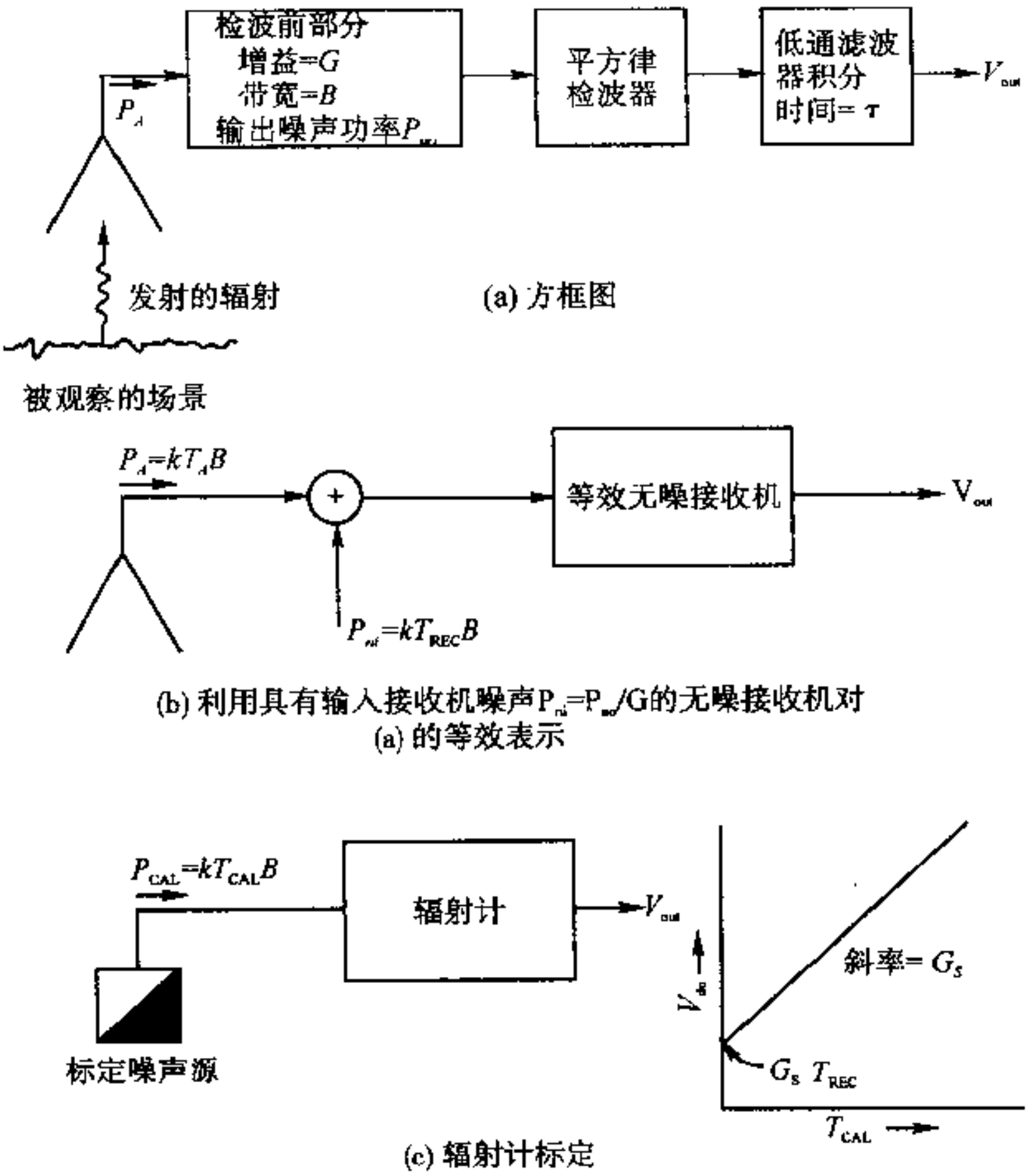



**图 2-2-2　全功率辐射计**

言，假定检波服从平方律，这样输出电压 $V_{out}$正比于输入功率。检波前组合的功率增益为 $G$，检波器的输入信号的射频带宽为 $B$，图中(a)表示辐射计的构成，(b)表示输出电压 $V_{out}$与两种输入功率的关系。如前所述，辐射计量测温度还包括天线本身的辐射，一般的处理方法是把内部产生的接收机输出噪声功率 $P_{no}$用在无噪接收机的输入端"注入"的等效输入噪声 $P_{ni}=P_{no}/G$ 来表示。根据(2-2-1)式，用等效接收机输入噪声温度 $T_{REC}$来描述 $P_{ni}$，即

$$P_{ni} = kT_{REC}B \tag{2-2-4}$$

输入功率包括投射到天线上的能量 $P_A$ 和接收机产生的噪声功率$P_{ni}$，这个输入功率称为系统的输入噪声功率，即

$$P_{sys} = P_A + P_{ni} \tag{2-2-5}$$

输出电压 $V_{out}$包括了两部分，一部分是与输入功率平均值相对应的直

流分量 $V_{dc}$，另一部分是检波后噪声谱低频分量的交流分量 $V_{ac}$（高频分量被低通滤波器滤除），即

$$V_{out} = V_{dc} + V_{ac} \tag{2-2-6}$$

而

$$V_{dc} = G_s(T_A + T_{REC}) \tag{2-2-7}$$

图 2-2-2(c)是定标示意图，用噪声温度 $T_{CAL}$ 已知的可变噪声源代替天线，由于输出电压与 $T_{CAL}$ 是线性关系，在两个以上不同的 $T_{CAL}$ 值上测量相应的 $V_{out}$，就可以完成定标，由

$$V_{dc} = a(T_{CAL} + b) \tag{2-2-8}$$

在测量计算出 $a$、$b$ 后，可得 $a = G_s$，$b = T_{REC}$，$G_s$ 即系统的增益系数，由此建立接收机的传递函数。

## 二、侧视雷达

### 1. 一般结构

如图 2-2-3 所示，侧视雷达 S 在飞机（或卫星）飞行时间向垂直于航线的方向发射一个很窄波束，这个波束在航向上很窄，在距离方向很宽，复盖了地面上一个很窄条带，飞机在飞行时不断发射这样的波束，并不断接收地面窄带上的各种地物的反射信号，于是由这些波束扫视地面一条带状区域，形成图中的成像带。每个波束是由所发射的一个短的脉冲形成，这个脉冲遇到目标后，一部分能量由地物反射返回雷达天线，即回波。地面上与飞机距离不同的目标反射的回波，由雷达天线和接收机按时间的先后次序接收下来，并由同步的亮度调制的光点在摄影胶片上按回波的强度大小记录下来，一条视频回波线就记录了窄条带上各种地物的图像。紧接着发射下一个脉冲，飞机同时向前飞行了一段很短的距离，然后又接收地面相邻窄条带的地物反射回波信号，如此继续，构成地面成像带的图像。图2-2-4表示接收地面窄条带内几个目标的详细情况。这个窄条带由 $A$ 至 $B$ 的几个目标的回波经电子处理器的处理后在阴极射线管上形成一条图像线，从 $A$ 点的回波信号到达天线的时刻起，阴极射线管上的光点即开始以恒定的速度在管面扫描。$A$ 点的回波因 $A$ 点离雷达最近，故最先在阴极射线管显示出来，接着是 1 点的回波，光点亮度依其回波信号强弱而变化，并在管面上 $X$ 处显示出来，然后是 2 点的回波显示于管面 $Y$ 处，直至 $B$ 点回波显示并在胶片上曝光后，阴极射线管即被关闭，直到接收下一

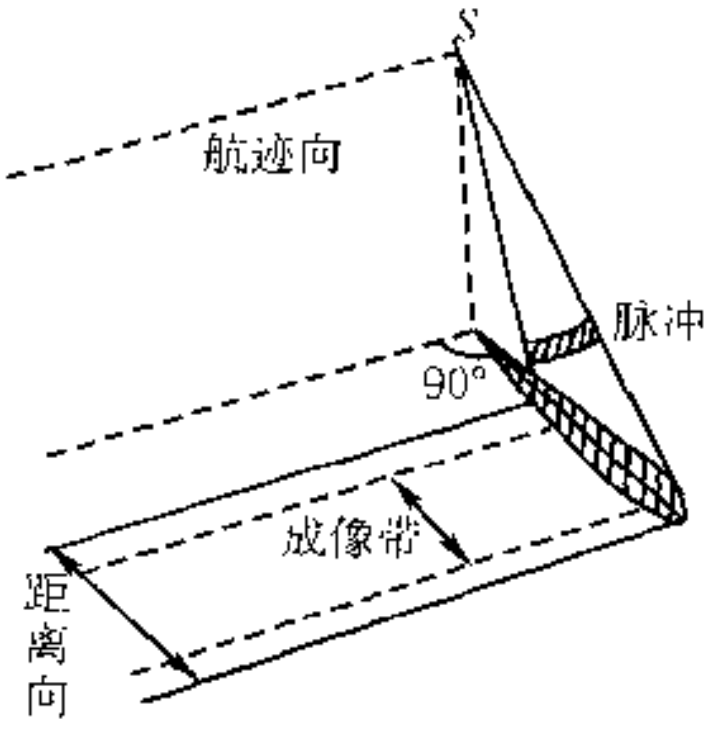



**图 2-2-3　雷达波束**

个脉冲信号时再启动。

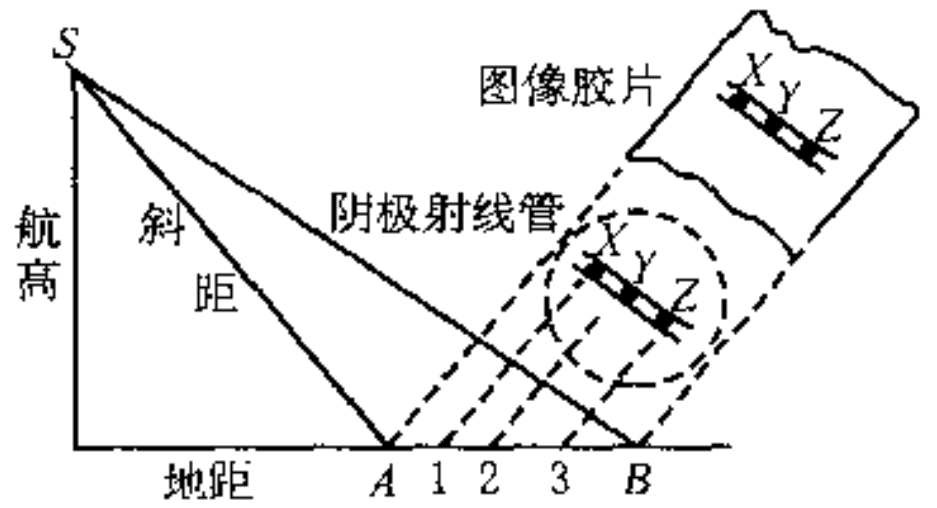



图 2-2-4　脉冲测距示意图([8])

这里提到的脉冲长度 $\tau$ 与雷达波长 $\lambda$ 是不同的,从图 2-2-5 中可以明白两者之间的区别与联系。具体的例子如 $X$ 波段波长约 3cm,而脉冲长度则有几米,脉冲的不同部分被不同位置的目标反射,如图 2-2-5,脉冲的 $U$ 部分首先被 $Z$ 点反射,然后 $V$ 部分被 $Y$ 点反射,要区分两个邻近的目标,必须是这两个目标反射的脉冲的两个部分在不同时间到达天线,即要求反射脉冲没有重叠。如果两个目标靠得很近,或脉冲比较长,那么这两个目标所反射的脉冲部分就有可能重叠,即几乎同时达到天线,因而被同时记录下来,无法分开。在地面可以分辨的两目标最短距离就是侧视雷达图像的距离分辨力。

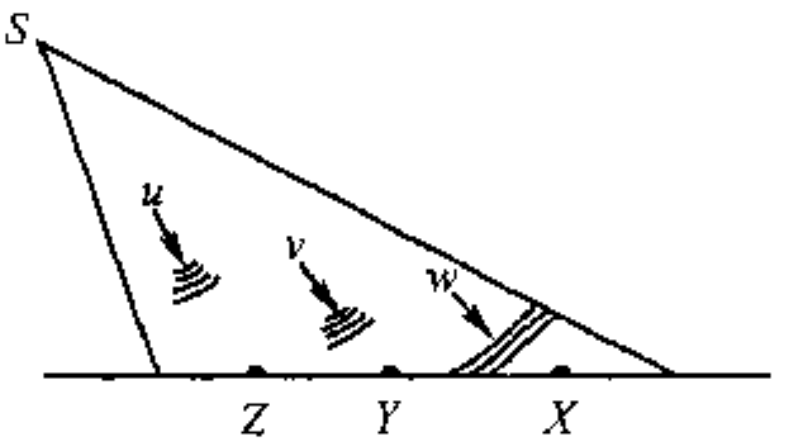



图 2-2-5　被反射的脉冲

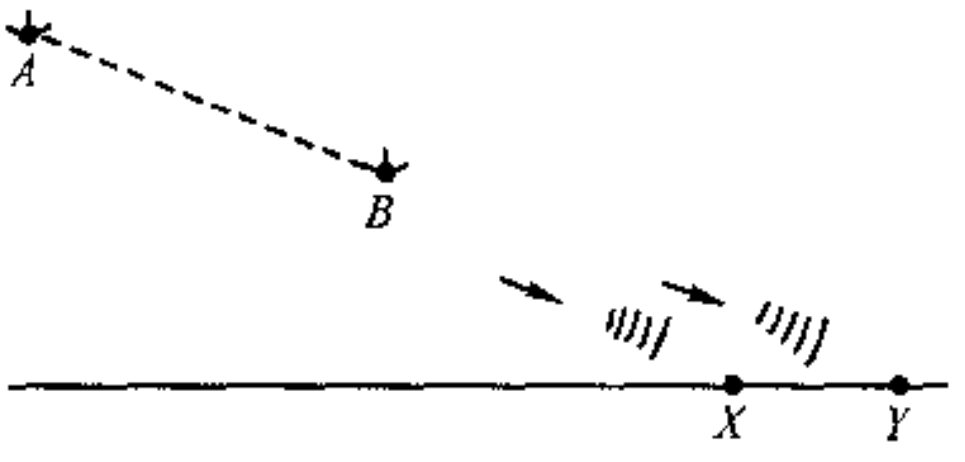



图 2-2-6　距离向分辨力

距离分辨力与飞机——目标之间的距离无关,或者说与飞机高度无关。如图2-2-6所示,无论飞机在 $A$ 处,或在 $B$ 处,所接收的两相邻目标信号均是相同的。但是在不同俯角下的两个目标(如图 2-2-7)则有不同的结果。图 2-2-7 中 $X$ 处的两个目标与 $Y$ 处的两个目标虽然都相距同一距离,但 $X$ 处俯角 $\beta_1$ 大,两目标反射的脉冲会重叠,故而两点信号无法分开。而 $Y$ 处俯角 $\beta_2$ 小,反射信号不会重叠。这说明了距离分辨力与俯角关系甚大,侧视时距离分辨力好,近垂直时反而差,与航空摄影的情况正好相反,同时也说明了雷达成像必须侧视的原因。

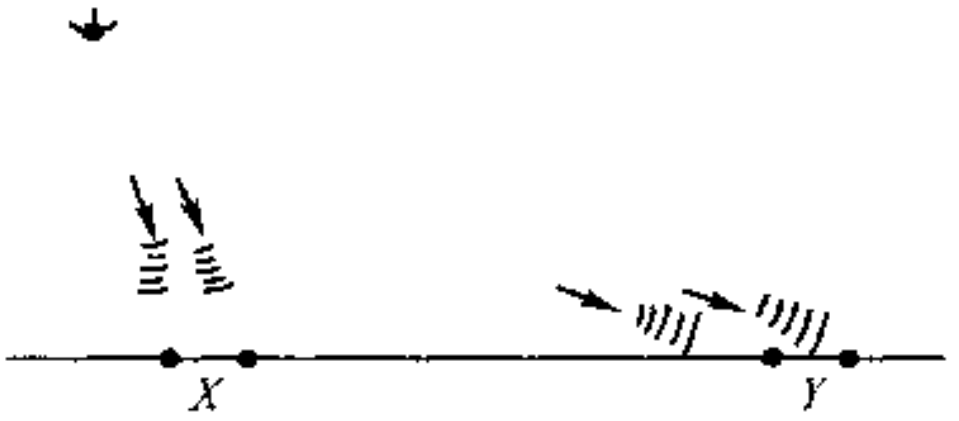



**图 2-2-7　距离分辨力与俯角关系**

一般距离分辨力可用下式表示

$$R_r = \frac{\tau C}{2}\sec\beta \tag{2-2-1}$$

式中 $\tau$ 为脉冲长度，$C$ 为电磁波传播速度，$\beta$ 为俯角。在航向上，两个目标要能区分开来，就不能处于同一波束内，在这一方向上所能分辨出的两个目标的最小距离称为方位分辨力：

$$R_\omega = \omega R \tag{2-2-2}$$

式中 $\omega$ 为波瓣角，$R$ 为斜距，图 2-2-8 为两个方向分辨力的示意。

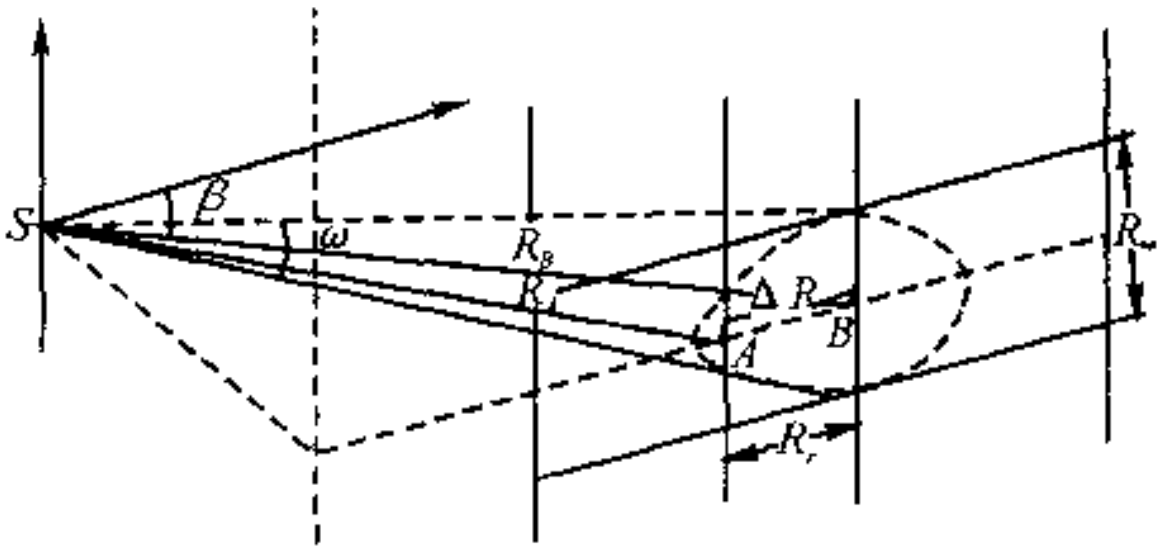



**图 2-2-8　侧视雷达的地面分辨力**

由于波瓣角与波长 $\lambda$ 成正比，与天线孔径 $d$ 成反比，故方位分辨力又可表示为

$$R_\omega = \frac{\lambda}{d}R \tag{2-2-3}$$

可见要提高方位分辨力，必须加大天线孔径，采用波长较短的电磁波，缩短观侧距离。但在飞机或卫星上，这些都受到限制。目前的方法是采用合成孔径侧视雷达，这种雷达接收的回波并不像上述真实孔径侧视雷达那样，立即显示成像，而是把目标回波的多普勒相位史（下面将要介绍这一概念）贮存起来，即存贮在所谓的“数据胶片”上，然后对数据胶片进行相关处理，形成图像。

### 三、合成孔径侧视雷达

合成孔径技术的基本思想，是用一个小天线沿一直线方向不断移动。如图 2-2-9 所示。在移动中每个位置上发射一个信号，接收相应发射位置

*的回波信号贮存下来。存贮时必须同时保存接收信号的振幅和相位。当天线移动一段距离 $L_s$ 后,存贮的信号和长度为 $L_s$ 的天线线阵列诸单元所接收的信号非常相似。*这可用图 2-2-10 来说明。合成孔径天线是在不同位置上接收同一地物的回波信号,真实孔径天线则在一个位置上接收目标的回波。如果把真实孔径天线划分成许多小单元,则每个单元接收回波信号的过程与合成孔径天线在不同位置上接收回波的过程十分相似。真实孔径天线接收目标回波后,好像物镜那样聚合成像。而合成孔径天线对同一目标的信号不是在同一时刻得到,它在每一个位置上都要记录一个回波信号,每个信号由于目标到飞行器之间的距离不同,其相位和强度也不同,如图 2-2-11 所示。然而,这种变化是有规律的,当飞行器向前移动时,飞行器与目标之间的球面波波数逐渐减少,目标在飞行航线天线处的法线上时距离最小。当飞过这条法线时球面波波数又有规律地增加。这样形成的整个图像,也不像真实孔径雷达图像那样,能看到实际的地面图像,而是一相干图像,它需要处理后才能恢复成地面的实际图像。

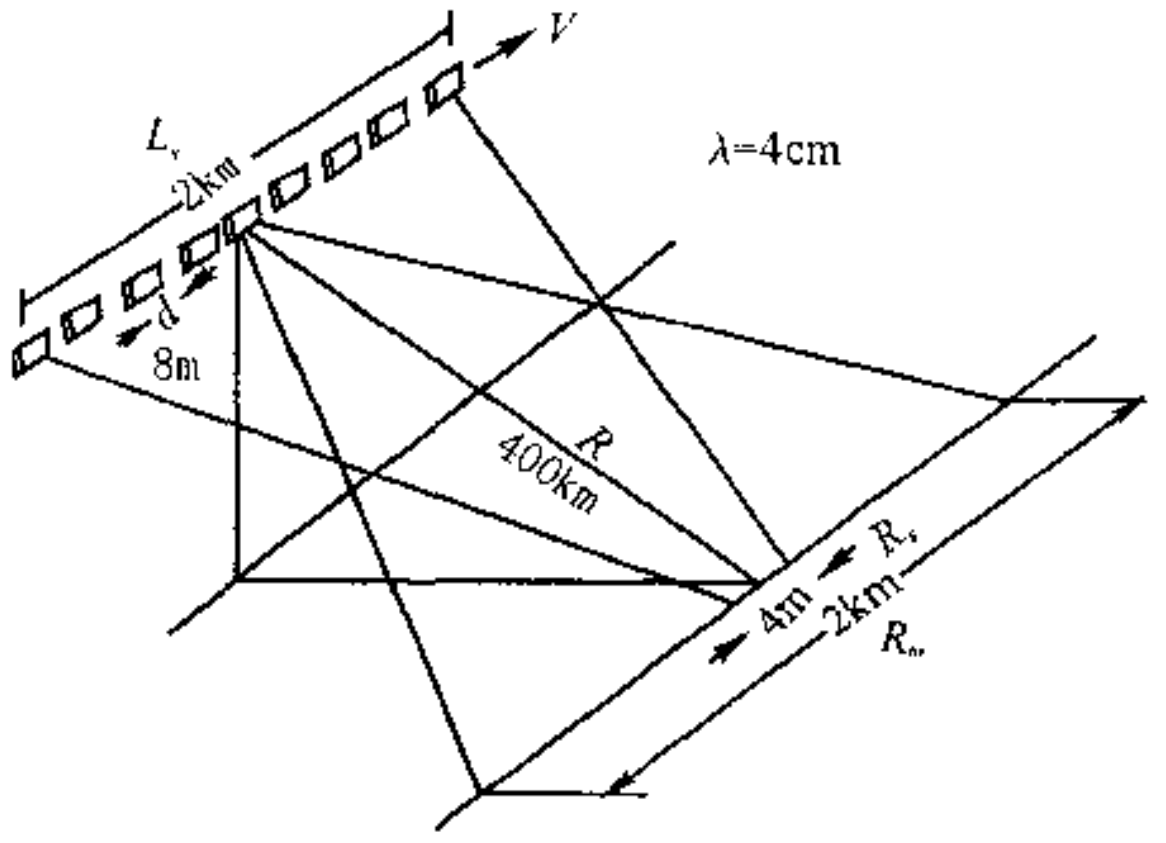



**图 2-2-9　合成孔径侧视雷达工作过程**

按照图 2-2-11 所显示的信号获取过程,假定天线在五个位置上依次接收某目标 $T$ 的回波信号,在每个位置上均记录下接收信号的振幅和相位。现在分析一下合成孔径侧视雷达如何进行信号合成。为简单起见,假定每个位置上振幅相同,只需要记录相位,每一位置上的相位如图2-2-12上方方框中所示。若每一个位置称作一个阵元,则合成孔径的方法就是将这些阵元所记录的信号进行合成处理(见图 2-2-12 下方)。在阵元 $i$ 上(即位置 $i$ 上)雷达波束经发射、被目标 $T$ 散射,其返回的波束形成双程传输,相移为 $2kR_i$,这里 $k$ 为波数,$R_i$ 为目标 $T$ 到位置 $i$ 的距离。当每个位置上记下相移时,处理器即进行相移补偿,(补偿距离 $R_1$ 到 $R_5$ 之间的相位差异),将 $V_i$ 乘以 $e^{+j2kR_i}$,即图中 $\Phi_C$,相当于作一个校正。所有 5 个阵元上的校正结

果是其电压之和为单个信号的五倍。这个过程就相当于聚焦于目标 $T$，即

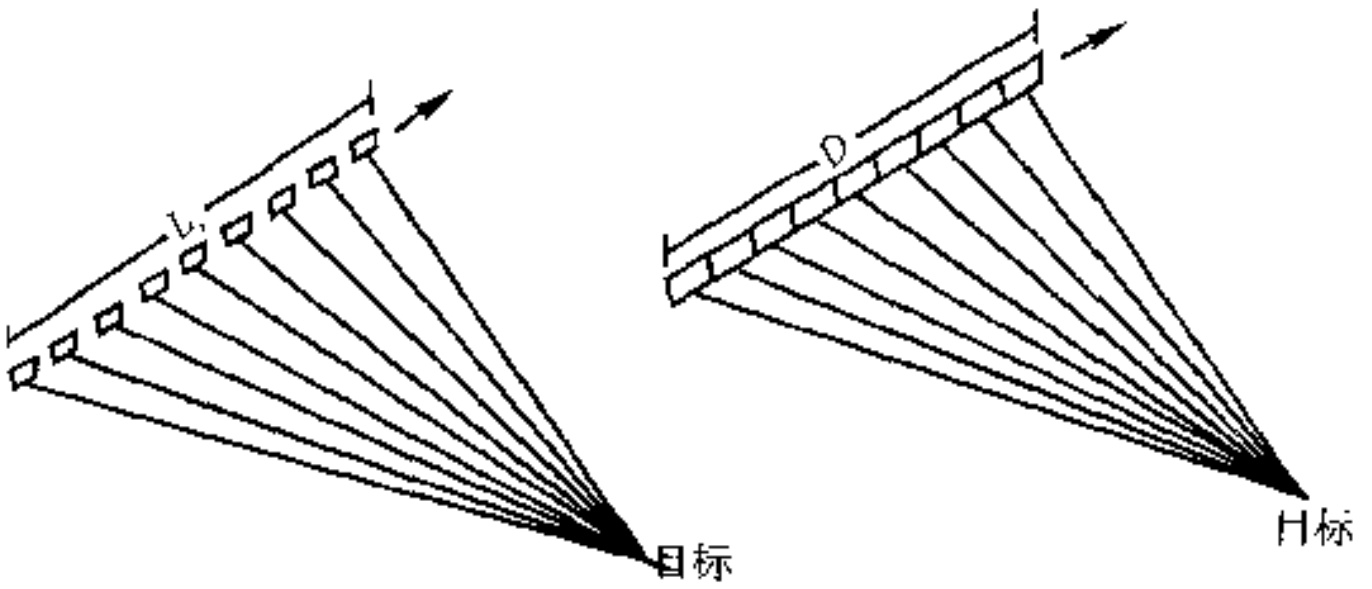



图 2-2-10　两种天线接收信号的相似性

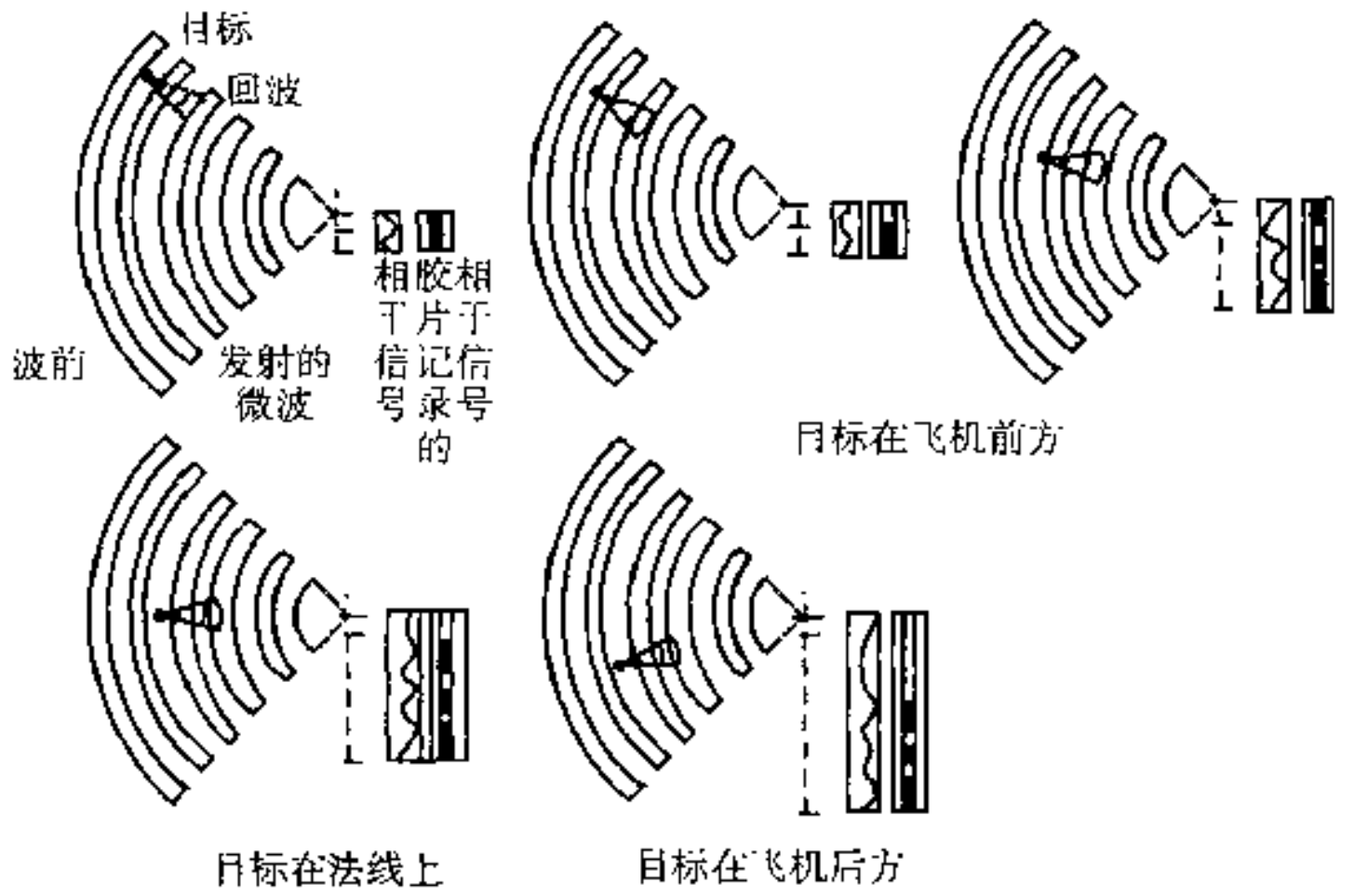



图 2-2-11　合成孔径雷达在不同位置上接收反射波

在信号从目标到达求和点的总相位延迟必须相同，或同相相加。因此，

$$\Phi_{Ri} + \Phi_{Ci} = \Phi_{Rj} + \Phi_{Cj} = \Phi_T, i \neq j$$

因为 $\Phi_{Ci} = 2kR_i$，$\Phi_{Ri} = -2k\,R_i$，所以实际上 $\Phi_T = 0$，在求和点上电压为

$$V = \sum_i e^{-j\Phi_T} = 5e^{-j\Phi_T}$$

$$| V | = 5$$

从上面的分析可以看出，由于 $\Phi_{Ci}$ 为 $\Phi_{Ri}$ 的相反数，这个校正量加到别的目标的回波信号上，就不能使最后求和点上的数值为 5。这就是合成孔径信号合成的概念。

合成孔径雷达的方位分辨力可从图 2-2-9 中看出。若用合成孔径雷达的实际天线孔径来成像，则其分辨力将很差。如图中所示，天线孔径为 8m，波长为 4cm，目标与天线的距离为 400km 时，按式(2-4-3)计算，其方位分辨力为 2km。现在若用合成孔径技术，合成后的天线孔径为 $L_s$，则其方位分辨力为：

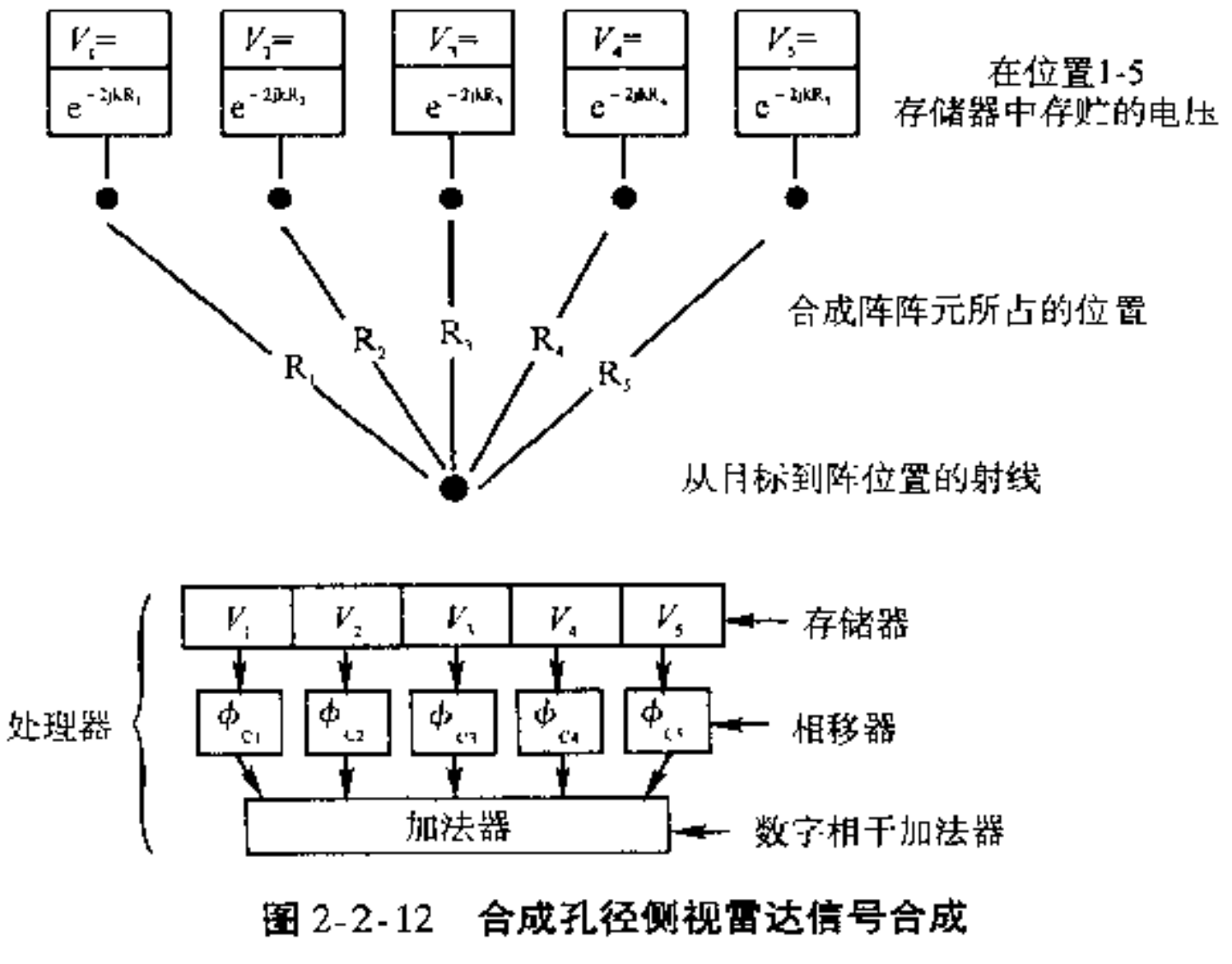



**图 2-2-12　合成孔径侧视雷达信号合成**

$$R_s = \frac{\lambda}{L_s}R \tag{2-2-4}$$

由于天线最大的合成孔径为：

$$L_s = R_\omega = \frac{\lambda}{d}R \tag{2-2-5}$$

将式(2-2-5)代入式(2-2-4)则

$$R_s = d \tag{2-2-6}$$

式(2-2-6)说明合成孔径雷达的方位分辨力与距离无关，只与实际使用的天线孔径有关。此外由于双程相移，方位分辨力还可提高一倍，即 $R_s = d/2$。

侧视雷达成像技术是目前广泛应用的遥感技术，故此，本书将主要讨论这方面的理论和图像处理技术。

我国的合成孔径侧视雷达研究及图像应用已有十多年的历史，主要是 $X$ 波段，单极化合成孔径雷达和多极化合成孔径雷达，后者命名为 CAS-SAR，表 2-2-1 是其主要参数与 80 年代国外同类产品的比较。

表 2-2-1　CASSAR 与国外 80 年代同类样机若干工作参数及性能比较([8])

| 样机型号 | CASSAR | STAR-1 | UARAN-S | SAR-580 | GERA | 地球资源雷达(引进) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 国　别 | 中　国 | 美　国 | 法　国 | 加拿大 | 美　国 | 美　国 |
| 发表年限 | 1988 | 1986 | 1985 | | 1982 | 1984 |
| 工作波段 | X 波段 | X 波段 | X 波段 | X 波段 | X 波段 | X 波段 |
| 工作模式 | 四种<br>50,60<br>95,105km | 二种<br>40,60km | | | 18.7～37km<br>37～55.6km | 18.7～37km<br>37～55.6km |
| 测绘带宽 | 35km | 22.4/44.7km | 10km | | 18.5km | 18.5km |
| 最大作用距离 | 105km | 60km | | | 55.6km | 55.6km |
| 极化方式 | HH, VV,<br>HV, VH | HH | VV, HH | HH | HH | HH |
| 分辨率 | 10m×10m | 6m×6m<br>6m×12m | 9m×9m | 6m×6m | 3m×3m | 3m×3m |
| 侧视方式 | 双侧视 | 单侧视 | 单侧视 | 单侧视 | 双侧视 | 双侧视 |
| 实时数据传输 | 有 | 有 | | 有 | | 无 |
| 成像处理方式 | 光学 | 数字 | 数字 | 数字 | 光学 | 光学 |
| 载机型号 | CessnaCitation<br>S/Ⅱ | Cessna 441 | B-17 | Cessna | | Learjet36 |
| 天线增益 | 29dB | 30.9dB | | | 28dB | 28dB |
| 发射功率 | ～28kW | 2kW | 6kW | | 50kW | 50kW |
| 接收机噪声系数 | ～5dB | 3.5dB | 8dB | | 7.5dB | 7.5dB |
| 记录方式 | 胶片 | 磁带 | 磁带 | 磁带 | 胶片 | 胶片 |

## 第三节　天线、雷达方程和灰度方程

### 一、雷达天线及其参量

天线是将发射机产生的电磁波发射出去，或者接收地物反射回来的电磁波，并传送给接收机的重要中间环节。在雷达系统中，有时同时安置两个天线以分别发射和接收电磁波，有时用同一天线兼备两种功能。不论哪一种情况，天线都是自由空间传播的电磁波和传输线内传输的电磁波之间转换区域。

在将电磁辐射能量从传输线转换到自由空间时，天线在各方向上辐射的能量是不均匀的。所谓各向同性的天线，即在各方向辐射能量相同的天线是不存在的。天线辐射能量的空间分布称为天线辐射方向图，通常用两平面方向图来代表天线立体方向图，如图 2-3-1 所示。图中 Z 轴为雷达波束的方向，一般波束宽度即图中半功率点之间的宽度，在这个宽度内构成了

天线辐射的主瓣，周围还分布着一些能量很小的辐射，一般称为旁瓣。对大多数天线来讲，若发射和接收时辐射方向图是一致的，则被称为互易元件。图 2-3-2 为常用的各种天线。微波遥感多用矩形口径的天线。

天线所发射的电磁波是球面波。如图 2-3-3 所示，从辐射源发射的波束主瓣方向为 $Z$ 轴，与它两两正交的 $X$ 轴和 $Y$ 轴视为矩形口径的电场方向和磁场方向。由图 2-3-4(b)所示球面坐标系即辐射能量的空间分布坐标系，其中 $r$ 表示距离，$\theta$ 称为仰角，$\varphi$ 称为方位角，则辐射方向图 $F(\theta,\varphi)$ 即表示了在 $(\theta,\varphi)$ 方向每单位立体角内的辐射功率。

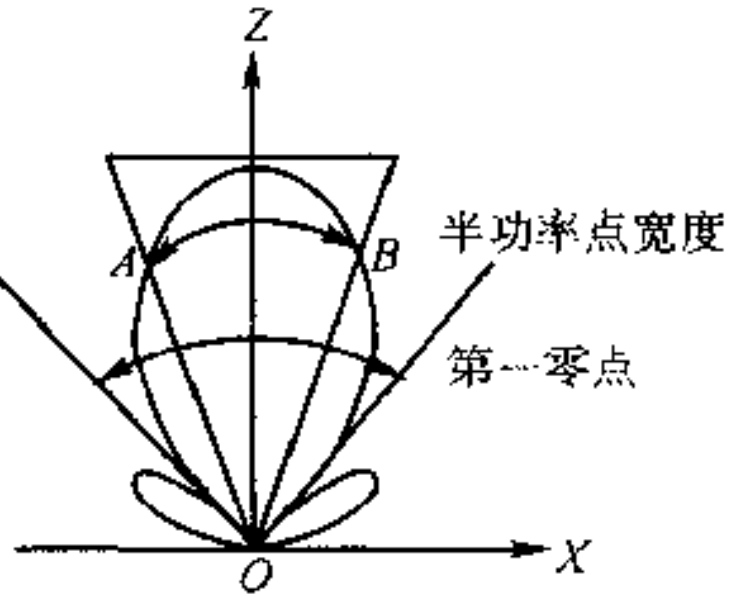



图 2-3-1　平面天线方向图

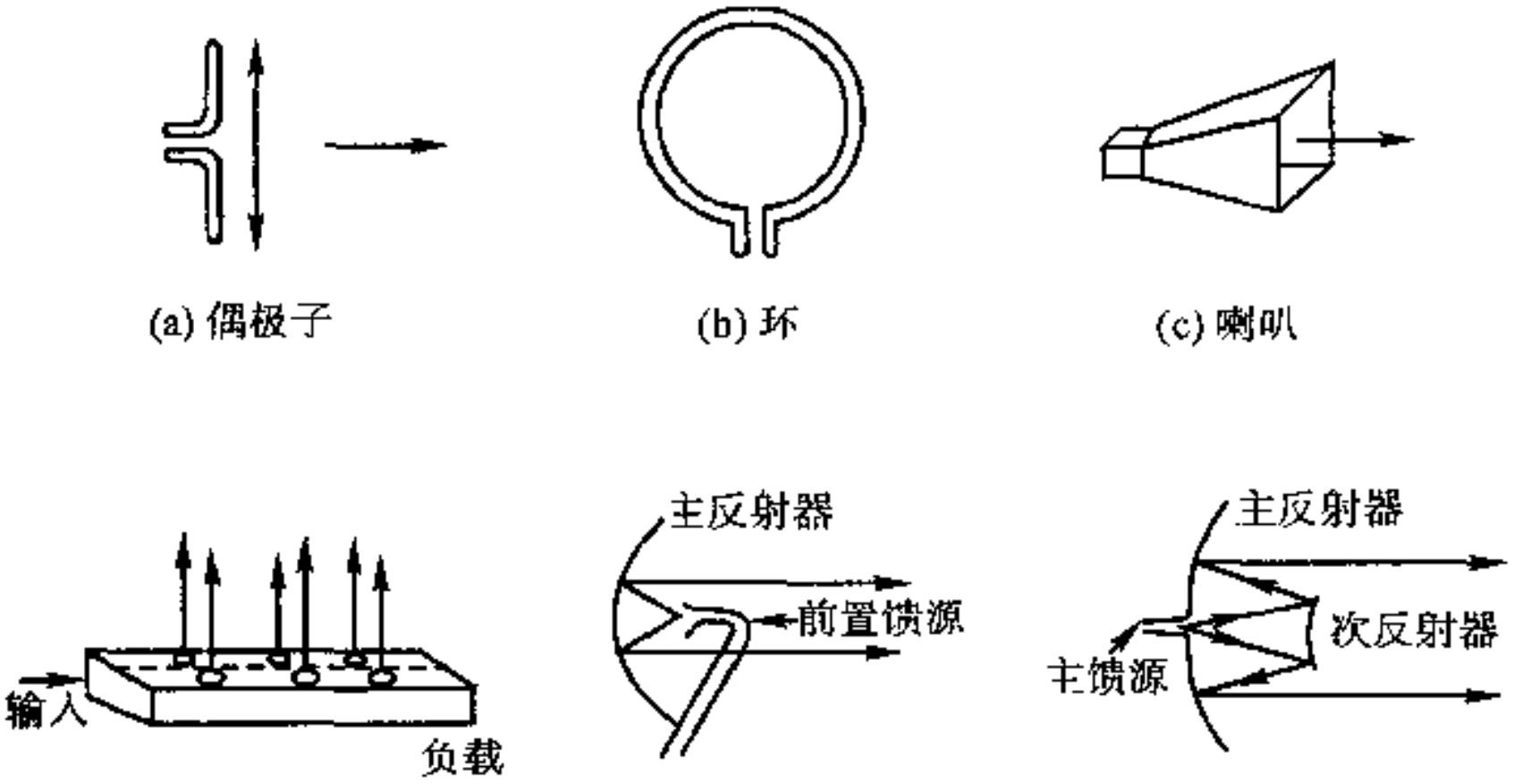



图 2-3-2　微波遥感中常用的各类天线([7])

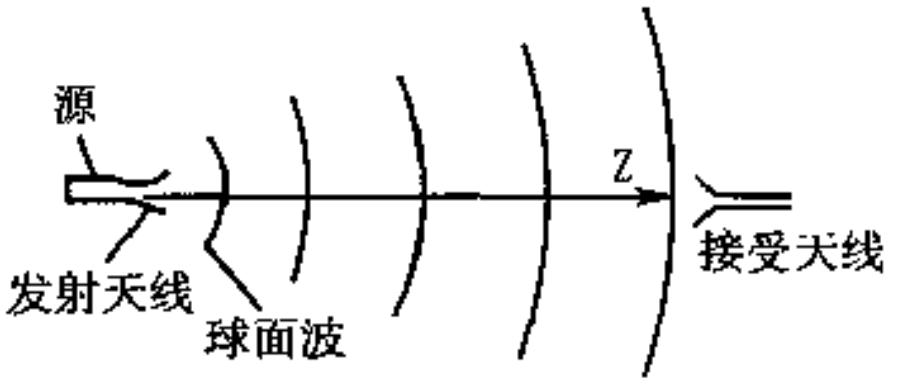
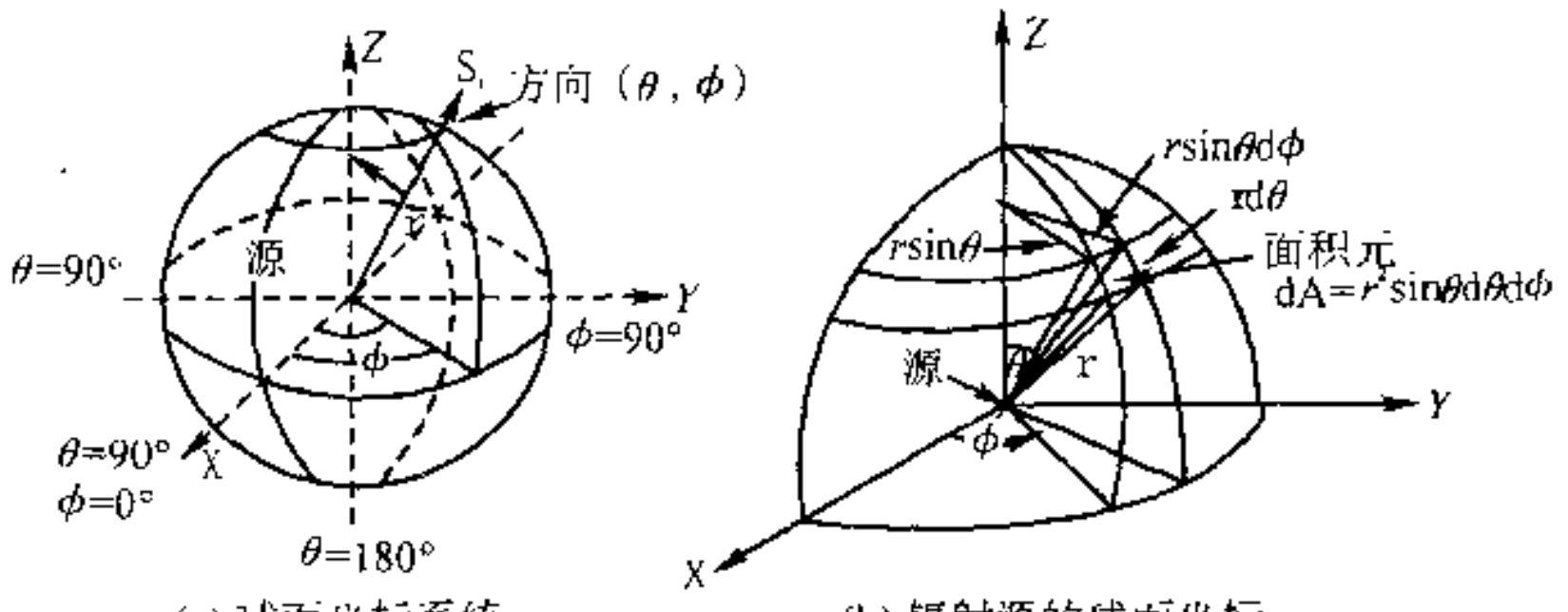



图 2-3-3　球面波的发射与接收

通常对 $F(\theta,\varphi)$ 按其最大值作归一化处理，这时的方向图称为归一化辐射方向图 $F_n(\theta,\varphi)$，即

$$F_n = \frac{F(\theta,\varphi)}{F(\theta,\varphi)_{\max}} \tag{2-3-1}$$

这是一个无量纲的值，常用分贝表示。




(a) 球面坐标系统　　(b) 辐射源的球面坐标

**图 2-3-4　辐射源的球面坐标**

不同情况下天线方向图的主瓣有效宽度可分别用方向图立体角 $\Omega_p$，主瓣(或主波束)立体角 $\Omega_m$ 和旁瓣立体角 $\Omega_s$ 来描述：

$$\Omega_p = \iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \tag{2-3-2}$$

$$\Omega_m = \iint_{\text{主瓣}} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \tag{2-3-3}$$

$$\Omega_s = \Omega_p - \Omega_m \tag{2-3-4}$$

$$\mathrm{d}\Omega = \sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi \tag{2-3-5}$$

上述所有立体角均用球面度 $S_r$ 表示。

通常，天线的主波束效率 $\eta_m$ 及其杂散因子 $\eta_s$ 分别表示天线主瓣和旁瓣的发射功率(或接收功率)：

$$\eta_m = \Omega_m/\Omega_p \tag{2-3-6}$$

$$\eta_s = \Omega_s/\Omega_p = 1 - \eta_m \tag{2-3-7}$$

上图 2-3-1 中半功率宽度即半功率波束宽度，它是主波束中 $F_n(\theta,\varphi)$ 为峰值一半的点即半功率点所围成的一个立体角在某一平面如图 2-3-1 中 $X-Z$ 平面上的投影，即射线 $OA$ 和 $OB$ 之间的夹角，在 $OA$ 和 $OB$ 方向上的辐射强度都为最大辐射强度的一半，即

$$F_n(\theta_{1/2},\varphi) = 0.5 \tag{2-3-8}$$

图 2-3-1 中主波束两侧的第一个零点即出现第一个 $F_n(\theta,\varphi)$ 最小值的方向，图中主波束两旁的第一个零点之间的波束宽度为

$$\beta_{\text{null}} = 2\theta_{\text{null}} \tag{2-3-9}$$

其中 $\theta_{\text{null}}$ 的含义是

$$F_n(\theta_{\text{null}},\varphi) = F_n(\theta,\varphi)\ \text{第一个最小值} \tag{2-3-10}$$

有时，$\beta_{\text{null}}$ 可用来描述主瓣的总宽度。

天线设计中经常用到方向系数的概念，天线在一定方向上的方向系数是指天线在该方向上的归一化辐射方向图 $F_n(\theta,\varphi)$ 与 $F_n(\theta,\varphi)$ 在 $4\pi$ 立体

角内的平均值之比，即

$$D(\theta,\varphi)=\frac{F_n(\theta,\varphi)}{\frac{1}{4\pi}\iint F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}=\frac{F_n(\theta,\varphi)}{\frac{1}{4\pi}\Omega_p} \tag{2-3-11}$$

当上式中 $F_n(\theta,\varphi)=1$ 时的方向系数称为最大方向系数 $D_o$

$$D_o=\frac{4\pi}{\Omega_p} \tag{2-3-12}$$

可见，任何方向$(\theta,\varphi)$上的方向系数 $D$ 都可表示为

$$D(\theta,\varphi)=D_o\cdot F_n(\theta,\varphi) \tag{2-3-13}$$

对于像图 2-3-1 中具有单一主瓣，其波束指向 $Z$ 轴的天线，方向图立体角 $\Omega_p$ 可以近似地表示为半功率宽度 $\beta_{xz}$ 和 $\beta_{yz}$ 的乘积，即

$$\Omega_p\approx\beta_{xz}\beta_{yz} \tag{2-3-14}$$

于是

$$D_o\approx\frac{4\pi}{\beta_{xz}\beta_{yz}} \tag{2-3-15}$$

这是估计天线最大方向系数的一种有效方法。

天线的最大方向系数还与天线的有效面积(或有效孔径)$A_{eff}$有关：

$$D_o=\frac{4\pi}{\lambda^2}A_{eff}=\frac{4\pi}{\lambda^2}\eta_a A_p \tag{2-3-16}$$

式中 $A_{eff}=\frac{\lambda^2}{\Omega_p}\approx\frac{\lambda^2}{\beta_{xz}\beta_{yz}}$，$A_p$ 是天线的实际孔径，$\eta_a$ 是孔径效率$(0<\eta_a<1)$，

$$\eta_a=\frac{A_{eff}}{A_p} \tag{2-3-17}$$

在发射机将电磁能供给天线后，天线获得的总功率为 $P_t$，天线将电磁波发射出去时，进入自由空间的电磁波功率为 $P_o$，而有一部分能量 $P_l$ 在天线中耗散为热能，发射出去的功率 $P_o$ 与它原有的总功率 $P_t$ 之比称为辐射效率 $\eta_l$

$$\eta_l=\frac{P_o}{P_t} \tag{2-3-18}$$

所谓天线在某一方向$(\theta,\varphi)$上的增益 $G(\theta,\varphi)$则是天线辐射的功率密度 $S_r(\theta,\varphi)$与无耗各向同性天线辐射功率密度 $S_{ri}$之比：

$$G(\theta,\varphi)=\frac{S_r(\theta,\varphi)}{S_{ri}} \tag{2-3-19}$$

无耗各向同性天线辐射的总功率为

$$P_{oi}=4\pi r^2 S_{ri} \tag{2-3-20}$$

而实际天线辐射的总功率则由 $S_r(\theta,\varphi)$在半径为 $r$ 的球面内积分得：

$$Po = \iint_{4\pi} S_r(\theta,\varphi) r^2 \mathrm{d}\Omega = r^2 \iint_{4\pi} S_r(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}3\text{-}21)$$

由于 $P_t = P_{ot} = P_o/\eta_l$，故有

$$S_{ri} = \frac{P_{ot}}{4\pi r^2} = \frac{P_o}{4\pi r^2 \eta_l} = \frac{1}{4\pi\eta_l}\iint_{4\pi} S_r(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}3\text{-}22)$$

代入(2-3-19)式得

$$G(\theta,\varphi) = \frac{4\pi\eta_l S_r(\theta,\varphi)}{\iint S_r(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \qquad (2\text{-}3\text{-}23)$$

由(2-3-11)式，则

$$G(\theta,\varphi) = \eta_l \cdot D(\theta,\varphi) \qquad (2\text{-}3\text{-}24)$$

可见，在最大辐射方向上，有最大增益 $G_o = \eta_l \cdot D_o$

此外，由(2-3-23)式和(2-3-21)式，可得

$$S_r(\theta,\varphi) = \frac{G(\theta,\varphi)P_o/r^2}{4\pi\eta_l} = \frac{P_t G(\theta,\varphi)}{4\pi r^2} \qquad (2\text{-}3\text{-}25)$$

此式表示了天线辐射功率密度 $S_r$ 与天线功率 $P_t$ 的对应关系。

## 二、雷达方程与灰度方程

雷达波束是以天线为中心的球面波。当雷达发射机的发射功率为 $W_t$，天线增益为 $G_t$，地物目标在与天线相距 $R$ 处接收到雷达球面波，则在地物目标处单位面积上所接收的能量为

$$W_{or} = \frac{W_t G_t}{4\pi R^2} \qquad (2\text{-}3\text{-}26)$$

地物目标在获得这一能量后向雷达天线方向再反射回去(这里未计入大气衰减的影响)，如果其有效的反向散射面积为 $\sigma$，那么它向雷达天线反射的总的回波功率就应为

$$W_{or} = \frac{W_t G_t}{4\pi R^2}\sigma \qquad (2\text{-}3\text{-}27)$$

回波同样是球面波，只不过是以地物目标为中心的球面波。这样在雷达接收天线处单位面积上的回波功率即为

$$W_{rr} = \frac{W_t G_t}{4\pi R^2}\sigma\,\frac{1}{4\pi R^2} \qquad (2\text{-}3\text{-}28)$$

如果接收天线的有效面积为 $A_r$，那么接收机所接收的回波的总功率为：

$$W_r = \frac{W_t G_t}{4\pi R^2}\sigma\,\frac{1}{4\pi R^2}A_r \qquad (2\text{-}3\text{-}29)$$

一般说来，雷达天线与发射天线是同一天线，故接收天线增益 $G_r$ 与发

射天线增益$G_t$是相等的，它们与接收天线有效面积和波长$\lambda$之间的关系是

$$G = G_t = G_r = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \tag{2-3-30}$$

所以，有

$$W_r = \frac{W_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{2-3-31}$$

这就是雷达方程，它描述了雷达发射机发射雷达波束后由地物目标反向散射，雷达接收天线所接收到的回波功率。这个方程通常是用以描述点目标的回波功率的，由于实际地物大多为分布型目标。一般用地物单位面积的平均散射系数$\sigma^o$（或地物单位面积的散射截面）来表达地物的散射特性，如果雷达波束照射到地物的面积为$A$，则地物目标总的有效散射截面$\sigma$为

$$\sigma = \sigma^o A \tag{2-3-32}$$

那么，对于分布目标的雷达方程为

$$W_r = \frac{W_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma^o A \tag{2-3-33}$$

雷达照射面积$A$为雷达波束方位向分辨率与距离向分辨率的乘积即雷达图像的分辨单元

$$A = (\omega R) \frac{C\tau}{2\cos\beta} \tag{2-3-34}$$

其中$\omega$为雷达波束有效宽度，$C$为光速，$\tau$是脉冲长度，$\beta$为雷达天线俯角。

实际上在分辨单元内的地物有许多随机分布的散射中心，如果其中独立样本数为$N$，可将每一分辨单元的回波$P_r$近似地写成

$$P_r = W_r(1 + R_n/\sqrt{N}) \tag{2-3-35}$$

其中$R_n$为归一化高斯随机变量，即其均值为零，方差为1。这样

$$P_r = \frac{W_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} A(1 + R_n/\sqrt{N})\sigma_o = K(1 + R_n/\sqrt{N})\sigma^o \tag{2-3-36}$$

其中

$$K = \frac{W_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} A \tag{2-3-37}$$

回波功率的大小将由雷达接收机视频输出信号强度$I$表示出来，即

$$I = M \cdot P_r \tag{2-3-38}$$

$M$是接收机的传递函数。

视频信号记录在图像胶片上时，转换为胶片密度$D$，它与视频信号强度$I$的关系是

$$D = \gamma \lg I + \lg k \tag{2-3-39}$$

其中$\gamma$为胶片的传递函数，$k$为胶片和曝光时间有关的常数，考虑到(2-3-36)式和(2-3-38)式，有

$$D = \gamma\lg\sigma^0 + \gamma\lg M + \gamma\lg K + \lg k + \gamma\lg(1 + R_n/\sqrt{N}) \tag{2-3-40}$$

令

$$H = \gamma\lg M + \gamma\lg K + \lg k \tag{2-3-41}$$

则

$$D = \gamma\lg\sigma^0 + \gamma\lg(1 + R_n/\sqrt{N}) + H \tag{2-3-42}$$

这个方程表达了雷达回波功率 $P_r$ 转换为图像密度的过程，被称为灰度方程。

## 第四节　空间微波遥感系统

美国于1978年发射海洋卫星SEASAT，它是第一个装载侧视雷达的民用卫星，这个卫星上的侧视雷达波段为L波段(23.5cm)，水平极化方式，入射角为22°，其主要目的是用于海洋和海冰观测。图2-4-1为SEASAT外观。80年代和90年代国外主要空间雷达成像系统及其性能见表2-4-1，其中SIR-A，SIR-B均为装载在航天飞机上的侧视雷达。

表2-4-1　国外主要空间雷达成像系统的性能

| | Seasat | SrA | Sir-B | Sir-c | Ers-1 | Radarsat | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 发射时间 | 1978 | 1981 | 1984 | 1994 | 1991 | 1995 | |
| 高度 | 795km | 259km | 225km | 250～300km | 720km | 793～821km | |
| 轨道交角 | 108° | 38° | 57° | ～60° | ～98° | ～98° | |
| 波长 | 23.5cm | 23.5cm | 23.5cm | 23.5cm<br>5.7cm | 5.7cm | 5.3cm | |
| 极化 | HH | HH | HH | HH VV<br>HV VH | HH | HH, VV | |
| 俯角 | 67.5°±3° | 40°±3° | 30°～75° | 30°～75° | 67.5°±3° | 30°～80° | |
| 辐照带宽 | 100km | 50km | 30～50km | 30～60km | 80±10km | 45～510km | |
| 方位分辨率 | 25m | 40m | 25m | 15m | 30/100m | 9～100m | |
| 距离分辨率 | 25m | 40m | 17～58m | 30m | 30/100m | 9～100m | |
| 记录方式 | 光+数 | 光 | 光+数 | 数 | 数 | 数→光 | |

90年代初，欧洲空间局和日本相继发射侧视雷达卫星。欧洲空间局1991年7月发射了ERS—1，这是一个与太阳同步，沿近极轨道飞行的卫星，飞行平均高度为785km，上面载有C波段(5.3GHz)垂直极化合成孔径

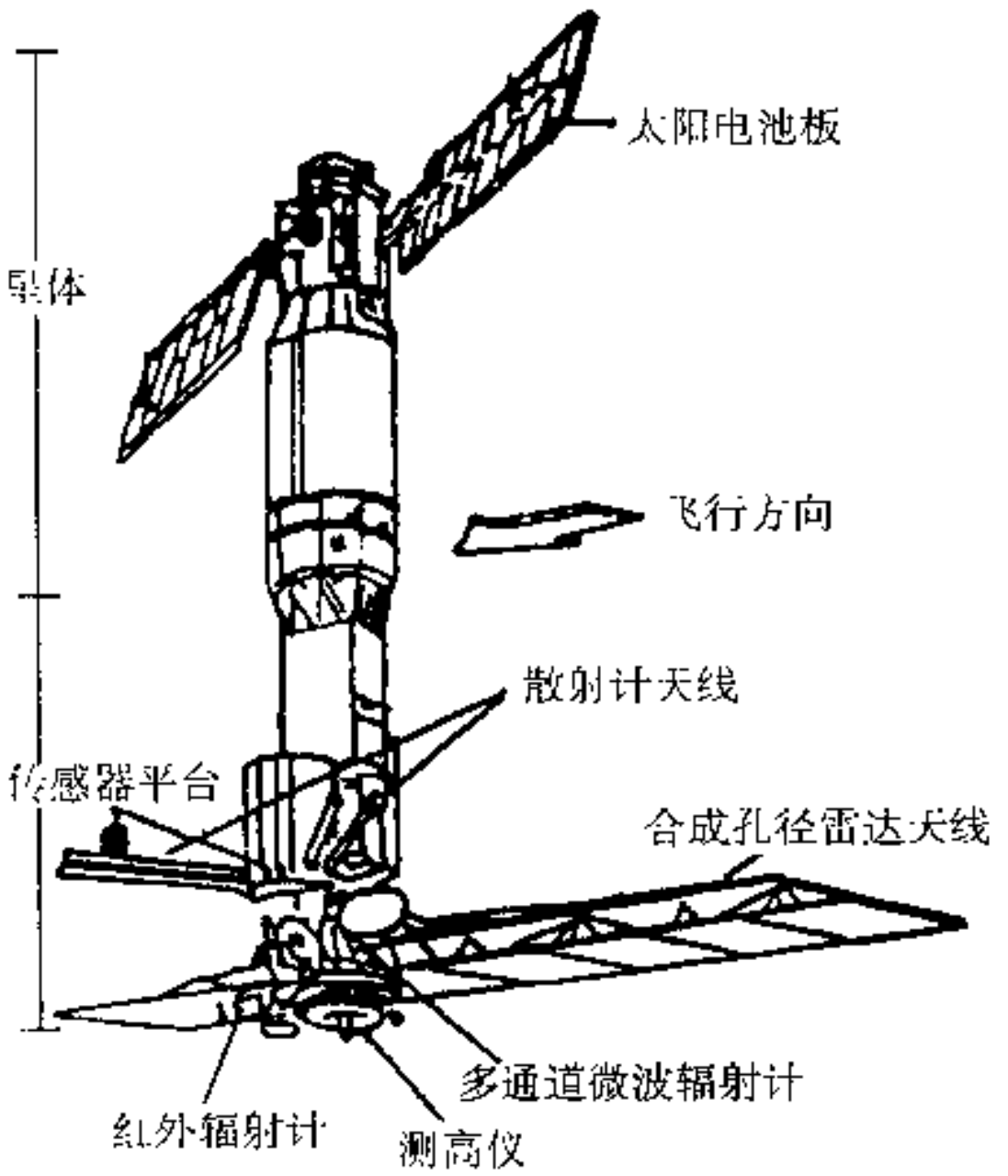



图 2-4-1　海洋卫星

侧视雷达，入射角为 23°，其图像辐面为地面 100km×100km。日本于 1992 年发射了 JERS－1，其轨道高度为 568km，轨道倾角为 97.9°，入射角为 35°，极化方式为 HH，工作波段是 L 波段。

空间合成孔径侧视雷达的发展，以美国和加拿大为代表。美国宇航局利用航天飞机装载新型的 SIR－C 成像雷达系统，这是一个研究多功能多参数成像雷达实验系统，它包括由美国研制的 L 波段、C 波段雷达以及和德国联合研制的 X 波段雷达。其中 L、C 波段具有 HH、VV、HV 和 VH 四种极化方式，通过多频率、多极化来研究和确定地物对不同频率雷达波的响应，以及雷达图像上显示的地下特征，以定量确定雷达波的穿透深度。原计划拟飞行两次，间隔六个月，以获取地物季节变化的信息。另外 SIR－C 雷达备有图像定标系统，以逐步把定量雷达遥感推向实用阶段。在 SIR－C 发射运行的基础上，美国还在 90 年代中期发射装载在空间站上的地球观测系统 EOS。这是一个长期的全球观测系统，预计开始时该系统工作波段为 L 波段和 C 波段，加上 X 波段或 Ka 波段，然后再准备加上 P 波段(400MHz)和 Ku 波段。该系统将从 620km 高度对地球进行为期 15 年的系统的连续的观测。

加拿大发射的 RADARSAT，是一个兼顾商用和科学实验的运行系统，该系统有 5 种波束工作模式：

(1)标准波束,入射角 20°～49°,成像宽度为 100km,距离及方位分辨率为 28m×15m;

(2)宽辐射波束,入射角 20°～40°,成像宽度为 150km,分辨率为 28m×35m;

(3)高分辨率波束,入射角 37°～49°,成像宽度为 45km,分辨率为 10m×10m;

(4)扫描雷达波束,入射角 20°～49°,成像宽度为 300km,分辨率为 50m×50m,或 100m×100m;

(5)试验波束,入射角 49°～59°,成像宽度为 75km,分辨率为 28m×30m。

与已有的星载 SAR 系统比较,RADARSAT 有如下特点:

(1)具有 45,75,100,150,300 和 500km 六种不同宽度成像能力。

(2)分别为 11.6,17.3,30.0MHz 的调频带宽,使距离分辨率可调。

(3)覆盖全球周期短,每天可覆盖北纬 73°至北极全部地区。3 天可覆盖加拿大及北欧地区,24 天可覆盖全球。

这一计划及围绕它制订的 GLOBE SAR 计划(全球合成孔径雷达计划),将会推动微波遥感应用的发展。

## 第五节　辐射测量原理

### 一、辐射亮度

图 2-5-1 中辐射源有效面积为 $A_t$,与有效面积为 $A_r$ 的无损接收天线的距离为 $R$,设 $A_t$ 与 $A_r$ 的最大方向系数所在方向垂直,而且距离 $R$ 足够大,这样可以认为辐射功率密度 $S_t$ 在立体角 $\Omega_r$ 范围内是一个常数。那么天线所接收的功率为

$$P = S_t A_r \tag{2-5-1}$$

因为辐射功率密度 $S_t$ 在半径为 $R$ 的辐射球面单元 $\alpha_A$ 上的辐射功率为

$$P_A = S_t \mathrm{d}A = S_t R^2 \mathrm{d}\Omega \tag{2-5-2}$$

则辐射强度

$$F_t = P_A / \mathrm{d}\Omega = S_t R^2 \tag{2-5-3}$$

其单位为 $\mathrm{W \cdot sr^{-1}}$,用辐射强度表示天线所接收的功率,有

$$P = F_t \Lambda_r / R^2 \tag{2-5-4}$$

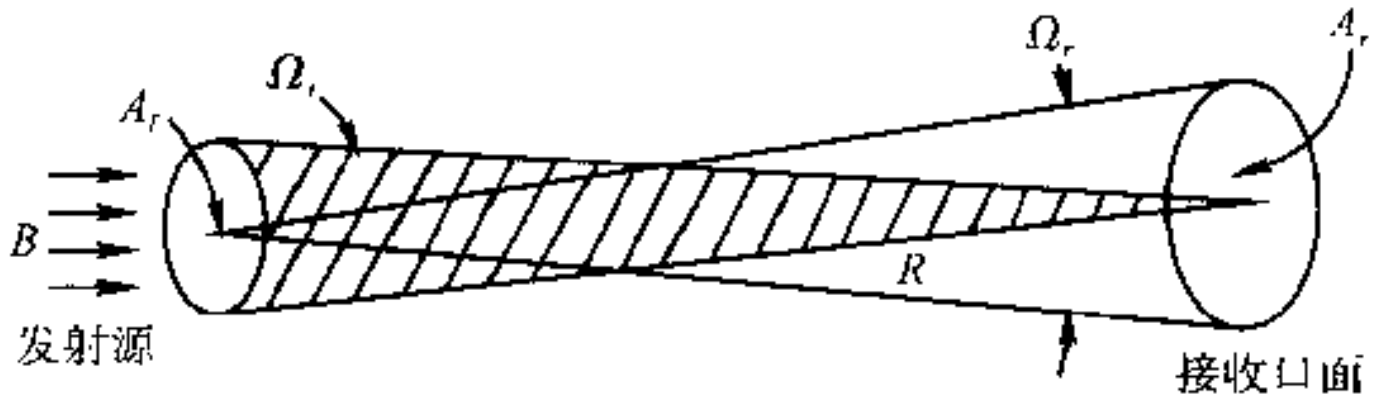



图 2-5-1　接收来自发射源的功率，几何示意图

由于具有有效面积 $A_t$ 的辐射源仍可以作为具有辐射方向图 $F_t(0,\varphi)$ 的点源，上述辐射强度 $F_t$ 也即辐射方向图，只不过在 $\Omega_r$ 范围内，按前述假设 $F(0,\varphi)$ 为一个常量。为了描述非相干辐射的具有一定的分布的物质，如某一种地物或天空，可以给出下述定义

$$B = F_t/A_t \tag{2-5-5}$$

即辐射亮度，其单位为 $W\cdot sr^{-1}\cdot m^{-2}$，用它来表示天线接收的功率，有

$$P = BA_rA_t/R^2 \tag{2-5-6}$$

由图 2-5-1，具有有效辐射面积 $A_t$ 的辐射源相对于天线中心所具有的立体角 $\Omega_t$ 为

$$\Omega_t = A_t/R^2 \tag{2-5-7}$$

由此将(2-5-6)式简化为

$$P = BA_r\Omega_t \tag{2-5-8}$$

若用微分立体角 $d\Omega$ 代替 $\Omega_t$，那么由图 2-5-2，天线所接收的具有辐射亮度分布 $B(\theta,\varphi)$ 的分布型辐射源在天线坐标系中 $(\theta,\varphi)$ 方向上 $d\Omega$ 范围内的微分功率为

$$dP = A_rB(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)d\Omega \tag{2-5-9}$$

其中 $F_n(\theta,\varphi)$ 是 $(\theta,\varphi)$ 方向上的归一化辐射方向图。

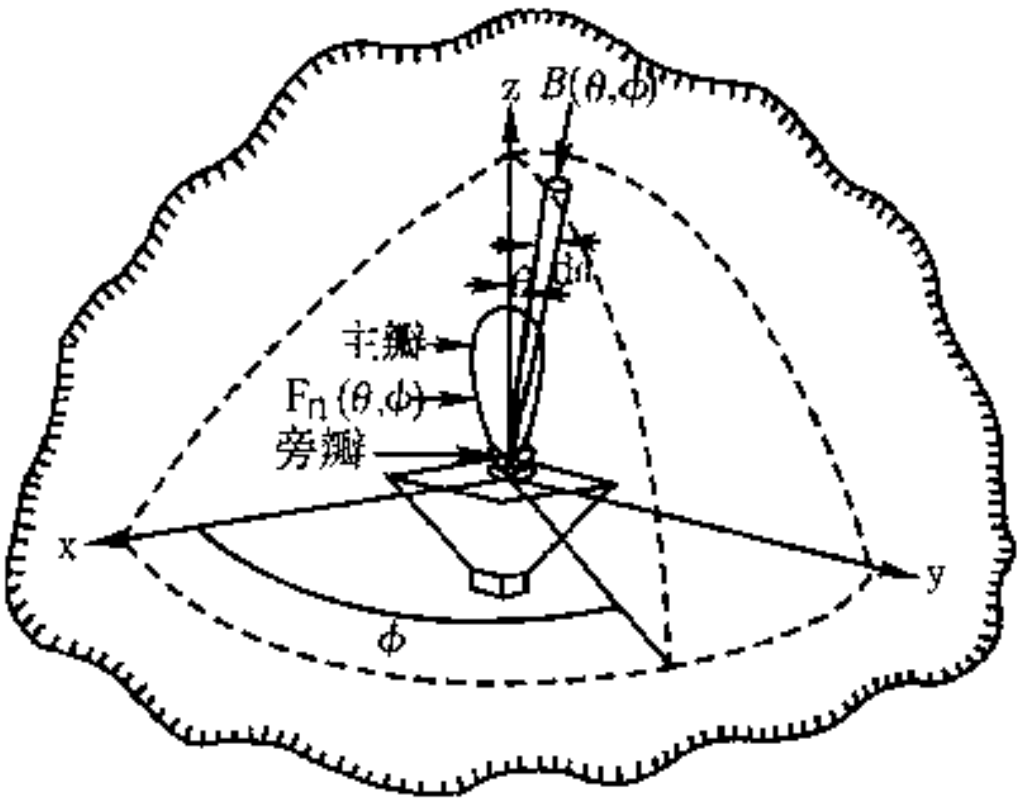



图 2-5-2　入射到有效面积为 $A_r$、归一化辐射方向图为 $F_n(\theta,\varphi)$

的天线的辐射，几何示意图

如果天线接收的信号频率范围为$[f, f+\Delta f]$，定义$Bf(\theta,\varphi)$为频率带中单位带宽的辐射亮度，天线所接收到的总功率可以表示为

$$P = A_r\int_f^{f+\Delta f}\iint_{4\pi} B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}f \qquad (2\text{-}5\text{-}10)$$

这里考虑到了整个$4\pi$球面度上的辐射，而实际上天线往往只接收到上述总功率的一半，即

$$P = (1/2)A_r\int_f^{f+\Delta f}\iint_{4\pi} B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}f \qquad (2\text{-}5\text{-}11)$$

若这里$\Delta f$为1Hz带宽，将(2-5-11)式写为

$$P = \int_f^{f+\Delta f} P_f\mathrm{d}f \qquad (2\text{-}5\text{-}12)$$

其中

$$P_f = (1/2)\Lambda_r\iint_{4\pi} B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}5\text{-}13)$$

$P_f$称为谱功率，其单位为$\mathrm{W\cdot Hz^{-1}}$。上式中的积分部分称为辐射源的谱通量密度$S_f$，

$$S_f = \iint_{4\pi} B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}5\text{-}14)$$

它的单位为$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$。

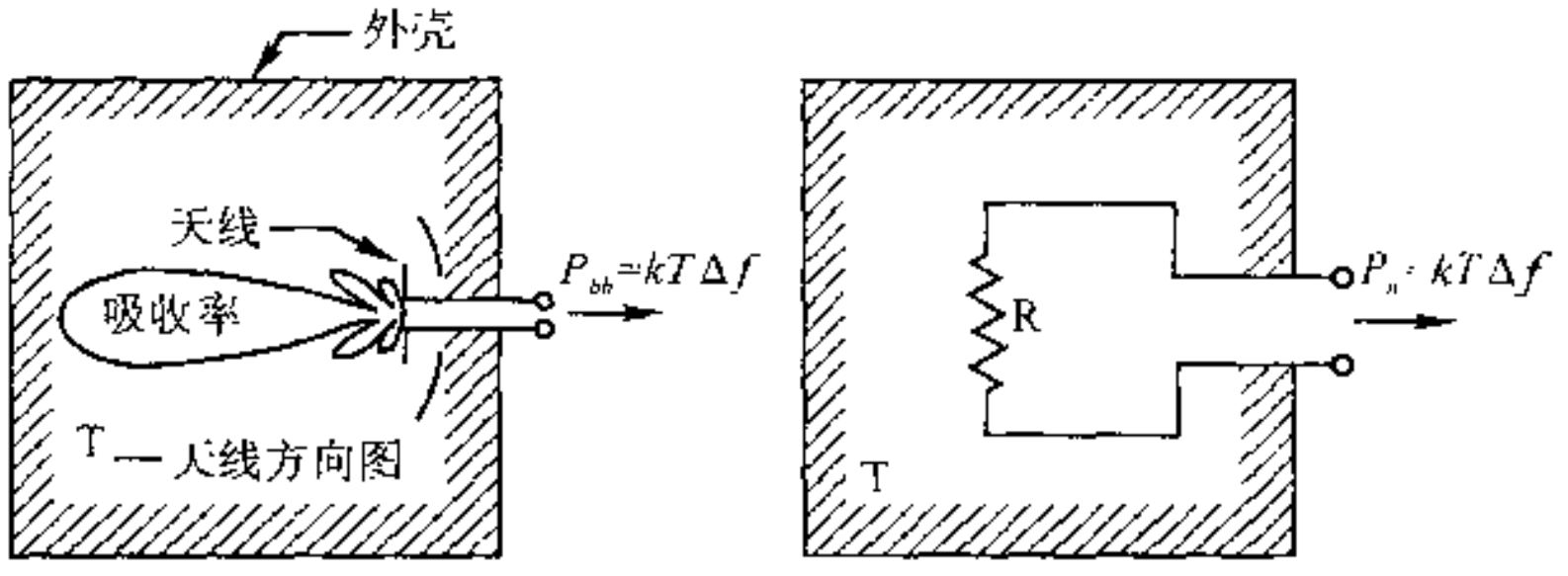



图2-5-3　功率与温度的关系原理

## 二、辐射功率的温度表达式

若将一个无损天线置于一个具有恒定温度的黑体箱内(图2-5-3)，根据(2-5-11)式和瑞利—金斯公式，天线所接收的黑体辐射功率为

$$P_{bb} = (1/2)A_r\int_f^{f+\Delta f}\iint_{4\pi}(2kt/\lambda^2)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}f \qquad (2\text{-}5\text{-}15)$$

假设天线接收功率限于一窄带$\Delta f$内，认为$B_f$近似为一个常数，则

$$P_{bb} = kT\Delta f(A_r/\lambda^2)\iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \tag{2-5-16}$$

因为天线辐射图立体角 $\Omega_P = \iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega$，且 $\Omega_P = \lambda^2/A_r$，于是

$$P_{bb} = kT\Delta f \tag{2-5-17}$$

由此导出了本章第一节中所介绍的辐射计天线接收功率的绝对温度一次方表达式。

奈奎斯特于 1928 年对温度为 $T$ 的电阻导出了类似于(2-5-17)式的相同结果，如图 2-5-3(b)所示。

### 三、灰体辐射

所谓灰体是指实际的物体，它不可能吸收所有入射到它表面的能量，讨论灰体辐射，必须与相应的黑体一道进行。

1. 亮度温度

若黑体的温度为 $T$，在一个很窄的辐射频带 $\Delta f$ 内，其辐射亮度为

$$B_{bb} = B_f\Delta f = (2kT/\lambda^2)\Delta f \tag{2-5-18}$$

一个实际物体，其等效黑体温度(即物理温度，假如它能吸收所有入射能量时的温度)为 $T$，它的辐射亮度因方向$(\theta,\varphi)$不同而异。若它的辐射量测温度为 $T_B(\theta,\varphi)$，则其辐射亮度

$$B(\theta,\varphi) = (2k/\lambda^2)T_B(\theta,\varphi)\Delta f \tag{2-5-19}$$

这里 $T_B(\theta,\varphi)$就称为亮度温度，它是方向$(\theta,\varphi)$的函数，该物体的发射率就定义为它的辐射亮度与等效黑体辐射亮度之比，即

$$e(\theta,\varphi) = B(\theta,\varphi)/B_{bb} = T_B(\theta,\varphi)/T \tag{2-5-20}$$

也就是说可以将物体的亮度温度与等效黑体温度之比表示其发射率。亮度温度是辐射量测中的一个重要的物理量，在以后的讨论中将要经常用到这个概念和这个物理量。

2. 视在温度

视在温度也称为表观温度，它是利用天线进行辐射量测时用到的一个物理量，表示入射到天线上的能量，用 $T_{AP}(\theta,\varphi)$表示，也是与入射方向$(\theta,\varphi)$有关的量，入射到天线上的辐射亮度由此表示为

$$B_i(\theta,\varphi) = (2k/\lambda^2)T_{AP}(\theta,\varphi)\Delta f \tag{2-5-21}$$

显然，$T_{AP}(\theta,\varphi)$表示在$(\theta,\varphi)$方向上天线所接收的能量。它不仅包括地面物体的辐射能量，还有大气的辐射能量，以及被地面物体反射或散射的大气辐射能量。由于大气辐射具有全方位的特点，即向各个方向辐射，所以天线所接收的能量就包括了多方面的辐射能量。

3. 天线温度

由上述(2-5-21)式,若天线的有效面积为 $A_r$,则天线的接收功率可以表示为

$$P = (1/2)A_r\iint_{4\pi}(2k/\lambda^2)T_{AP}(\theta,\varphi)\Delta f F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}5\text{-}22)$$

而根据功率的温度表达式,天线输出端匹配电阻提供的噪声功率 $P_n$,与它的物理温度成正比,若这一温度为 $T_A$,则应有

$$P_n = kT_A\Delta f = P \qquad (2\text{-}5\text{-}23)$$

因此,由(2-5-22)式,可以写出 $T_A$ 的表达式

$$T_A = (A_r/\lambda^2)\iint_{4\pi}T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \qquad (2\text{-}5\text{-}24)$$

利用方向图立体角 $\Omega$ 的两个表达式

$$\Omega_P = \iint_{4\pi}F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega$$

和

$$\Omega_P = \lambda^2/A_r$$

(2-5-24)式可以进一步写为

$$T_A = \frac{\iint_{4\pi}T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint_{4\pi}F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \qquad (2\text{-}5\text{-}25)$$

$T_A$ 称为天线辐射测量温度。它与视在温度 $T_{AP}$及物体亮度温度 $T_B$ 的关系,由图 2-5-4(a)所示,图 2-5-4(b)为天线处所有入射能量的框图。

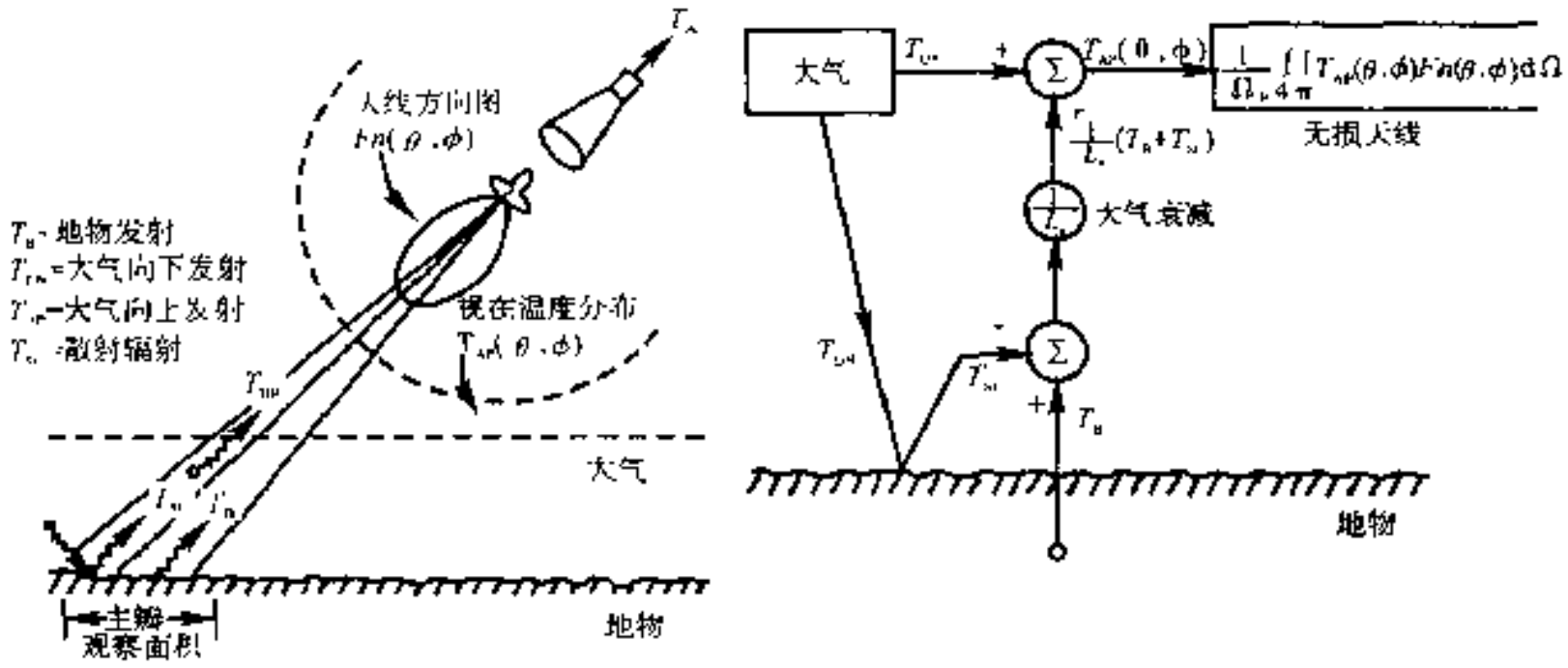



图 2-5-4　天线温度 $T_A$,视在温度 $T_{AP}$以及亮度温度 $T_B$ 之间的关系

## 四、天线效率

天线辐射测量温度 $T_A$ 应视为天线主辨贡献与旁辨贡献之和,即将(2-5-25)式分子分为两个部分,一部分对主辨($ML$)积分,一部分对旁瓣($SL$)积分:

$$T_A = \frac{\iint\limits_{ML} T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} + \frac{\iint\limits_{SL} T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}$$

$$= \frac{\iint\limits_{ML} T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{ML} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \cdot \frac{\iint\limits_{ML} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}$$

$$+ \frac{\iint T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{SL} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \cdot \frac{\iint F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \quad (2\text{-}5\text{-}26)$$

上式中,若令

$$T_{ML} = \frac{\iint\limits_{ML} T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{ML} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}$$

$$T_{SL} = \frac{\iint\limits_{SL} T_{AP}(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint\limits_{SL} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \quad (2\text{-}5\text{-}27)$$

$T_{ML}$称为主瓣贡献有效视在温度,$T_{SL}$称为旁瓣贡献有效视在温度。显然,$T_A$等于 $T_{ML}$与 $T_{SL}$分别与主波束效率 $\eta_m$ 和杂散因子 $\eta_s$ 相乘之和

$$T_A = \eta_m T_{ML} + \eta_s T_{SL} = \eta_m T_{ML} + (1-\eta_m)T_{SL} \quad (2\text{-}5\text{-}28)$$

由前面的分析,$T_A$ 代表了无损接收天线输出端的功率。事实上,天线接收的部分能量会被天线接收,成为热损耗。这样,在其输出端传递的能量(即未被吸收的能量)就不是入射到天线上的能量的全部,它被称为天线端口接收功率。这一功率与全部入射功率之比就称为天线辐射效率 $\eta_l$,这一概念与第二章第三节中所介绍的是完全一致的。

天线所吸收的部分能量还会进一步转化为辐射,即天线本身的发射噪声功率,用 $T_N$ 表征。

$$T_N = (1-\eta_l)T_o \quad (2\text{-}5\text{-}29)$$

其中 $T_o$ 表示天线物理温度。这样在天线的输出端,除天线传递的辐射外,

还有天线自身的辐射，接收机接收到的能量就包括了这两个部分，若以 $T'_A$ 表征接收机接收功率，那么

$$T'_A = T_A\eta_l + (1-\eta_l)T_o$$
$$= \eta_l\eta_m T_{ML} + \eta_l(1-\eta_m)T_{SL} + (1-\eta_l)T_o \qquad (2\text{-}5\text{-}30)$$

$T'_A$ 被称为有损天线的天线温度，它是微波辐射计接收机所接收到的信号，它包含了被观察景物的发射特性信息 $T_{ML}$。辐射计遥感的目的就是要通过观测，分析景物的特性，监测其变化。由(2-5-30)式，可以得到

$$T_{ML} = 1/(\eta_l\eta_m)T'_A - (1-\eta_m)/\eta_m T_{SL} - (1-\eta_l)/(\eta_l\eta_m)T_o \qquad (2\text{-}5\text{-}31)$$

其中 $T'_A$ 为量测得到的天线温度，天线辐射效率 $\eta_l$ 和波束效率 $\eta_m$ 的量测，后面将会加以讨论，$T_o$ 可以用热敏电阻监测出来。旁瓣有效视在温度不容易量测，只能加以估计，通常要求设计尽可能高的波束效率 $\eta_m$ 以抑制 $T_{SL}$ 的影响。

**思考题：**

1. 试以侧视雷达从发射脉冲到接收回波的成像过程说明侧视雷达图像距离向分辨力的推导原理。
2. 试分析合成孔经侧视雷达与真实孔径侧视雷达不同之处。
3. 用自己的语言说明微波辐射计的工作原理。
4. 推导出单位立体角的表达式。
5. 为什么归一化辐射方向图可以由分贝表示？
6. 试解释有效散射面积和 $\sigma^o$。
7. 列出与辐射计图像数据有关的物理量，并解释其意义。
8. 辐射功率的温度表达式与瑞利—金斯公式是怎样的关系，其异同点在什么地方？

# 第三章　微波图像的特点

本章以讨论雷达图像的特点为主，同时也讨论微波辐射计图像。

学习本章主要应掌握雷达图像的几何特点，影响地物回波强度的因素和典型地物的回波特点。至于辐射计图像，它不同于雷达图像，则应掌握典型地物的亮度温度特点。

雷达遥感不同于可见光和红外遥感，它以有源主动方式工作。目前主要采用侧视雷达，其成像方式已在第二章作了介绍，由于其特殊的成像方式，必然形成图像的不同特点，这些特点包括几何特点、图像的信息特点等，只有充分了解和掌握了这些特点，才能对图像信息作出正确的分析和判断，以利更好地在各方面的应用中发挥作用。

## 第一节　侧视雷达图像参数

侧视雷达图像的参数包括系统的工作参数和图像的质量参数。雷达系统的工作参数是成像基本条件，必须了解这些成像条件才能对图像的理解有所帮助。图像的质量参数涉及地物信息的可解译程度，在分析和解译图像之前必须了解图像的这些参数。

### 一、侧视雷达系统的工作参数

这里主要简要分析一下几个主要工作参数对雷达回波的影响，这直接关系到解译工作。

雷达波长涉及对地物表面粗糙度的衡量，而粗糙度不同，回波的效果是不一样的，另外雷达波的穿透能力随波长而异，回波信号中是否包括体散射和多路径散射的效应，也依穿透的程度而定，因此解译必须知道雷达波长。

雷达的极化方式不同时，地物的回波响应不同。第一章曾分析过不同极化方式对雷达回波的影响。既便是同极化方式，地物对 HH 和 VV 极化方式的响应也不一样，交叉极化方式与同极化方式的效果更不一样。一般说来，同一地区的 HH、VV 和 HV 图像各不相同，尤其是 HV 图像，与同极化图像的差异更大。VH 图像实际上很少使用，因为它与 HV 图像的效果基本上相同。如第一章所介绍的那样，某些地物的交叉极化回波具有显著

特点，掌握这些特点对于信息提取和地物识别是十分重要的。

雷达波束对地物的不同照射方向，会产生不同的回波效果。当具备多视向时，就可以获得地物的更多信息，这对地物的定性和定量的识别是十分有利的。雷达俯角是雷达波束与水平面之间的夹角，它与入射角成互补关系，两者之中只要知道其一，便知其二。当同一类地物处于不同的俯角之下时，其回波效果不尽一致，分析图像信息时必须注意这一点。如图 3-1-1 所示，由于雷达波束在距离方向具有一定宽度，因而形成一个俯角范围。在这一范围内雷达波束照射的地面宽度称为照射带宽度，在这一照射带内的同一类地物就可能对应着不同的俯角。

雷达图像有两种距离显示形式，即地距显示和斜距显示。地距显示的图像中各地物之间的相对距离与其对应的地面距离成比例，图像比例尺是一个常数，而斜距显示则完全是地物到雷达天线的距离在图上的表示，这种图像上比例尺就不是一个常数了。

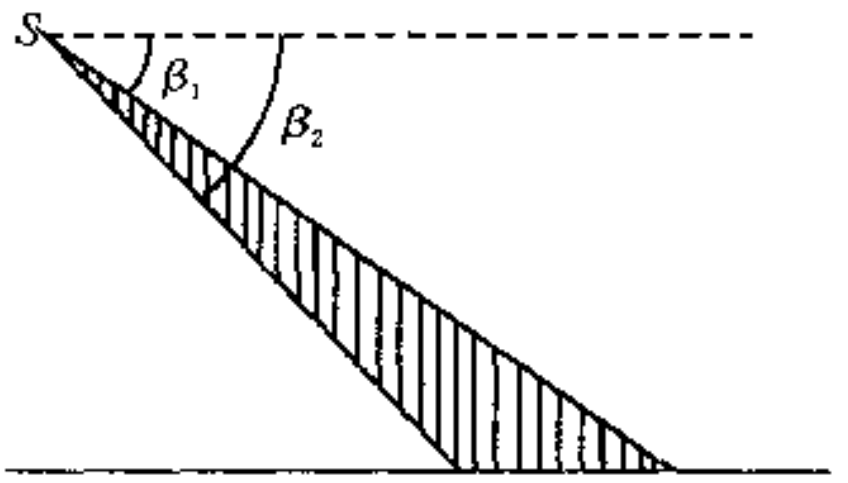



图 3-1-1　俯角与照射带

雷达系统的工作参数除了上述波长、极化方式、入射角，照射带宽和距离显示方式之外，还有平台的飞行参数，如高度、姿态、成像时间和经纬度等，这些都具有一定参考作用。

**二、图像质量参数**

雷达图像的质量取决于雷达系统的工作参数，人们更关心那些影响图像信息提取能力的参数。一般描述图像质量的参数就是这类参数。

首先看看图像分辨率。

这里所说的图像分辨率包括空间分辨率，灰度分辨率和体分辨率。

空间分辨率是指雷达图像上可区分的两个地物目标的最小距离，它包括方位分辨率和距离分辨率，第二章已作过介绍。在描述图像分辨率时通常写成两者的乘积，即地面分辨单元的大小，或称为面分辨率。实践证明，不管方位分辨率和距离分辨率是否相同，只要面分辨率相同，解译的效果总是相同的。

根据第二章对距离分辨率的分析可知，它是俯角的函数，在照射带宽度内，它实际上是变化的。所以有时又用平均面分辨率 $\Delta A$ 来描述图像的空间分辨率，它是照射带近距离端 $NR$ 到远距离端 $FR$ 所有分辨单元面积之平均。

$$\Delta A = \sum_{NR}^{FR} \frac{R_r R_\omega}{N} \tag{3-1-1}$$

了解上述空间分辨率对于图像的可解译程度就可以作出正确的评价，

并在解译中作出正确的判断。

灰度分辨率是可以分辨出两个地物目标的最小灰度对比度。灰度是地物的回波在图像上的反映，区分地物目标不仅有赖于空间分辨率，还需要看灰度分辨率的大小。由于同一类地物目标所对应的图像灰度因其分布位置而异，并非一致，是在一定范围的随机值，故对于识别地物带来困难。在区分各类地物时，通常是区分其平均灰度值，即以其平均回波功率作为识别依据，所以灰度分辨率常指可以区分的平均回波功率的最小差值。

单独用空间分辨率或灰度分辨率都不足以完全确定雷达图像可解译的程度，故引入体分辨率的概念，其表达式为

$$R_v = R_r R_\omega R_g \tag{3-1-2}$$

其中 $R_g$ 为灰度分辨率。由于实际工作中，高的空间分辨率与高的灰度分辨率常常是互相矛盾，故采用体分辨率即是这两者之间的最佳折衷。

与可见光和红外图像一样，雷达图像具有一定灰度范围，这个范围是可以检测的最强目标电平(对应于图像灰度最大值)到最弱目标电平的变化范围，可检测的最强目标通常由雷达成像系统的饱和电平所决定，由于有的雷达图像以胶片作为成像介质，故最强目标取决于胶片的饱和电平。最弱目标则由图像的背景噪声决定，通常最弱目标要比噪声高一个选定的信噪比因子(例如 10dB)。

地面目标的回波信号强度范围一般可高达 100dB 或更高，而胶片的动态范围一般不超过 20dB，这就产生了回波信号强度动态范围的压缩和取舍。通常要选择合适的回波信号动态范围，将感兴趣的目标回波信息与图像显示的灰度范围相匹配。在确定回波信号动态范围时，有两个问题应予考虑。其一，由于天线发射雷达波束时不可避免有旁瓣存在，地物点目标将对旁瓣能量作出响应，当旁瓣能量很大时，地物点目标可能对它作出较强的响应，其回波信号也在图像中记录下来，与其对雷达波束主瓣的响应同时存在，因而形成'假像'。所以在考虑可检测的最强目标时，应排除形成'假像'的可能。这就要求可检测的最强目标主瓣回波不要达到饱和，旁瓣要低于允许电平。其二，灰度最高值和最低值所对应的电平要规定一个概率范围，比如各规定 5%，以克服地面上有一分布范围的目标回波信号的相干特性的干扰，保证灰度动态范围在 90%的有效范围内。

图像的质量参数还包括图像的几何精度，在利用图像进行量测分析时必须考虑这一参数，它是经过图像几何处理最后所达到的精度。不同的几何处理方法有不同的结果，其几何精度不一样，这将在第六章中介绍。

## 第二节　侧视雷达图像的几何特点

从第二章有关侧视雷达成像机理的介绍中，已经可以看到雷达图像不同于其它图像，它有其固有的几何特点，认识这些几何特点，对于正确地分析雷达图像，是十分必要的。

### 一、斜距显示的近距离压缩

雷达图像中平行飞行航线的方向称为方位向或航迹向，垂直于航线的方向称为距离向，一般沿航迹向的比例尺是一个常量，它取决于胶片记录地物目标的卷片速度与飞机或卫星航速之比。

但是沿距离向的比例尺就复杂了，因为有两种显示方式。在斜距显示的图像上地物目标的位置由该目标到雷达的距离（斜距而不是水平距离）所决定，图像上两个地物目标之间的距离为其斜距之差乘以距离向比例尺：

$$y_1 - y_2 = f(R_1 - R_2) = (R_1 - R_2)/a \qquad (3\text{-}2\text{-}1)$$

这里 $y_1$、$y_2$ 是两目标在图像上的横坐标，纵坐标通常为航迹向图像坐标，以 $x$ 表示，$f$ 是距离向比例尺，$a$ 为比例尺分母，它由阴极射线管上光点的扫描速度所决定。由于当俯角为 $\beta$ 时，

$$\Delta R = \Delta G\cos\beta \qquad (3\text{-}2\text{-}2)$$

其中 $\Delta R = R_1 - R_2$，即两目标斜距之差，

$$\Delta G = G_1 - G_2 \qquad (3\text{-}2\text{-}3)$$

$G_1$、$G_2$ 分别为两目标到雷达天线的水平距离。

于是两目标的图上距离为

$$y_1 - y_2 = f\Delta R = f\Delta G\cos\beta = \frac{f}{\sec\beta}(G_1 - G_2)$$

$$= f'(G_1 - G_2) = \frac{1}{a\sec\beta}(G_1 - G_2) \qquad (3\text{-}2\text{-}4)$$

而此时比例尺 $f'$ 不再是常数，它与俯角成正比，$\beta$ 越大，$f'$ 也越大。

图 3-2-1 表示了地面上相同大小的地块 $A$，$B$，$C$ 在斜距图像和地距图像上的投影，$A$ 是距离雷达较近的地块，但在斜距图像上却被压缩了，可见比例尺是变化的，这样就造成了图像的几何失真，这一失真的方向与航空摄影所得到的像片形变方向刚好相反，航空像片中是远距离地物被压缩。

为了得到在距离向无几何失真的图像，就要采取地距显示的形式，通常在雷达显示器的扫描电路中，加延时电路补偿或在光学处理器中加几何校正，以得到地距显示的图像，图3-2-1中表示了地距显示图像在距离向没有

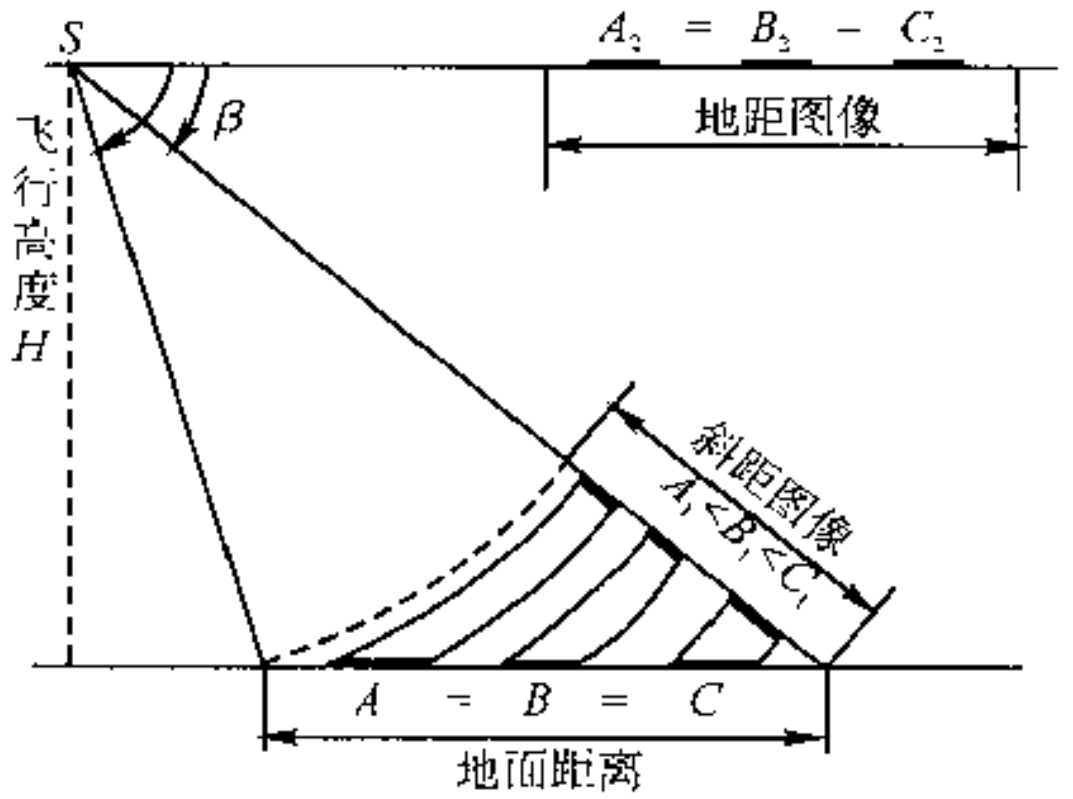



**图 3-2-1　斜距图像近距离压缩**

形变，不过这只是对平地图像的处理，可以作到距离无失真现象，如果遇到山地，既便地距显示也不能保证图像无几何形变。

## 二、侧视雷达图像的透视收缩和叠掩

在侧视雷达图像上所量得的山坡长度按比例尺计算后总比实际长度要短，如图 3-2-2 所示，设雷达波束到山坡顶部，中部和底部的斜距分别为 $R_t$，$R_m$，$R_b$，从图 3-2-2(a)中可见，雷达波束先到达坡底，最后才到达坡顶，于是坡底先成像坡顶后成像，山坡在斜距显示的图像上显示其长度为 $L'$，很明显 $L'<L$。而图 3-2-2(b)中由于 $R_t=R_m=R_b$，坡底，坡腰和坡顶的信号同时被接收，图像上成了一个点，更无所谓坡长。图 3-2-2(c)中由于坡度大，雷达波束先到坡顶，然后到山腰，最后到坡底，故 $R_b>R_m>R_t$，这时图像所显示的坡长为 $L''$，同样是 $L''<L$，图 3-2-2(a)所示图像形变称为透视收缩，图 3-2-2(c)的形变称为叠掩。一般令雷达图像显示的坡长为 $L_r$，有

$$L_r = L\sin\theta \tag{3-2-5}$$

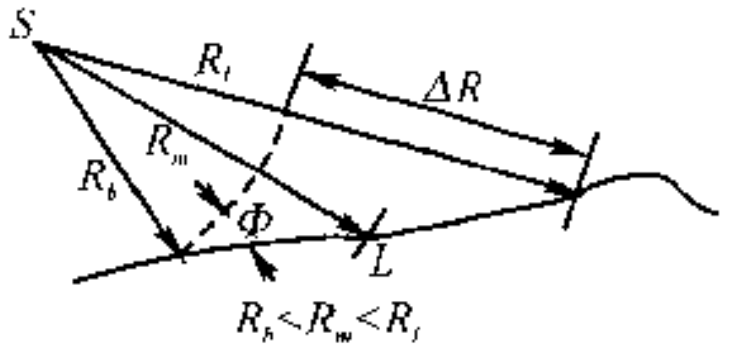
这里 $\theta$ 为雷达波束入射角，可见当 $\theta=90°$ 时，$L_r=L$，即波束贴着斜坡入射时，斜坡的图像显示才没有变形，其它情况下，$L_r$ 均小于 $L$。

入射角 $\theta$ 一般可由下式表达

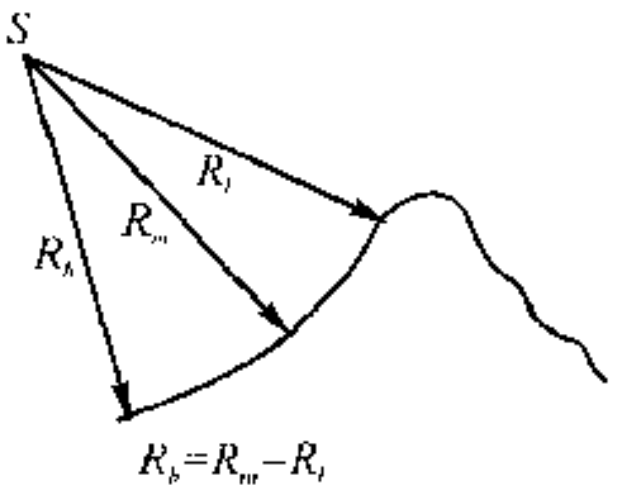
$$\theta = 90° - (\beta + \alpha) \tag{3-2-6}$$

其中 $\beta$ 为俯角，$\alpha$ 为山坡坡度。由图 3-2-3 可见 $\theta$ 角的符号定义通常是与山坡坡度相关的(对于某一雷达系统，$\beta$ 总是一个常数或一定的范围)，由 $\theta$ 的定义可见，对同样坡度的山坡，$\beta$ 角越大，$\theta$ 角越小。于是由(3-2-5)式，说明近距离时图像收缩更大。定义图像透视收缩比为

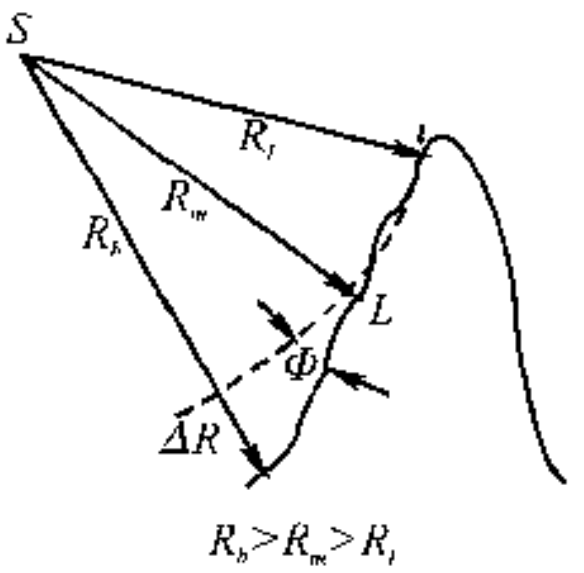
$$F_p = (1-\sin\theta)\% \tag{3-2-7}$$




(a) 雷达透视收缩




(b) 斜坡成像为一点




(c) 雷达叠掩

图 3-2-2 斜坡的成像解译([8])

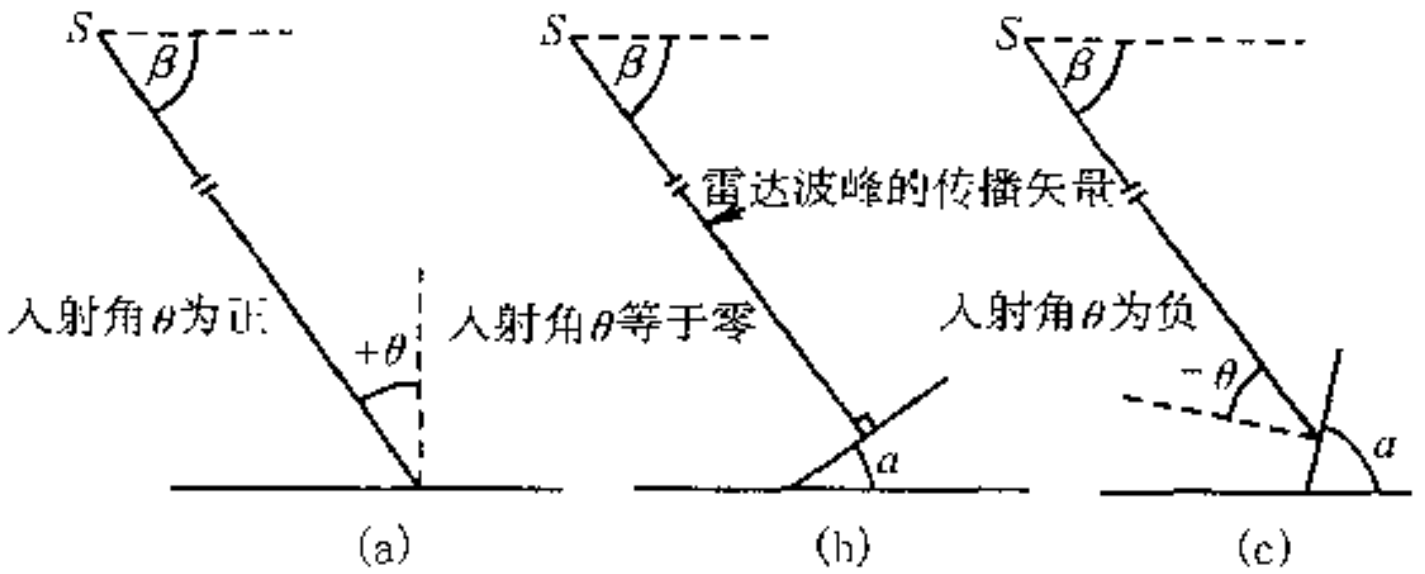


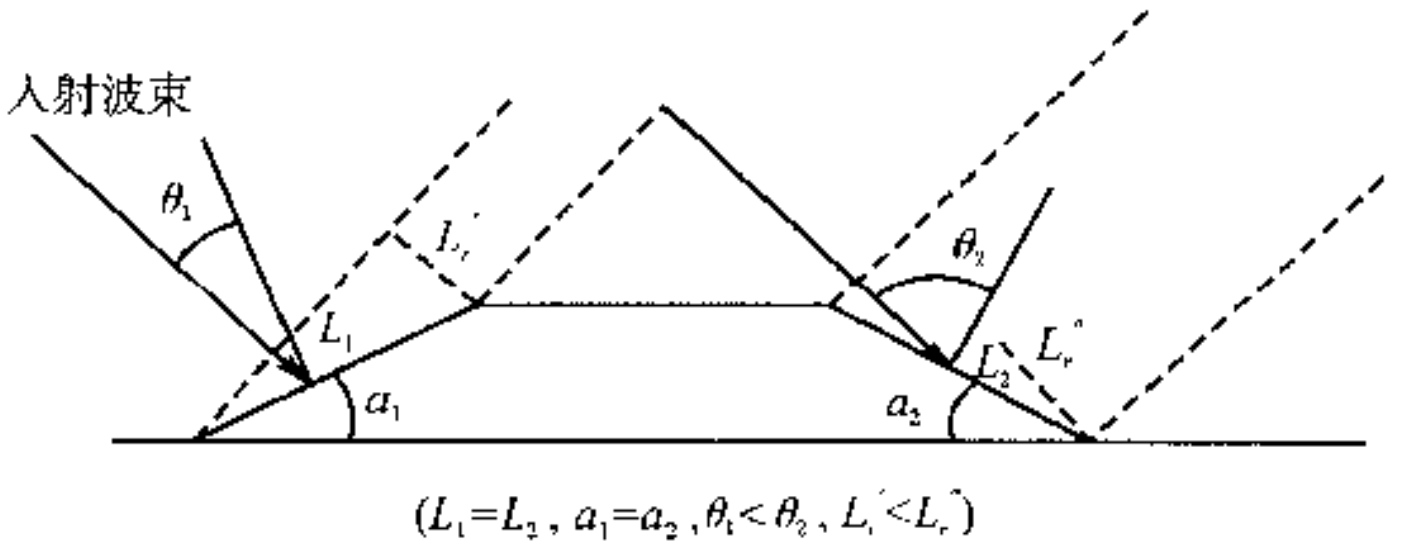

图 3-2-3 地形、坡度($\alpha$)对入射角($\theta$)的影响

它与入射角的关系由此式和表 3-2-1 给出。

表 3-2-1 雷达图像收缩百分比($F_p$)随入射角($\theta$)的变化关系([8])

| $\theta$ | $F_p$ | $\theta$ | $F_p$ |
|---|---|---|---|
| 90 | 0.0 | 40 | 35.7 |
| 80 | 1.5 | 30 | 50.0 |
| 70 | 6.0 | 20 | 65.8 |
| 60 | 13.4 | 10 | 82.6 |
| 50 | 23.4 | 0 | 100.0 |

以上是考虑朝向雷达波束的坡面,即前坡的情况。背向雷达波束的坡面,称为后坡,对于同一方向的雷达波束,后坡的入射角与前坡不一样。如




$(L_1=L_2,\ a_1=a_2,\ \theta_1<\theta_2,\ L_r'<L_r'')$

**图 3-2-4　前后坡图像收缩情况($L_r$)对比**

图 3-2-4,后坡坡度与前坡相同时,图像的收缩情况不一样。表 3-2-2 给出了前后坡均为 15°时,后坡与前坡图像显示的坡长比,可见图像上的后坡总是比前坡长,前坡的透视收缩严重,由于透视收缩本身表明回波能量相对集中,最集中的情况是山顶、山腰、山底的回波集中到一点(图 3-2-2(b)),所以收缩意味着更强的回波信号,故而一般在图像上的前坡比后坡亮。

**表 3-2-2　不同俯角时的地面入射角和雷达坡度长度([4])**

| 俯　角 | 雷达坡度长度 | | 坡长比(后/前) |
|---|---|---|---|
| | 前坡 | 后坡 | |
| 75° | 0.00 | 0.50 | ∞ |
| 65° | 0.17 | 0.64 | 3.76 |
| 55° | 0.34 | 0.77 | 2.26 |
| 45° | 0.50 | 0.87 | 1.74 |
| 35° | 0.64 | 0.94 | 1.47 |
| 25° | 0.77 | 0.98 | 1.28 |
| 15° | 0.87 | 1.00 | 1.15 |

图 3-2-5 为图像叠掩的形成,可见山顶 $D$ 点是与山下 $C$ 点在图像上成像于同一点 $D'$,山底成像晚于山顶,这种成像与航摄像片中的成像正好相反,一般说来,当雷达波束的俯角 $\beta$ 与山坡坡度角 $\alpha$ 之和大于 90°时,才会出现叠掩,表 3-2-3 给出了不同坡度产生叠掩的条件,可见波束入射角为负时才产生叠掩,图 3-2-6 表明俯角与叠掩的关系,即俯角越大,产生叠掩的可能性越大,且叠掩多是近距离的现象,图像叠掩给判读带来困难,无论是斜距显示还是地距显示都无法克服。

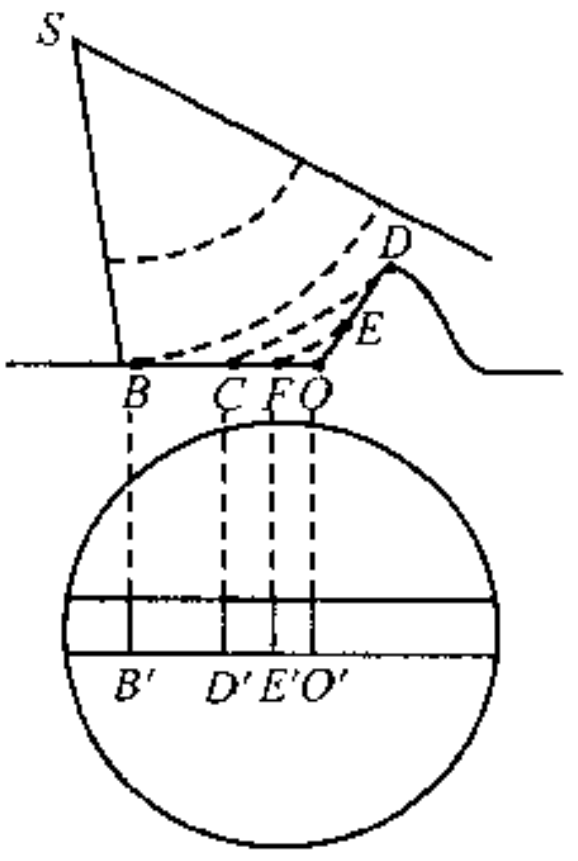



**图 3-2-5　图像叠掩的形成**

## 三、雷达阴影

雷达波束在山区除了会造成透视收缩和叠掩外,还会对后坡形成阴影,如图3-2-7所示,在山的后坡雷达波束不能到达,

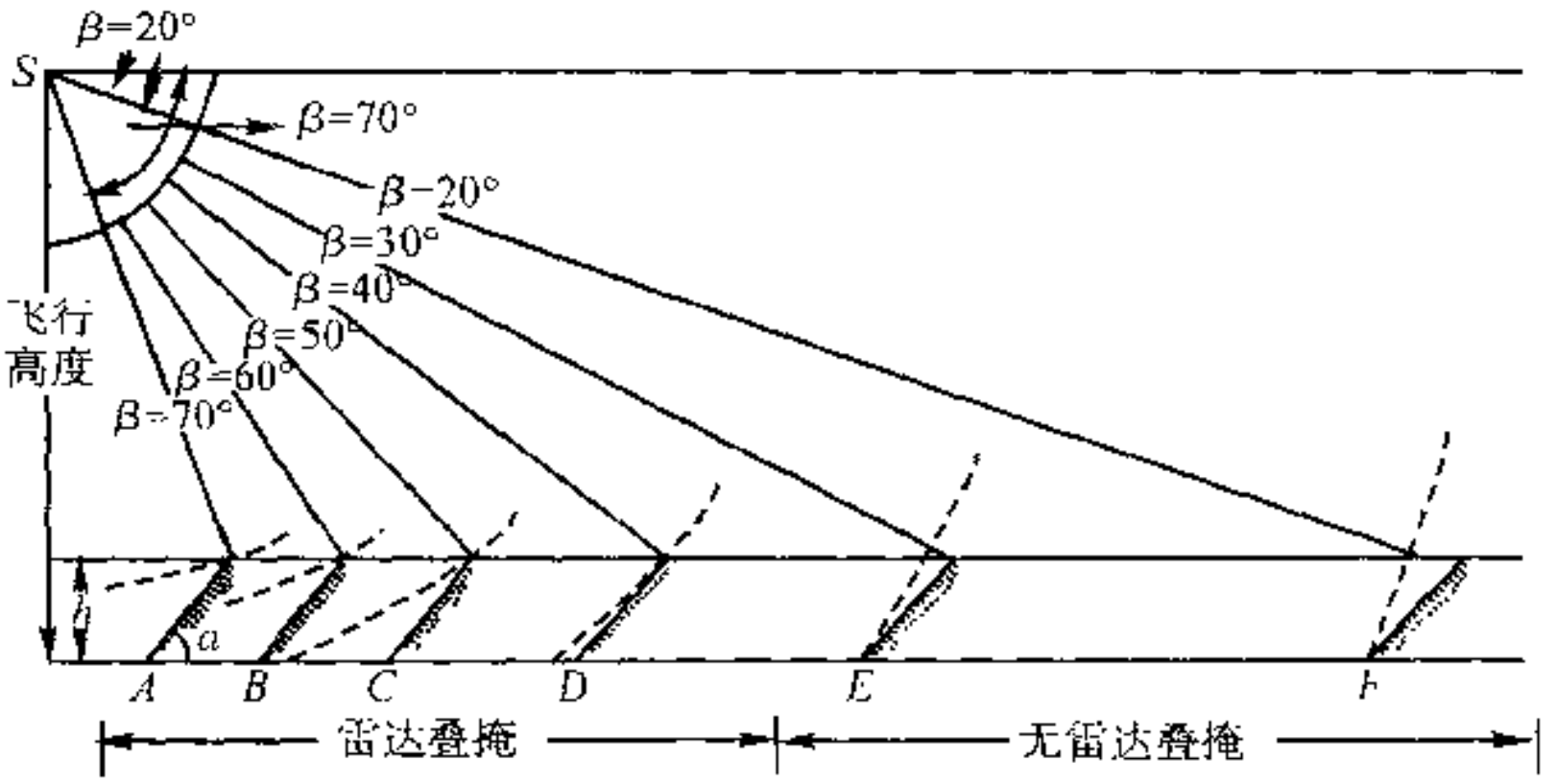



**图 3-2-6　雷达叠掩与俯角($\beta$)的关系([4])**

因而也就不可能有回波信号,在图像上的相应位置出现暗区,没有信息。雷达阴影的形成与俯角和坡度有关。图 3-2-8 说明了产生阴影的条件。当背坡坡度小于俯角即 $\alpha<\beta$ 时,整个背坡都能接收波束,不会产生阴影。当 $\alpha=\beta$ 时,波束正好擦过背坡,这时就要看背坡的粗糙度如何,倘为平滑表面,则不可能接收到雷达波束,若有起伏,则有的地段可以产生回波,有的则产生阴影。当 $\alpha>\beta$ 时,即背坡坡度比较大时,则必然出现阴影。

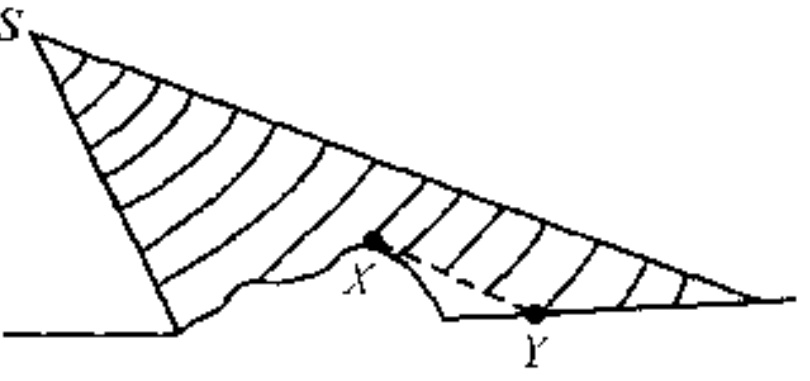
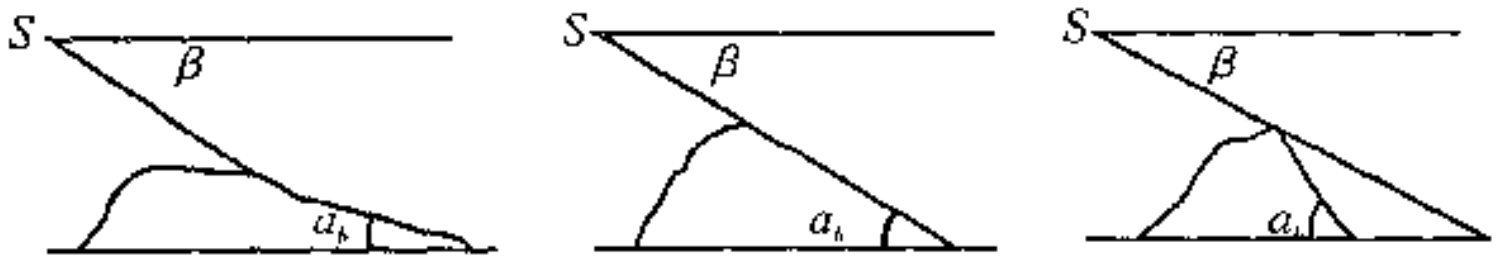



**图 3-2-7　雷达阴影的产生**

雷达阴影的大小,与 $\beta$ 角有关,在背坡坡度一定的情况下,$\beta$ 角越小,阴影区越大,这也表明了一个趋势,即远距离地物产生阴影的可能性大,与产生叠掩的情况正好相反。




(a)$a_b<\beta$ 无阴影　　(b)$a_b=\beta$ 波束擦掠后坡　　(c)$a_b>\beta$ 产生阴影

**图 3-2-8　背坡角对雷达图像的影响**

上面所述是山脊走向与雷达波束垂直时的情况。当山脊走向与航向不平行,其夹角 $\psi$ 不为零时,产生阴影的条件会发生变化,图 3-2-9 即表示了在不同 $\psi$ 角和不同俯角情况下会产生阴影的背坡坡度,图中虚线指示了当山脊走向与雷达波束的夹角为 40°,俯角为 40°时,只有当背坡坡度大于 47.5°时,才会产生阴影。

由图 3-2-8(c)还可看出,斜距内的雷达阴影的长度 $S_s$ 与基准面上的

地物高度 $h$ 和雷达到阴影最远端的斜距 $S_r$ 以及航高 $H$ 有关，其表达式为

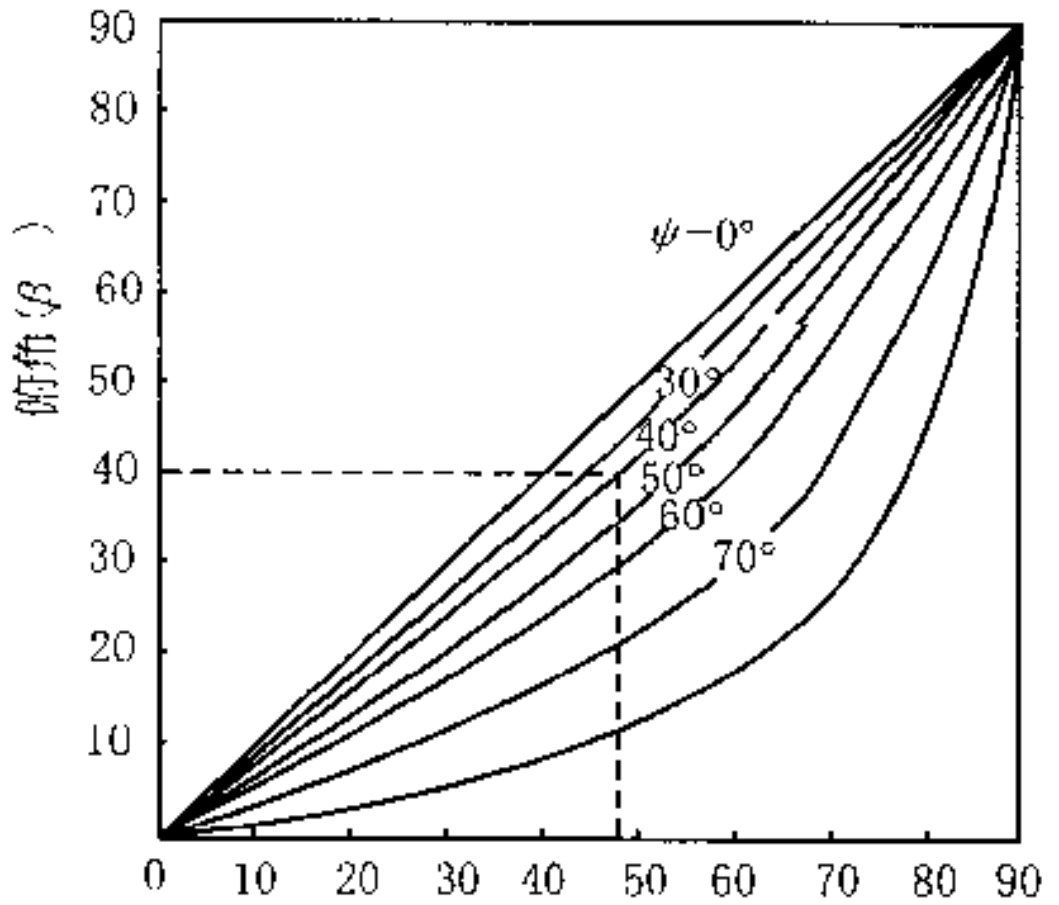



**图 3-2-9　航向与山脊线走向之间的夹角 $\psi$ 与产生阴影的地形背坡角度 $\alpha_h$ 之间的关系。([4])**

$$S_s = hS_r/H \tag{3-2-8}$$

若用俯角表示，则有

$$S_s = h/\sin\beta \tag{3-2-9}$$

**表 3-2-3　产生叠掩的必要条件**

| 地形坡度 | $\beta$ | $\theta$ |
|---|---|---|
| >80° | 10° | ↑ |
| >70° | 20° | |
| >60° | 30° | |
| >50° | 40° | |
| >40° | 50° | 负 |
| >30° | 60° | |
| >20° | 70° | |
| >10° | 80° | ↓ |

这说明阴影对于了解地形地貌是十分有利的，可以根据对阴影的定量统计(如面积和长度的平均值，标准差等)和其它标准对地形进行分类。但是当阴影太多时，就会导致背坡区信息匮乏。这是它不利的一面。所以一般尽可能在起伏较大的地区避免阴影，为了补偿阴影部分丢失的信息，有必要采取多视向雷达技术，即在一视向的阴影区在另一视向正好是朝向雷达波束的那一面，前者收集不到的信息在后者那里得到补偿。

## 第三节　侧视雷达图像的信息特点

侧视雷达图像上的信息是地物目标对于雷达波束的反应，而且主要是

地物目标后向散射形成的图像信息，即朝向雷达天线的那部分被散射的电磁波所形成的图像信息。由于地物目标所处的位置、地物结构、表面形态和介电性能等不同，对雷达波束的反应是不一样的。同时不同雷达波段、极化方式、入射角也会使地物产生不同的反应，因而在图像上形成不同的色调和纹理。

进而言之，雷达波束是一种电磁波波束。由于电磁波具有振幅、频率、初相以及极化四个要素，一般只要有一个要素不同，就是不同的电磁波。所谓地物目标对雷达波束的不同反应就是指回波振幅、初相或极化不同。一般在散射过程中，初相会发生变化，但电磁波的频率不会改变，只是当雷达波束穿透地物目标时波长会发生变化。回波振幅不同表现为图像上不同的灰阶，它是因回波强度不同所致。不同的极化则以同极化图像或交叉极化图像的形式表现出来。一般雷达图像不直接记录相位信息，其变化只能通过间接的方式(即通过回波强度的变化)影响图像信息。

本节主要讨论影响地物目标图像特征的诸要素，这对于图像的解译和目标识别是十分重要的。

## 一、地物目标对雷达波束的几种不同反应

一般说来，地物目标在被雷达波束照射后，可能有以下几种情况：反射、散射、穿透和吸收。

如果被地物目标吸收，则没有回波信号。当雷达波束穿透了地物时，则可能在穿透过程中，有一部分能量被反射或散射，造成雷达回波，一般这种情况称为体效应。地物目标的散射则因各向散射的能量分布不同，形成散射方向图，如图 3-3-1 所示。当指向雷达那部分能量即后向散射能量最大时，就形成了较强的信号。而当反射雷达波时，则要看反射的方向是否指向雷达天线，当反射方向不朝向雷达天线时，就可能收不到回波信号。

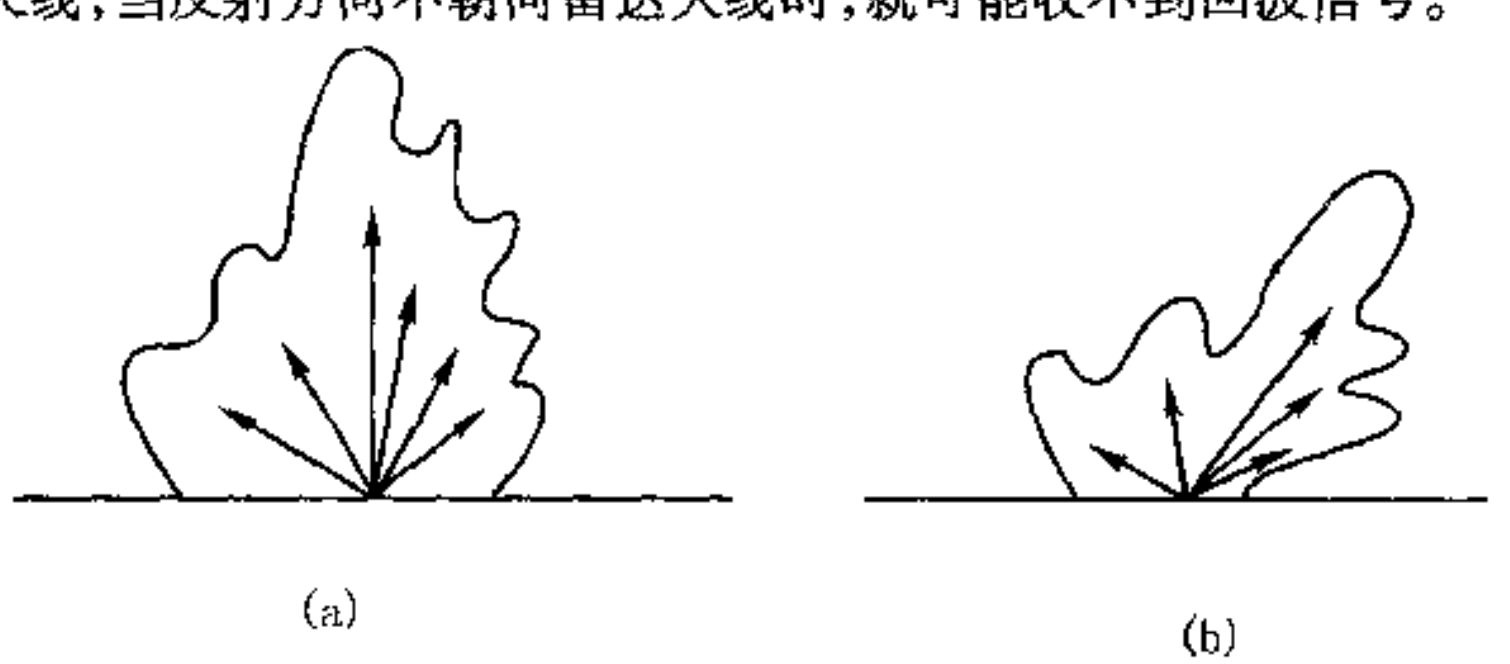



**图 3-3-1　地物各向散射回波**

通常地物目标对雷达波束的反应是散射(或反射)、穿透和吸收三种情

况并存，这时就要看哪种情况起主导作用，而这又由目标的性质和电磁波波长所决定。因为波长不同，对地物的穿透性是不一样的。地物本身的结构，表面的粗糙度和介电性能不同，则会对电磁波的穿透、反射（或散射）和吸收带来不同程度的效应。

## 二、地物目标的几种类型

一般说来，地物目标可分为分布型目标、点目标和所谓的硬目标。下面逐一简要地分析一下这几种目标的特点。

所谓分布目标又叫面目标。比如一大块草地或农田，它由许许多多同一类型的物质或点组成，这些组成物质或点的位置分布是随机的，因而它接收到的电磁波相位各有不同，回波初相也不一致，其回波幅度也是随机的，但其中没有任何一个物点的回波散射可以在总回波功率中占主导地位。雷达波束在扫过这些点之后，雷达天线所接收的电磁波电场信号往往形成周期性的信号，造成图像上这类地物最强信号（亮点）到最弱信号的周期变化，并非灰度均匀（当然不是有信号和无信号之间的强烈反差），而是一系列亮点和暗点相间的图斑，形成了“光斑”效应。由于合成孔径雷达图像的几何分辨率高于真实孔径雷达图像，故其“光斑”效应比真实孔径雷达要大得多。为了减少这种效应，通常采用“多视”技术，降低空间分辨率。因为这一般对分布目标是没有多大影响的。还可以采用图像低通滤波方法，以减少“光斑”，但这种方法也是人为地降低图像空间分辨率。

需要指出的是，并非所有面目标都是分布目标，只有表面足够粗糙（表面粗糙度与电磁波长相当或更大）的地物目标又具有较大的面积才是分布目标。有的地物如水面，雪地，尽管面积较大，但表面光滑，只会反射雷达波，且多为镜面反射，几乎无后向散射回波，就无从引起“光斑”效应了。

点目标是指比分辨单元小得多的地物目标，也就是在一个像素所对应的地块内比较小的独立地物目标，它与地块内其周围地物不是一个类型，因此它的散射回波与周围地物的不一样，有时它的回波信号相当强，在整个地块的回波信号中占据了主导地位，这时它所在像素的信号几乎就只反映它的存在。但一般说来，点目标所在像素的信号除了点目标的散射回波外，还有相对于它的背景地物的贡献。当回波强度用地物的散射截面表示时，若背景地物的回波可表示为 $\sigma = \sigma^0 A$，其中 $A$ 为分辨单元面积，$\sigma^0$ 是背景地物的平均后向散射系数，这里将点目标的大小视为可忽略不计。如果点目标的散射雷达截面积为 $\sigma_p$，则有点目标的回波与背景回波之比

$$S = \frac{\sigma_p}{\sigma^0 A} \tag{3-3-1}$$

因此要从图像中检测出点目标，必须有足够大的 $S$。一般说来，空间分辨率

高的雷达图像是比较容易检测出点目标的，图3-3-2就是用以像素尺寸的1/10作为密度分割单元，对雷达图像的密度分布进行观测，测出点目标的密度分布情况。这里的密度是指点目标信息的输出电压，可以看出，密度分布曲线都形如 sinc 函数($\mathrm{sinc}(x)=\sin x/x$)。

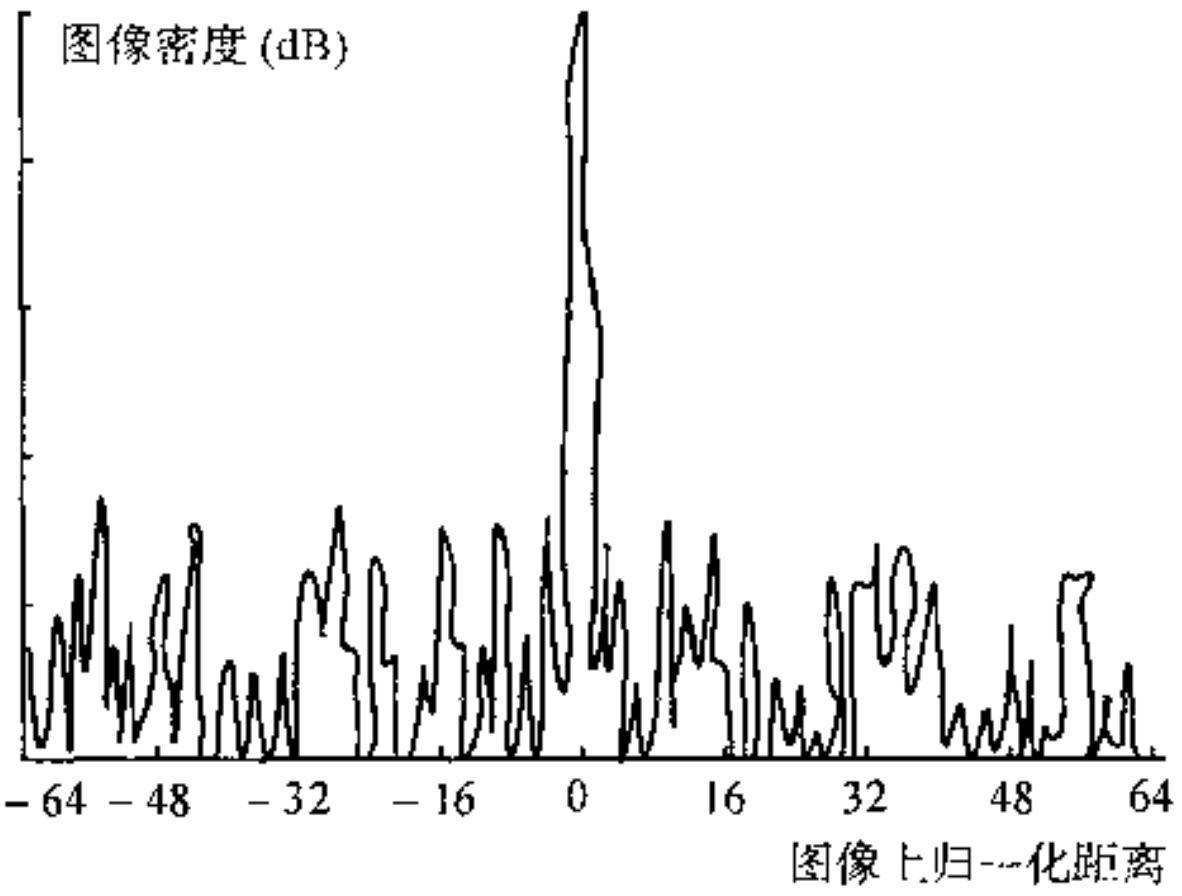



图 3-3-2　点目标密度分布图([8])

所谓硬目标是那种既不占有相当面积，又不限制在分辨单元之内的地物，其回波信号在图像上往往表现为一系列亮点或一定形状的亮线，大多数人工目标如桥梁、输电线、房屋等都属于这一类目标，它们的回波信号很强，其原因主要是：有与雷达波束相垂直的平面；有角反射效应；有相应于入射波频率的谐振效应；有合适指向的线导体。

很明显，地物只要其某一表平面垂直于雷达波束时，就可能产生反射，这时反射方向正好指向雷达天线。角反射效应，指的是如图 3-3-3 的几次反射效应，这种效应常常会造成很强的回波信号，这时尽管雷达波束并不与地物表面垂直，但由于有角反射效应，也会产生强回波。产生谐振效应的目标，常常是金属，或高介电常数的材料所组成的地物，入射波的极化方向不一定与目标的长度方向平行，但只要有一个电场分量与它平行，就会产生谐振效应，形成强的回波，在图像中形成一系列亮点。例如人们曾在 Ka 波段雷达图像中观察到机场停机坪内一系列亮点，但停机坪内当时并无飞机，后来发现是停机坪内的小型泄洪道的谐振效应。

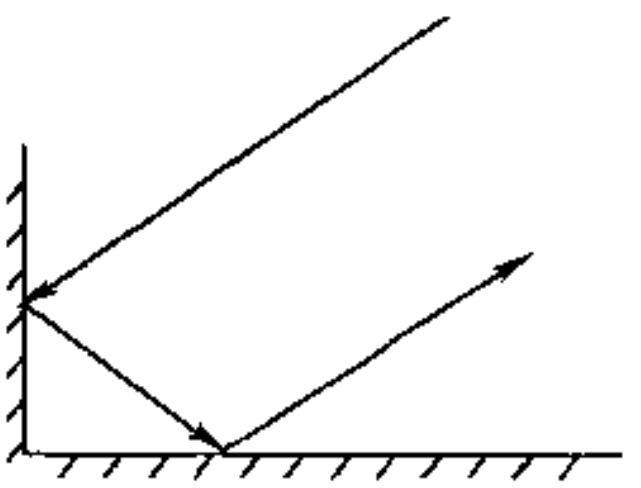


图 3-3-3　雷达波的角反射效应

线导体在没有形成谐振效应的条件时，也会产生很强回波，特别在雷达

波束垂直于导线时，回波信号最强。

总之，硬目标回波具有很强的方向性，它与入射雷达波束和地物的相对方向有很大关系，只有在一定的相对方向的条件下，才会产生硬目标回波，而且只要出现硬目标回波，必定是很强的回波。

### 三、影响雷达图像色调的因素

雷达图像多是单波段图像，因此图像灰度及灰度空间变化所构成的纹理就是从雷达图像中提取信息的主要依据。这里重要的就是雷达图像的灰度，它是地物目标后向散射回波强度的表现形式，而地物后向散射通常以雷达后向散射截面积 $\sigma$ 或后向散射系数 $\sigma^0$ 来表达。以下主要讨论后向散射系数 $\sigma^0$，分析影响地物目标后向散射系数的主要因素。

一般可以认为，$\sigma^0$ 是雷达系统的参数波长 $\lambda$，入射角 $\theta$，极化方式 $P$ 和地物目标的参数方位角 $\varphi$，复介电常数 $\varepsilon$，表面粗糙度 $\Gamma_1$，次表面粗糙度 $\Gamma_2$，及不均匀介质中的体散射系数 $V$ 的函数。即

$$\sigma^0 = f(\lambda, \theta, P, \varphi, \varepsilon, \Gamma_1, \Gamma_2, V) \tag{3-3-2}$$

目前尚不能得出上式的具体解析形式，只能给出部分参量与 $\sigma^0$ 的定量关系。一般都是根据理论分析和大量实验结果所作的定性的解释。

#### 1. 表面粗糙度的影响

这里的表面粗糙度指的是小尺度的粗糙度，即尺度比分辨单元的尺寸要小得多的地物表面粗糙度，它是由细小的物质如叶面，砂石等所决定的粗糙度。这是决定回波振幅的主要因素，其定量表示是地物表面起伏高差的均方根值 $h$，一般这种粗糙度分为三种情况，即光滑表面，稍粗糙表面和十分粗糙的表面，如图 1-3-6 所示。

完全光滑的表面产生镜面反射，其反射规律遵循斯涅耳定律，即反射角等于入射角。这种情况下，几乎所有的反射的能量都集中在以反射线为中心的很小的立体角角度范围内，因此一般情况下，几乎没有回波信号，只有当雷达波束垂直于这类地物表面时，才能收到很强的回波。

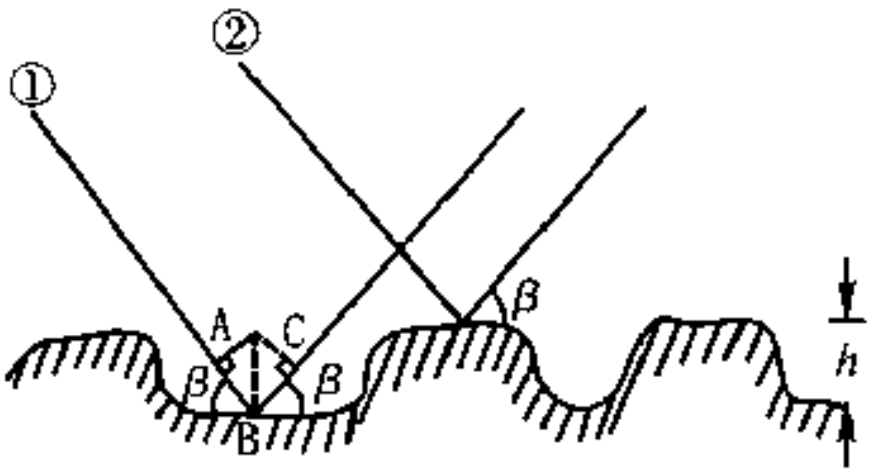



图 3-3-4　瑞利准则的推导([4])

对于稍微粗糙表面，被反射的能量不再完全集中在反射线的方向，而是在各个方向上均有反射能量的分布，常称漫反射或散射。这时尽管镜面反射方向的能量仍占大部分，雷达天线已可以接收到少部分能量，图像出现回波信号，但是比较弱。

对于非常粗糙的表面，可以向所有方向比较均匀地反射能量，镜面反射

的情况没有了，这就是所谓各向同性散射，这时雷达天线接收的回波比较强。

一般情况下，粗糙表面在图像上的色调是亮色调，稍粗糙表面是灰色调，而光滑表面呈暗色调。

现在的问题是如何区分三种表面。这个问题涉及到瑞利准则，如图 3-3-4 所示，两条入射波①和②在俯角为 $\beta$ 时，入射到高度($h$)不规则的地物表面上，由于这种高度不规则，产生两条射线的程差(即折线 $ABC$)为

$$\Delta r = 2h\sin\beta \tag{3-3-3}$$

这时，两条射线的相位差就是

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r = \frac{4\pi h}{\lambda}\sin\beta \tag{3-3-4}$$

如果 $h$ 很小，即几乎没有相位差，两条反射线能量就如同相加，造成在反射角方向能量的集中，这就是镜面反射的条件。但是如果 $h$ 值造成相位差接近 $\pi$ 弧度时，两条反射线相位相反，破坏了镜面反射的条件，使反射能量分布在很宽的角度上，形成散射。为此瑞利取相位差为 $\pi/2$ 作为区分光滑面与粗糙面和区分镜面反射与漫反射的分界线，即，如果

$$\Delta\varphi < \pi/2$$

或

$$h < \lambda/(8\sin\beta) \tag{3-3-5}$$

地物表面即可看作是光滑表面，这就是瑞利准则。

但是按照这一准则不能区分不同粗糙程度的表面。为此，1971 年皮克(Peake)和奥立佛(Oliver)通过理论推导，进一步修改了瑞利准则，将地物表面状况分为三类。他们提出的准则是，如果有

$$h < \lambda/(25\sin\beta) \tag{3-3-6}$$

则地物表面是光滑面。

当 $h > \lambda/(4.4\sin\beta)$时，则认为地物表面是粗糙面。而介于上述两者之间时，则可视为中等粗糙面或稍粗糙面，这时

$$\lambda/(25\sin\beta) < h < \lambda/(4.4\sin\beta) \tag{3-3-7}$$

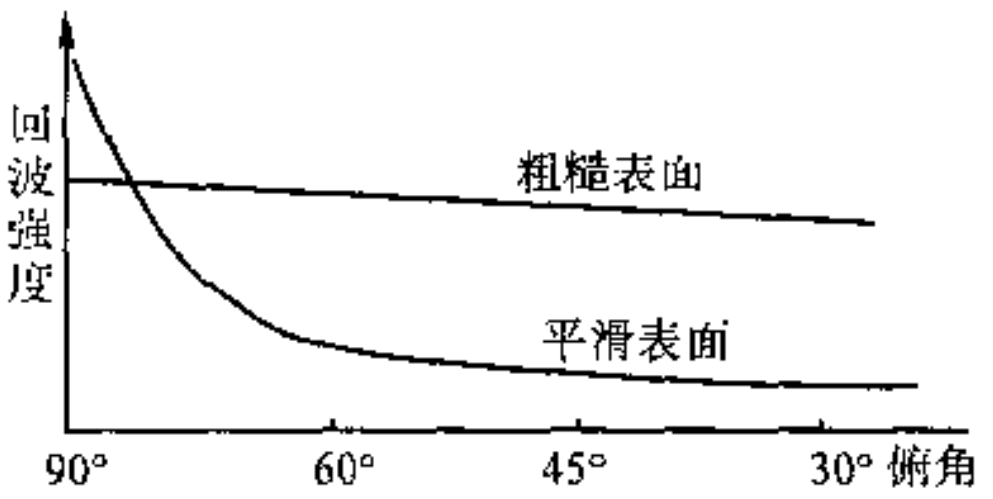



图 3-3-5　回波强度与俯角的关系([8])

从以上准则可见，粗糙度不仅取决于 $h$，它还与波长和俯角(或入射角)有关。同一地表面，在波长较长时显得光滑，在波长较短时就被认为粗糙。波长通过相应的有效表面粗糙度影响雷达回波的道理即在于此。另一方面，当俯角很小，即波束接近掠射时，地物表面常常被认为是光滑的。

实际的地物目标，如静止水面，机场跑道，平铺的道路，平屋顶等都可认为是光滑表面，一般几乎没有雷达回波，除非雷达波束入射角很小，接近垂直投射，才可能有回波信号。草地，森林，裸地等一般属于粗糙面，其中森林是典型的各向同性散射体。

一般光滑面与粗糙面的回波强度随俯角变化的曲线有如图 3-3-5 所示。

2. 复介电常数

组成地物目标的物质性质对雷达回波的影响是很大的，这一性质主要表现为复介电常数，一般说来，复介电常数越高，反射雷达波束的作用越强，穿透作用越小。复介电常数由表示介电常数的实部和表示损耗因子的虚部组成。所谓损耗因子是指电磁波在传输过程中的损耗或衰减，它与物质的传导率有关，图 3-3-6 是微波频率下水的介电常数和损耗因子。

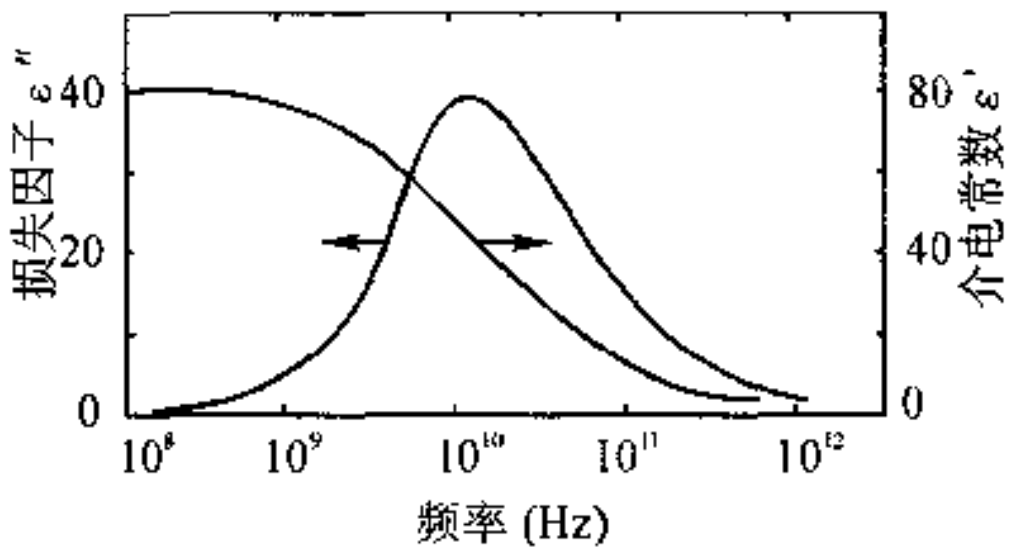



图 3-3-6　在微波频率下水的介电常数和损失因子([4])

复介电常数相对子单位体积的液态水含量呈线性变化。水分含量低时，雷达波束穿透力大，反射小，当地物含水量很大时，穿透力就大大减小，反射能量最大。在整个微波波段内，水的复介电常数量值变化范围为 20～80，而大多数天然物质(植被，土壤，岩石，雪)的介电常数变化范围只有 3～8，可见水的介电常数之高，它对于各种含水物质的影响甚大。地物目标含水量的多少决定其复介电常数的大小，影响雷达回波的变化，图 3-3-7 所示 Ka 波段草的雷达回波强度变化，表现随着季节的变化，含水量的不同，回波信号因之而异。

在雷达图像解译中，含水量经常是复介电常数的代名词，这对于植被、土壤湿度分析是十分重要的。

另一方面，微波能量的损失或衰减是物质传导率和辐射频率的函数。

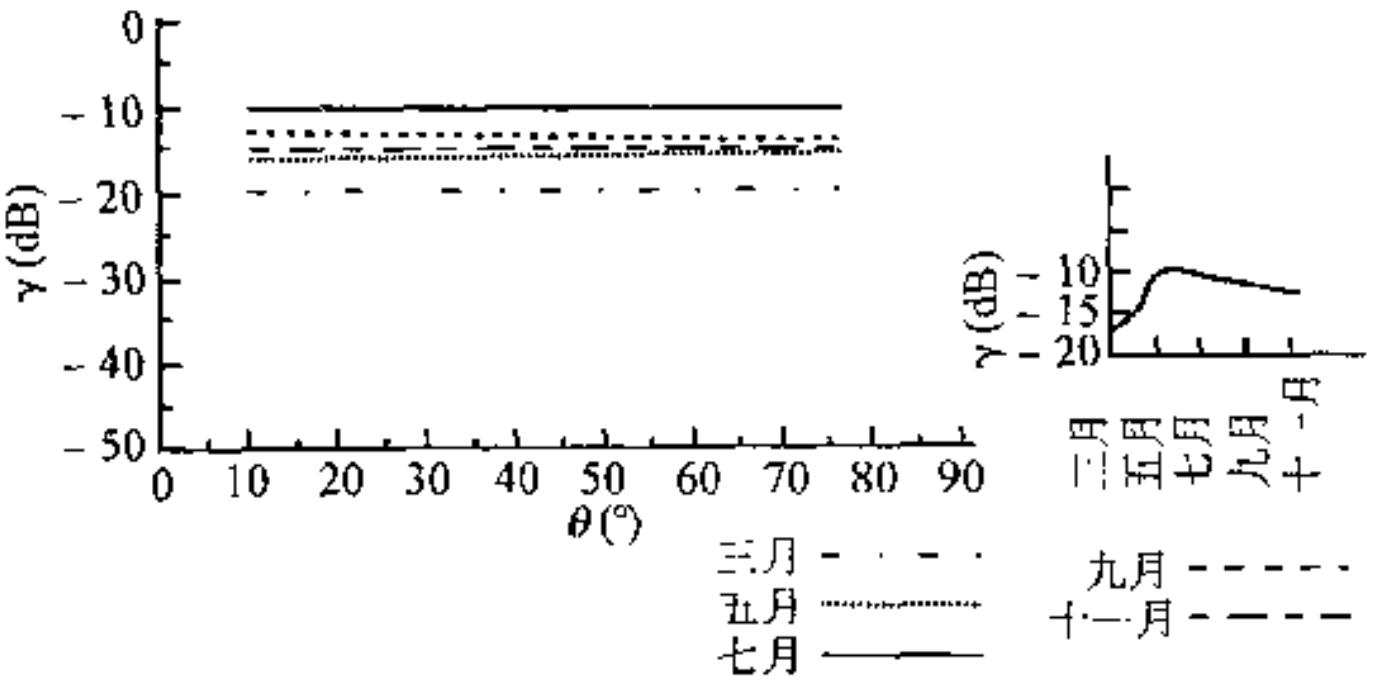



**图 3-3-7　Ka 波段草的季节变化([4])**

一般说来,频率越高,物质的衰减作用越大,有效穿透越低。这对于植被的回波影响较大,频率高时,因为穿透能力差,回波主要来自植被上部,而频率低时,由于穿透力强,回波主要来自植被下面的地表面。

3. 波长

从上面的讨论已经可以看出,波长是通过两个方面影响回波信号的,其一,按波长去衡量地物表面有效粗糙度,对于同一实物表面粗糙度,波长不同,其有效粗糙度不同,即对于雷达波束的作用不同。其二,波长不同,目标的复介电常数不同。从上面的讨论可知,有效表面粗糙度直接影响地物目标对电磁波的散射方向分布,因而影响到回波能量大小。复介电常数不同则影响到地物目标的反射能力大小和电磁波穿透力的大小。

实际情况表明,当波长为 1cm 时,大多数表面都被认为是粗糙面,而当波长接近 1m 时,则很少有显得粗糙的。波长为 1cm 时,穿透能力可以忽略不计,而当波长为 1m 时,对潮湿土壤的穿透能力为 0.3m,面对干燥的土壤则有 1m 或 1m 以上。

图 3-3-8 是不同土壤的趋肤深度,从中可以看出含水量和波长对穿透能力的影响。

一般说来波长对回波的影响即波长与 $\sigma^0$ 的关系是比较不确定的,尤其是海面。陆地上 $\sigma^0$ 与波长的关系,根据对大量实验数据的分析通常可以用 $\lambda^{-n}$ 来表示,其中 $0<n<1$。这尤其适用于 $X$ 和 $P$ 波段。

4. 入射角

根据瑞利准则,入射角的减小(即俯角的增大)即目标表面有效粗糙度的增加,将会增加目标散射能量分布的范围。一般说来,这时散射回波面积的大小也随之增大了。(但是对于非常粗糙的表面,散射回波面积就与入射角无关了,因为这时粗糙的程度无论对怎样的波长和入射角都是同一性质。)这里主要讨论入射角的变化对平均散射系数 $\sigma^0$ 的影响,入射角的变化

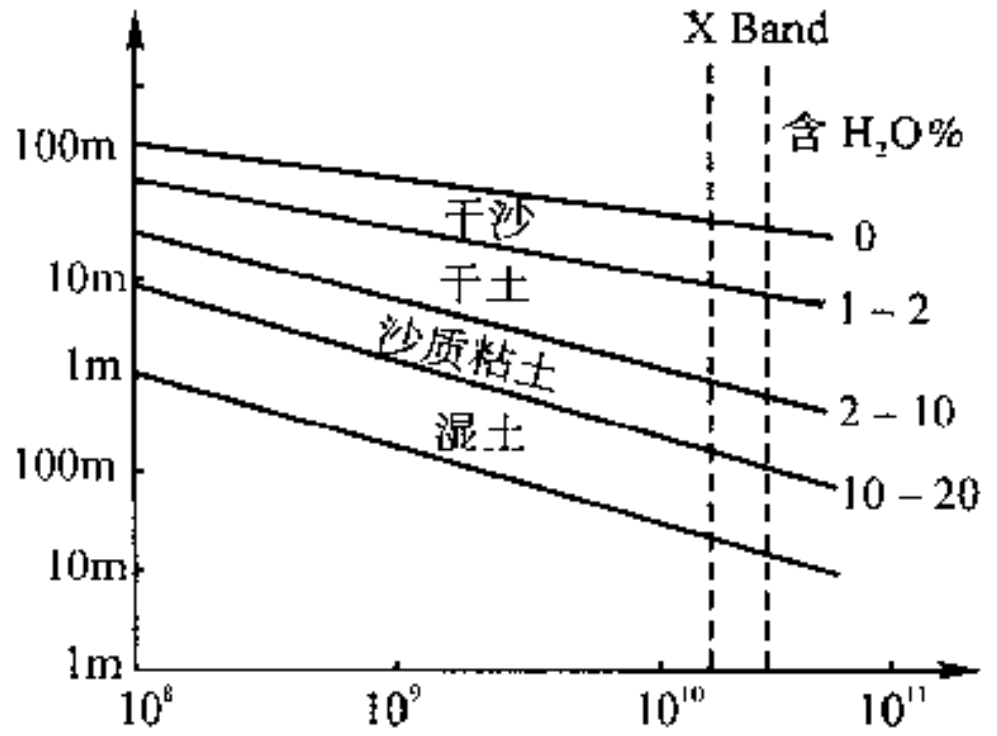



**图 3-3-8　微波对不同土壤的趋肤深度([7])**

当然也会改变分辨单元的面积 $A$，它们之间的关系式已经讨论过了，这里不再复述。

对于理想的光滑表面，平均散射系数按下式表达

$$\sigma^0 = \begin{cases} \delta & \text{在后向散射角等于镜面角的情况下} \\ 0 & \text{在其它情况下} \end{cases} \tag{3-3-8}$$

理想的粗糙表面即朗伯面，其平均散射系数则表示为

$$\sigma^0(\theta) = \sigma^0(0)\cos\theta \tag{3-3-9}$$

图 3-3-9 的曲线即为两种理想情况下的 $\sigma^0(\theta)$曲线。一般而言，对光滑面，入射角变化可能造成 25dB 以上的回波强度变化。对粗糙表面，随粗糙的程度不同，$\sigma^0(\theta)$曲线是不尽一致的。图 3-3-10 即几种粗糙表面的 $\sigma^0(\theta)$曲线，稍粗糙表面粗糙度很小，镜面反射分量只是略有减少。

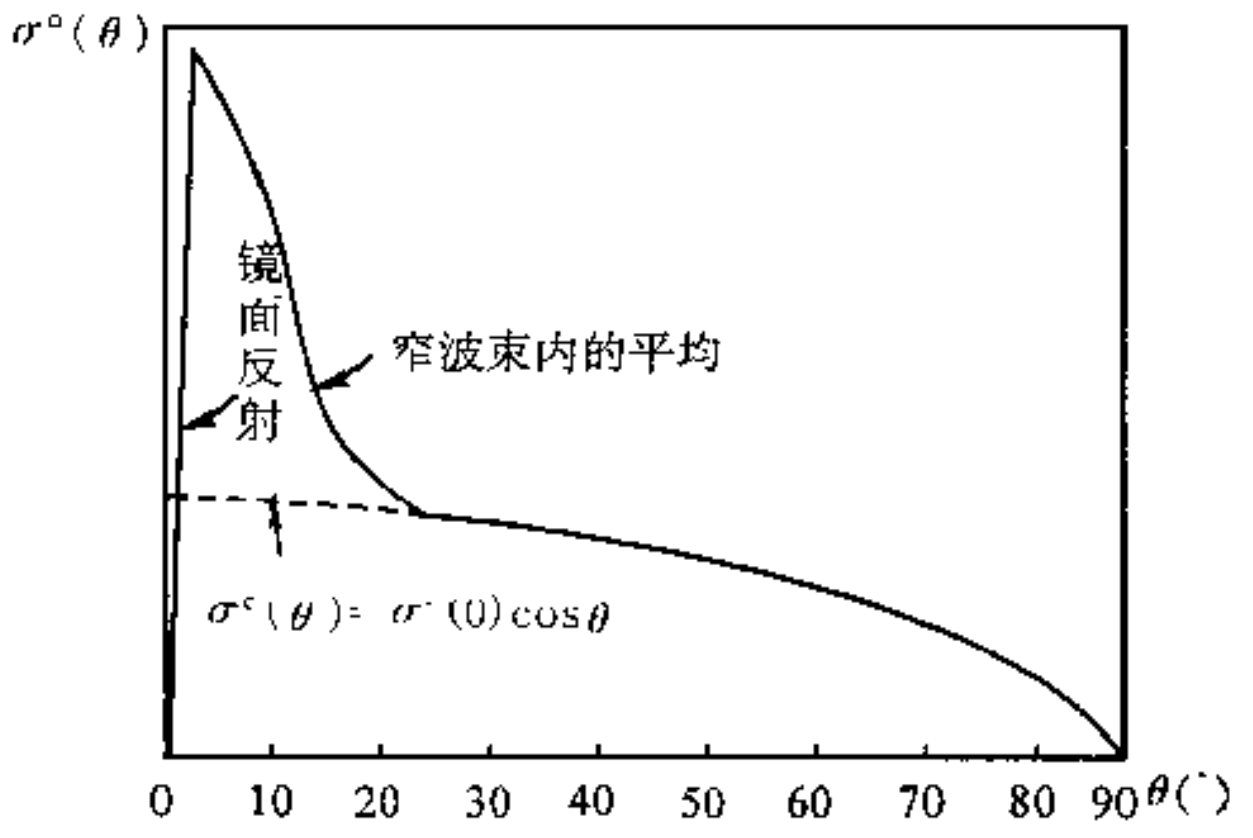



**图 3-3-9　不同类型表面的 $\sigma^0(\theta)$([8])**

实际情况下，光滑表面和粗糙面的 $\sigma^0(\theta)$曲线并非如此。如图 3-3-11，海洋卫星和机载雷达图像上得到的火山区两种表面的 $\sigma^0(\theta)$曲线与理想情况下的曲线是有--些差异的。

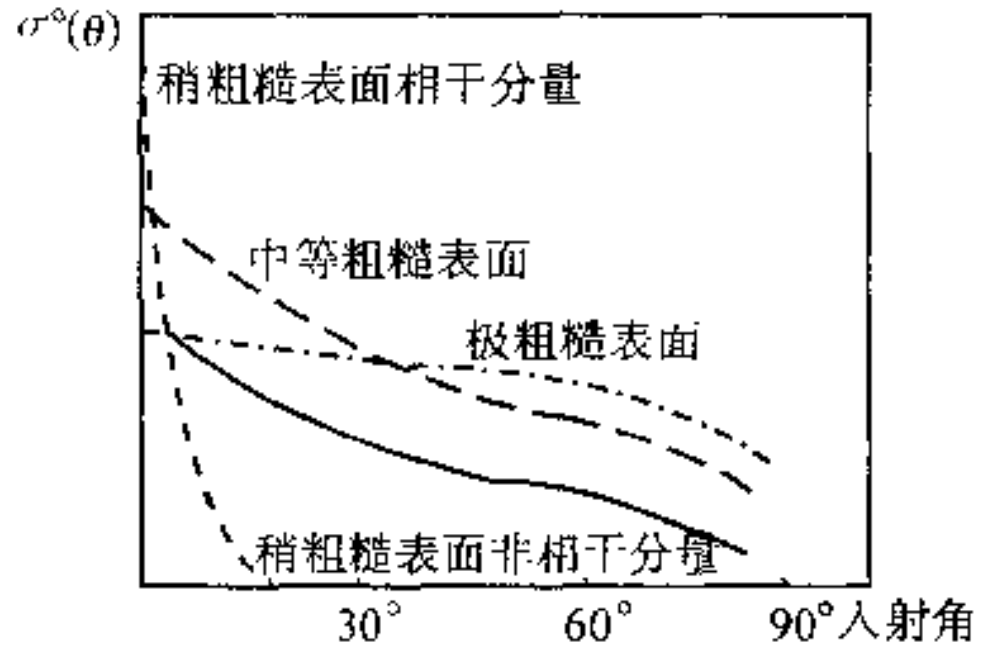



**图 3-3-10　不同表面粗糙度 $\sigma^0$ 随入射角变化([8])**

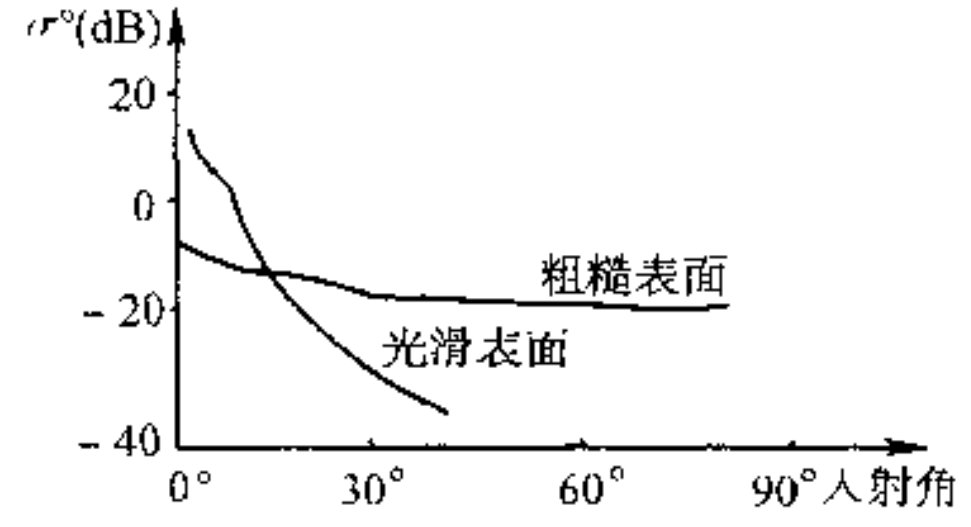



**图 3-3-11　火山区的 $\sigma^0$ 曲线([8])**

一般说来，$\sigma^0(\theta)$曲线可按入射角分为三个部分，如图 3-3-12 所示。这三部分为近垂直入射区，平直区和近切向入射区。确定三个区域的 $\theta_v$ 和 $\theta_t$ 因粗糙度而异。这样的划分便于对回波散射系数的描述。一般在陆地上空，雷达波束的入射角都在平直区范围内，这时 $\sigma^0(\theta)$的曲率变化不大，因此同一类地物目标无论在图像的近距离端，还是在远距离端，回波强度变化不大，相应的图像灰度也不会有很大变化，有利于目标解译。在这种情况下，入射角的影响不是影响雷达回波的主要因素。

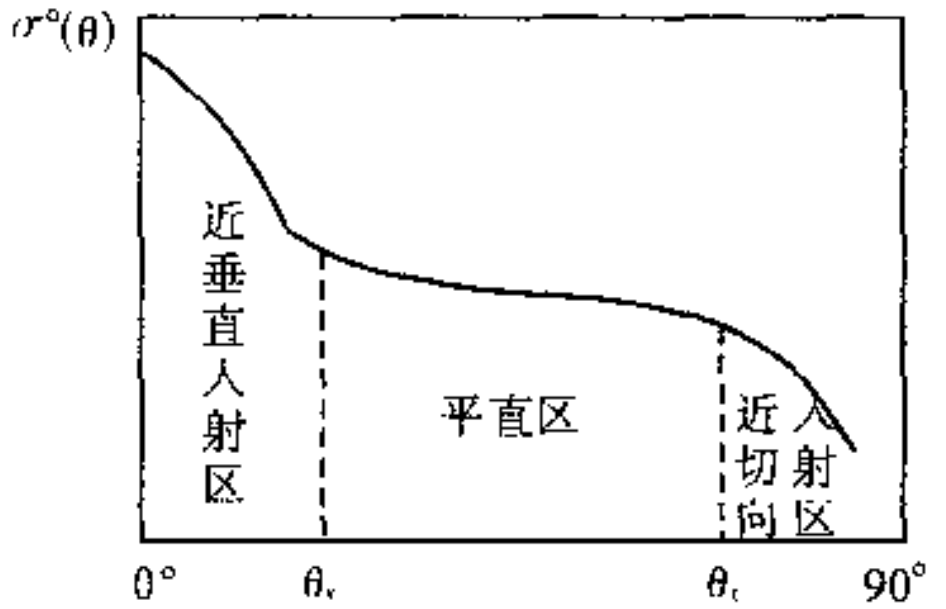



**图 3-3-12　实际表面的 $\sigma^0(\theta)$([8])**

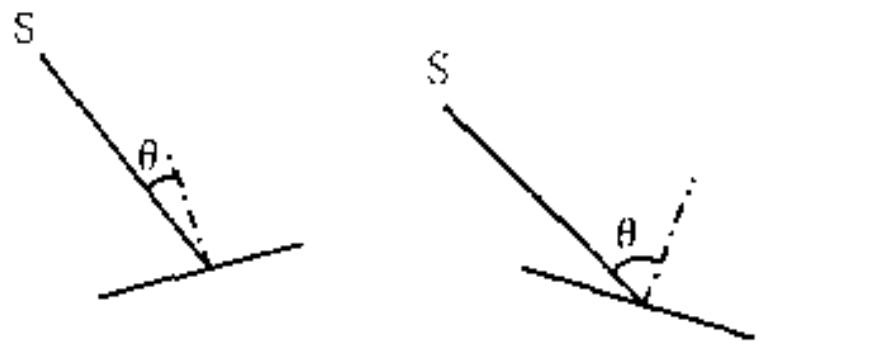
对于大尺度粗糙度表面(地形粗糙度)，即对山地，平地等而言，山坡可能朝向雷达波束，这时$\sigma^0(\theta)$就会处于近垂直入射区，如图3-3-13所示，图

像上色调会变亮。而背向雷达波束的坡面可能出现像图中(b)所示，$\sigma^0(\theta)$处于近切向区，故而图像上出现暗色调，这种情况对分析地形是有利的。

对海洋遥感而言，则有时需要将入射角控制在近垂直入射区，例如海洋油污检测，由于平静海而近似于光滑表面，只有在近垂直入射区，才能保证足够的信噪比，以利于油污信息提取。

5. 极化方式

雷达成像系统一般发射水平极化波，当这种电磁波与地表相互作用时，会使电磁波的极化方向产生不同程度的旋转，形成水平和垂直两个分量，可用不同极化的天线去接收。这样就有了 HH 和 HV 两种极化方式的图像。当雷达系统发射垂直极化波，同样可以接收到两种分量的信号，产生 VV 和 VH 图像，但一般较少这样做，多是发射水平极化波。




(a) 向着波束的斜坡　　(b) 背着波束的斜坡

图 3-3-13　斜坡效应([8])

当地物表面非常粗糙，回波与入射角无关(地表散射各向同性)时，水平和垂直同极化(HH 和 VV)信号的量测之间基本上没有什么差别。但是当地表比较平滑的情况下，回波就与极化有一定程度的相关关系。对水平极化测量来说，可以低到 15dB，比相同表面的垂直极化回波测量结果要小。在近垂直入射时，两种极化的电场矢量都在水平面内，HH 和 VV 的差别趋于消失。对于水面来说情况是类似的。在城区情况有所不同，对于房屋建筑，HH 的回波通常比 VV 回波大，有时高出 10dB，这些都是对同极化而言。对于交叉极化，通常回波比同极化低 8 到 25dB，故用以接收交叉极化的雷达接收机的增益要高些。因此在比较同极化图像和交叉极化图像的灰度时应注意。

一般说来，产生交叉极化(如 HV)的过程称为去极化。目前的研究表明有四种去极化机理。

(1)由均匀的平滑起伏表面上反射系数的差别引起的准镜面反射；

(2)非常粗糙的表面引起的多次散射；

(3)地表趋肤深度层内的非均匀物体引起的散射；

(4)地物目标本身的各向异性产生的散射。

第一种情况是对于平滑起伏的表面而言。当近垂直入射时，实际上不会产生交叉极化波，在入射角增大时(近切向入射除外)，交叉极化回波也随着增大。但这种情况产生的交叉极化回波比第二种和第三种情况下产生的交叉极化波要弱些。第二种情况和第三种情况下由于地物表面粗糙，除近切向入射外，对所有入射角范围都有均匀的交叉极化产生。一般说来，第三种情况造成的交叉回波信号最强，它是体散射和多路径散射造成的结果。

当电磁波穿透地物目标时，形成体散射，如图 3-3-14 中 $c$ 波束所示。多路径散射如植被内叶面、细枝、树干等等几条路径的散射，由于叶面、枝干取向的随机性，植被从整体上可起到某种各向同性散射的作用。如图 3-3-14 中 $a$ 波束所示，图中 $a$ 波束为植被的散射，$b$ 波束为土壤的表面散射。

图 3-3-15 为不同极化方式和不同散射的回波功率。

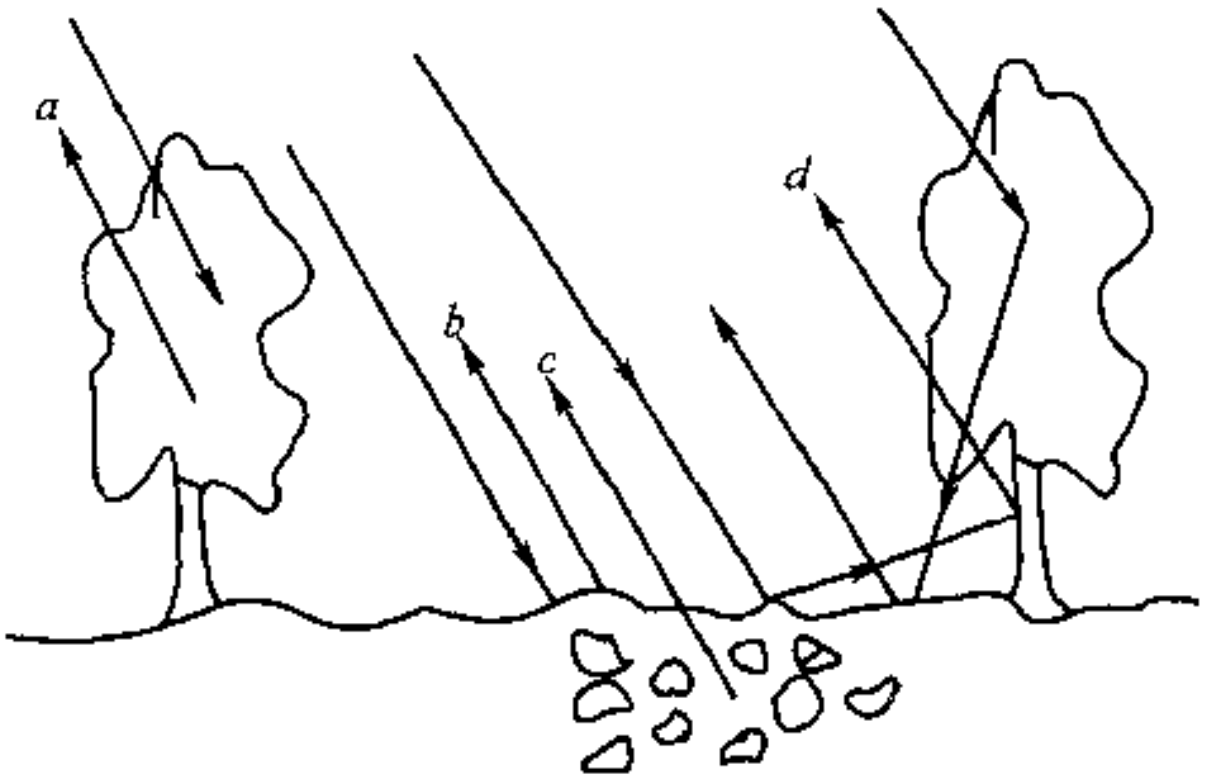



图 3-3-14　后向散射类型([8])

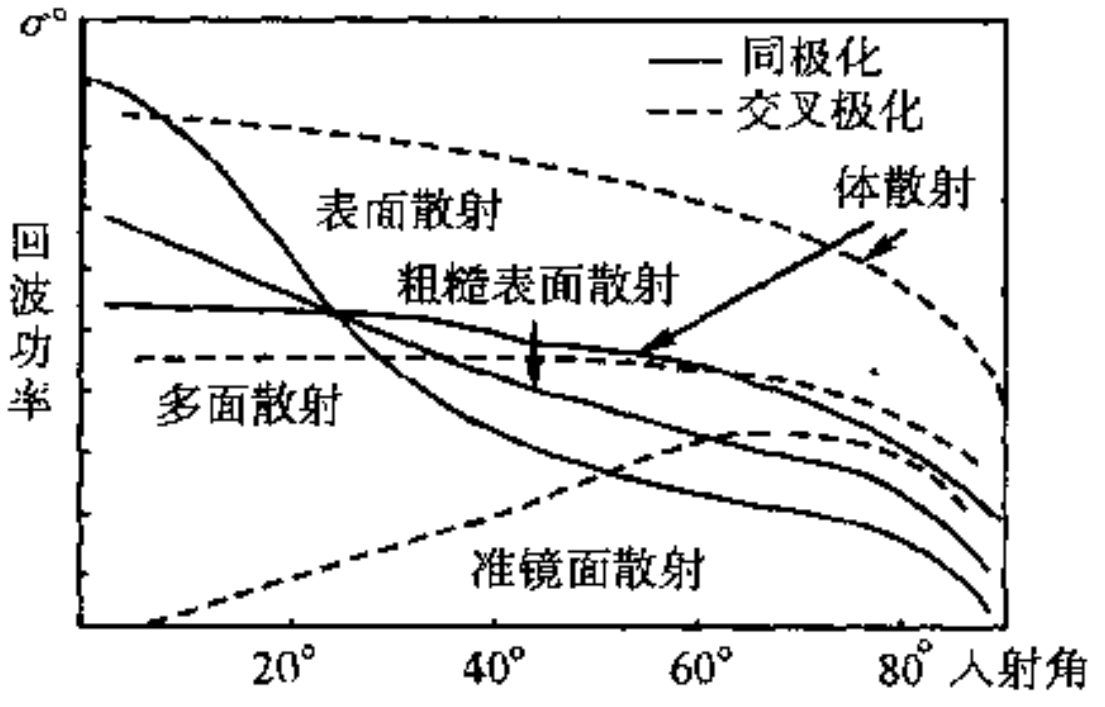



图 3-3-15　各种情况的回波功率([8])

6．亚表面粗糙度和体散射

当电磁波能穿透地物时，第二层介质的表面粗糙度即亚表面粗糙度和第一层介质及第二层介质的体散射才会产生作用。例如对复盖在物体上的雪或干沙，雷达波是可以穿透的，这样就有可能从回波上看到雪和干沙之下的物体信息。

体散射是当雷达波束穿透地物时，由于地物内物质的不均匀性，和不连续的空间位置分布，如树干、枝干、叶面等分布的随机性，引起体内散射的各向同性。如果地物内部物质是均匀分布的，则不会产生这种情况，而只会出现表面散射信息。

另一方面，地物内部物质的平均介电常数不同，后向散射曲线是不同

的。平均介电常数比较小的地物体散射曲线 $\sigma^0(\theta)$除近切向入射区外，是比较平缓的。平均介电常数比较大时，散射回波信号要小些，体散射曲线 $\sigma^0(\theta)$不平缓，如图 3-3-16 所示。

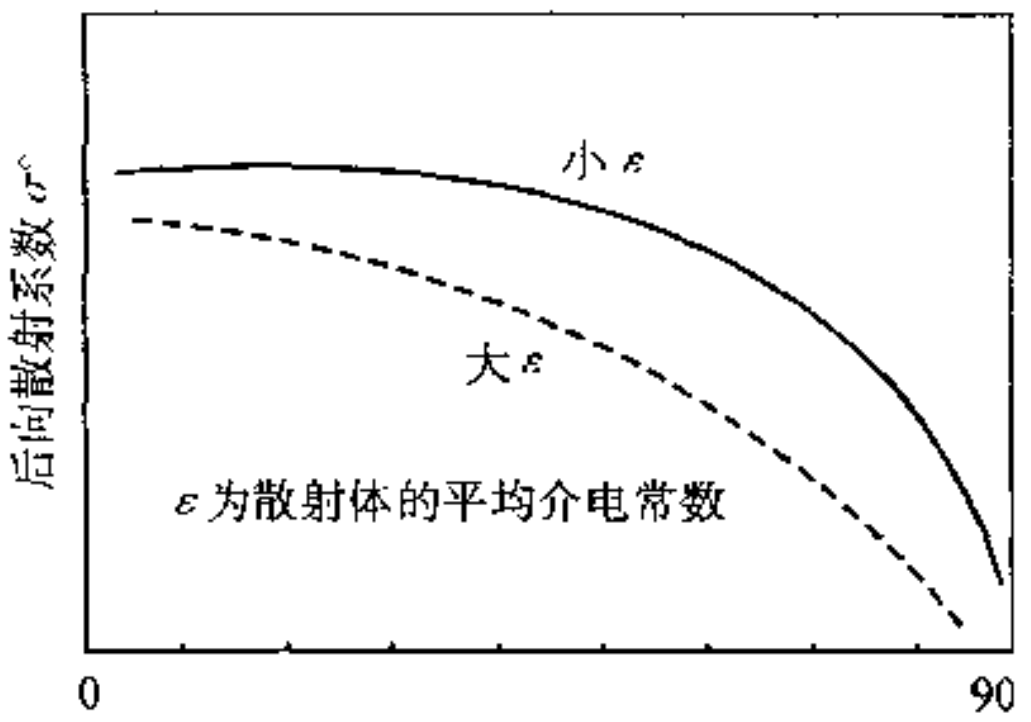
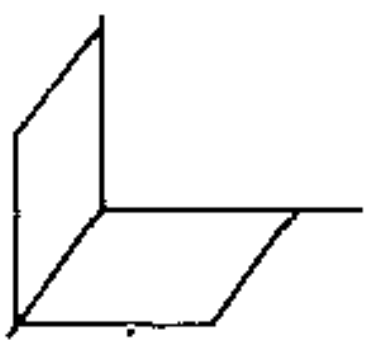



图 3-3-16　体散射的 $\sigma^0$ 与 $\varepsilon$ 的关系([8])

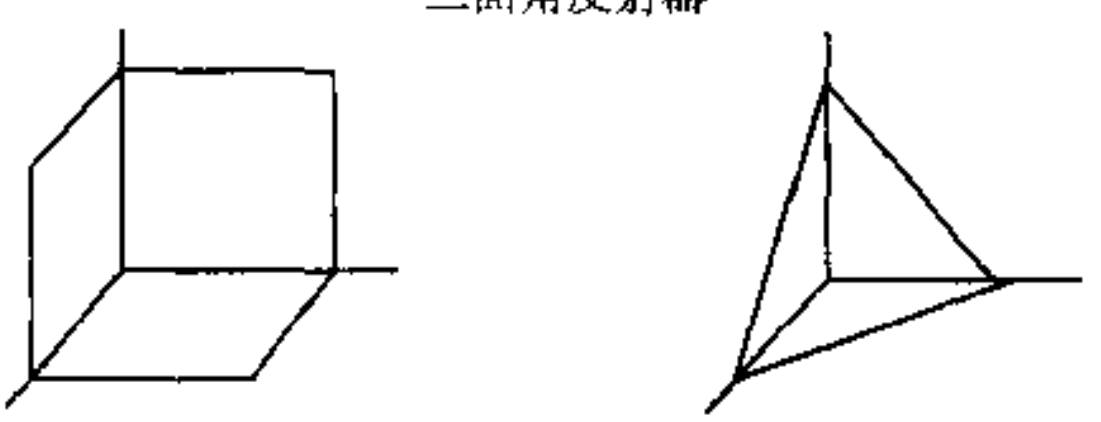
在表面散射和体散射同时存在的情况下，两者的区别是，表面散射的强度与表面复介电常数成正比，散射特性曲线的形状由表面粗糙度决定，而体散射的散射强度与内部物质介质的不连续程度成正比，其散射曲线的形状由平均介电常数等因素决定。

7. 角反射器效应

当地物目标具有两个互相垂直的光滑表面(如房屋墙面与地表面)或有三个互相垂直的光滑表面(如建筑物的凹部与地表面)时就是所谓角反射器，它有二面角反射器和三角角反射器之分，如图 3-3-17。



二面角反射器



三面角反射器

图 3-3-17　角反射器

当雷达波束遇到这种目标时，由于角反射器每个表面的镜面反射，使波束最后反转180°方向向来波方向传播(如图3-3-18)这样就产生各条射线

在反射回去的时候方向相同，相位也相同，故而信号互相增强的现象，致使回波信号极强。对二面角来说，雷达图像上就出现相应于二面角两平面交线(轴线)的一条亮线，对于三角角来讲，就在图像上形成相应于三个面交点的一个亮点，亮点尺寸和亮线宽度均为一个分辨单元。

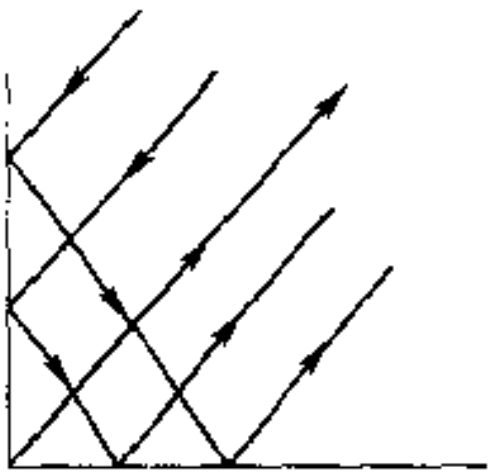


图 3-3-18　两面角反射器的反射

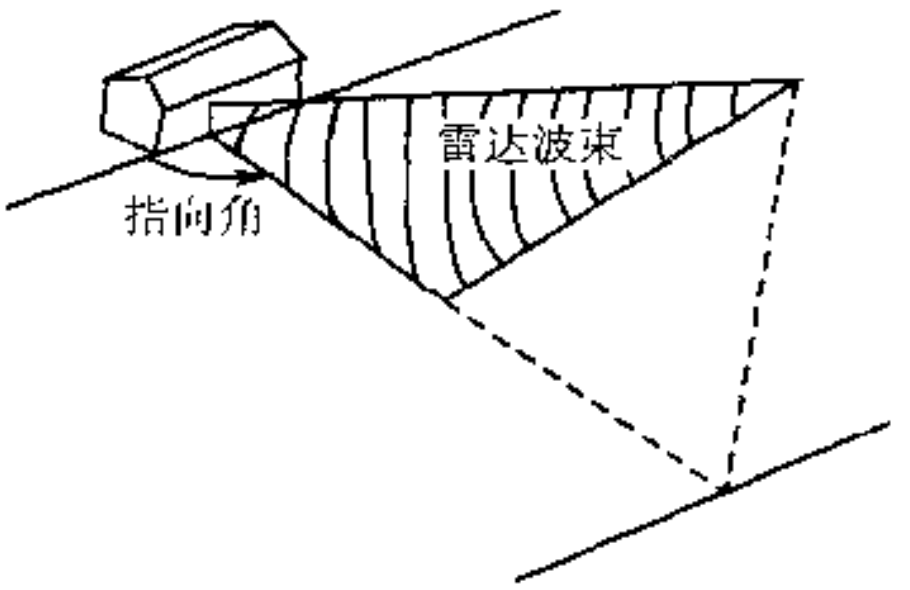



图 3-3-19　雷达波束的指向角

由于有这种特性，在雷达散射测量中，常制作各种角反射器作为雷达散射截面的标准。

前面在分析所谓硬目标的回波特性时，曾提到角反射器效应，还提到指向问题，也就是目标方位角问题。对于角反射器，指向角就是两面角轴线与雷达波束所在平面的夹角，如图 3-3-19 所示。一般说来，当指向角为 90° 时，回波最强，偏离 90° 时，回波就弱，但三面角没有这种指向角的明显效应，无论雷达波束方向如何，其回波总是比较强的。

不同材料的角反射器其回波强度不同，主要与其介电常数有关，一般金属角反射器比混凝土角反射器的回波要强，混凝土角反射器又比木材角反射器的回波要强。

### 四、雷达图像中的某些虚假现象

雷达图像的形成过程中，地物的反射和散射或者多路径散射可能会导致虚假的目标。另外，天线的方向图中由于旁瓣的作用，也可能出现这种情况，虽然这种情况很少，但了解产生原因对于图像分析是有帮助的。

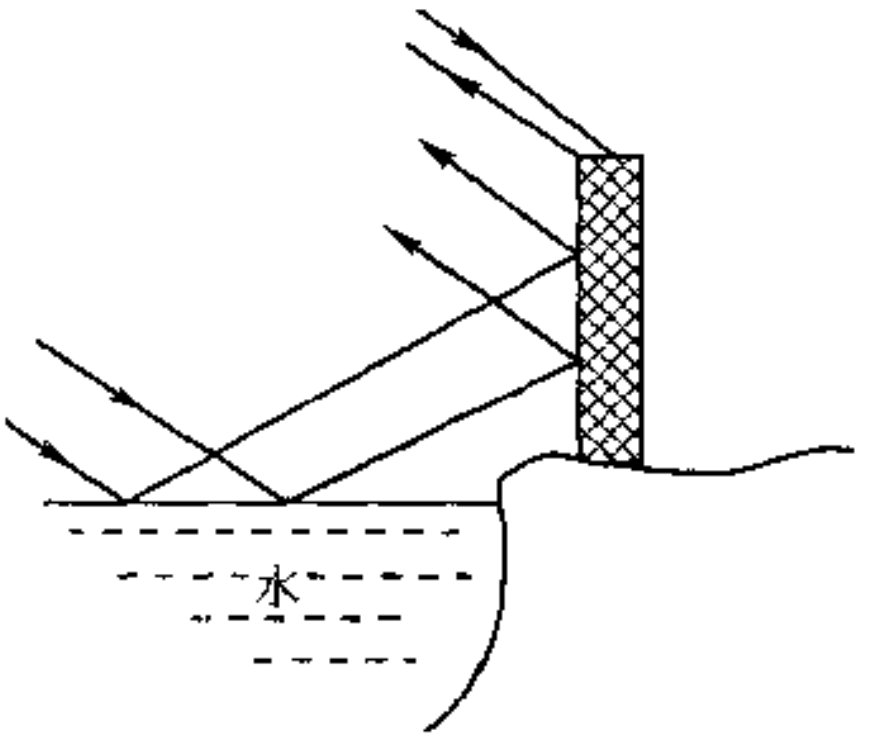
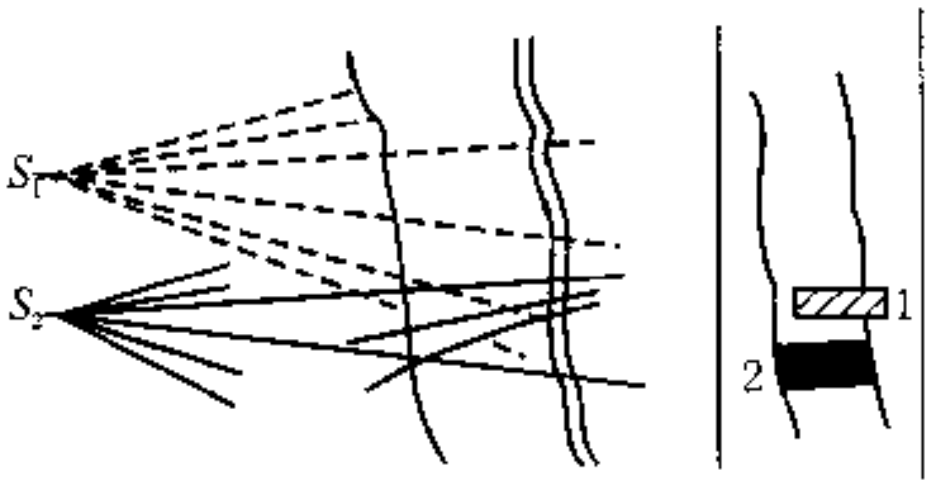



图 3-3-20　角反射引起多重回波

如图 3-3-20 在强反射体如金属塔附近若有光滑表面，如路面，水面等，就可能形成角反射器。除金属塔某一部分本身反射雷达波束外，雷达波束还会被附近光滑表面反射到金属塔，然后又被反射出去，这样就可能出现多重回波信号，当图像分辨率比较

高时，一个塔在图像上可能变成几个塔，一座桥在图像上可能变成几座桥。

若旁瓣照射到反射目标如桥梁上，而主波束却照射到无回波的水面上，这时在真实目标的附近可能出现微弱的虚假目标，图 3-3-21 所示就是这种情况，虽然这种情况是极个别的，但也须引起注意。




1. 为前旁瓣形成的虚假目标
2. 为主波束形成的实际目标图像

图 3-3-21　雷达图像虚假目标

虚假现象的出现多与强反射目标有关，在图像分析时，遇有强反射目标，应注意附近是否有虚假目标出现。

## 五、雷达图像中的其它异常现象

由于雷达天线的旁瓣和图像处理过程中的某些环节上的问题，可能产生图像异常和图像模糊。

天线旁瓣位于主波束两侧，可能会在照射到某些地物后造成一定回波，从而形成附近的弱信号，造成航迹向的模糊。通常这种现象少见，或看不出来，但在旁瓣照射到某些反射特性较强的地物时，可能会造成这种模糊现象。

天线设计不当，使由于旁瓣发射和接收的能量加强了主波束回波信号，会导致图像上很亮的条带，即所谓旁瓣条带。但一般旁瓣发送和接收的能量较弱，对远距离目标的照射则因能量传输中的损耗，更显得微弱，故一般在近距离会造成旁瓣条带。另一方面，交叉极化一般回波较弱，须用高增益的接收机，因而有可能增强旁瓣条带。

从以上分析可见，天线方向图中旁瓣的影响是必须注意的，设计过程须考虑这一因素，信号接收过程中也须注意它的影响。

在雷达信号的处理过程中，某些环节若不加注意，也会造成异常现象。合成孔径侧视雷达图像是依据地物目标的相位史的处理形成的，若相位史数据没有很好地记录于胶片上（或者说，没有很好地聚焦），导致偏出光，在实际目标两边会形成小的拖影，即所谓图像的光点旁瓣或条纹。因为这种偏出的光一般很弱，只是在反射特性很强的目标两侧才有可能因处理不好而显现出来。在处理过程中过强的光照也会导致强反射目标周围的光晕或

光环。

雷达图像胶片形成过程中，总是先对距离向回波曝光，再沿航向移动，然后对下一个距离向回波曝光，所以是一个条带一个条带曝光而形成图像。如果阴极射线管或激光源照射不均匀，在条带之间的照射度起了变化，就可能产生这一个条带与下一个条带图像之间的差异，即同一强度回波信号却成了不同亮度的图像，在图像上产生条纹。

具有自动增益控制的雷达接收装置的增益通常是按平均回波强度来调整的，当回波功率的动态范围较小时就加大增益，而如果在某一地区内出现一个反射特性很强的目标时，因为回波功率动态范围比较大，增益就被调整得很低，这样一来，弱回波目标成像时因为信号太弱，根本显现不出来，似乎消失了，或者被背景淹没。

没有自动增益控制的成像雷达系统由于在回波功率转化为胶片密度过程中，胶片密度的变化范围有限，遇有强反射目标时，弱回波目标也可能在密度表示过程中被淹没。

从以上两方面来看，目标消失的情况是在成像范围内有强反射目标存在时才可能产生的，在分析图像时应注意这一点，在增益控制设计和成像过程中也应注意这一点。

## 第四节　典型地物的散射特性

我们知道不同的地物具有不同的电磁波反射和辐射特性，因而表现在遥感图像上具有不同的灰度或色调，同一地物在不同波段的图像上的色调也不尽相同，正是由于这样的特性，使我们可以利用遥感图像进行地物分析，识别地物，提取所需要的信息，所以掌握地物的波谱特征是十分重要的。对于侧视雷达而言，地物波谱特性主要表现为地物对于某一波长(包括不同极化方式)或某几个波长的雷达波束的不同散射特性。选择有代表性的地区的各种典型地物量测其微波波谱特性，对于我们很好地利用微波遥感图像，从中提取可靠的信息是十分重要的。以下是根据国内外大量测试结果和侧视雷达图像对典型地物的散射特性的分析。

光滑表面对微波的散射情况有如图 3-4-1 和图 3-4-2 所示(此节中的图例均出自于文献[8])，一般说来，平静的水面，水泥路面等都是光滑表面，在这些表面上对波长为 3cm 的侧视雷达波束(以下散射特性图均对 3cm 波而言)形成了镜面反射，没有回波信号，图像上多呈黑色，但随着入射角的变化，信号有所不同，在接近垂直入射的情况下，信号非常强，$\sigma^0$ 值可高达

20dB(分贝),而在入射角为 50°～60°时,回波已很弱。对于光滑表面,HH 与 VV 极化方式下的散射系数差大约有 5dB,但这时同向极化与交叉极化的散射系数相差较大,可达 10～15dB。

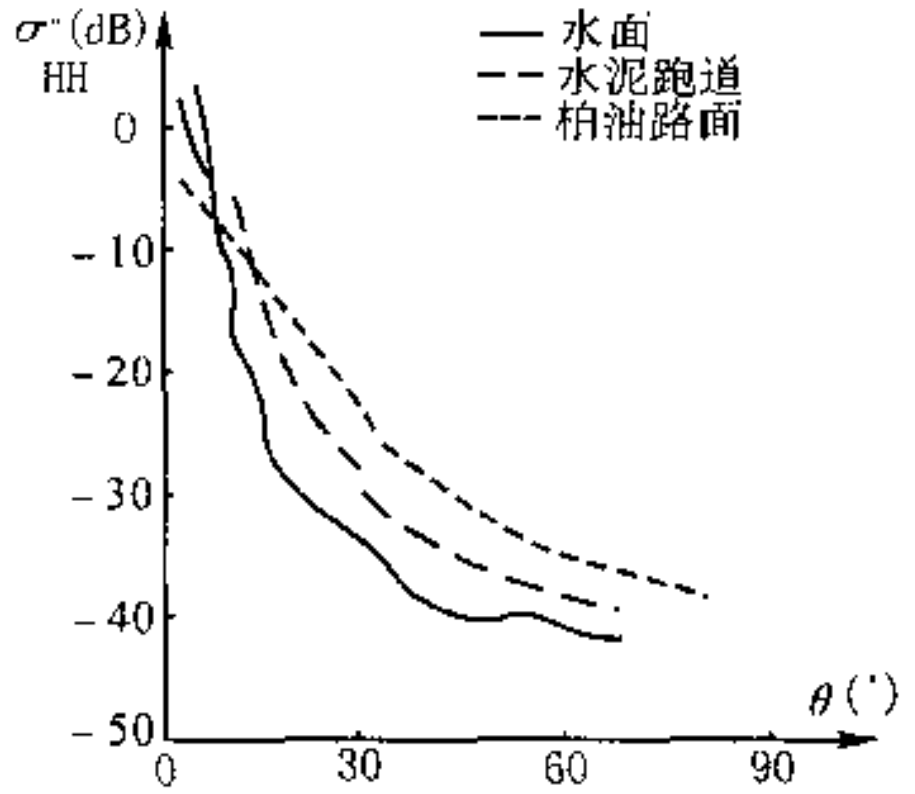



图 3-4-1　几种光滑表面的散射特性图

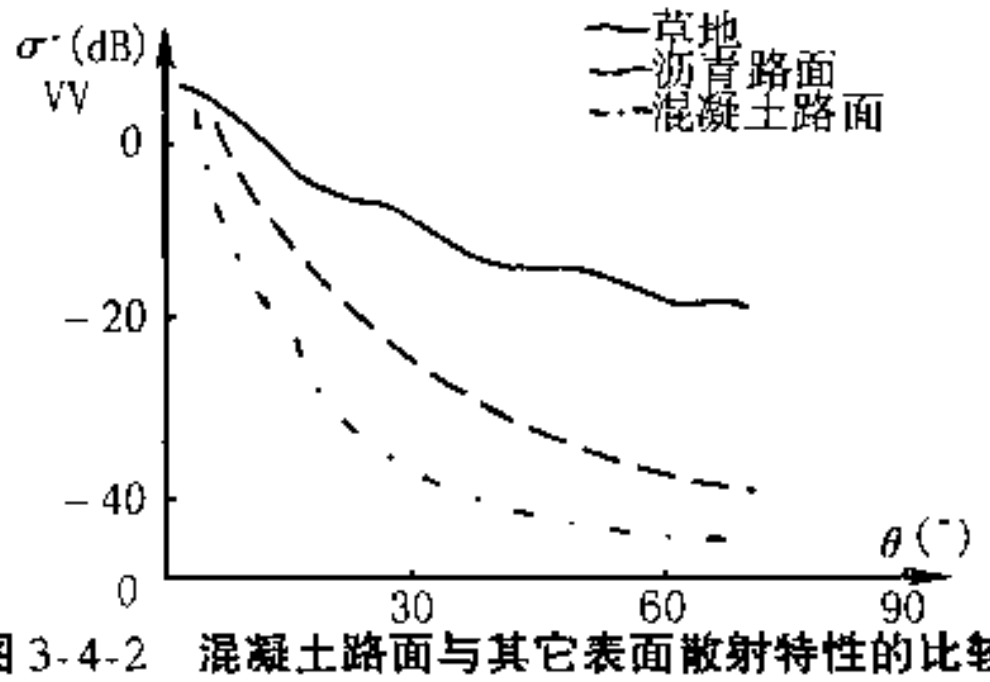



图 3-4-2　混凝土路面与其它表面散射特性的比较

绝大多数地物都可以认为是粗糙表面,只是粗糙程度不同。根据瑞利准则,随着粗糙度与波长的相对大小的差异,地物所表现出的散射特性是极其复杂的。一般说来,粗糙表面的散射特性曲线是比较平缓的,图 3-4-3 是

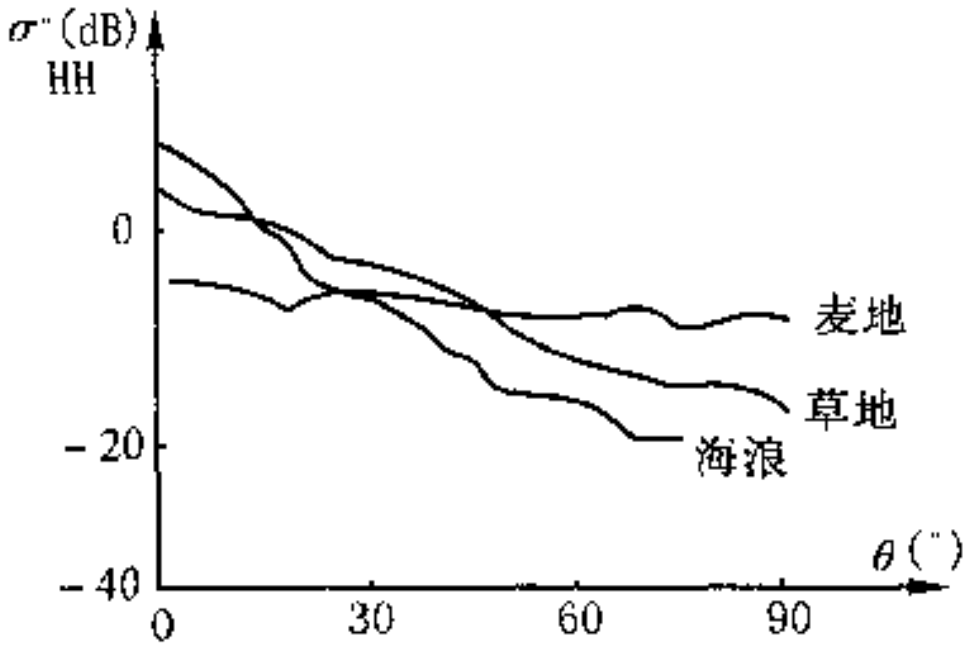
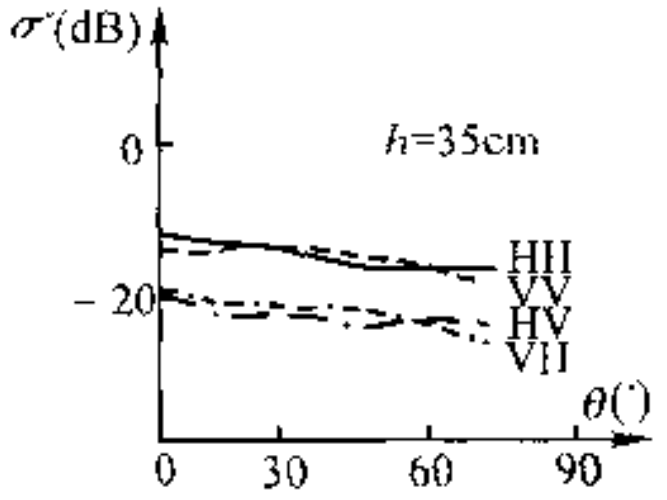


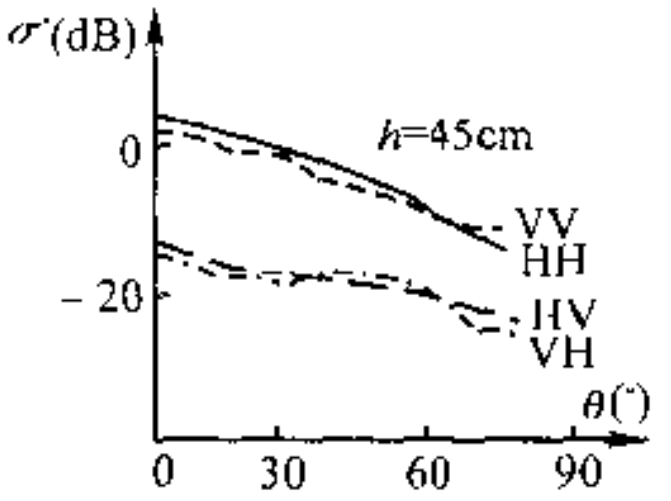

图 3-4-3　几种粗糙面的散射系数

几种粗糙面的散射系数曲线,从这些曲线可以看出,在接近垂直入射(入射

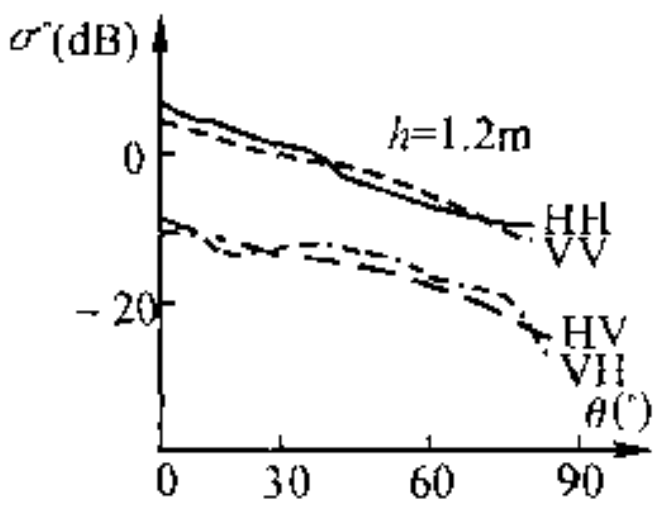
角为 0°)和切向入射(入射角为 90°)时,曲线斜率变化都很小。曲线斜率的变化不大说明对于入射角的敏感性小,另一方面,同极化与交叉极化散射系数之间差异也变小,大约只在 5～15dB 的变化幅度内,这点在下面关于农作物等的散射情况分析中就会看得到的。



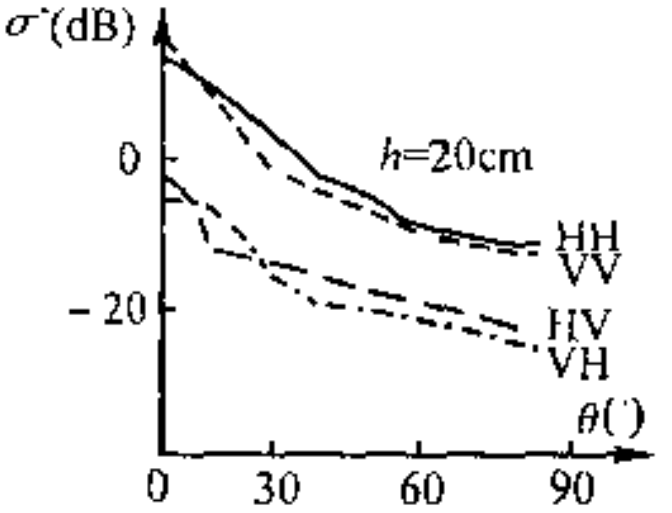

小麦的散射特性



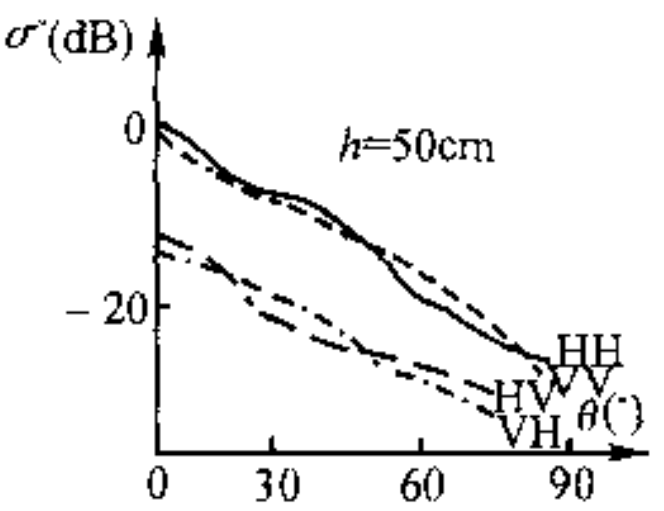

棉花的散射特性




玉米的散射特性




水稻的散射特性




草地的散射特性

**图 3-4-4　几种农作物的散射特性(h 为作物的高度)**

图 3-4-4 是不同农作物和草地的散射特性,很明显,VV 与 HH 极化方式之间,HV 与 VH 极化方式之间,差别很小,只是在同向与交叉极化方式之间存在 5～15dB 的差异,曲线之间呈平行趋势,对入射角不很敏感,甚至几乎没有什么变化(如小麦),仅水稻散射曲线在接近垂直入射角时散射系数增大,这主要是由于水稻田中水的反射所致。一般而言,农作物的散射回波是植物与土壤回波的叠加,土壤的影响主要表现在接近垂直入射角时的回波信号之中,而随着农作物叶穗形状、密度、方向及含水量等等不同,散射信号呈现不同数值,与土壤回波的叠加也呈现不同的状况。

图 3-4-5 即表现含水量不同对散射的影响，一般含水量高时散射系数值增大，从图中可以看出，大约高出 5～10dB。绿草在入射角为 10°以内时，散射系数表现了与土壤镜面反射的迭加，另一方面，对不同波长的散射系数差异很大。图中为含水量不同的草对波长为 8.6mm 和 3.2cm 的雷达波束的回波散射系数，可见对于波长较长的雷达波束，散射系数要小。

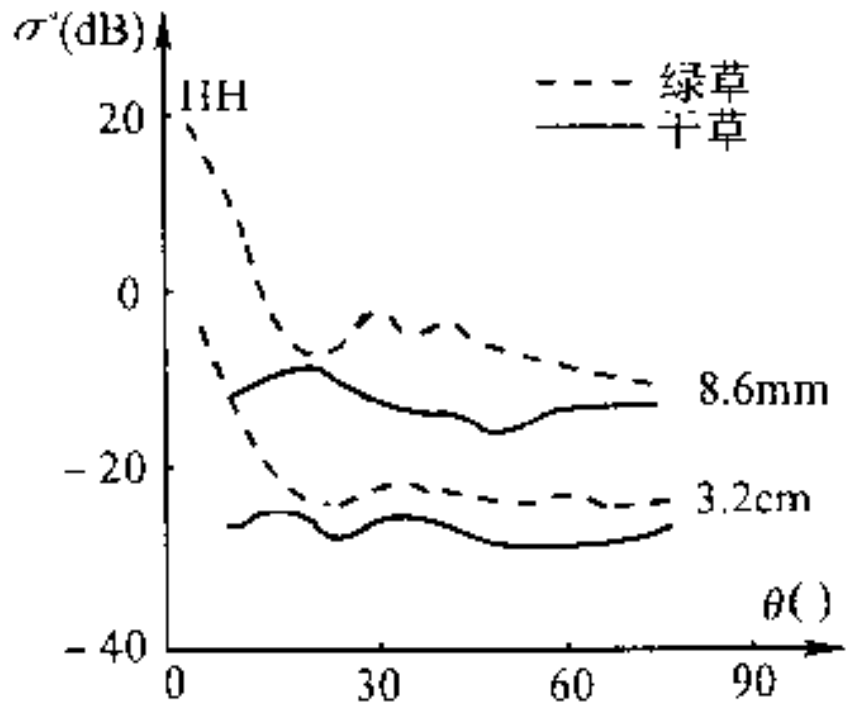



图 3-4-5　不同频率对绿草、干草散射特性的影响

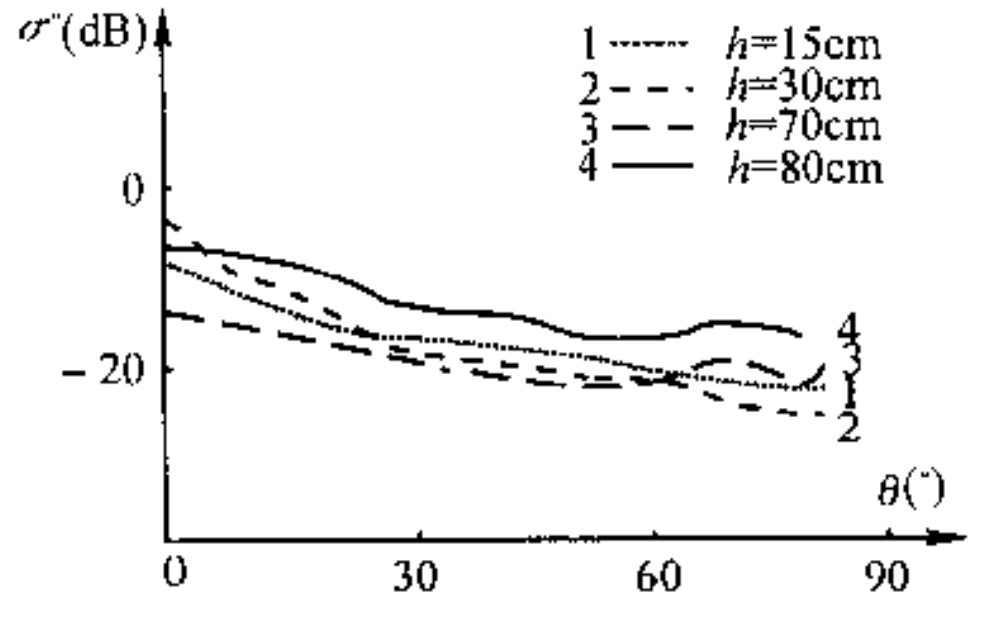



图 3-4-6　小麦不同生长期内的散射特性

对于作物不同的生长期，散射特性可能有所不同，也可能基本不变，如图 3-4-6，表示小麦在不同高度（即不同生长期）时的散射特性，根据国内外多组数据的分析，一般情况下，小麦散射特性基本稳定，即曲线的形状，散射随入射角的变化幅度基本不变，只是曲线的位置，或者说散射数值有微小改变，但是当病虫害肆虐时，由于叶片密度，形状等都会出现变化，农作物的散射特性就会呈现不同趋势，另外，同一作物不同长势的散射特性也会有所差异，如图3-4-7所示，

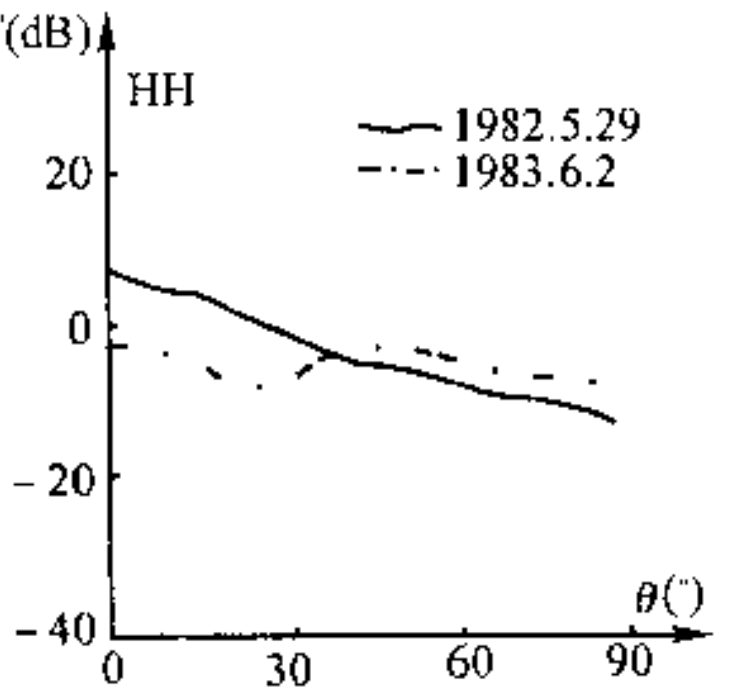



图 3-4-7　不同麦田的散射特性

对这种差异的研究有利于对农作物生长状况的估计，以及估产工作的开展。

森林在地球上覆盖相当大的面积，其密度的不同，所处地形的变化，及不同波长的雷达波束，对于回波信号的影响是不一样的。当雷达波束可以穿透树叶，树林的体散射信号可能就比较强。树种不同，树叶大小不同，枝叶结构不同，所引起的回波也有一定的差别。图 3-4-8 是松林与落叶林的散射回波强度比较，一般松林的散射回波强度比落叶林的要小。不同方式极化的回波信号也不一样，一般 $\sigma^0_{HH}$比 $\sigma^0_{VV}$要大一些。

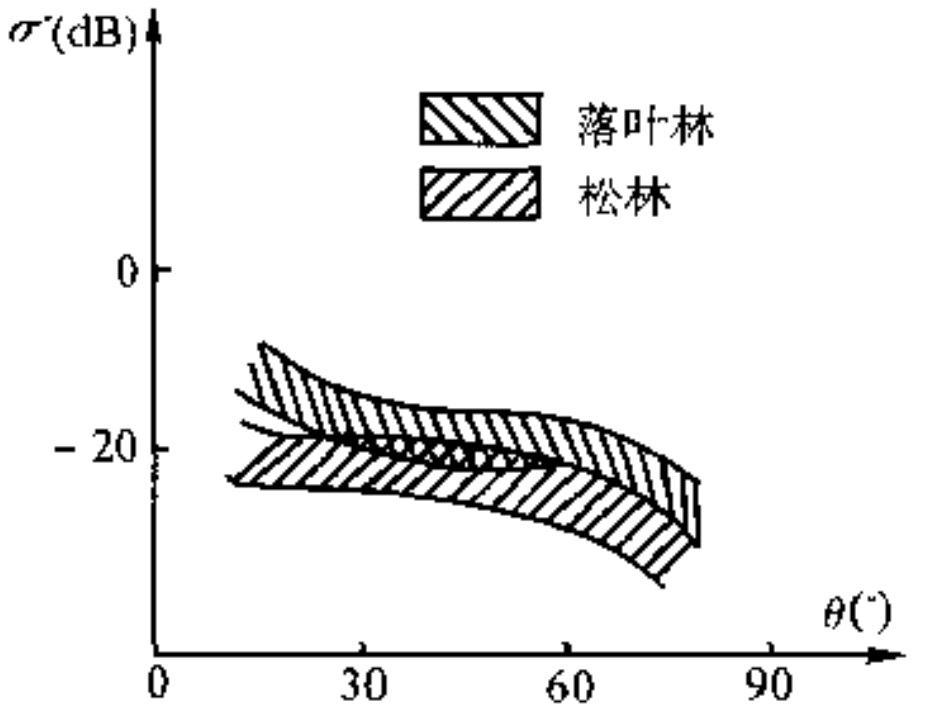



图 3-4-8　不同树种的散射特性

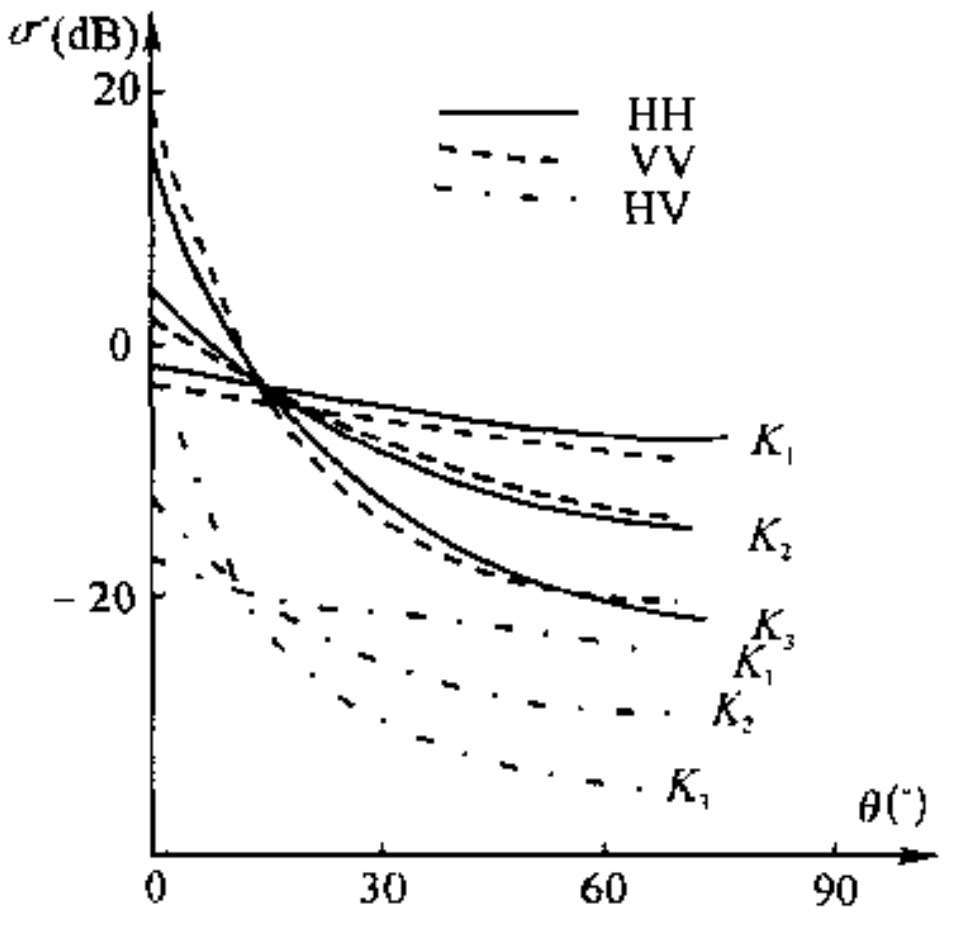
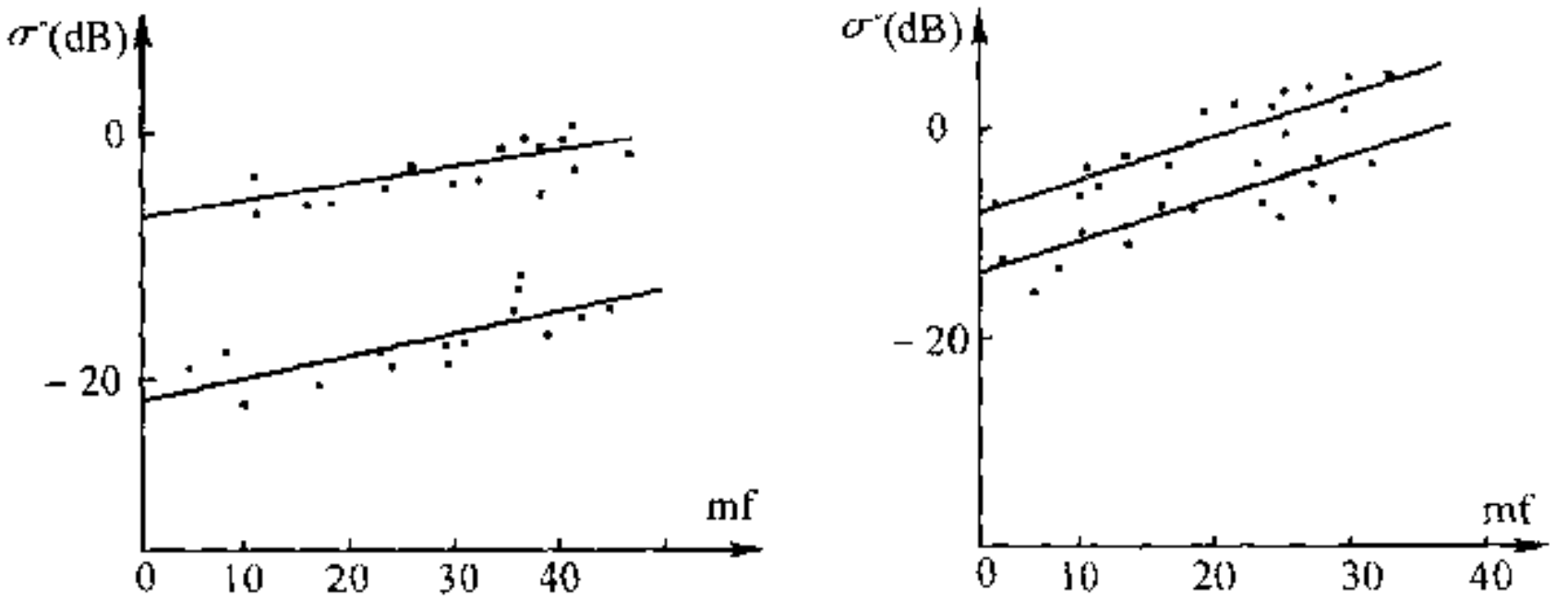



图 3-4-9　裸露土壤的散射系数与入射角的关系曲线

土壤的散射特性主要与入射角、地表粗糙度、含水量等有关。图 3-4-9 说明裸露土壤的散射系数随入射角增大而减小，曲线随粗糙度增加(从 $K_3$ 到 $K_1$)而变得平缓，并且不管在哪一种极化组合情况下，不同粗糙度的土壤散射特性曲线都交于同一入射角，图中显示了这个入射角大约为 12°。这是中科院遥感应用研究所等单位用 $X$ 波段散射计的测量结果。美国堪萨斯大学做过类似量测，发现对于 7.5GHz 的探测频率曲线交会在 10°左右。当




(a) $f$ = 1.5GHz $\theta$=20°　　(b) $f$ = 4.5GHz $\theta$=10°

**图 3-4-10　土壤散射系数与土壤湿度的关系**

探测频率为 1.1GHz 时，这一交会点在 7°左右，这说明对于各波段都存在一入射角，对于该入射角，裸露土壤的散射特性与粗糙度无关，仅与地面含水量有关，这是利用侧视雷达探测土壤湿度的重要依据。

图 3-4-10 为在某一入射角下，土壤散射系数与湿度因子 mf 的关系曲线。大量研究表明这一般为线性关系。一般说来，在侧视雷达图像上可将已知土壤含水量的各点图像密度作为参照，以量测其它点处土壤表层的含水量。

岩石的散射特性与多种因素有关，表面形状和粗糙度，组成岩石的元素，照射角取向等都影响到岩石的散射特性，而裸露的岩石形状各异，整块的可构成不同的角反射器，碎块的堆积又造成不同的粗糙度，要得到单一类型岩石的散射系数值比较困难。图 3-4-11 和图 3-4-12 分别是石灰岩和含铜钼的矿岩的散射特性，要获得这些数据一般都须用机载散射计进行量测，但由于岩石通常被植物和土壤覆盖，要分析不同的岩石常常需要对植被土壤的覆盖信息进行分析。

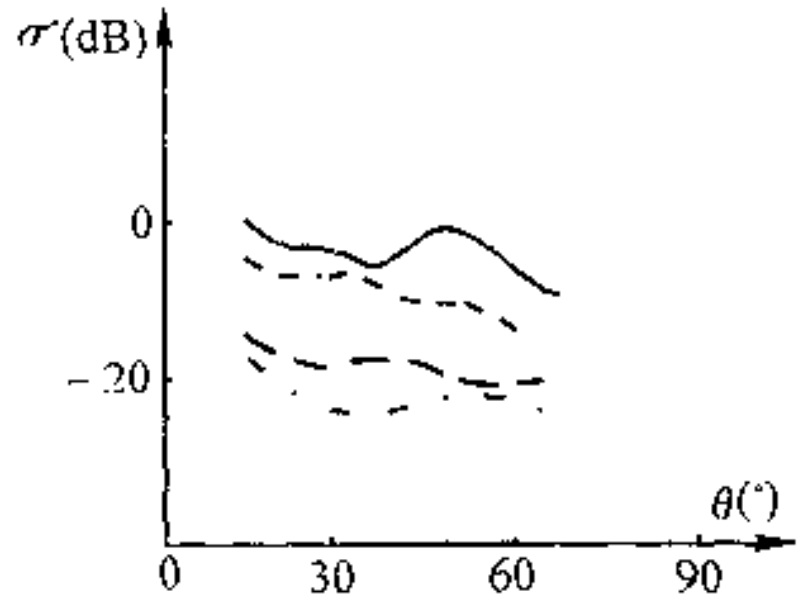



**图 3-4-11　石灰岩的散射特性**

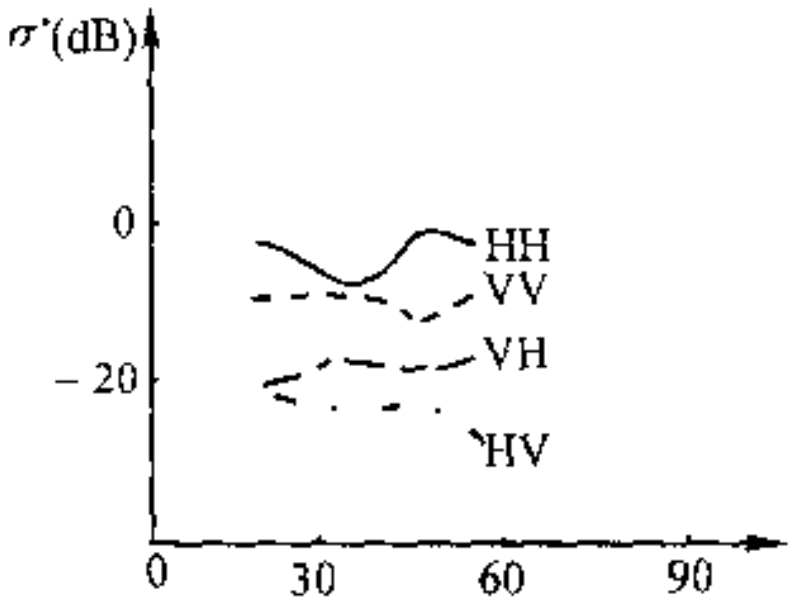



**图 3-4-12　矿岩的散射特性**

利用微波探测海浪信息是其重要应用的一个方面。海浪可看作是粗糙度比较均匀的表面，比较容易建立散射特性与粗糙度的关系，以便研究海浪

和海风的状况。图 3-4-13 是不同风速下海面散射特性曲线，海面散射系数随入射角变化的曲线斜率与海面粗糙度有关，即与风速有关。图3-4-14为不同方向上(观测方向与风向的不同夹角)的海浪散射特性，表明在逆风向测得的散射系数比其它方向要大一些。一般说来，在风浪大的情况下，同极化的散射系数近似相等，当海面平静时，VV 极化散射系数通常要大。

海风是影响海面粗糙度的主要因素，此外，受重力控制的重力波和受海水表面张力控制的表面张力波也是造成海面粗糙的原因。当海面上有油时，由于油污对表面张力波的阻尼作用，减弱了雷达回波强度，因此油污覆盖的海面在雷达回波图像上呈黑色，而海面上漂浮的杂物则可使雷达回波增强，造成在海面雷达图像上的亮点。

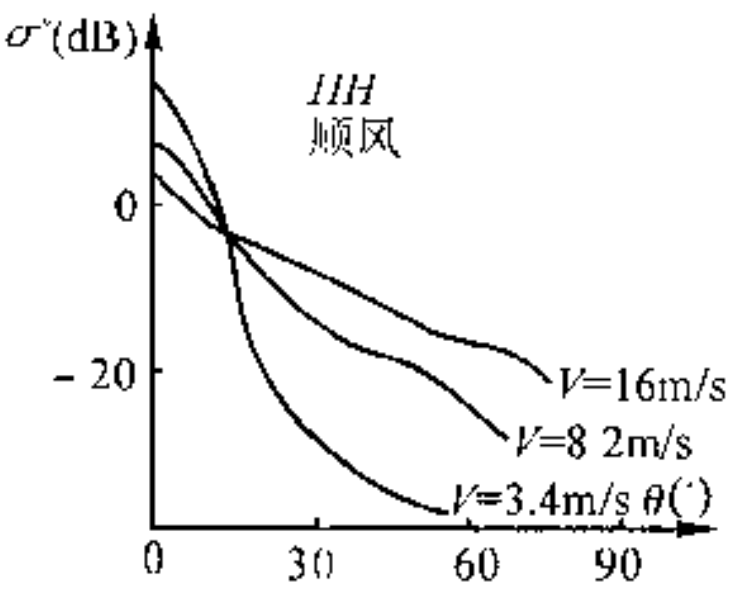



图 3-4 13　不同风速海面散射特性

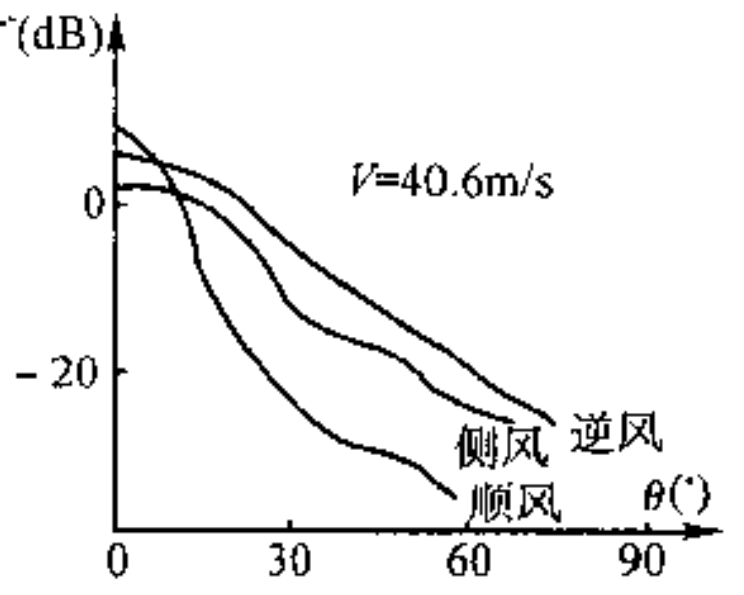



图 3-4-14　不同风向海浪的散射特性

冰雪的散射特性对于航海、水资源探测等都是有很大价值的。通常大面积的冰层表面是非常光滑的，其散射特性与平静的水面相似，回波信号一般很弱或没有回波信号，雷达图像上呈现黑色。但是在冰层融化时期，海面、河面出现浮冰块，不再是成片的光滑冰面，因面镜面反射大大减弱，水面粗糙度大大增加，雷达回波显著增强。如图 3-4-15 所示，其散射特性与所有粗糙地物的回波信号特征一致，因而在雷达图像上常夹杂着亮点，这一特点有利于用来预测河流的通航期。

雪层是地表各种地物的覆盖层，雷达波束常常能够穿透，反映在雷达图像中除了雪的回波外，还不同程度地夹杂着地物的回波信号，虽然雪层对地表面起到某种程度的平滑作用，但覆盖雪层的地表面仍因其不同的地形和不同的地物结构，面造成复杂的背景。雪层含水量各有不同，其介电性能因而不一致，回波信号也就不同。雪的不同厚度对于雷达回波也具有不同的影响，如图3-4-16即为不同厚度雪层的散射特性。不同的雷达波长

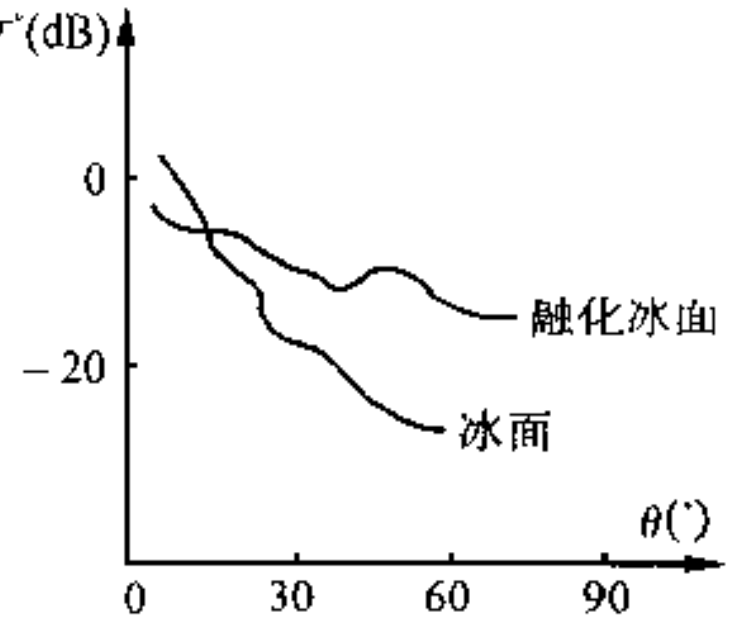



图 3-4-15　冰层的散射特性

对雪的穿透程度不一，因而回波信号不一样，长波穿透能力强，回波就相应弱些，如图3-4-17所示，频率越低，即波长越长，回波信号就越弱。

雪层的探测是十分有意义的，尤其对于农业，它是土壤墒情估计的依据，而在水资源估计方面和洪水预报方面，它也是极有价值的。

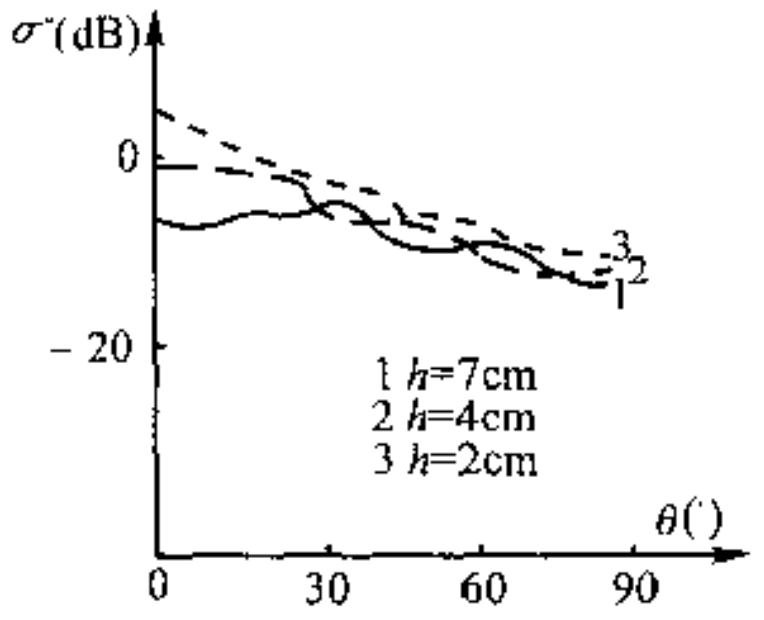



图 3-4-16　不同厚度雪层的散射特性

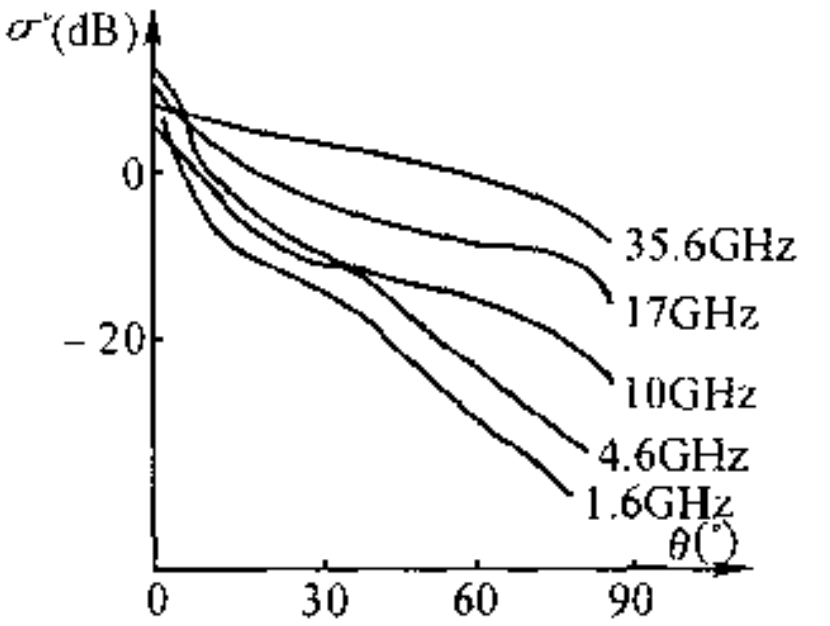



图 3-4-17　不同频率下雪的散射特性

## 第五节　典型地物的亮度温度

辐射计图像是地物表观亮度温度的反映。正如各种地物散射特性是分析雷达图像的重要依据一样，研究各种典型地物的亮度温度特点对于辐射计图像分析将有着指导作用。

### 一、土壤

土壤的微波辐射特性受到各种因素影响，主要与土壤表面粗糙度、微波介电常数和植被覆盖有关，下面首先看看无植被情况下裸露土壤的微波辐射特性。

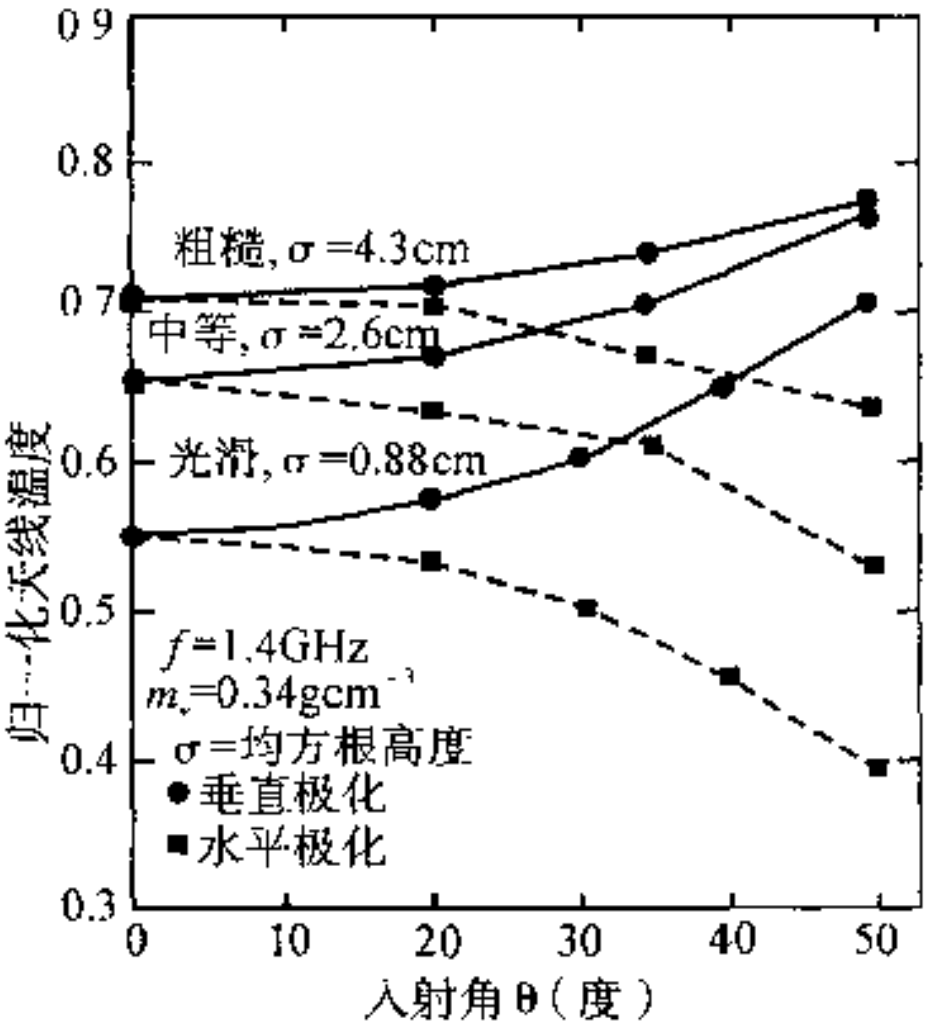



图 3-5-1　在 1.4GHz 时，三种不同表面粗糙度裸露土壤的归一化天线温度随角度的变化关系（Newton 与 Rouse，1980）

图 3-5-1 为三种不同粗糙度土壤的辐射特性及随入射角和极化方式的变化，其中以归一化天线温度即辐射计测得的温度与土壤表面的实际温度之比表示土壤的辐射特

性。辐射计量测了土壤1.4GHz的微波辐射，量测值一般说来还应包括天空向下的辐射经土壤散射到天线的温度贡献，由于这一贡献很小，可以忽略。所以归一化天线温度近似于土壤表面的发射率 $e$。

由图 3-5-1 可见，水平极化发射率曲线 $e_h$ 和垂直极化发射率曲线 $e_v$ 都随土壤粗糙度即均方根高度 $\sigma$ 的增大而上升。同时粗糙度愈大，$e_v$ 与 $e_h$ 曲线间的间隔愈小，即趋向与极化无关。

可以用一个简单的模型表示与粗糙度有关的土壤发射率：

$$e_r(\theta) = 1 - \Gamma_r^{sp}(\theta)e^{-h'\cos^2\theta} \qquad (3\text{-}5\text{-}1)$$

式中 $r$ 为极化方式 $r = h$ 或 $v$，$\theta$ 为入射角，$\Gamma_r^{sp}(\theta)$ 为极化镜面反射率，$h'$ 为粗糙度参数，这个参数可以由经验选定。

(3-5-1)式通常可以得到与 $e_r(\theta)$ 的实测数据较好的吻合。

土壤微波辐射与土壤的微波介电常数关系甚切。通常土壤的介电常数由土壤的含水量决定，如图 3-5-2 所示，图中 $\varepsilon'$ 和 $\varepsilon''$ 为复介电常数的实部和虚部。由两类土壤的 $\varepsilon'$ 曲线明显地表示了土壤介电常数随着含水量的增加而递增的趋势，对其它类型土壤的量测也显示了同样的结果。

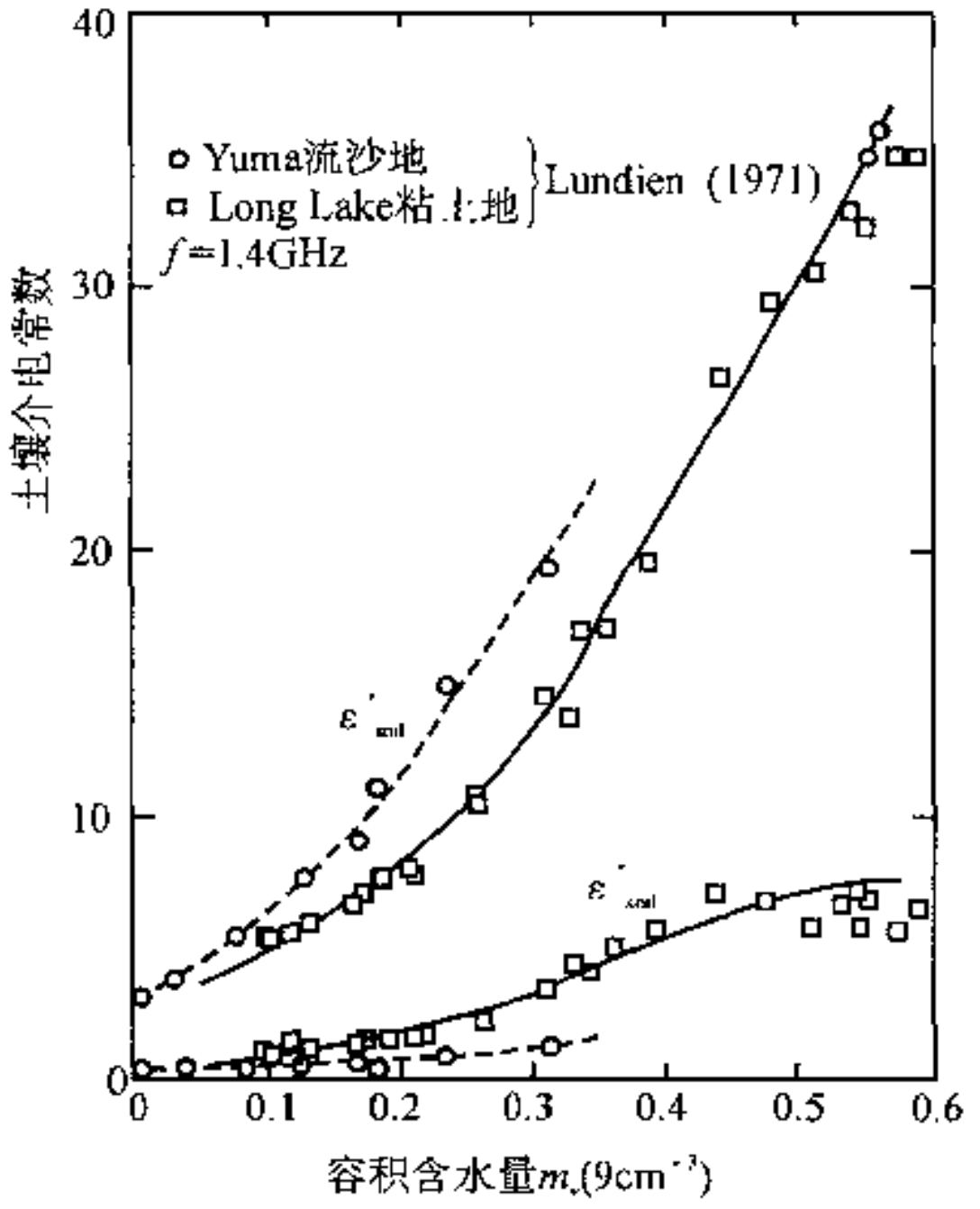



**图 3-5-2　在 1.4GHz 时测得的两种不同类型**
**(流沙地与高粘土地)土壤的相对介电常数随容积含水量的变化关系**
(图中曲线由 Wang(1980)按理论模型计算所得)

由表面极化发射率可知，土壤表面的发射率等于 1 减去各方面散射系

数的和，在土壤含水量增加时，这种散射主要表现为反射，反射率增加，因此发射率会减小，图3-5-3即是实证，图中曲线是以1.4GHz频率对光滑的土壤表面($\sigma=0.88$cm)所测得的归一化天线温度。由于这种归一化天线温度相当于发射率，所以明显可见发射率随含水量增加而减小。在入射角为0°时，含水量由0.08到0.35gcm$^{-3}$的四种土壤，相应的发射率从0.91降低到0.58。四组曲线还说明了极化方式的影响，在垂直极化方式下，随着入射角的增加，发射率呈递增趋势，而在水平极化方式下，却恰恰相反。

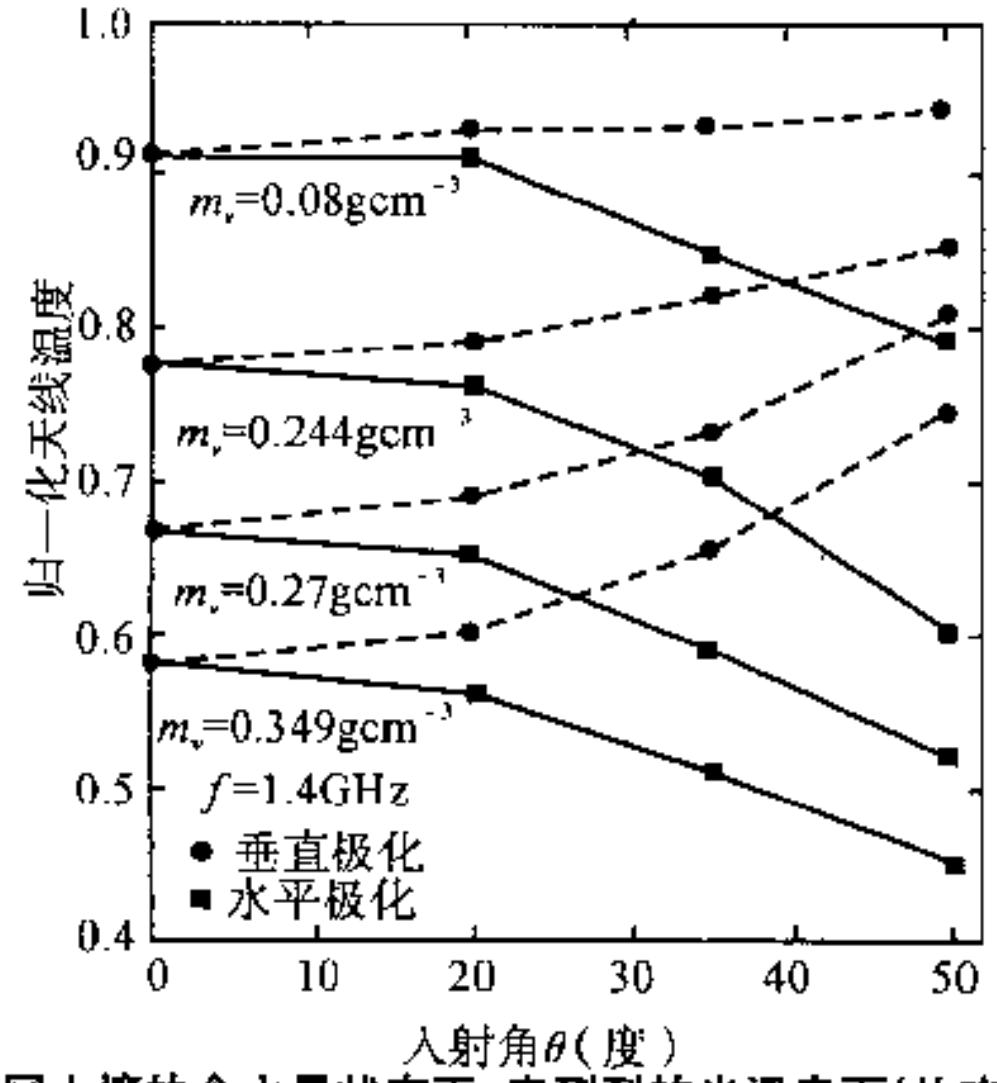



**图3-5-3 各种不同土壤的含水量状态下，实测到的光滑表面(均方根高度为0.88cm)的归一化天线温度(发射率)，(Newton与Rouse，1980)**

在有植被覆盖的情况下，土壤的辐射受到衰减，在频率很高时衰减得更厉害，一般若能穿透植被，则与植被的辐射同时发生，在辐射测量所得亮度温度中都有贡献。图3-5-4为机载辐射计测量结果与计算结果的比较，入射角为0°，测试频率为1.4GHz，图中的曲线分别表示裸露土壤随含水量增加亮度温度降低的计算值(虚线)和在玉米遮盖下，植被土壤亮度温度的计算值(实线)。图中的黑点为实测数值，它说明在植被遮盖下亮度温度随土壤含水量增加而减小的变化幅度要小得多。

## 二、植被

在植被稀少的情况下，亮度温度可由(3-5-2)式表示

$$T_B(\theta,\varphi) = [1-C(\theta,\varphi)]T_{B,\text{bare}} + C(\theta,\varphi)T_{B,c} + [1-C(\theta,\varphi)]T_{B,\text{int}}(\theta,\varphi) \tag{3-5-2}$$

式中$C(\theta,\varphi)$为在$(\theta,\varphi)$方向上植被覆盖的比例，$T_{B,\text{bare}}$为无植被覆盖时的

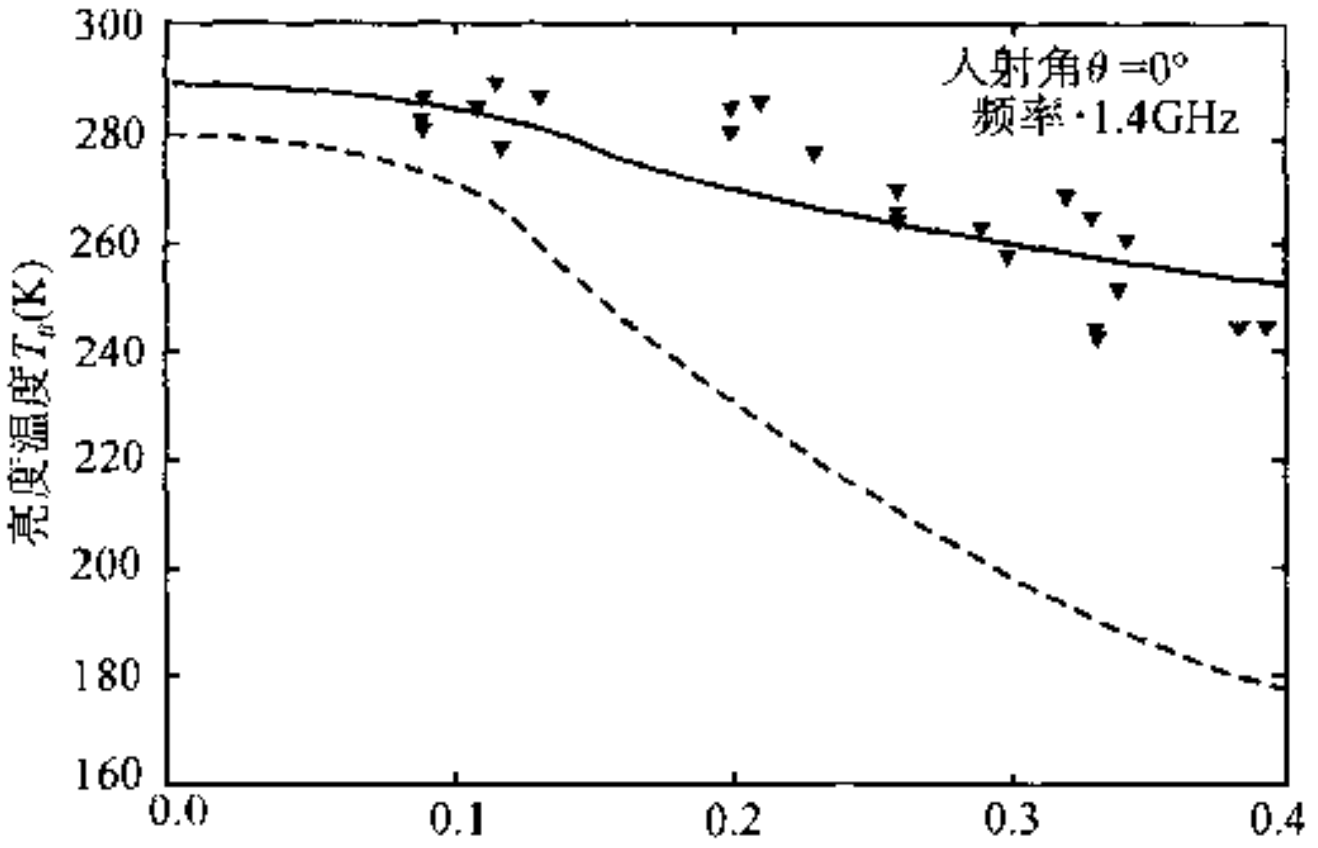



**图 3-5-4　成熟期玉米田的天顶角亮度温度随土壤含水量的变化关系(Ulaby 等,1981b)**

亮度温度,$T_{B,can}$为有植被覆盖时的亮度温度,$T_{B,int}$表示两种间接贡献,即土壤表面的辐射经植物枝叶的反射(或散射)部分和植物辐射经土壤反射的部分。

若 $C(\theta,\varphi)$接近于 1,即植被完全覆盖的情况下,由上式得到亮度温度完全来自于植被。实际上,还需考虑辐射频率,当频率高于 10GHz 时,可以认为基本上只有植被辐射,没有土壤辐射的贡献,但频率低于 10GHz,尤其低于 5GHz 时,就必须考虑两方面的贡献。

图 3-5-5 和图 3-5-6 是在 10GHz 频率下燕麦田和高粱田的亮度温度曲线,对于燕麦田不同极化的影响很小,随入射角变化的亮度温度差异也不大,对于高粱田当入射角大于 20°时,垂直极化方式下的亮度温度比水平极化时大约高出 10K。

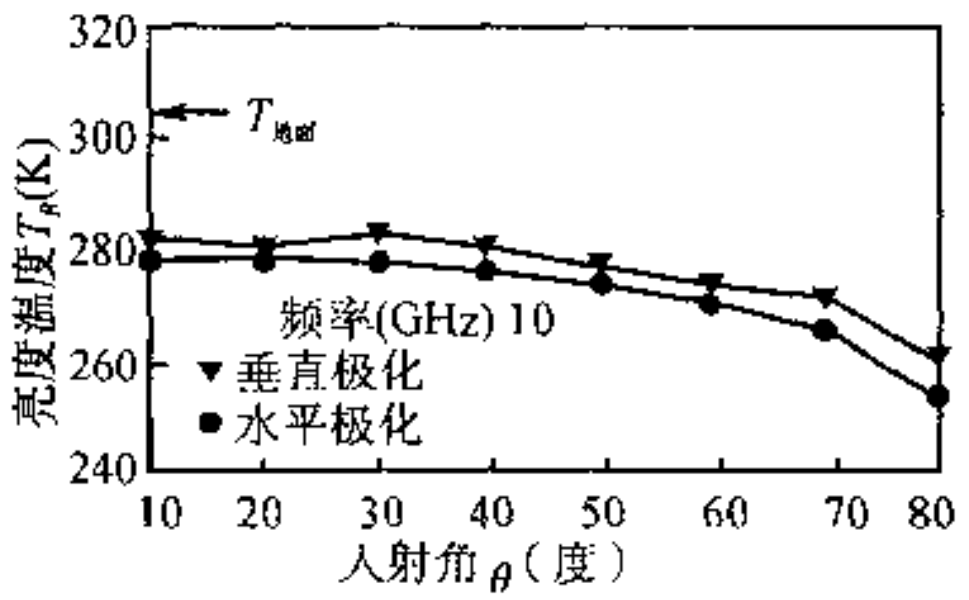



**图 3-5-5　10GHz 时,绿色(谷穗)燕麦田的亮度温度(Peake 与 Oliver,1971)**

图 3-5-7 是针对小麦、紫花苜蓿、大豆、高粱和燕麦测得的 14 组数据,而且是在不同生长期的亮度温度,可见植被亮度温度与入射角近似无关,特别是 $\theta$ 在 60°以内,垂直极化方式下的亮度温度比水平极化略高,平均高约 5K。

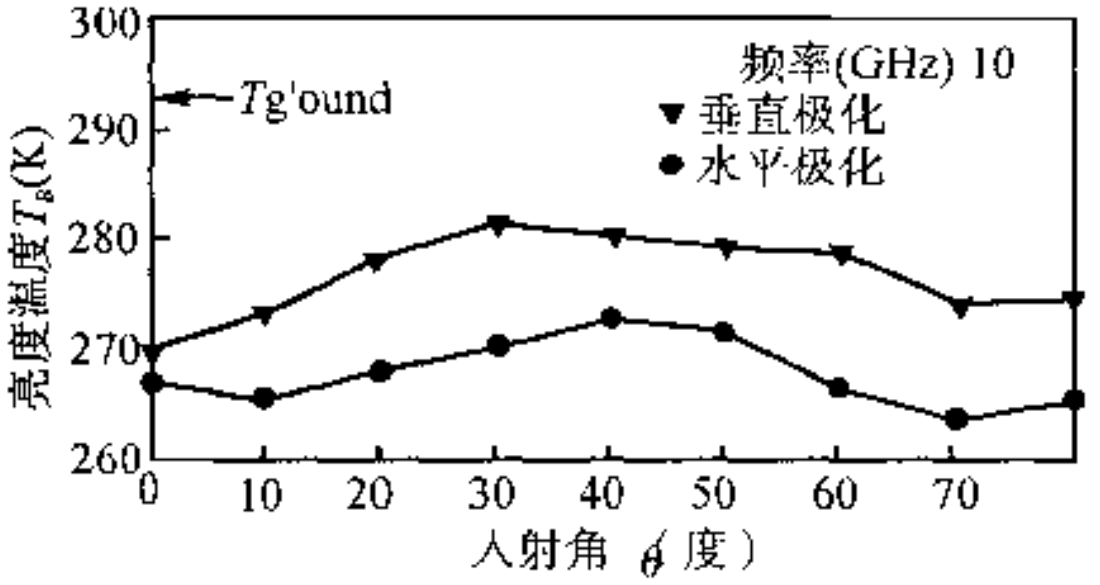



**图 3-5-6　10GHz 时，绿色(穗状花)高粱田的亮度温度**
(Peake 与 Oliver，1971)

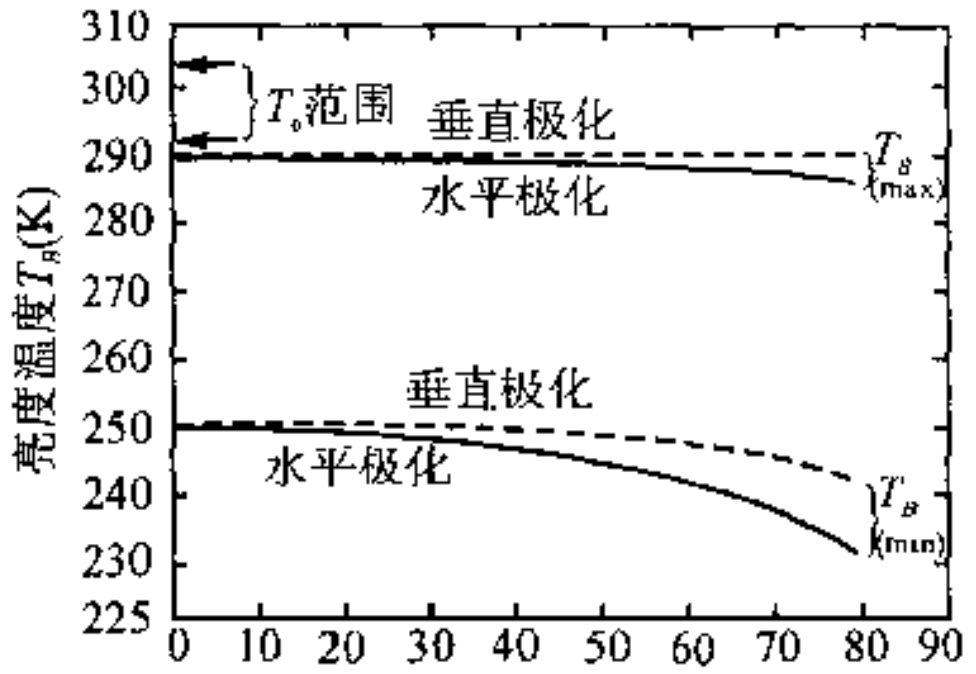



**图 3-5-7　在 10GHz 时，观测不同作物、不同生长期的 14 组数据，$T_B$ 值上、下边界范围(Peake 与 Oliver1971)**

## 三、海水

海水的亮度温度因是否有风浪而异。首先看看无风浪时平滑海水面的情况。此时海水的亮度温度可以表示为

$$T_B(\theta,P) = [1 - \Gamma^{SP}(\theta,P)]T_o \tag{3-5-3}$$

式中 $\theta$ 为入射角，$P$ 表示极化方式，$\Gamma^{SP}(\theta,\varphi)$为镜面反射系数，$T_o$ 为水的实体温度。

图 3-5-8 为 $\theta = 0°$，盐的浓度是 36‰时海水亮度温度随海水实体温度的变化关系曲线，从图中四条曲线来看，$T_B$ 与 $T_o$ 似成线性关系，而频率越

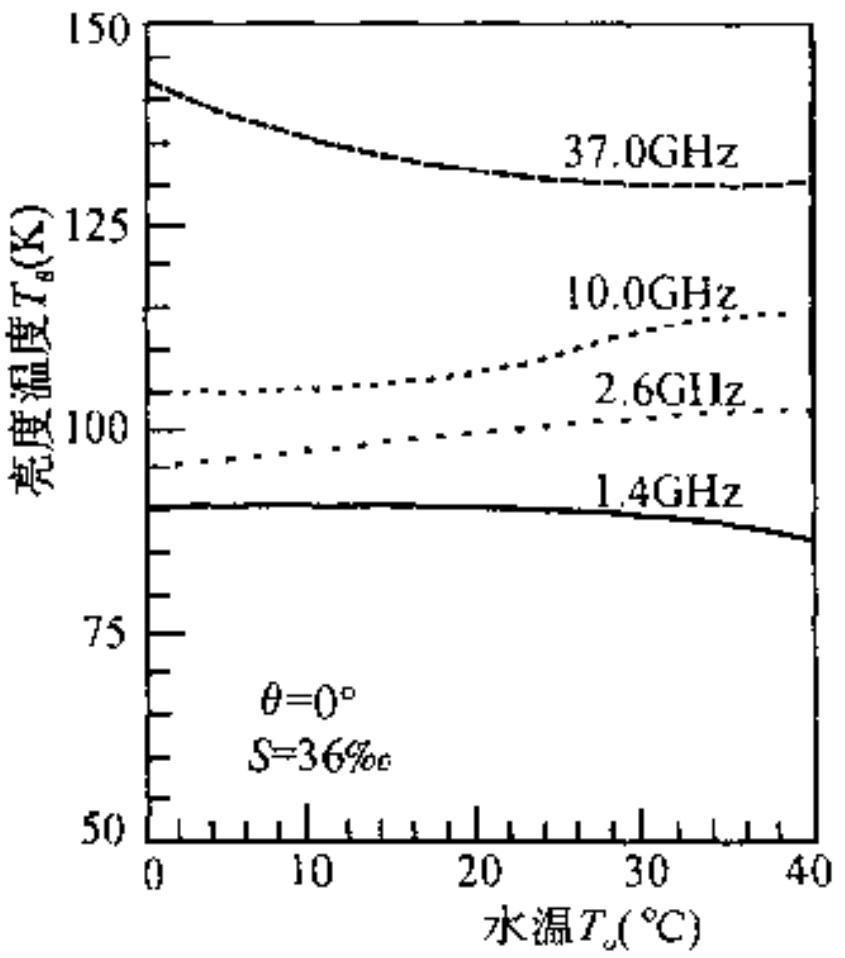



**图 3-5-8　镜面海面的天顶角亮度温度随海水实体温度的变化关系**

高，亮度温度也越高，$T_o$ 增大时，$T_B$ 可能增大，也可能减小，依不同的频率而变化。

海水的盐浓度对于其亮度温度的影响是比较大的，图 3-5-9 为 $\theta=0^\circ$，频率为 2.65GHz 时平滑海面亮度温度在不同盐浓度情况下随海水实体温度变化的曲线，从这个图可以看出，$T_o$ 增大时，$T_B$ 对盐浓度反映敏感，盐浓度越低，$T_B$ 与 $T_o$ 的线性关系越强。

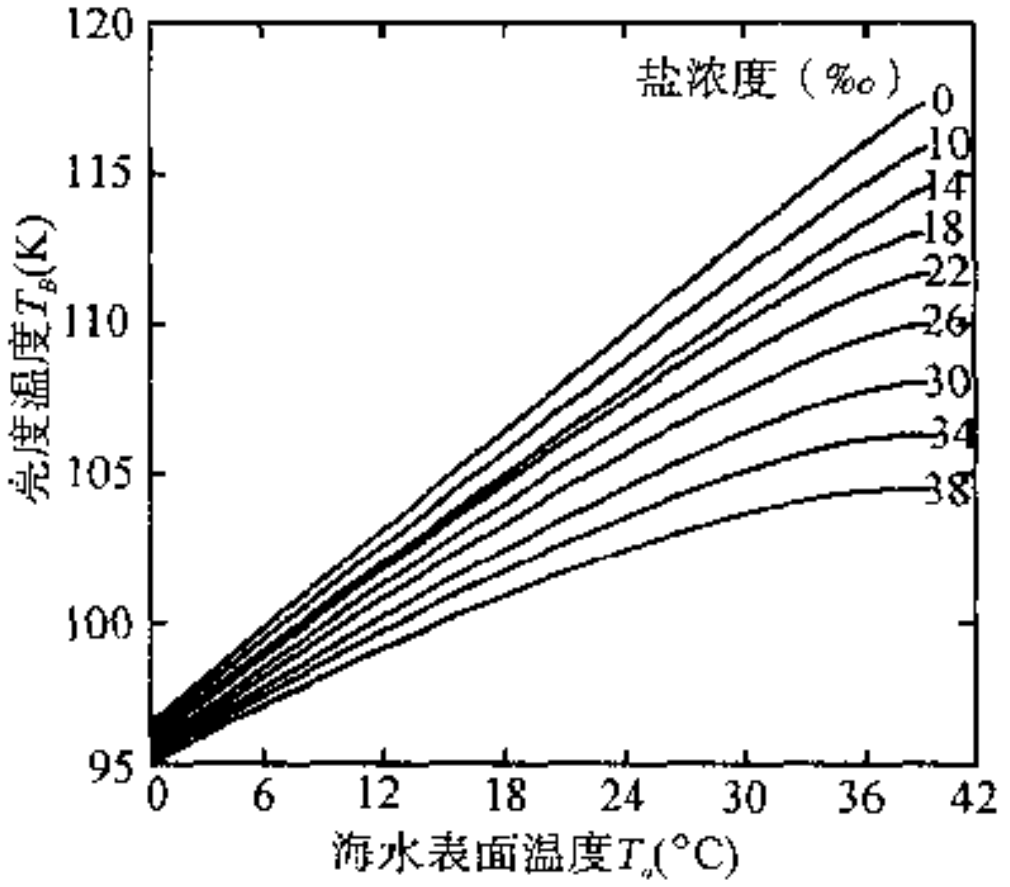



**图 3-5-9　2.65GHz 频率时，平滑海面的亮度温度随海表面实体温度的变化关系**(Klein 与 Swift，1977)

研究表明，当频率高于 5GHz 时，$T_B$ 对盐浓度的变化不敏感。

当海面有风浪时，海水不再是平滑表面，而成了有一定粗糙度的表面，这时的海水亮温与粗糙度有关，或者说与风速有关，为(3-5-4)式所示：

$$T_B(\theta,P,u) = T_B(\theta,P,0) - a(\theta,P)u \qquad (3\text{-}5\text{-}4)$$

其中 $u$ 为风速，$a(\theta,P)$表示随不同入射角和极化方式而异的一个常量。

图 3-5-10 是入射角为 55°时，不同极化情况下，海水亮度温度随海风变化的规律。在垂直极化方式下，不论频率多大，$a$ 值很小，说明风速基本没有影响。而在水平极化方式下，风速的影响明显，频率为 1.4GHz 时，$a$ 等于 0.34K/ms$^{-1}$，8.36GHz 时，$a$ 为 0.60K/ms$^{-1}$，频率为 19.34GHz 时，$a$ 达到 1.06K/ms$^{-1}$，这表明水平极化有利于对海面状况的观测。

## 四、雪

雪的亮度温度与其实体温度之比可以认为是雪的发射率，图 3-5-11 就是以雪的含水当量 $W$ 对雪的发射率的影响来表示雪的亮度温度随着入射角 $\theta$、雪的密度 $\rho$ 以及频率的不同而变化的情况的，其中的 $d$ 表示深度。由于有三种测量频率，故图中发射率分三段表示，图中写出了经试验拟合的频率和雪的密度不同时的发射率方程。

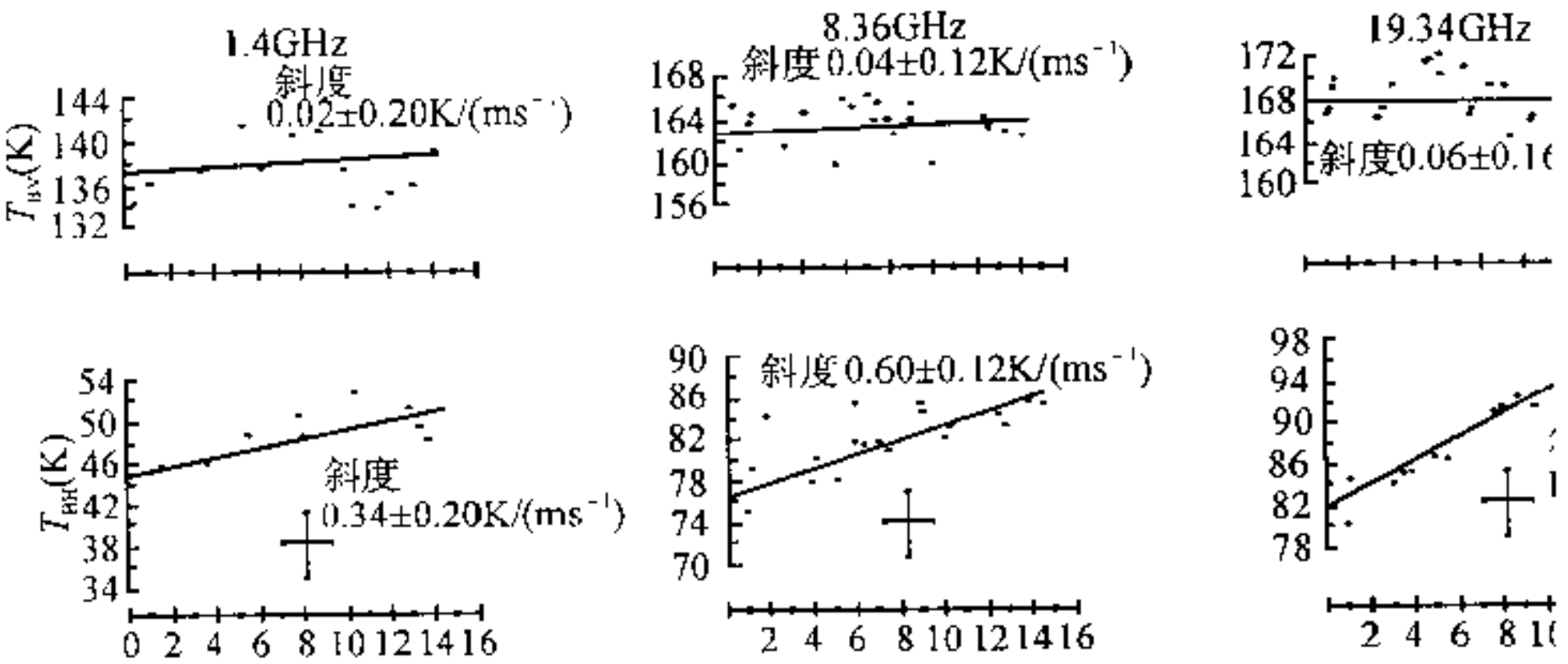



图 3-5-10　在 $\theta=55°$ 条件下，亮度温度 $T_B$ 随风速的变化关系(Hollinger,1971)

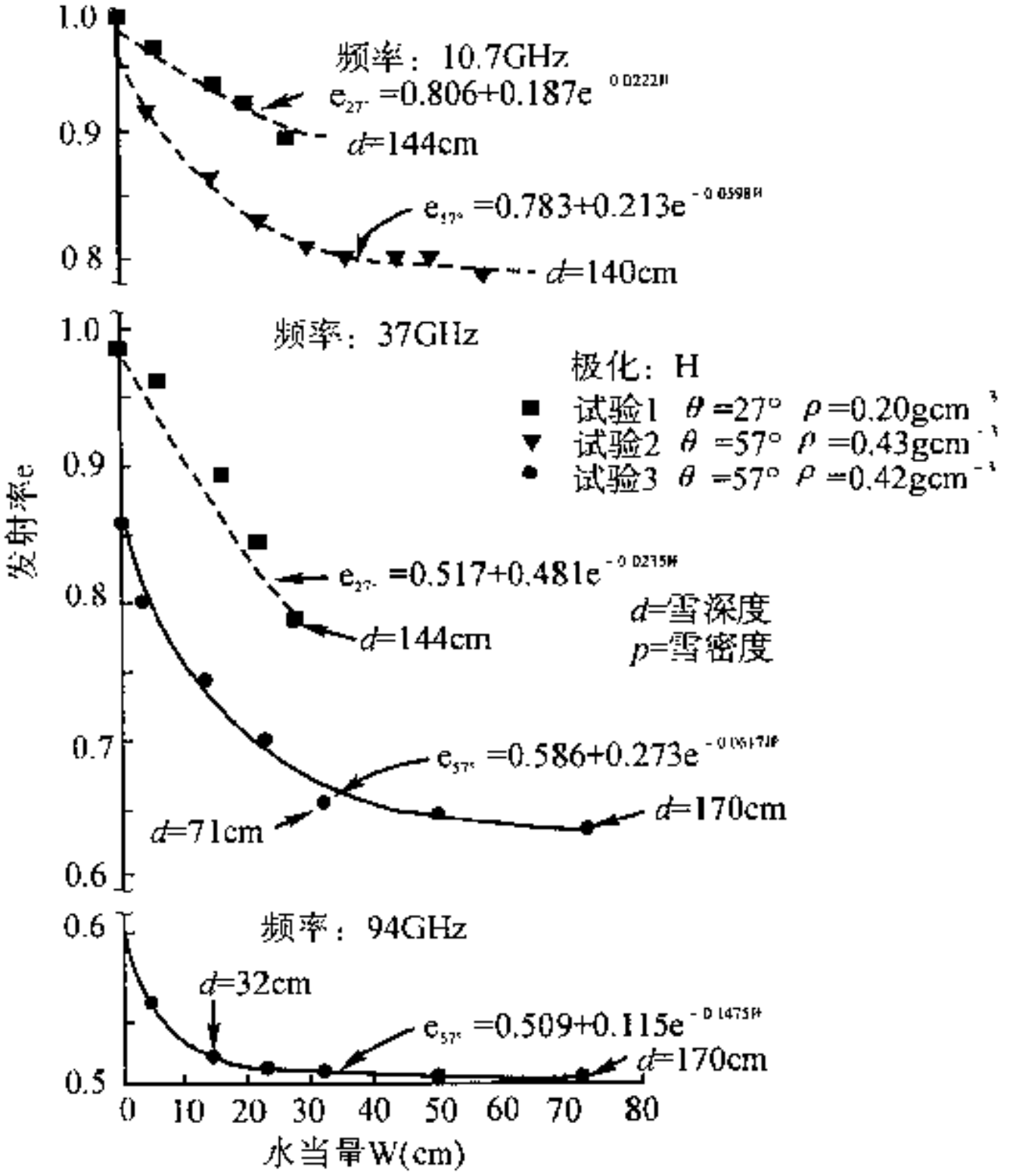



图 3-5-11　在 10.7GHz,37GHz 和 94GHz 频率测量时，发射率 $e$ 随雪中含水当量 $W$ 的变化关系

(Ulaby 与 Stiles,1980)

这个图是干雪的发射率变化规律，当雪中含液态水分的比例 $m_v$ 增大时，经理论分析和实验分析，雪的亮度温度 $T_{AP}$ 与 $m_v$ 的关系式为

$$T_{AP}(m_v) = A - B\exp(Cm_v) \tag{3-5-5}$$

在一定的频率、入射角和极化状态下，式中$A$、$B$、$C$均为常系数。图3-5-12是频率为10.7GHz和37GHz时的量测结果。

雪的表面粗糙度对于微波辐射也具有一定的影响且在湿雪情况下影响更大，实际的量测表明这一点。

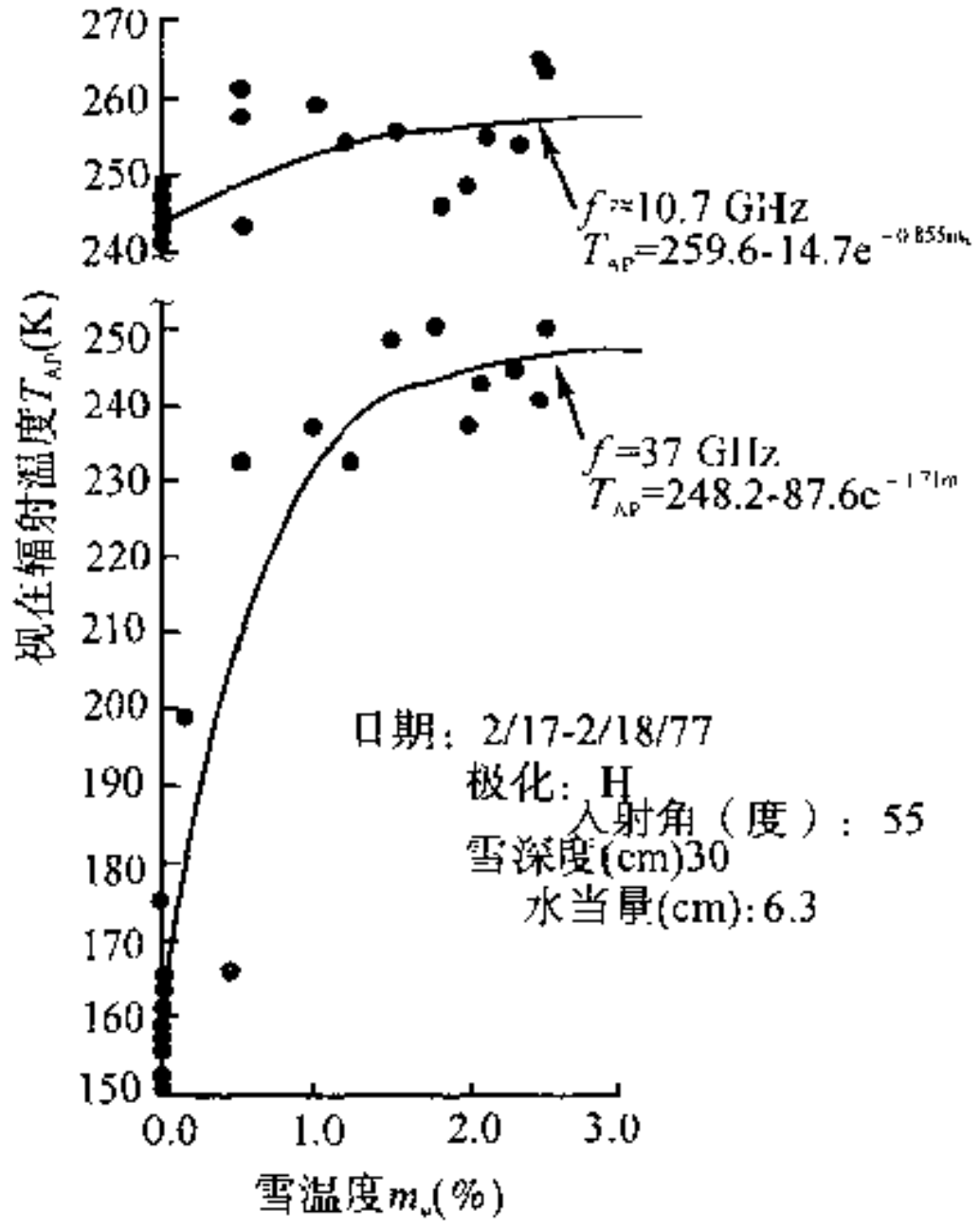



**图 3-5-12　表观温度 $T_{AP}$随积雪层顶部 5cm 厚度内的液态水含量 $m_v$ 的变化关系**(Stiles 与 Ulaby，1980a)

**思考题：**

1. 地面分辨元和平均面分辨元的意义是什么，为什么要提出平面分辨元？
2. 灰度分辨率的意义是什么，为什么最好以平均回波功率来衡量？
3. 为什么要提出体分辨率？
4. 地物目标的回波信号强度范围为 100 分贝，那么最强回波功率与最弱回波功率的比是多少？
5. 近距离压缩与透视收缩的区别是什么？
6. 为什么地物表面的粗糙度都是相对的？
7. 点目标与硬目标有什么不同和相同之处？
8. 角反射器在什么情况下没有回波？
9. 为什么植被含水量越大，其图像灰度值越大，而湖水在图像上却很暗？
10. 不同粗糙度土壤的散射系数曲线的交点说明了什么？
11. 为什么逆风观测海面的散射系数一般比顺风观测时大？
12. 为什么裸土的粗糙度越大，归一化天线温度越高？

13. 为什么含水量越大，土壤发射率越小?

14. 为什么有植被覆盖的土壤亮度温度与无植被土壤相比要高一些?

15. 试说明无风浪时海水亮度温度随辐射计工作频率增大而上升的原因。

# 第四章　微波图像的校准、定标与模拟

雷达图像是地物目标回波强度用灰度来表示的一种形式。像可见光、红外图像一样，它也受到外部的干扰，或传感器本身性能的影响，使接收到的信号不那么准确，所表现出来的灰度也就不一定完全正确。可见光、红外图像需要进行辐射校准，雷达图像也需要改正由于天线、发射机和接收机性能等的衰变造成接收信号的误差，改正由于环境干扰造成的信号混杂或噪声带来的误差，使雷达图像所反映的信号在最大限度上真实表现地物目标的回波强度。这就是雷达图像校准所要达到的目的。

对于校准后的雷达图像，建立起图像灰度与标准后向散射截面的关系，则是定量分析与应用的重要前提，这是定标所要解决的问题。在分析与应用中，按照雷达成像机理和有关数据资料制作模拟图像，具有多方面的应用价值，需要掌握这种模拟的原理与方法。

对于微波辐射计图像，同样由于天线、接收机等性能的影响，需要作校准，并在校准的基础上定标。

学习本章主要应掌握雷达图像和微波辐射计图像的校准和定标的原理和方法。

## 第一节　雷达回波的校准

雷达天线接收地物目标的回波，然后形成图像，在这一过程中，不仅受地物目标散射能力的影响，而且受雷达系统本身性能的影响，因此辐射校准包括了对雷达系统的内部校准，和利用标准体的外部校准即绝对校准。内部校准是为了克服信号获取过程中的系统误差，外部校准是为了解决回波量测过程中的随机误差。经过校准后，才能对雷达图像定标，建立图像灰度与地物目标散射回波的对应关系。

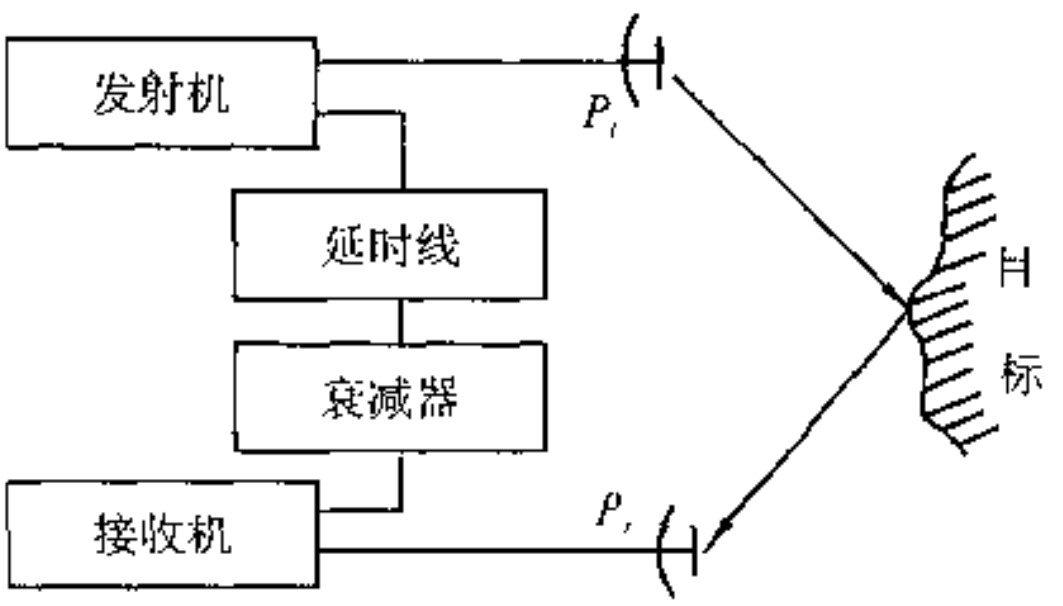



图 4-1-1　内部校准系统([8])

## 一、内部校准

雷达系统各部件性能的不稳定，造成整体上信号传输函数的变化。内部校准就是通过标定的发射功率来测试发射接收系统的传输函数，如图 4-1-1 所示的校准系统即内部校准系统，它是由增加延时线和定标衰减器组成的回路。在校准时，切断发射通路，发射的功率通过校准回路到达接收机，由接收机获得输出电压，以此测出接收机的性能，并进行校准。

若接收机所接收的信号功率为

$$P_r = \int \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^o}{(4\pi)^3 R^4} \mathrm{d}A \tag{4-1-1}$$

其输出电压为 $V_0$，传输函数为 tr 则有

$$V_0 = \mathrm{tr}\sqrt{P_r} = \mathrm{tr}[\int \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^o}{(4\pi)^3 R^4} \mathrm{d}A\,]^{1/2} \tag{4-1-2}$$

若考虑到雷达波束很窄，认为其照射范围内各参量基本不变，则有

$$V_0 = \mathrm{tr}[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^o}{(4\pi)^3 R^4} A\,]^{1/2} \tag{4-1-3}$$

这是不通过校准回路时的表达式。校准时，由于发射通路切断，发射波只通过校准回路，则接收机输出电压为

$$V_0' = \mathrm{tr}\sqrt{P_t / L} \tag{4-1-4}$$

其中 $L$ 指延时线长度，那么，

$$\frac{V_0}{V_0'} = \left[\frac{L G^2 \lambda^2 \sigma^o A}{(4\pi)^3 R^4}\right]^{1/2}$$

$$\sigma^o = (V_0 / V_0')^2 \frac{(4\pi)^3 R^4}{L G^2 \lambda^2 A} \tag{4-1-5}$$

一般校准曲线 $V_0 = f(P_r)$ 包括两个部分，一个是线性部分，一个是非线性部分。如图4-1-2所示，在线性变化范围内只要有两个校准点，即可对整个线性部分进行校准。而对于非线性部分，则只能逐点进行校准。通常雷达系统均为调频雷达，为了测量和计算方便，可预先计算接收机系统的输出电压与接收发射功率比的关系曲线，将数据存入计算机，然后在测量时，根据回波强度用内插法选择校准点，进行校准。若有预先编好的校准程序，则可在测量时进行实时校准。

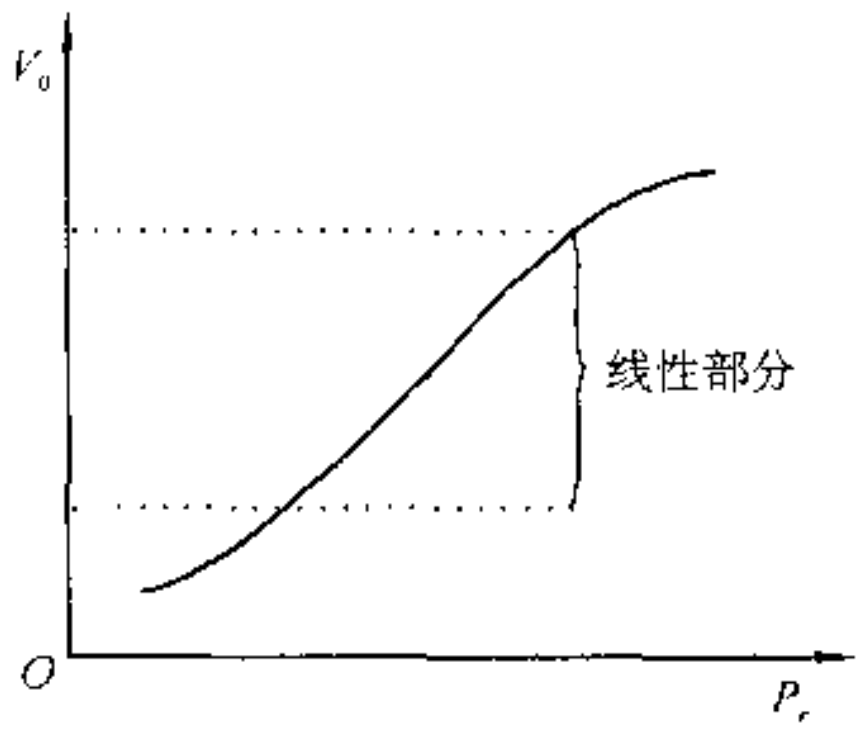



图 4-1-2　校准曲线〔8〕

一般说来，当已知天线增益和方向图，但不能利用已知散射截面的标准地物目标进行校准时，通过内部校准，即可计算出 $\sigma^o$ 的绝对值。

雷达系统须周期地作内部校准,以确定发射机功率或放大器漂移。另一方面,由于接收机响应的非线性,常需要使用校准衰减器在目标输入信号的预期动态范围内确定若干个输入功率电平,然后测试校准。

## 二、绝对校准

绝对校准是通过获得已知散射截面的地面目标信号来进行的。根据第二章关于雷达方程的介绍,校准目标的散射截面为

$$\sigma_c = \frac{P_{rc}(4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2} \tag{4-1-6}$$

于是可以根据理论计算出校准目标的散射截面 $\sigma_{co}$,而实际量测的校准目标的散射截面为 $\sigma_c$,$|\sigma_c - \sigma_{co}|$ 即为量测偏差,利用这一偏差,即可对被测目标的散射截面进行绝对校准。

校准量测过程中除接收到校准目标的信号外,还有与其相邻的背景信号。校准精度即取决于背景回波的大小。设 $E_c$ 为校准目标的回波电场强度,$E_b$ 为背景回波电场强度,$E_m$ 为量测到的电场强度,则有

$$E_m = E_c - E_b = E_c[1 - E_b/E_c] = E_c[1 - |E_b/E_c| e^{i\varphi}] \tag{4-1-7}$$

其中 $\varphi$ 为 $E_c$ 与 $E_b$ 之间的相对相位,而所测得的散射截面 $\sigma_m$ 与接收功率 $|E_m|^2$ 成正比,有

$$\begin{aligned}\sigma_m &= K|E_m|^2 \\ &= K|E_c|^2(1 + |E_b/E_c|^2 + 2|E_b/E_c|\cos\varphi) \\ &= \sigma_c(1 + \sigma_b/\sigma_c + 2\sqrt{\sigma_b/\sigma_c}\cos\varphi)\end{aligned} \tag{4-1-8}$$

这里 $K$ 是比例系数,$\sigma_c$ 和 $\sigma_b$ 为校准目标和背景目标的散射截面。若 $\sigma_b << \sigma_c$,则 $\sigma_m \approx \sigma_c$。为确定校准误差,取 $\varphi$ 的两个限值 0 和 $\pi$,则校准误差为

$$(\sigma_m - \sigma_c)/\sigma_c = \sigma_b/\sigma_c \pm 2\sqrt{\sigma_b/\sigma_c} \tag{4-1-9}$$

为了进行校准,通常采用具有规则形状的校准目标。常用的校准目标有平面矩形板,圆平板,圆球体,角反射器和朗伯球。如图 4-1-3 所示,由于角反射器具有很高的散射截面值,经常使用这种目标进行校准和定位。对于角反射器,有

$$\sigma_{max} = (4\pi/\lambda^2)A_{eff}^2 \tag{4-1-10}$$

其中 $A_{eff}$ 为三面角反射器的有效面积。

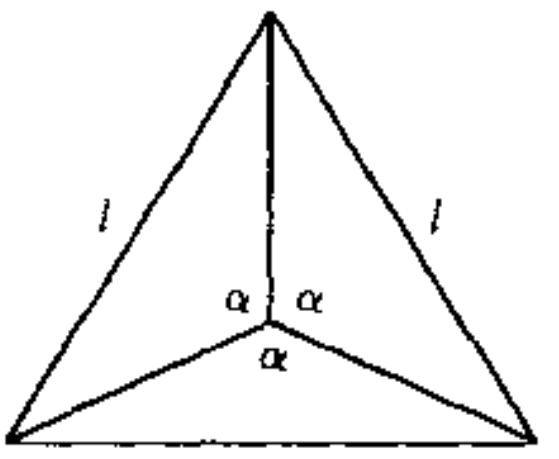



图 4-1-3 角反射器校准

$$A_{eff} = l^2/\sqrt{12} = 0.289 l^2 \tag{4-1-11}$$

朗伯球是球形的朗伯透镜，透镜折射指数 $n$ 随半径 $r$ 变化，

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon(r)} \tag{4-1-12}$$

中心区域散射截面最大，

$$\sigma_{max} = (4\pi/\lambda^2)A^2 = (4\pi^3 r_0^4)/\lambda^2 \tag{4-1-13}$$

其中 $r_0$ 为朗伯球半径，朗伯球的散射截面比金属球要高 28dB，是作校准用的理想目标。

雷达系统校准后可以得到地物目标的散射系数，但要确定这些散射系数与图像灰度的关系需要进一步的测量，如图 4-1-4 所示，以同一入射角对同一地物分别用地面散射计和侧视雷达获取地物目标回波，然后进行比较，即可确定散射回波与图像灰度之间的关系。

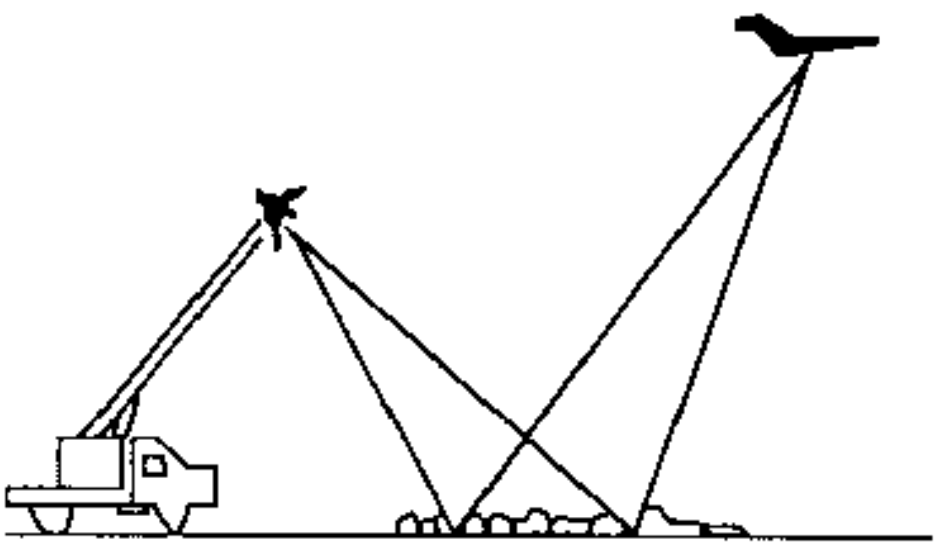


图 4-1-4　机载与地面校准

## 第二节　雷达图像定标

雷达图像的定标是确定图像的灰度与标准雷达散射截面的关系。定标是定量分析的前提，定标后，即可由雷达图像的灰度计算出地物目标回波的绝对值。雷达图像的定标工作是在雷达系统进行校准后进行的。

实际应用不但需要定性分析，更需要定量分析，比如测定土壤湿度，这对于农业估产，洪水预报，水资源调查等都具有重大意义。再如海洋遥感，需要海风风速，海浪波高，海冰分类等实况信息，以便航海计划的制定，这些都需要定量数据，所以雷达图像的定标是至关重要的。

### 一、雷达定标的一般原理

雷达系统的输入是地物目标回波功率，其输出则是图像灰度(或胶片密度)，输出量与输入量之间的关系称为传递函数，只有确定了这一传递函数才能利用雷达图像进行定量分析。然而侧视雷达系统是由多个分系统所组成，它包括发射机、天线、接收机、记录器、处理器等，甚至包括有关胶片冲洗的各类设备。要确定整个系统的传递函数，必须测出每一分系统的传递函数，所有分系统传递函数的乘积即系统整体传递函数。这样做的前提是各个分系统性能稳定，互相独立。从理论上讲，若能做到这样，最后环节的图

像密度用微密度计等测出后，就可根据总体传递函数计算输入的回波功率。但是实际上并没有采用这种方法，而是采用将标准反射器和标准信号源相结合的方法。

一般从图像测量以散射截面 $\sigma$ 表示的回波功率有以下三种方法，如图 4-2-1 所示，其一，已知 $\sigma_1^0$，测量 $\sigma_2^0$，其二，有标准反射器作参考，测量 $\sigma^0$，其三，无标准反射器时对 $\sigma^0$ 的测量。第一种方法称为相对测量，后两种方法是绝对测量。一般在只需要作相对测量时，就无必要测定总体传递函数，只要求系统总的噪声足够小，以分辨很小的 $\Delta\sigma^0$。

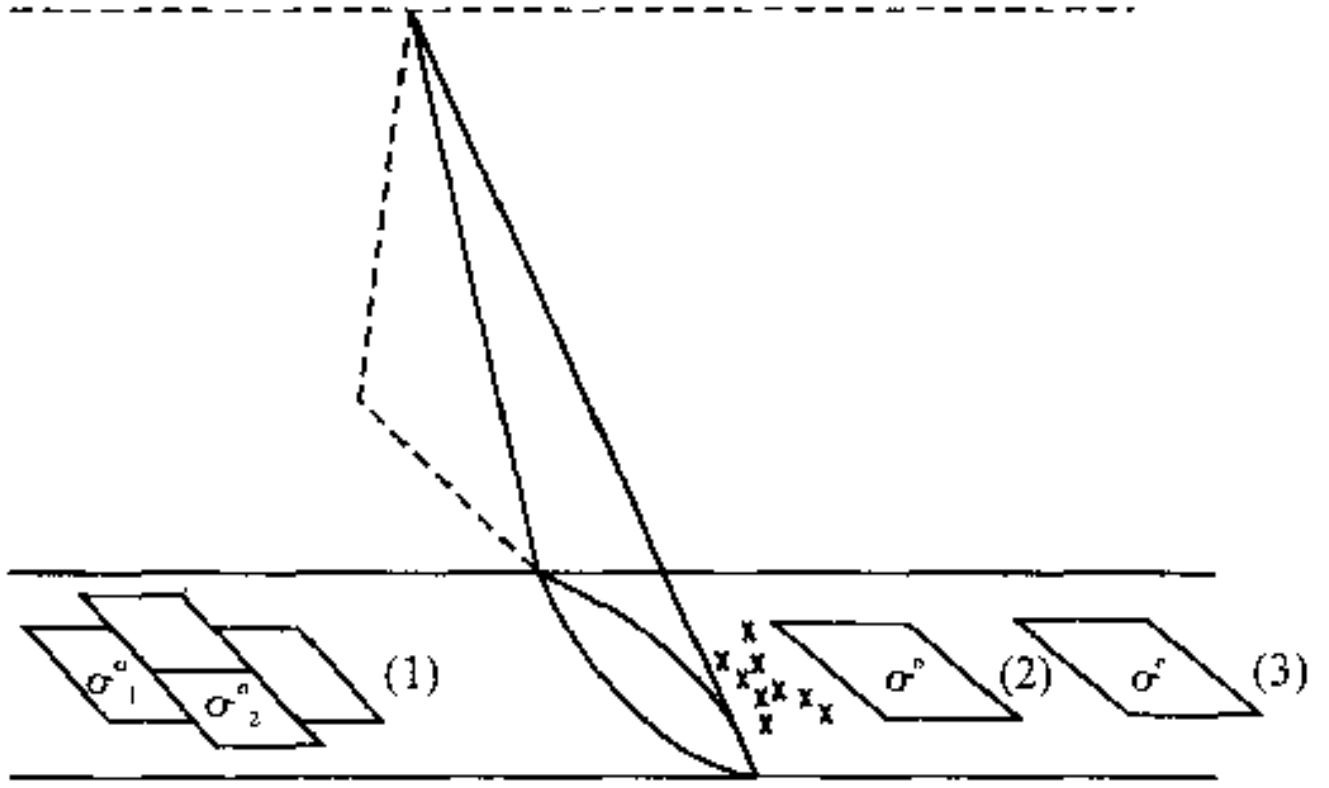



**图 4-2-1　$\sigma^0$ 测量方法示意图**

由雷达方程和成像原理可知，雷达图像密度 $Pi$ 可表示为

$$P_i = \frac{P_t G^2(\theta)\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} H_r \sigma \tag{4-2-1}$$

其中 $H_r$ 为从接收机到形成图像的处理器的传递函数。

若令

$$K_p = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^3} \tag{4-2-2}$$

则有

$$P_i = K_p \frac{G^2(\theta)}{R^4} H_r \sigma \tag{4-2-3}$$

若设 $H_s$ 为系统总体传递函数，即

$$H_s = K_p \frac{G^2(\theta)}{R^4} H_r \tag{4-2-4}$$

则

$$P_i = H_s \sigma \tag{4-2-5}$$

于是

$$\sigma^0 = H_s^{-1} P_i / A_c \tag{4-2-6}$$

这里 $A_c$ 为地面分辨单元面积。

从以上分析可以看出，总体传递函数 $H_s$ 主要因 $G(\theta)$和 $R$ 而异，必须测出 $G(\theta)$和 $R$ 才能测出$H_s$。如果在地面上设置一系列标准反射器，由于其散射截面 $\sigma_n$ 已知，在测定其相应的图像密度 $P_i$ 后即可给出 $P_i = f(\sigma_n)$ 曲线，这一曲线似乎就包含了 $H_s$。对于待测点，似乎只要根据这点的图像密度在曲线上找对应关系就可以获得 $\sigma$ 数值。这只是一种近似的方法即前面所述第一种方法，因为不同地物 $G(\theta)$和 $R$ 的变化，故要精确测定某一目标的回波，必须测定相应的 $G(\theta)$和 $R$ 即测定$H_s(\theta)$。

## 二、有标准反射器作参考时的总体传递函数测量

如前所述，测定 $H_s(\theta)$与 $G(\theta)$和 $R$ 有关，一般说来，主要要测定 $G(\theta)$，它是天线方向图，利用标准反射器，可以测出 $G(\theta)$。一般采用航空量测的方法，在天线照射带内，设置一组有相同散射截面的标准反射器，经多次雷达成像，根据相应图像密度数据，对不同斜距 $R$ 值分别作计算，即可得到双程天线方向图 $G^2(\theta)$。

也可以用分布型地物目标代替标准反射器，只要这类地物在实测区域内均匀分布，那么在雷达图像上密度的变化即代表了双程天线方向图。不过这里忽略了 $R$ 和入射角的变化，只是在卫星侧视雷达系统中可以考虑，因为卫星飞行高度在八、九百公里以上，雷达波束内目标的 $R$ 和 $\theta$ 变化已经很小。

在卫星雷达系统上，可以采用前述第一种方法，只要测出一组已知散射截面的标准反射器的图像密度，找出相应的 $P_i = f(\sigma_n)$曲线关系，测出 $H_s$ 即可以满足要求。在这一过程中，要求精确测出标准反射器的 $\sigma$ 值和它的指向角等数据。除了在室内反复精确测出每个标准反射器的 $\sigma$ 值外，还可以采用车载和机载散射计等雷达测试仪，来校准标准反射器的 $\sigma$ 值。

标准反射器有以下三类：

点状目标反射器，如朗伯透镜，帽形角反射器，三角形、正方形或圆形角反射器。

分布目标反射器，有用人工布设的分布目标，如用沙或不同直径的鹅卵石铺成的分布目标，也有用自然分布目标的，如森林，荒漠等，其雷达散射截面要用散射计量测。

有源雷达反射器，它有一个天线专门接收雷达发射来的波束，然后经过放大器，用另一天线发射回去。

一般对这些标准反射器有以下要求：

在测定 $H_s(\theta)$时，最小散射截面要等于雷达可检测的最小信号电平，最大散射截面能达到雷达饱和电平；最大和最小散射截面之间，至少要有三种

中间数值的散射截面值;具有每种数值的反射器个数要尽可能多,以保证较多的样本;信号与背景噪声之比要在 10dB 以上;最小与最大标准反射器之间的距离在方位向应为实际天线发射波束的两倍,在距离向应为发射脉冲长度的两倍;尽可能减少多途径回波效应。如波束到达地面又反射到反射器上,再由反射器反射出去等情况出现时,有时须设置吸收材料阻挡这类效应。

在测定 $G(\theta)$时,同样要求散射截面的数值应与系统线性动态范围相吻合,信号与背景噪声比要大,尽可能减少多途径效应。此外,在波束照射带内应设置散射面积相同的标准反射器,在方位方向设置多个反射器时应确保系统不要饱和,对于天线的每一俯角要有不少于五个相同散射截面的反射器等。

### 三、无标准反射器作参考时 $\sigma^0$ 的测量

这是指在测量 $H_s(\theta)$之后,不再利用标准反射器而直接利用 $H_s(\theta)$测量。因此必须保证 $H_s(\theta)$的稳定数值,或监视其变化规律,这时是利用飞机上高度稳定的标准信号源来进行的。

标准信号源可以产生模拟回波的信号,从馈线端输入,然后在图像上记录下来。若设标准信号源的输出功率为 $P_s$,其对应的图像密度为

$$P_i' = H_r P_s \tag{4-2-7}$$

因为

$$H_s = K_p \frac{G^2(\theta)}{R^4} H_r \tag{4-2-8}$$

面目标的图像密度为

$$P_i = K_p \frac{G^2(\theta)}{R^4} H_r \sigma_r \tag{4-2-9}$$

若令

$$P_i' = P_i(R_1\theta_1) \tag{4-2-10}$$

即标准信号源产生的图像密度与某一地物目标产生的图像密度相同,则由(4-2-7)式和(4-2-10)式,

$$P_s = K_p \frac{G^2(\theta_1)}{R^4} \sigma_r \tag{4-2-11}$$

这样,就可以利用标准信号源去监测 $G(\theta)$的变化,从而也就监测到 $H_s(\theta)$的变化。

标准信号源除了可用于监测 $H_s(\theta)$以外,还可以用于监测 $H_r$。在雷达系统相当稳定的情况下,也可以不用标准信号源,而采取别的方法,例如对航天飞机成像雷达所采用的方法,后面将专题介绍。

图 4-2-2 是真实孔径侧视雷达中标准信号源的情况，对于合成孔径侧视雷达来讲，对标准信号源的要求是不一样的，因为接收系统与常规雷达不同。这时标准信号发生器必须满足以下要求：

1. 模拟的回波信号，必须是二维线性调频信号，它与雷达遥感距离有关；

2. 输出幅度可精确控制；

3. 能将信号功率电平自动控制在所需范围内。

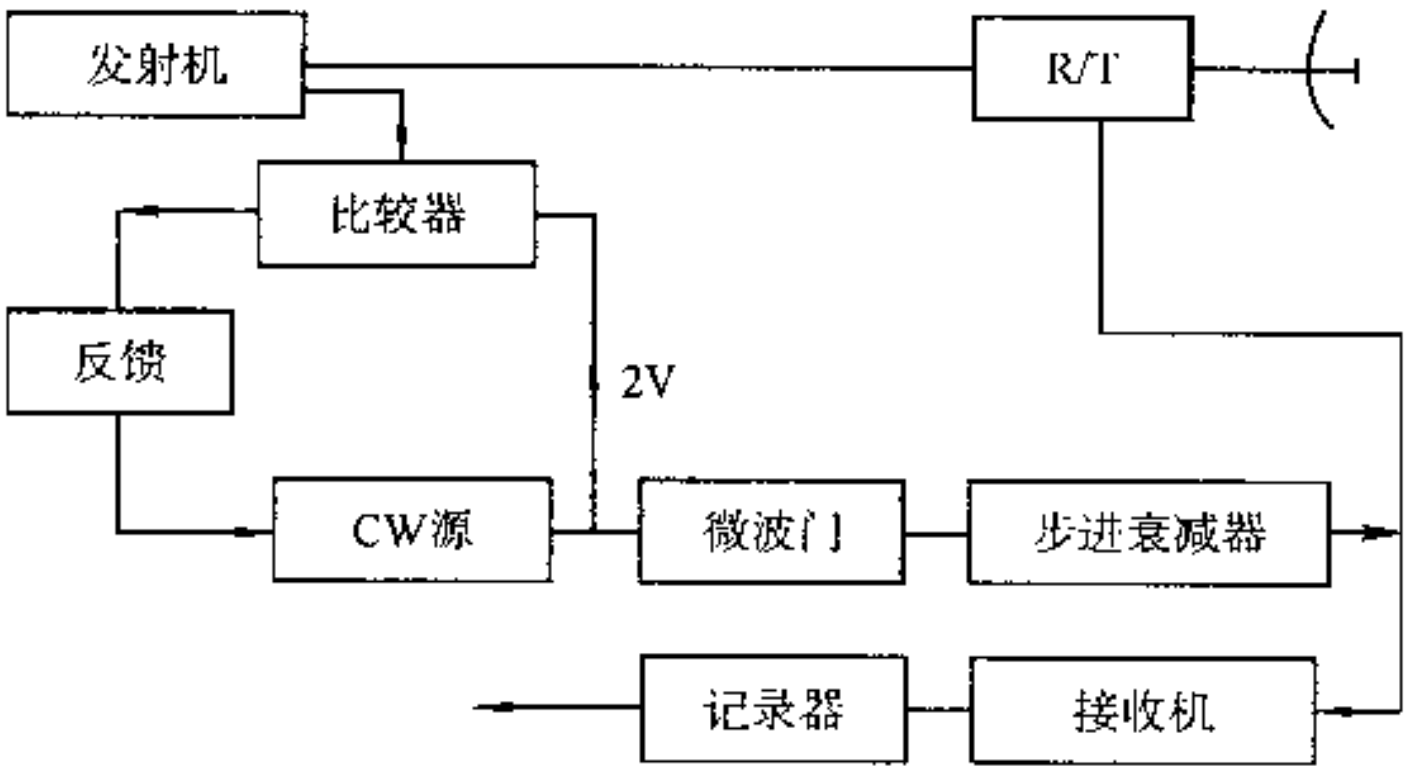



图 4-2-2 真实孔径雷达内定标原理框图([8])

实际设计这种信号源时，距离向的线性调频信号是从发射信号取样得到，方位向的线性调频信号则由微处理机上的程序产生多普勒相移变化，然后控制移相器的相移而得到。图 4-2-3 所示 $\varphi(x)$即为多普勒相移，$x$ 由来自导航的速度和时延 $\Delta t$ 给出，距离信号由微机程序预先给出，标准信号通过数控精密衰减器发送至接收机输入端，衰减值变化范围必须使信号在

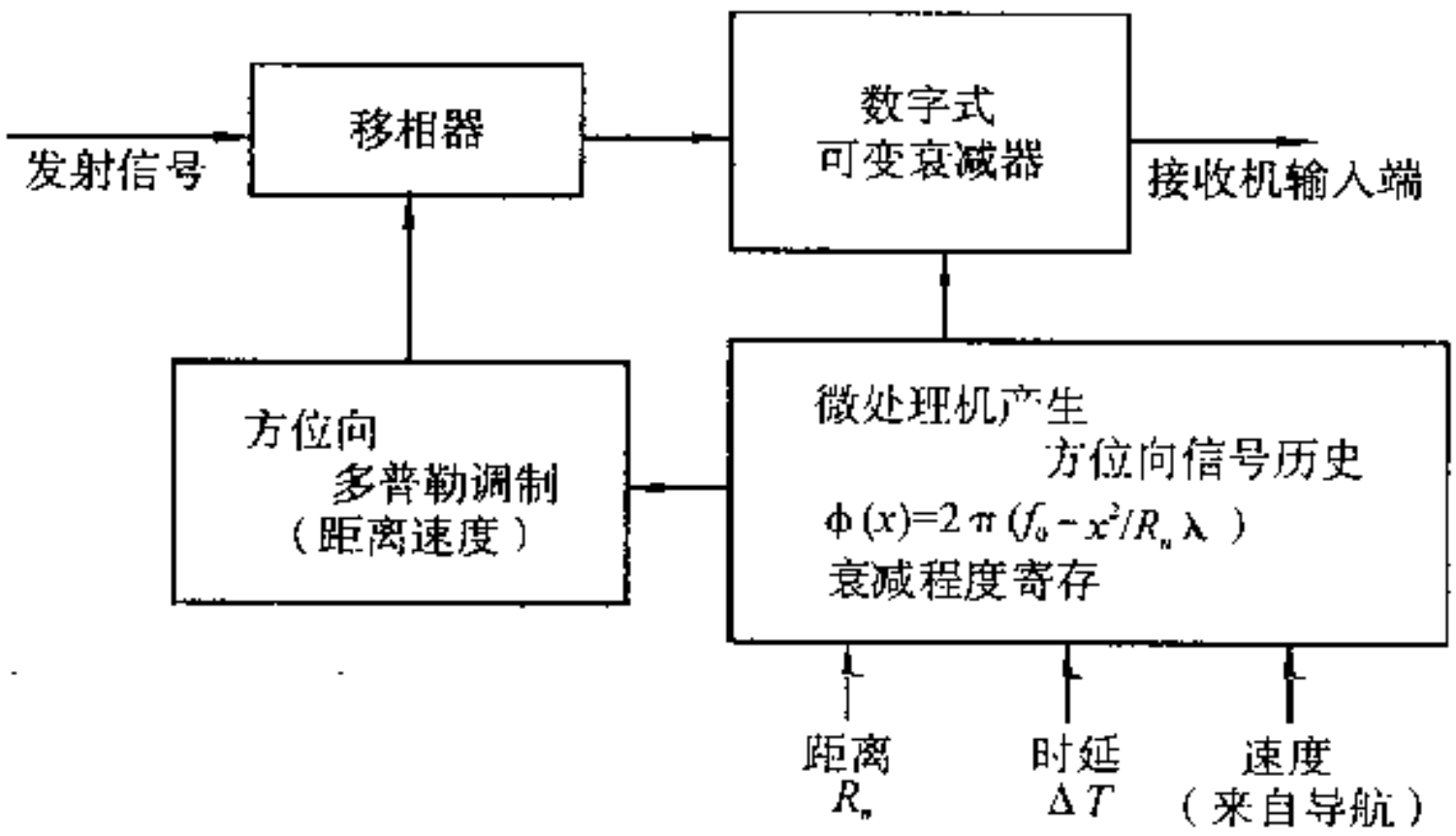



图 4-2-3 方位向线性调频信号的获得([8])

最小可检测信号电平和饱和电平之间。标准信号在雷达发射脉冲之前或发

射之后记录下来，以对每组回波提供标准。

下面介绍航天飞机合成孔径雷达图像的定标。

航天飞机的飞行高度为200多公里，1984年10月挑战者号携SIR－B雷达装置在伊利诺州进行了定标实验，其内容包括天线方位向方向图和距离向方向图及总体传递函数。实验中利用有源雷达反射器ARC作标准反射器，它具有很高的雷达散射截面，低雷达散射截面是由分布型地物目标作标准的。

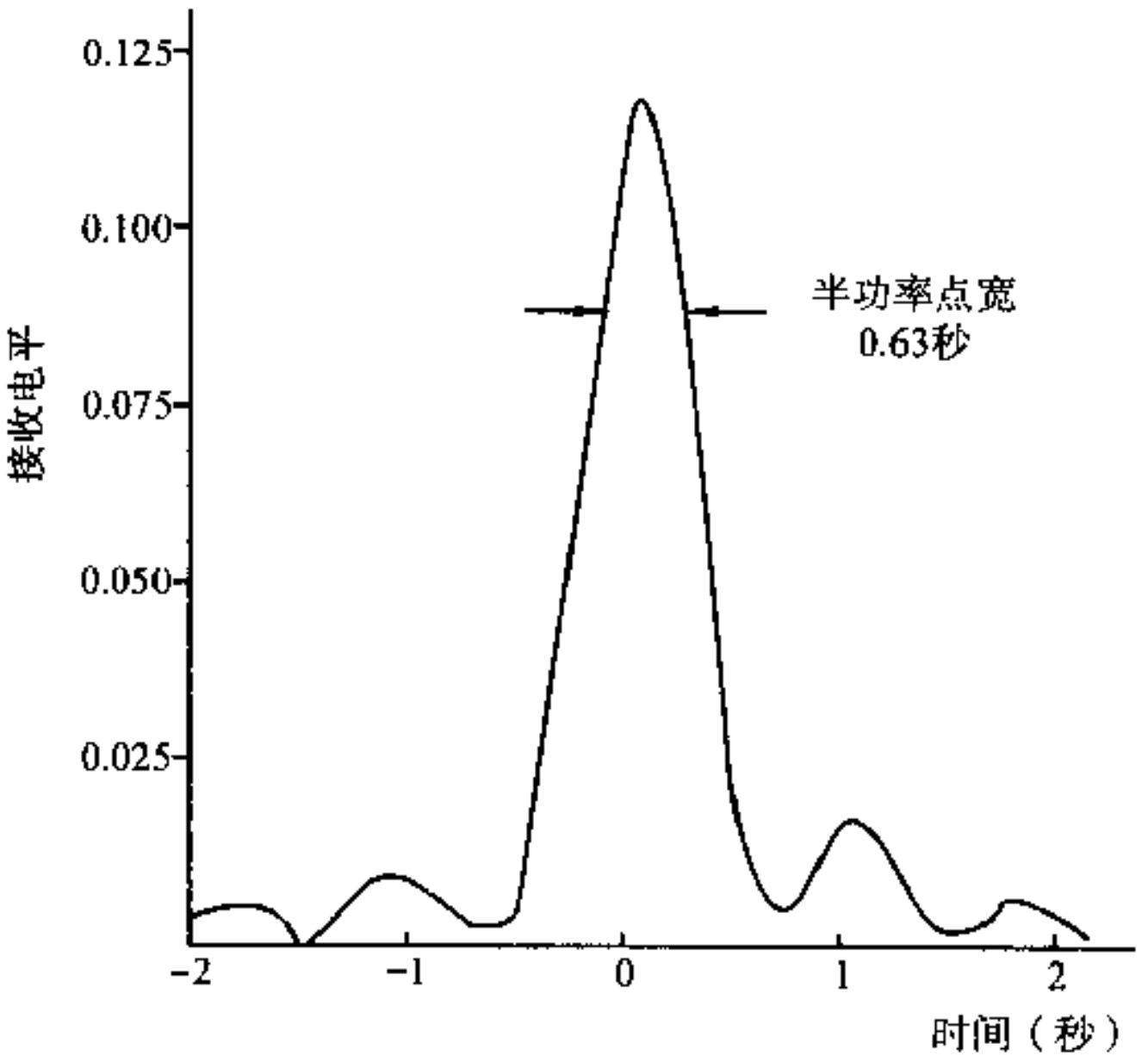



图4-2-4　SIR-B天线方位方向图([8])

在方位向，天线发射波束到达ARC，经转发由SIR－B记录ARC的回波，后按其数值给出天线方位向波束形状，如图4-2-4所示，表明与原设计形状吻合。

在距离向，采用由ARC接收和记录发射波的方法，由数个ARC记录值推算出来的，其计算公式是

$$P_t G_t(\theta) = 4\pi R^2 P_r / A_{eff} \tag{4-2-12}$$

其中 $P_t$ 和 $G_t(\theta)$ 为天线发射功率和方向增益，$A_{eff}$ 为ARC的有效接

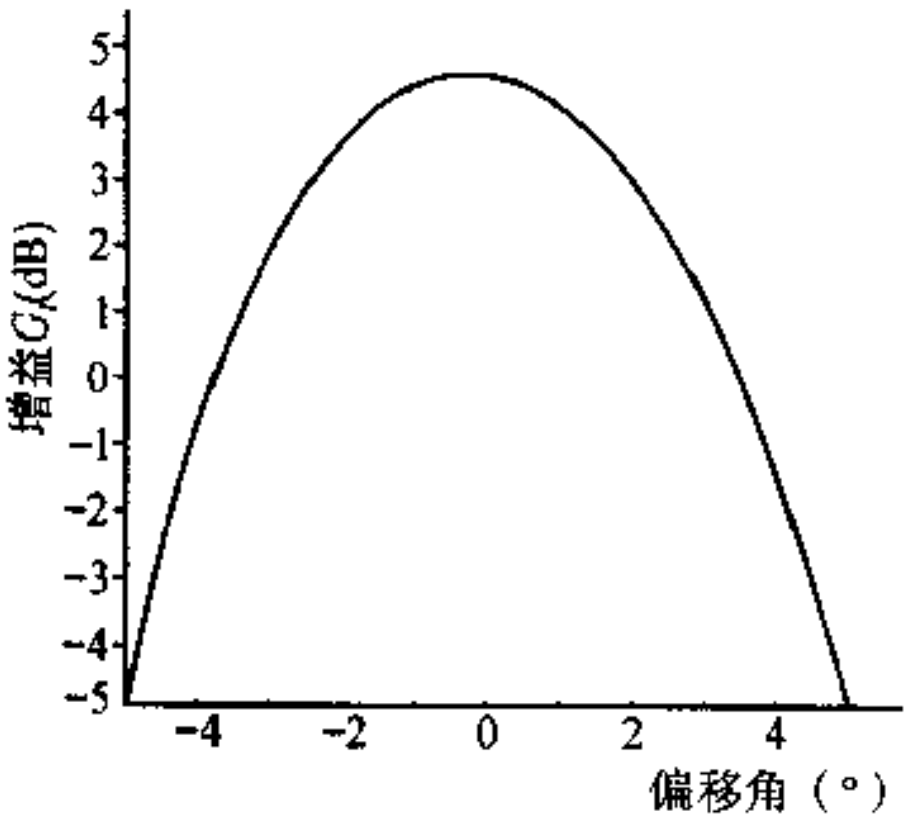



图4-2-5　SIR-B天线增益曲线([8])

收面积，$P_r$ 为 ARC 接收到的功率记录，$R$ 为天线到 ARC 的距离。由于 $P_t$ 已知是常数，ARC 设置在雷达波束照射带上不同的 $\theta$ 角处，将各个 ARC 的记录值计算出 $G_t(\theta)$后，即得到如图 4-2-5 的天线距离向增益曲线，它与设计值也符合得很好。

在图像定标，即求总体传递函数，以根据 SIR－B 的图像数据 $D_n$ 求实际地物目标的 $\sigma^o$ 值时，考虑到 $D_n$ 与接收功率的平方根成正比，有

$$D_{ni} = KP_i^{1/2} \tag{4-2-13}$$

其中 $i$ 为样本号，$K$ 为比例因子。为消除噪声，求 $D_{ni}$的期望值 $D_n$，根据中心极限定理，

$$D_n = E(KP_i^{1/2}) \tag{4-2-14}$$

而

$$P_i = P_{is} + P_{in} \tag{4-2-15}$$

其中 $P_{is}$为信号功率，$P_{in}$为噪声功率，故

$$P = P_s + P_n \tag{4-2-16}$$

因为

$$P = \frac{P_t G^2(\theta)\lambda^2\sigma^o(\theta)A_c}{(4\pi)^3R^4} = C_\theta\sigma^o(\theta)A_c \tag{4-2-17}$$

其中

$$C_\theta = \frac{P_t G^2(\theta)\lambda^2}{(4\pi)^3R^4} \tag{4-2-18}$$

所以有

$$D_n = K[C_\theta\sigma^o(\theta)A_c + P_n]^{1/2} \tag{4-2-19}$$

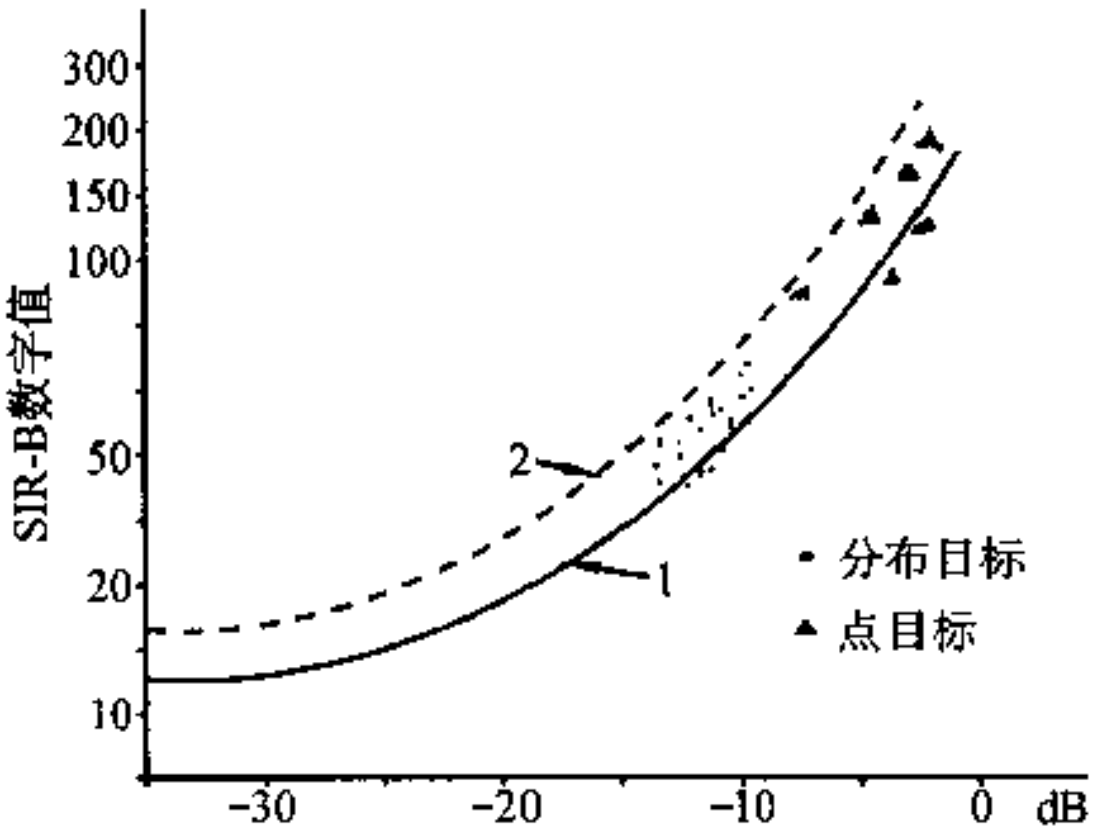



图 4-2-6　SIR-B 定标曲线([8])

于是

$$\sigma^0(\theta) = (D_n^2 - K^2 P_n)/(C_\theta K^2 A_c) \qquad (4\text{-}2\text{-}20)$$

由于 $P_n$ 可以利用图像中无回波部分(如水体,阴影等)的数值求出,所以可以用图像数据计算相应的回波信号,SIR－B 的定标结果如图 4-2-6 所示,它给出了目标与 $ARC$ 两组定标结果曲线。

## 第三节　雷达图像模拟

雷达图像的模拟是根据地面实际情况或其它资料(如地图或其它遥感资料),按照雷达图像的成像机理,用计算机产生一幅雷达图像,或根据已有雷达图像产生不同频率、不同极化的另外一种雷达图像,以供多种应用的技术。模拟所用的物理模型是"点散射"模型,所用数学模型为雷达成像几何公式、雷达方程和灰度方程。模拟的数据来源是有关雷达系统的参数和有关地面实际状况的两个数据库,即地面数字高程模型数据库和地物目标散射截面 $\sigma^0$ 数据库。图 4-3-1 表示了雷达图像的模拟计算框图和模拟流程图。

雷达图像模拟具有多方面的应用价值。其一,它是雷达系统最优化方案的依据。由于图像模拟,有利于掌握在复杂情况下,由各种参数(如入射角,波长,极化方式等)产生的图像特征差别,这种预见性为选择系统的最佳参数提供了帮助。其二,用于图像的几何校正,因为只要找到真实图像与模拟图像之间的关系,就可以对真实图像进行几何校正。其三,用于培训图像判读分析人员,因为按照雷达图像特有的成像几何关系和地物目标特征所进行的模拟,可以从多方面培训专业人员。其四,由于将多年研究所积累的资料用于模拟,在地物目标散射特性与雷达图像之间建立起定量关系,因而可以把模拟图像作为参照,在利用真实图像的时候,进行定量分析,比如进行土壤湿度的量测等。其五,在军事上用于无人驾驶飞行器的导航,制导等。

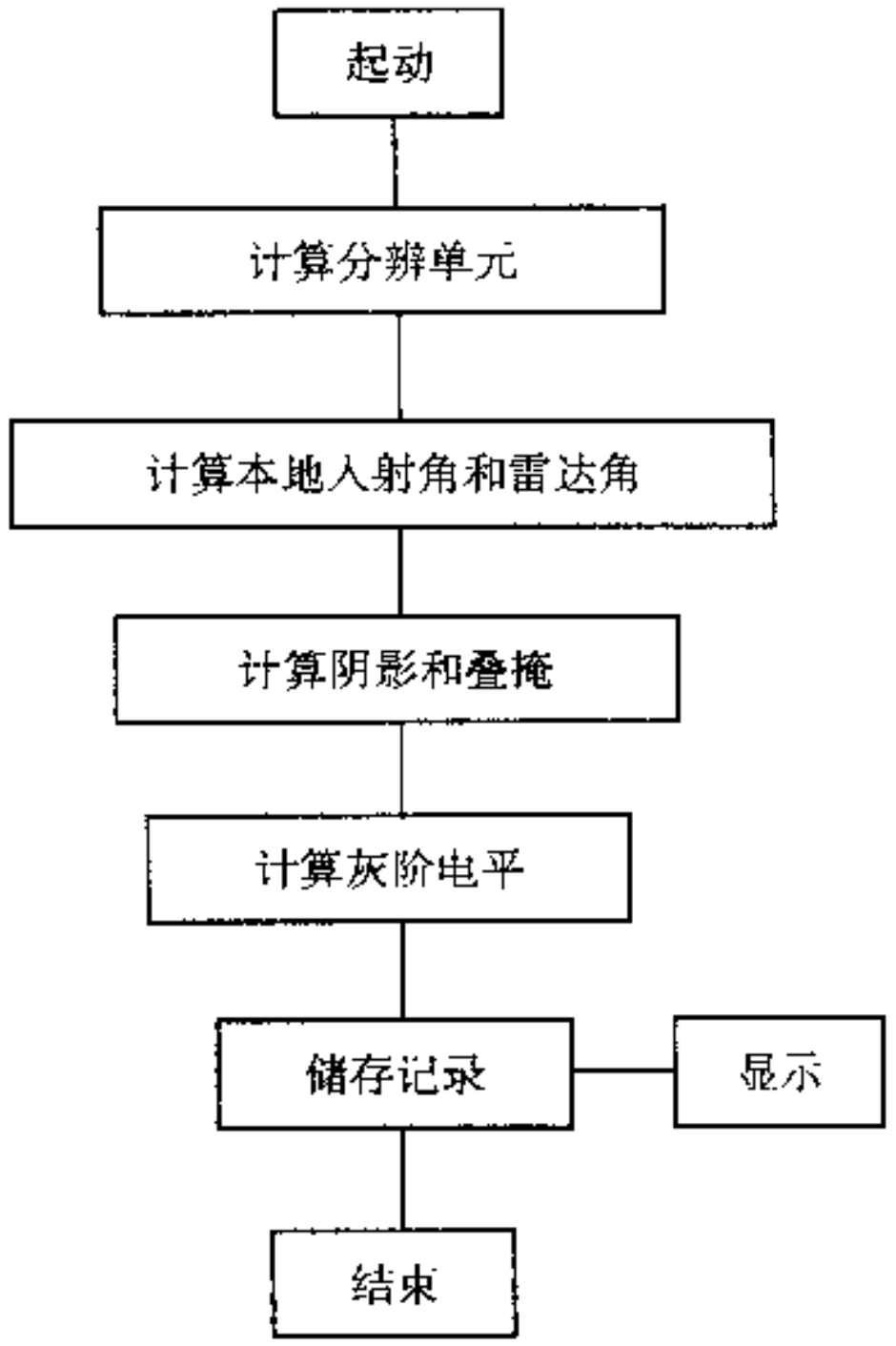
雷达图像中点目标是最简单的目标,其雷达方程为

$$P_r = \frac{P_t G^2(\theta)\lambda}{(4\pi)^3 R^4}\sigma \qquad (4\text{-}3\text{-}1)$$

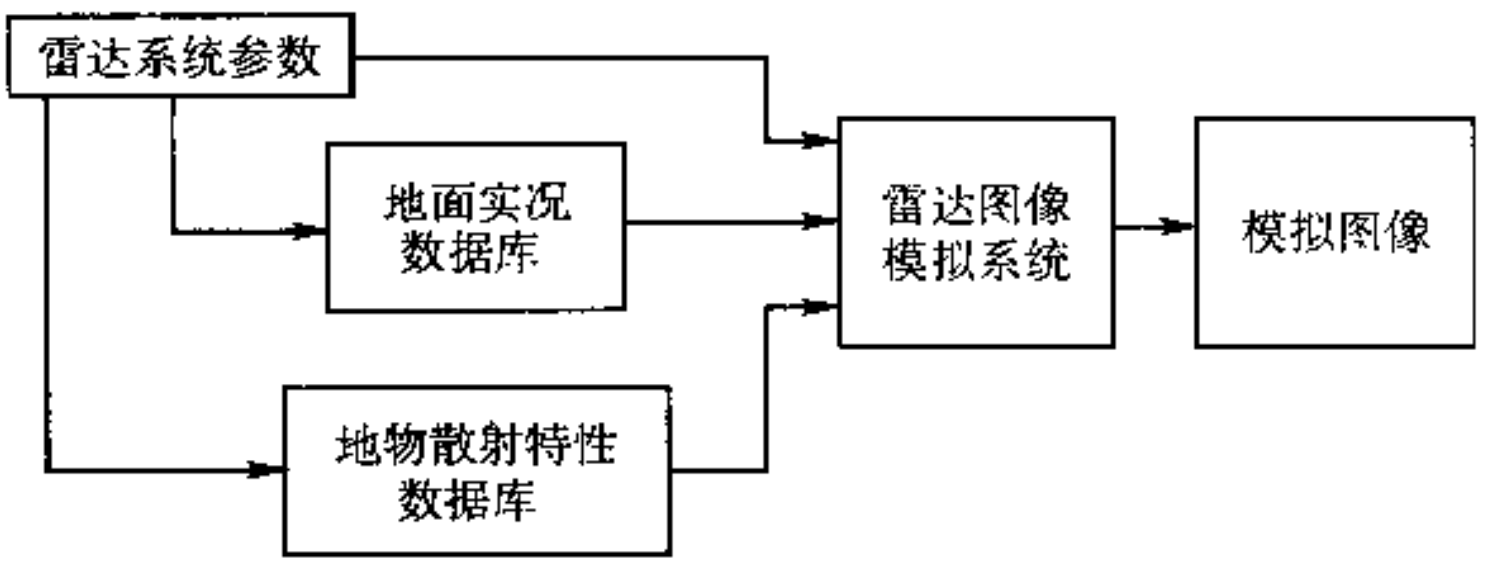
如果是分布式地物目标,须计算以分辨单元 $\Delta A$ 内的回波功率,相应的雷达方程是

$$P_r = \frac{P_t G^2(\theta)\lambda}{(4\pi)^3 R^4}\sigma^0 \Delta A \qquad (4\text{-}3\text{-}2)$$

模拟雷达图像时,即根据分辨单元的大小将地面划分成格网,其中每一




(a)框图




(b)流程图

**图 4-3-1　雷达图像模拟([8])**

格就是雷达图像的一个像素所对应的地面单元，按照“点散射”模型模拟雷达图像时就是把地面上每一网格中的地物，根据地物的散射特性和成像原理，按雷达方程和灰度方程，计算每一块地面单元的散射回波强度，再转换成图像灰度值，形成雷达图像。

由上述两个方程可以看到，仅 $\Delta A$ 一项因地面情况复杂，须针对每一地面单元进行计算外，其它参数都是已知的，包括各类地物在不同条件下的散射系数 $\sigma^0$。其中仅需对地面不同部位的雷达波束入射角加以计算(即下述

本地入射角的计算),在计算每一地面单元的散射回波,进而计算相应图像灰度时,顾及光斑效应、硬目标及分布目标的特点,同时按雷达图像的几何特征如阴影、迭掩等进行模拟,才能最终形成一幅较好的雷达图像。以下就模拟过程中的一些具体问题进行讨论。

## 一、分辨单元和本地入射角的计算

计算分辨单元 $\Delta A$ 的公式是

$$\Delta A = \rho_a \rho_r / [\cos\theta_A \sec(\theta - \theta_C)] \tag{4-3-3}$$

其中,$\rho_a$ 和 $\rho_r$ 为雷达图像空间分辨率,$\theta$ 为雷达入射角,$\theta_A$ 和 $\theta_C$ 是分辨单元在方位向和距离向的坡度角。

从下面几个常见的特例的 $\Delta A$ 计算,可以看出公式的物理意义。

地面平坦,因而 $\theta_A = \theta_C = 0$ 时

$$\Delta A = \rho_a \rho_r / \sec\theta \tag{4-3-4}$$

若地面上方位向具有一定坡度 $\theta_A$,距离向仍处于水平,即 $\theta_C = 0$,于是在方位向分辨单元的宽度为 $\rho_a / \cos\theta_A$,则有

$$\Delta A = \rho_a \rho_r / (\cos\theta_A \sec\theta) \tag{4-3-5}$$

若在距离向地面有一定坡度 $\theta_C$,方位向是水平的,即 $\theta_A = 0$,雷达波束入射角为 $\theta - \theta_C$ 故

$$\Delta A = \rho_a \rho_r / \sec(\theta - \theta_C) \tag{4-3-6}$$

当 $\theta_C = \pi/2$,即遇到高大建筑物的侧面时,

$$\Delta A = \rho_a \rho_r / (\cos\theta_A \csc\theta) \tag{4-3-7}$$

$\theta = \theta_C$ 是很少出现的情况,它相当于垂直入射或掠射两种情况。掠射或擦地入射时,回波功率极小,垂直入射则回波极强,这两种情况都需要作特殊处理。

$\theta$ 与 $\theta_C$ 互余,即 $\theta + \theta_C = 90°$ 时,也是一种掠射情况。

计算本地入射角的公式是

$$\theta_l = \arccos\left[\frac{\cos\theta + \mathrm{tg}\theta_C \sin\theta}{(1 + \mathrm{tg}^2\theta_C + \mathrm{tg}^2\theta_A)^{1/2}}\right] \tag{4-3-8}$$

同样,当地面处于水平时,$\theta_A = \theta_C = 0$,于是 $\theta_l = \theta$,当只有距离向的地面坡度 $\theta_C$ 时,$\theta_A = 0$,可以算出

$$\theta_l = \theta - \theta_C \tag{4-3-9}$$

可见只有地面坡度情况比较复杂时,计算过程才会比较繁杂一点。

## 二、图像灰度计算

在分辨单元计算出来以后,即可根据各类地物的散射系数由(4-3-1)式

计算回波功率 $P_r$，然后根据灰度方程赋予灰度。在第二章中，已经给出了灰度方程，这里简要回顾并加以讨论。

在计算回波功率 $P_r$ 之后，若接收机的传递函数为 $M$，则输出视频信号强度为

$$I = MP_r \tag{4-3-10}$$

由胶片传递函数 $\gamma$ 和与胶片、曝光时间有关的常数 $k$，得胶片密度为

$$\begin{aligned} D &= \gamma \lg I + \lg k \\ &= \gamma \lg P_r + \lg k + \gamma \lg M \end{aligned} \tag{4-3-11}$$

胶片密度 $D$ 定义为

$$D = \lg \frac{I_o}{I_t} \tag{4-3-12}$$

其中 $I_t$ 为透过的光强度，$I_o$ 为入射的光强度。如果密度的变化范围为 0～$X$，则

$$I_{t\min} = 10^{-X} I_o \tag{4-3-13}$$

在计算机中，如果以 $2^N$bits 表示图像灰度，即有 $2^N$ 个灰度等级，若将 0 作为一个等级，则还应有 $2^N - 1$ 个灰度等级。相应于胶片密度，在数字化时，其灰度值为

$$G_r = \frac{2^N - 1}{X} D \tag{4-3-14}$$

或

$$G_r = (2^N - 1)(1 - D/X) \tag{4-3-15}$$

由于胶片上最透明处，入射光几乎全部透过，称为白电平，即 $I_t = I_o$，有 $D = 0$。反之，只能透过极少入射光处则有黑电平，所以(4-3-14)式白电平相应灰度为零，黑电平相应灰度为$(2^N - 1)D/X$，(4-3-15)式则相反。在计算灰度值的时候，通常选定一个参考标准，以某一种地物目标回波的图像密度 $D_c$ 为准，有

$$G_{rc} = \frac{2^N - 1}{X} D_c \tag{4-3-16}$$

则其它地物目标的图像灰度为

$$G_r = G_{rc} + \frac{2^N - 1}{X}(D - D_c) \tag{4-3-17}$$

在计算图像灰度的过程中，还需要考虑光斑效应和分布目标的模拟，以及硬目标的模型等，这里不一一赘述。

### 三、雷达图像几何特征的模拟

雷达图像一般是斜距图像，当以地面的格网模拟雷达图像时，要考虑地

距与斜距的关系，即

$$R = G/\sin\theta \tag{4-3-18}$$

这里 $R$ 表示斜距，$G$ 表示地距，$\theta$ 为雷达波束入射角。

在地形起伏的地区，要考虑雷达图像的阴影和叠掩。这是雷达图像的重要几何特点。模拟这些特点时，须首先判断在什么情况下产生阴影和叠掩。

对于产生阴影的条件，如图 4-3-2 所示，若地面上有两点 $X_1$，$X_2$，其地

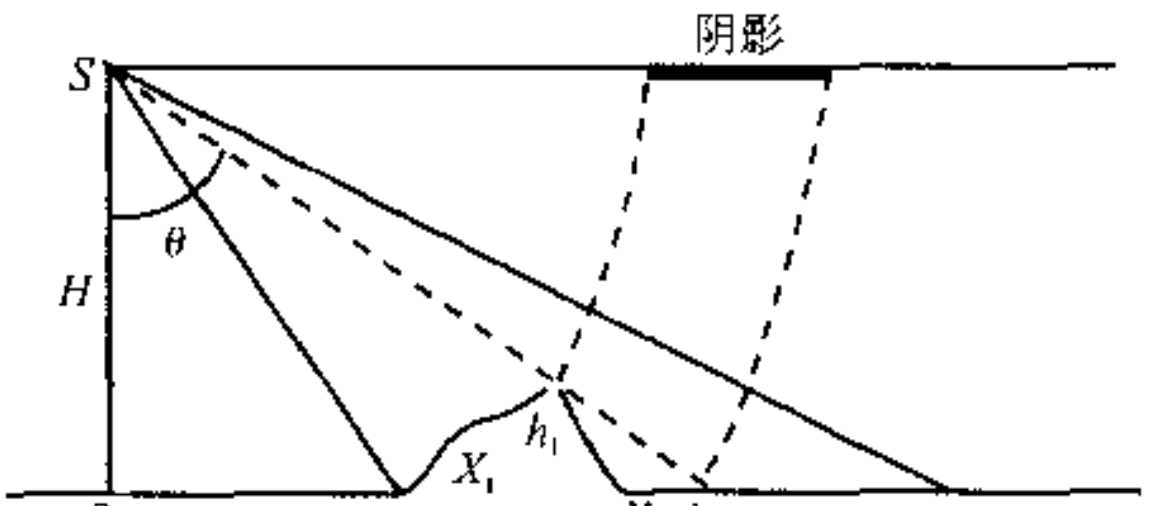



图 4-3-2　产生阴影的几何条件

距分别为 $G_1$ 和 $G_2$，$G_1 < G_2$，雷达波束投射在这两点的入射角为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$，则有

$$\begin{aligned} \mathrm{ctg}\theta_1 &= (H - h_1)/G_1 \\ \mathrm{ctg}\theta_2 &= (H - h_2)/G_2 \end{aligned} \tag{4-3-19}$$

于是

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \mathrm{arcctg}[(H - h_1)/G_1] \\ \theta_2 &= \mathrm{arcctg}[(H - h_2)/G_2] \end{aligned} \tag{4-3-20}$$

很明显，产生阴影的条件是

$$\theta_2 < \theta_1 \tag{4-3-21}$$

或

$$\mathrm{ctg}\theta_2 > \mathrm{ctg}\theta_1 \tag{4-3-22}$$

即

$$-\Delta h > \Delta G\ \mathrm{ctg}\theta_2 \tag{4-3-23}$$

其中

$$\Delta h = h_2 - h_1, \Delta G = G_2 - G_1$$

判断是否有叠掩发生，主要看相继成像的点的斜距是否减小，若减小则产生叠掩，设 $X_1$ 为当前最大斜距的目标点，其相应的斜距为 $R_1$，地距为 $G_1$，目标 $X_2$ 的地距为 $G_2$，$G_2 > G_1$，其斜距为 $R_2$，若 $R_2 < R_1$，则必有叠掩发生。如图 4-3-3 所示。

### 四、图像模拟数据库

从以上的讨论可见，在模拟雷达图像的过程中，必须以两类数据库作为前提，一个是地理信息数据库，一个是地物目标特性数据库。地理信息数据库包括数字高程模型(DEM)和土地利用信息数据，DEM是按地面格网点采集高程数据组成的一个数据集合，它可以由地形图等高线的数字化，然后按格网插值而得。土地利用信息数据主要是各种地物的分布现状数据，在计算各种地物的散射回波强度时，必须以每个格网所对应的地物为依据，所以土地利用数据是不可少的。

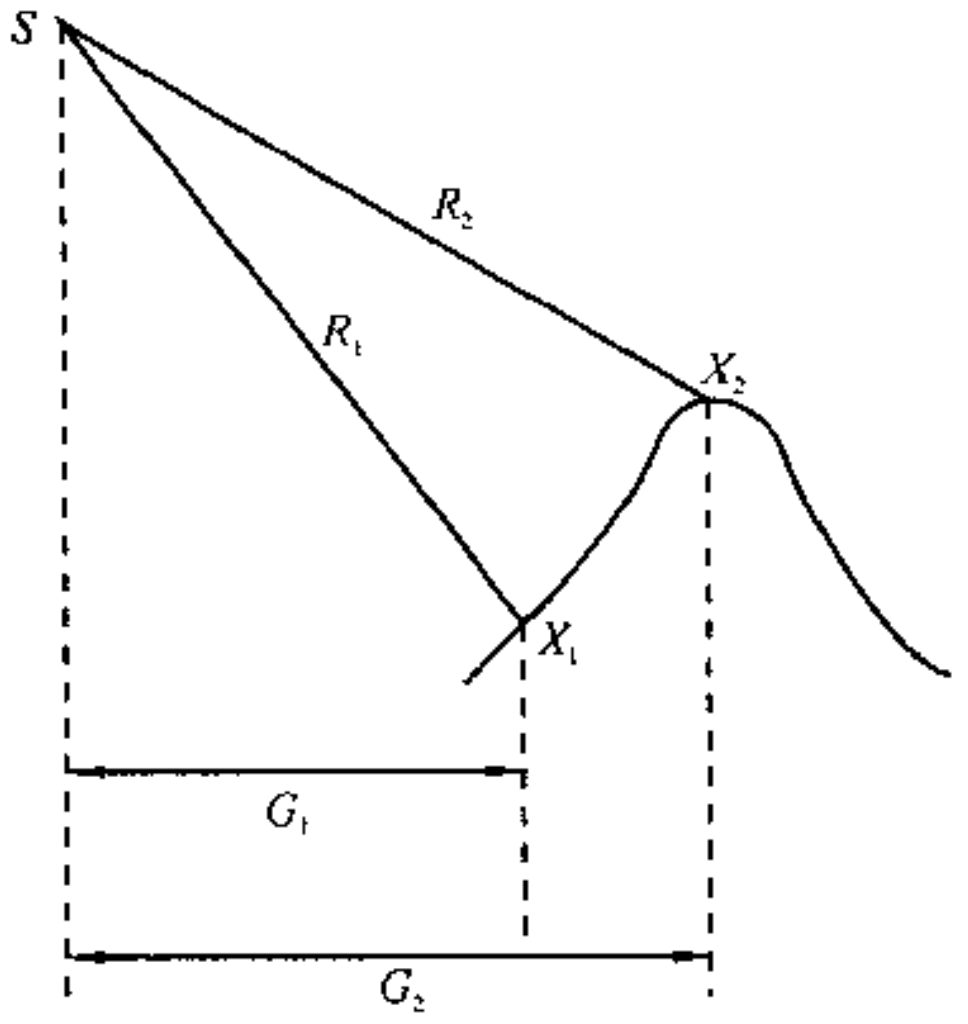



图 4-3-3　叠掩几何条件

地物目标特性数据库包括各种地物在不同雷达参数(波长，极化，入射角等)下的散射特性数据，即 $\sigma$ 和 $\sigma^0$，这些数据可以是实测的经验数据，也可以是用理论模型计算出来的，或者半经验半理论数据。

这里虽没有介绍微波辐射计图像模拟，但通过本节的讨论，对于如何模拟微波辐射计图像，可以设想其基本原理应该是一致的，只是具体公式不一样罢了。

## 第四节　辐射计的校准、定标

微波辐射计通过天线接收地面各种物体的微波辐射信号，这种辐射的不同即温度的不同，辐射计的精度高低主要反映在对不同辐射温度的灵敏度及辐射量度的精确程度上。

辐射到天线上的温度 $T_A$ 通常包括两部分，其一是主瓣贡献 $\alpha_m T_m$，$\alpha_m$ 为主瓣效率，其二是旁瓣贡献 $(1-\alpha_m)T_s$。这里 $T_m$ 和 $T_s$ 事实上是天线主瓣内和旁瓣内的亮度温度的加权平均。所以

$$T_A = \alpha_m T_m + (1-\alpha_m)T_s \tag{4-4-1}$$

$T_A$ 在这里就是天线输入端的温度。由于天线和馈线在信号传输过程中存在衰减，天线本身就有一个传输效率问题，而且天线本身也有温度贡献 $T_0$。如果天线的传输效率为 $\eta$，天线输出端的温度为 $T_a$，则

$$\begin{aligned} T_a &= \eta T_A + (1-\eta)T_0 \\ &= \eta\alpha_m T_m + \eta(1-\alpha_m)T_s + (1-\eta)T_0 \end{aligned} \tag{4-4-2}$$

在辐射计的遥感应用中，需要准确测出 $T_m$。由(4-4-2)有

$$T_m = [T_a - \eta(1-\alpha_m)T_s - (1-\eta)T_0]/(\eta\alpha_m) \tag{4-4-3}$$

可见，$T_m$ 与 $\eta$、$\alpha_m$、$T_a$、$T_s$、$T_0$ 有关。其中 $T_0$ 是天线实际温度，可以通过测量得到，但由于天线周围环境的影响，在 $T_0$ 测量中会有误差。$\alpha_m$ 和 $\eta$ 是天线主瓣效率和辐射效率，在天线设计时通常要使这两个效率较高，因为天线主瓣效率 $\alpha_m$ 越高，旁瓣影响 $T_s$ 越小，$T_m$ 的量测精度就会越高。$T_s$ 是很难精确测定的，只能估计。因此尽可能削弱其影响就显得重要了。天线辐射效率 $\eta$ 越高，天线周围环境的影响也就越小，对 $T_m$ 的量测越有利。$\alpha_m$ 和 $\eta$ 通常可以通过量测得到。

$T_a$ 是天线输出端的总功率，用温度表示，显然在 $T_m$ 的量测中具有重要的作用。辐射计的校准和定标就是要解决 $T_a$ 的量测精度问题，由于校准和定标是要将辐射计的输出电压 $V_0$ 和 $T_a$ 之间的定量关系精确地建立起来，以便提高 $T_a$ 的量测精度进而提高辐射计的精度。目前微波辐射计的绝对精度已可以达到 0.02K。这当中校准和定标是重要的一环。

辐射计的校准和定标的目的是确定辐射计输出电压或输出数据(如图像灰度)与地面目标亮度温度之间的定量关系，它包括了两个基本方面：天线校准和接收机校准。天线校准是要确定天线输出端的温度 $T_a$ 与目标亮度温度 $T_m$ 之间的关系，接收机校准则要确定作为接收机输入端的 $T_a$ 与接收机输出也即辐射计输出 $V_0$ 的关系。以下简要介绍这两个方面的校准。

## 一、天线校准

由(4-4-2)式可知 $T_a$ 与 $T_m$ 的关系，要确定该关系式需要量测天线温度 $T_0$、天线主瓣效率 $\alpha_m$ 和天线辐射效率 $\eta$，并对天线旁瓣贡献 $T_s$ 进行估计。这些量的量测和估计，直接关系到天线校准的精度和辐射计定标的精度。

天线主瓣效率 $\alpha_m$ 即第二章所介绍的主波束效率 $\eta_m$。由(2-3-6)、(2-3-2)和(2-3-3)式，可知

$$\alpha_m = \frac{\iint_{\text{主瓣}} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega} \tag{4-4-4}$$

而天线辐射效率 $\eta$ 即第二章(2-3-24)式中的 $\eta_l$，由于天线最大增益 $G_0 = \eta D_0$，$D_0$ 为天线最大方向系数，于是

$$\eta = G_0/D_0 = 4\pi G_0/\iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \tag{4-4-5}$$

根据(4-4-4)和(4-4-5)式，可以得到

$$\alpha_m = (\eta/(4\pi G_0))\iint_{4\pi} F_n(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega \tag{4-4-6}$$

由于 $G_0$ 和方向图 $F_n(\theta,\varphi)$ 可以根据天线测量的资料得到，只要量测出 $\eta$，就可以计算出 $\alpha_m$。

量测天线辐射效率有几种方法，其中一种是采用冷负载，如温度 $T_B$ 为 77.36K 的液氮，将天线靠近和对准一个充满液氮的多孔吸收材料箱，这种吸收材料反射系数很小，是一个良好的吸收体，于是微波辐射计天线温度为

$$T_a = \eta T_B + (1-\eta)T_0 \tag{4-4-7}$$

这样，可以计算出天线辐射效率

$$\eta = (T_0 - T_a)/(T_0 - T_B) \tag{4-4-8}$$

在天线口径较大，比如超过 1 平方米时，则量测方法是将天线置于良导体制成的金属斗内，天线对准天顶方向，以接受大气辐射，根据气象参数和大气辐射公式，计算大气辐射温度，然后计算 $\eta$。

通过量测、计算，得到 $\eta$，进而计算 $\alpha_m$，加上量测 $T_a$ 和 $T_0$，以及对 $T_s$ 的估算，就为确定 $T_a$ 与 $T_m$ 的关系创造了条件。

## 二、接收机的校准

在完成天线校准，确定了天线输出端温度 $T_a$ 与目标亮度温度 $T_m$ 之后，需要进行接收机的校准，以确定辐射计输出电压 $V_0$ 与天线输出端温度 $T_a$ 的关系，这样就能将 $V_0$ 与 $T_m$ 的关系式建立起来，达到定标的目的。

对于线性系统的辐射计接收机，由于

$$V_0 = aT_a + b \tag{4-4-9}$$

需要测定系数 $a$、$b$。一般将辐射计分别与热校准噪声源和冷校准噪声源相接，因为噪声源的温度已知，由联立方程

$$\begin{cases} V_0^h = aT_h + b \\ V_0^c = aT_c + b \end{cases} \tag{4-4-10}$$

式中 $T_h$ 和 $T_c$ 为热噪声源和冷噪声源的温度，解方程即可得到系数 $a$、$b$。

考虑到天线输出端的传输线与接收机的连接事实上存在阻抗失配，标准噪声源与接收机的连接也存在阻抗失配，由阻抗失配引起反射，在具体测定系数 $a$、$b$ 时，需要作修正，即消除阻抗失配的影响。

在量测计算出系数 $a$、$b$ 之后，就解决了接收机校准问题。

**思考题：**

1. 试分析定标与校准的关系，并以辐射计图像为例加以说明。
2. 试分析标准校准器在校准中的作用。
3. 内部校准和外部校准哪种方法更好？
4. 试比较微波图像与可见光、红外图像的校准和定标方法。
5. 若作微波辐射什图像模拟，应该如何进行？
6. 雷达图像模拟中“标准地距图像”的模拟和“斜距图像”模拟方法有什么不同？
7. 图像模拟中的基础数据库在模拟中的作用是什么？

# 第五章　微波图像的几何校正

本章主要讨论侧视雷达图像的几何形变和几何校正问题。至于微波扫描仪图像处理问题，则可以参照雷达图像的处理方法进行几何校正。事实上微波辐射计图像的处理与多光谱扫描仪（如 *MSS*，*TM*）图像的几何处理方法是相同的。

## 第一节　侧视雷达图像的几何变形分析

### 一、斜距投影变形

侧视雷达属斜距投影类型传感器，如图 5-1-1 所示，$s$ 为雷达天线中心，$s_y$ 为雷达成像面。地物点 $P$ 的图像坐标 $y_p$ 是雷达波束扫描方向的图像坐标，它取决于斜距 $R_p$ 以及成像比例尺 $\lambda$，

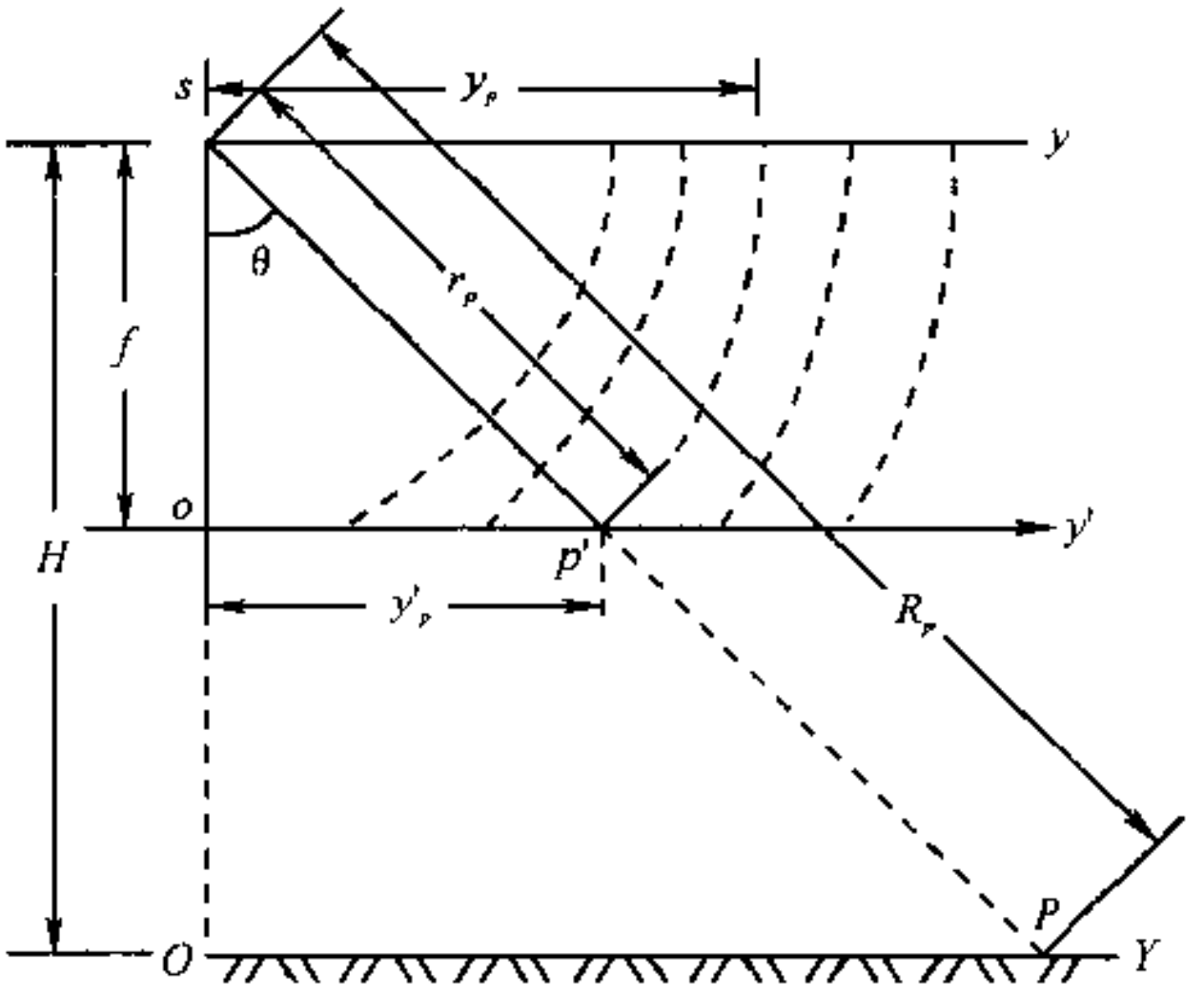



图 5-1-1　斜距投影变形

$$\lambda = \frac{2v}{C} = \frac{f}{H} \tag{5-1-1}$$

这里，$v$ 是雷达成像阴极射线管上亮点的扫描速度，$C$ 为雷达波在空间的传

播速度，$H$ 是传感器高度，$f$ 为等效焦距。

由于有

$$R_p = H/\cos\theta \tag{5-1-2}$$

于是

$$y_p = \lambda R_p = \lambda H/\cos\theta = f/\cos\theta \tag{5-1-3}$$

此外，地面点 $P$ 在等效的中心投影图像（即在估计出等效焦距 $f$ 之后可以设想有一个焦距为 $f$ 的摄影机与侧视雷达同时工作，获得同一地区的图像）$oy'$ 上的成像点 $p'$ 的坐标 $y_p'$ 可表达为

$$y_p' = f\mathrm{tg}\theta \tag{5-1-4}$$

从(5-1-3)及(5-1-4)式可推导出雷达图像坐标和等效中心投影图像坐标间的转换关系，即

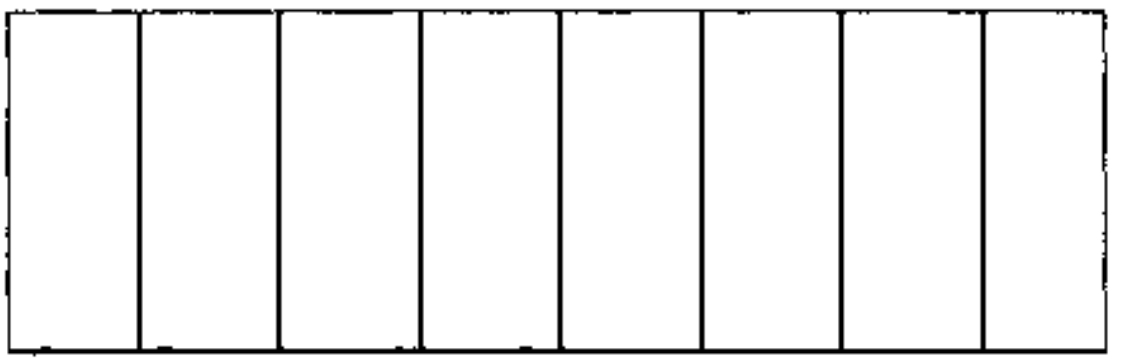
$$y_p = (y_p'/\mathrm{tg}\theta)/\cos\theta = y_p'/\sin\theta = y_p'/\sin[\mathrm{arctg}(y_p'/f)] \tag{5-1-5}$$

$$y_p' = f\sin\theta/\cos\theta = y_p\sin\theta = y_p\sin[\arccos(f/y_p)] \tag{5-1-6}$$

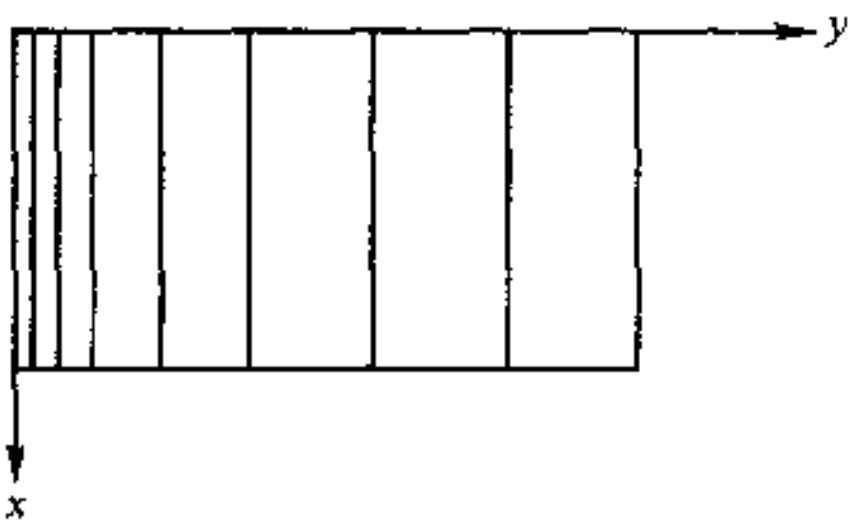
于是，斜距投影的变形误差为

$$\mathrm{d}y = y_p - y_p' = f(1/\cos\theta - \mathrm{tg}\theta) = y_p|1 - \sin[\arccos(f/y_p)]| \tag{5-1-7}$$

斜距变形的图形变化如图 5-1-2 所示。



(a)无变形图形




(b)斜距投影变形图形

图 5-1-2　成像几何形态引起的图像变形

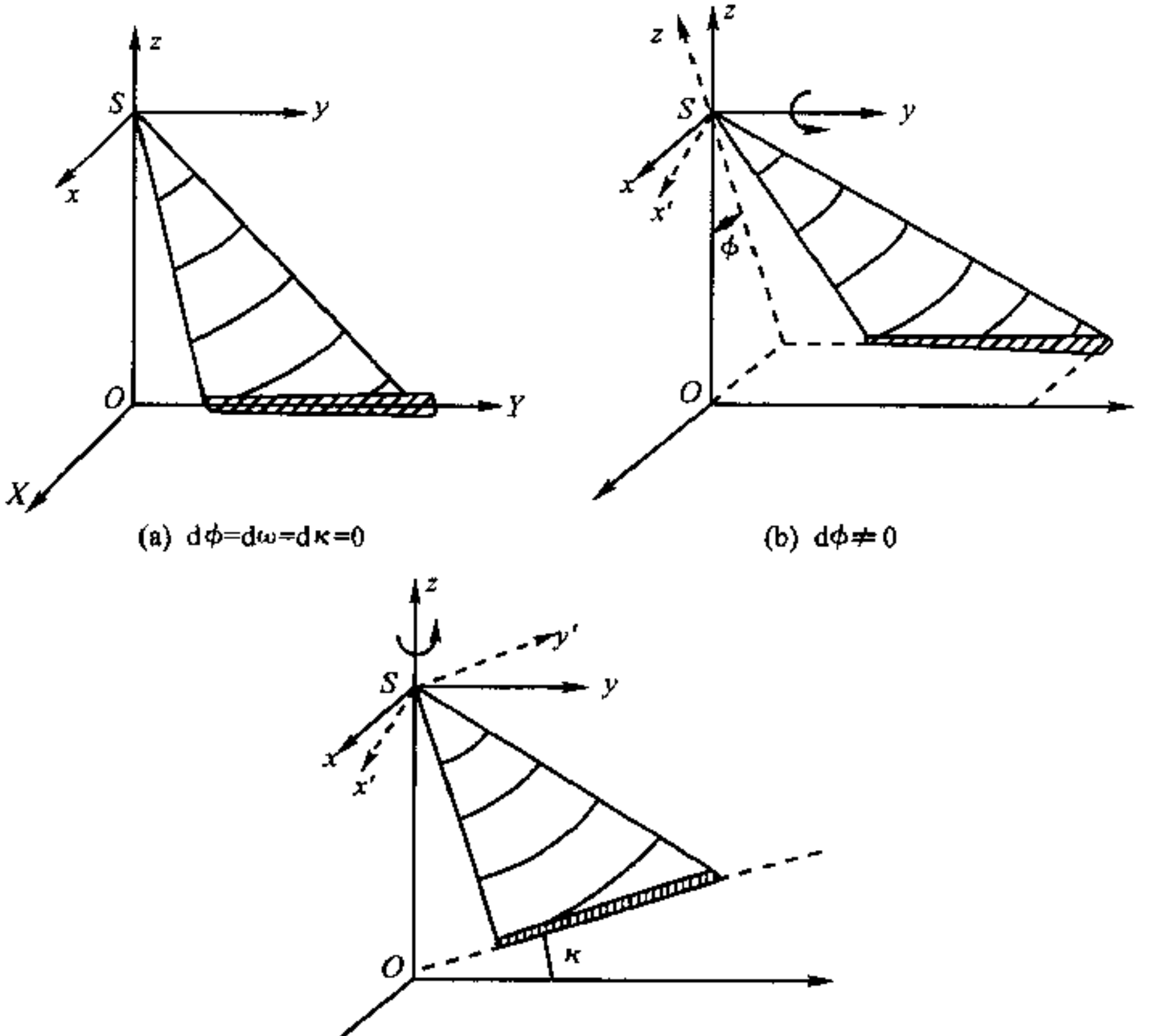
## 二、外方位元素变化的影响

传感器的外方位元素，即传感器成像时的位置（$X_s$，$Y_s$，$Z_s$）和姿态角

$(\varphi,\omega,\kappa)$，而对侧视雷达而言，还应加上飞行速度$(v_x,v_y,v_z)$。当外方位元素偏离标准位置而出现变动时，就会产生变形。这种变形的影响一般用地物点的图像坐标误差来表达，并可以通过传感器的构像方程来进行分析。

对于侧视雷达，其外方位元素对图像变形的影响比较复杂，在此仅作如下分析。

对于真实孔径侧视雷达，它的侧向图像坐标取决于雷达天线中心到地物点之间的斜距。一般说来，传感器围绕其中心产生姿态角的变化时，并不影响斜距的变化，但是由于雷达发射波沿侧向呈现细长波瓣状(如图 5-1-3(a))，当雷达天线的姿态角发生变化时，其航向倾角 $d\varphi$ 和方位旋角 $d\kappa$ 将使雷达波瓣产生沿航向平移和指向的旋转，引起雷达对地物点扫描时间上的偏移和斜距的变化，因而造成图像变形。而旁向倾角 $d\omega$ 不会改变斜距，只是使照射带的范围发生变化。



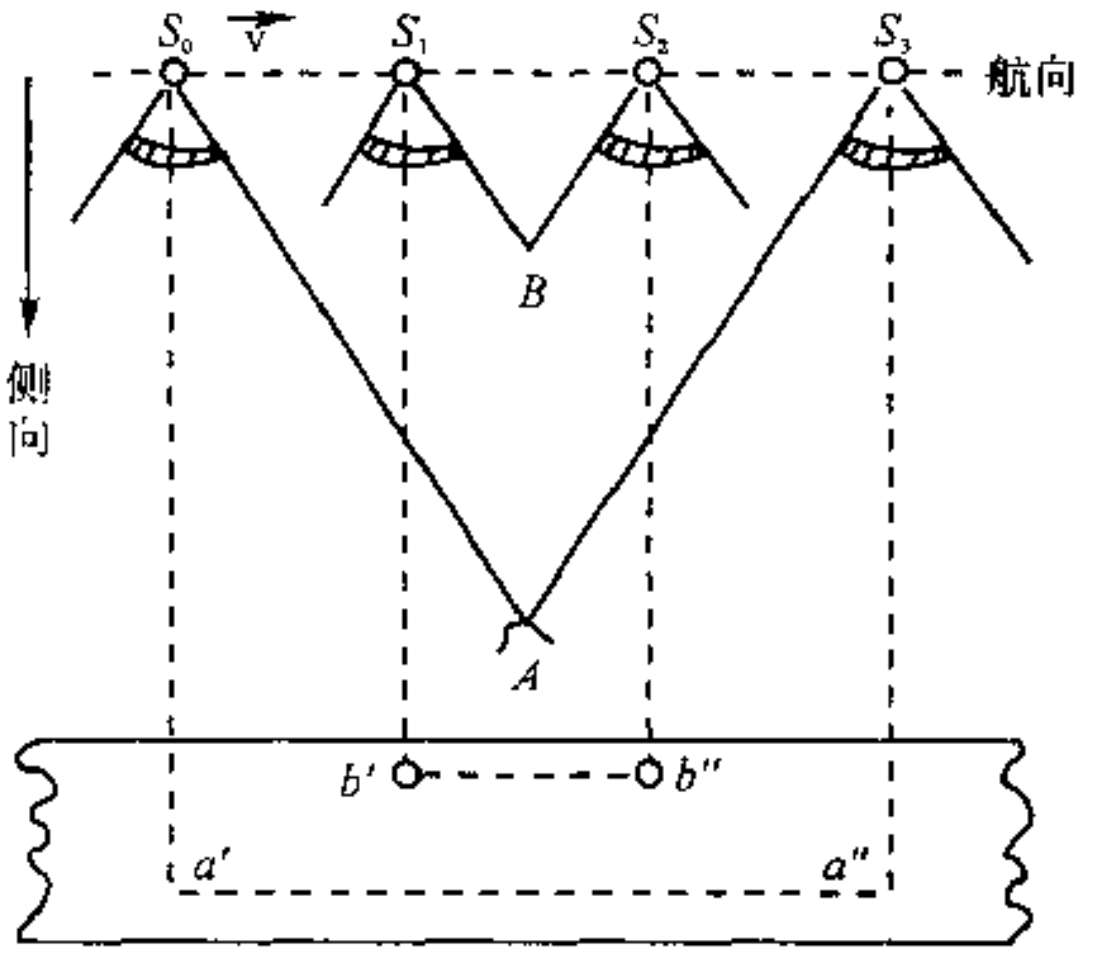

(a) $d\phi=d\omega=d\kappa=0$

(b) $d\phi\neq 0$

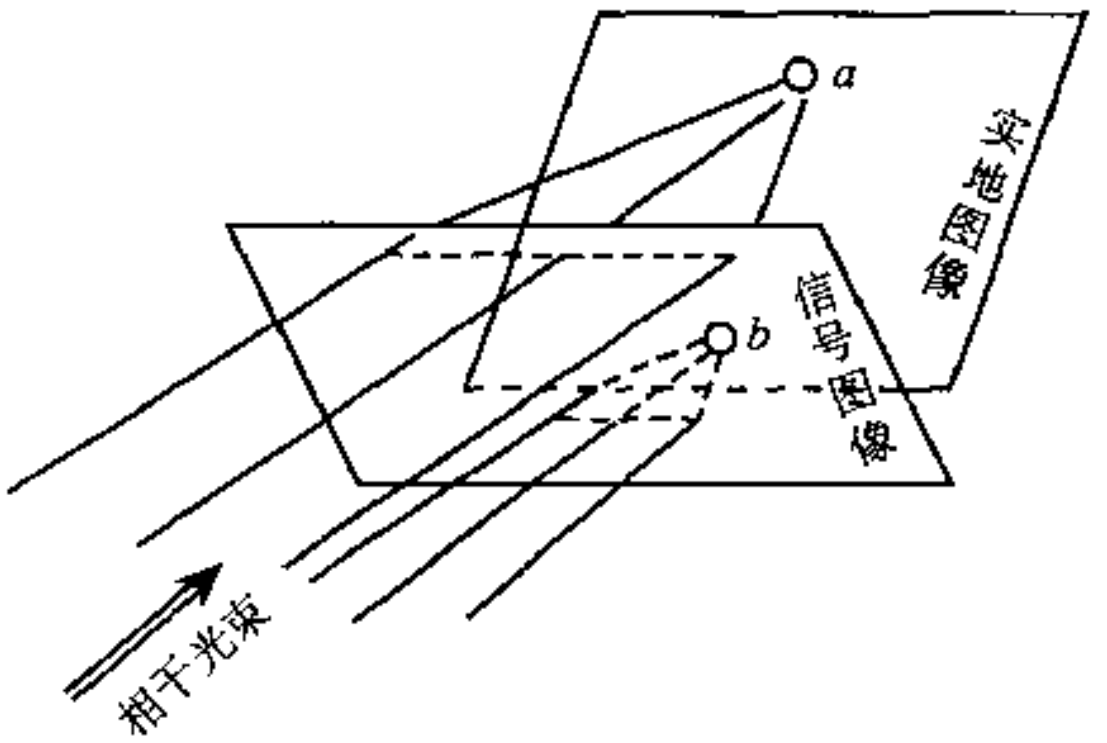
(c) $d\kappa\neq 0$

图 5-1-3　真实孔径侧视雷达姿态变化的影响((1))

对于合成孔径侧视雷达，其成像过程可分为两个阶段。首先，利用雷达相干波产生全息的雷达信号图像，如图 5-1-4 所示，然后通过光学(或数字)解码系统，将雷达信号变为实地图像(见图 5-1-4)。信号图像上记录的是一系列衍射条斑，如 $a'a''$、$b'b''$等，每一条斑对应实地一个点(或一组等斜距的点)，条斑中虚线段的长度及间隔在解码后决定了像点在图像上的位置。当雷达运载工具的航速矢量 $v$ 在运行中发生变化时，条斑的形状会发生改变，从而引起图像变形。所以对于合成孔径侧视雷达，应当把传感器的航行速度 $v=(v_x, v_y, v_z)^{\mathrm{T}}$ 也当作成像外方位元素来看待，并顾及它对图像变形的影响。




(a)信号图像的形成




(b)实地图像的形成

**图 5-1-4　合成孔径侧视雷达的成像物理过程([1])**

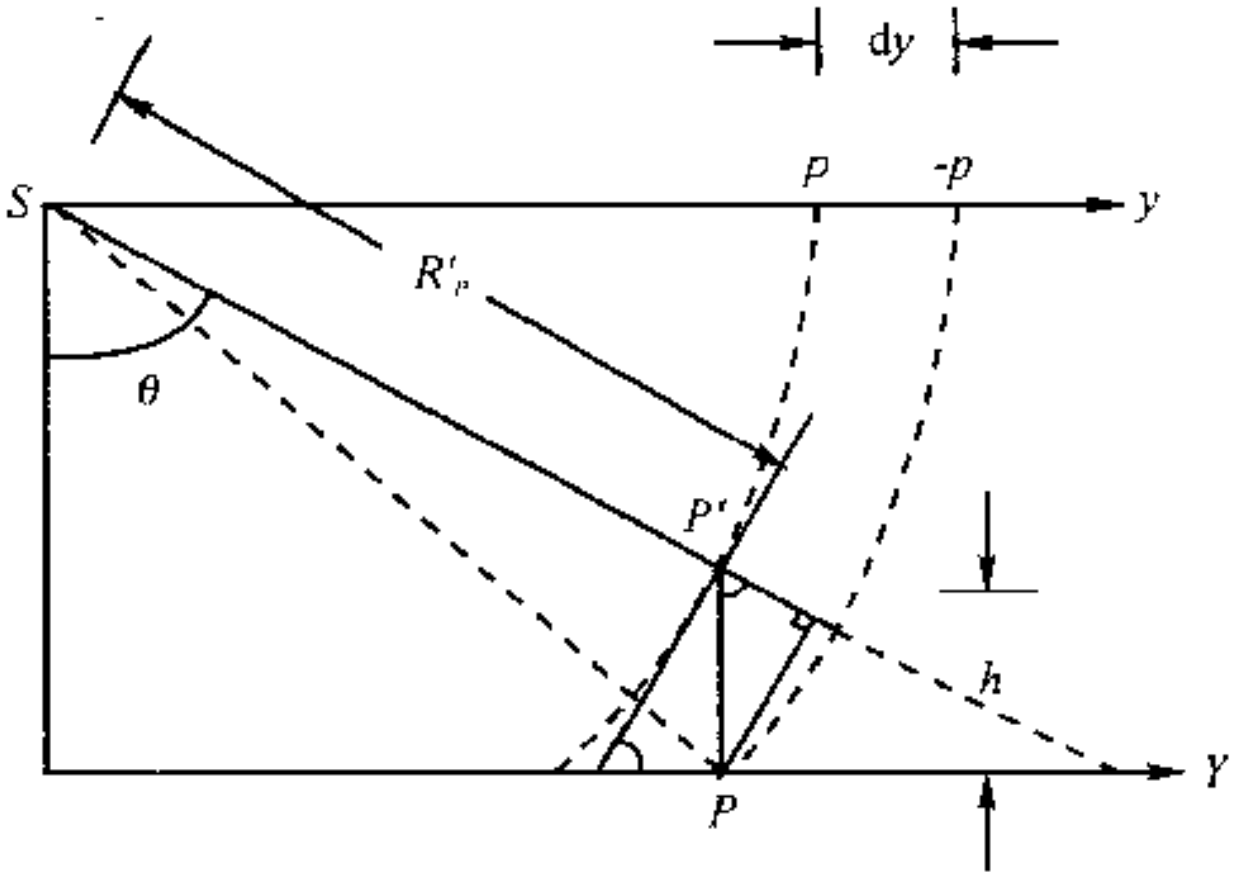



图 5-1-5　雷达图像的地形起伏影响

## 三、地形起伏的影响

地形起伏在雷达图像上引起的像点位移情况如图 5-1-5 所示。设地面点 $P'$ 上的高程为 $h$，其图像坐标为 $y_{p'}=\lambda R_p$，$P$ 是 $P'$ 点在地面基准面上的投影点，其斜距可近似地表达为

$$R_p \approx R_{p'} + h\cos\theta \tag{5-1-8}$$

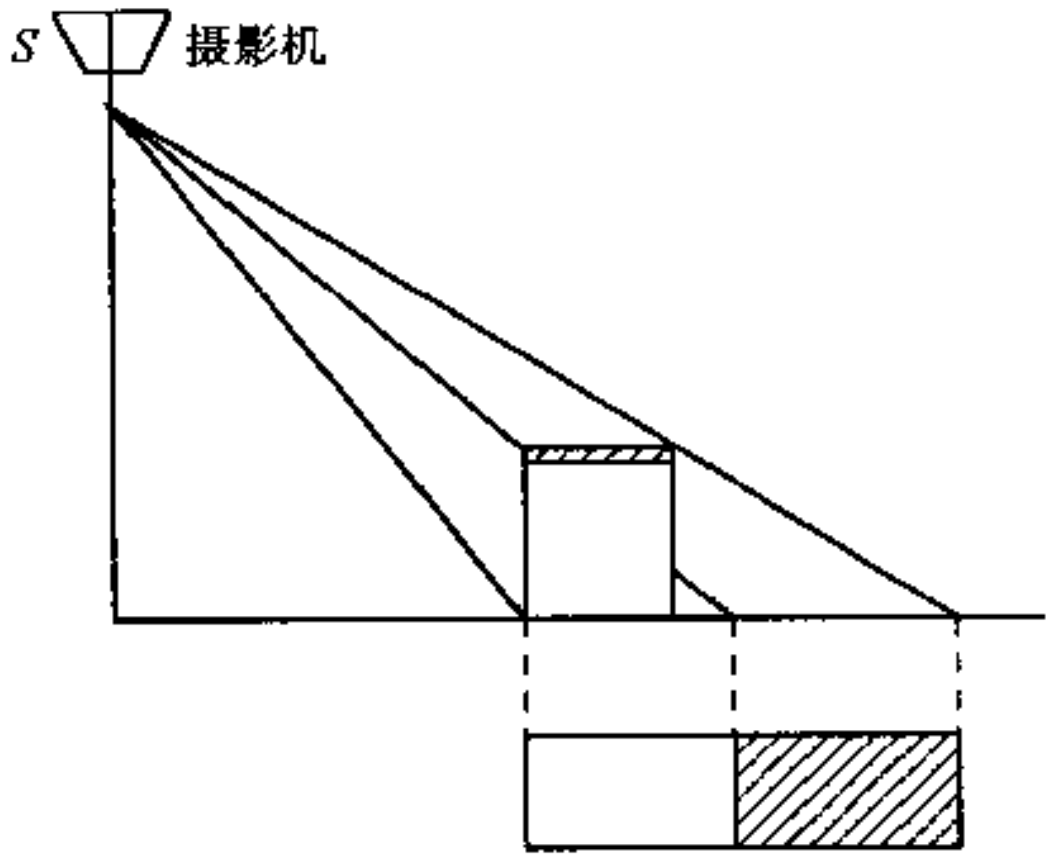
这里 $\theta$ 是 $P'$ 点的成像角。于是相应的因地形起伏产生的位移为

$$\mathrm{d}y = y_{p'} - y_p \approx -\lambda h\cos\theta \tag{5-1-9}$$

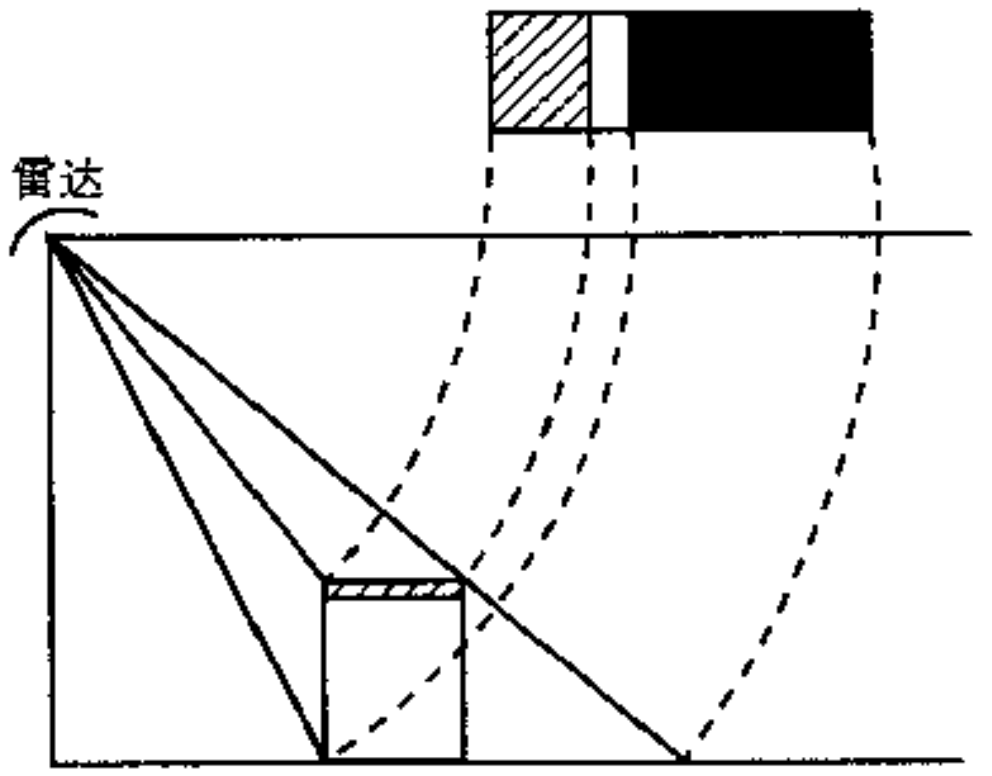
图 5-1-6 是地形起伏对中心投影图像和斜距投影图像影响的对比，地形起伏在中心投影图像上造成的像点位移是朝背离原点方向变动的，而在雷达图像上则向原点方向变动。这种投影差相反的特点，将使得对雷达图像进行立体观测时，看到的是反立体。此外，高出地面物体的雷达图像还可能带有“阴影”，远景地物可能被近景地物的阴影所覆盖，这也是与中心投影图像不同之处。

## 四、地球曲率的影响

地球曲率引起的像点位移类似于地形起伏引起的像点位移。只要把地球表面上的点(如图 5-1-7 中的 $P$ 点)到地球切平面的正射投影距离 $h$ 看作是一种地形起伏，就可以利用前面所介绍的像点位移公式(5-1-9)来估计地球曲率所引起的像点位移。也就是说，只要把(5-1-9)式中的高差符号 $h$ 用 $\Delta h$ 的表达式来代替，便可获得因地球曲率产生的像点位移公式。因此下面将只讨论 $\Delta h$ 的表达式。如图 5-1-7 所示，设地面点到传感器与地心的连线的投影距离为 $D$，又设地球的半径为 $R_0$，则根据圆的直径与弦线交




(a)中心投影情况




(b)斜距投影情况

**图 5-1-6　地形起伏影响的对比**

割线段间的数学关系可得

$$D^2 = (2R_0 - \Delta h)\Delta h \tag{5-1-10}$$

考虑到 $\Delta h$ 相对于 $2R_0$ 是一个很小的数值，对上式简化后可得

$$\Delta h \approx D/2R_0 \tag{5-1-11}$$

把 $\Delta h$ 代入前述有关式中 $h$ 的位置时，需要反号，因为地球曲面总是低于切平面。

由于对中心投影传感器情况有

$$\begin{bmatrix} h_x \\ h_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta h_x \\ -\Delta h_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{2R}\begin{bmatrix} D_x^2 \\ D_y^2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{2R_0}\frac{H^2}{f^2}\begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} \tag{5-1-12}$$

式中 $D_x = X_p - X_s$，$D_y = Y_p - Y_s$，$H = -(Z_p - Z_s)$。

故对侧视雷达斜距投影，有

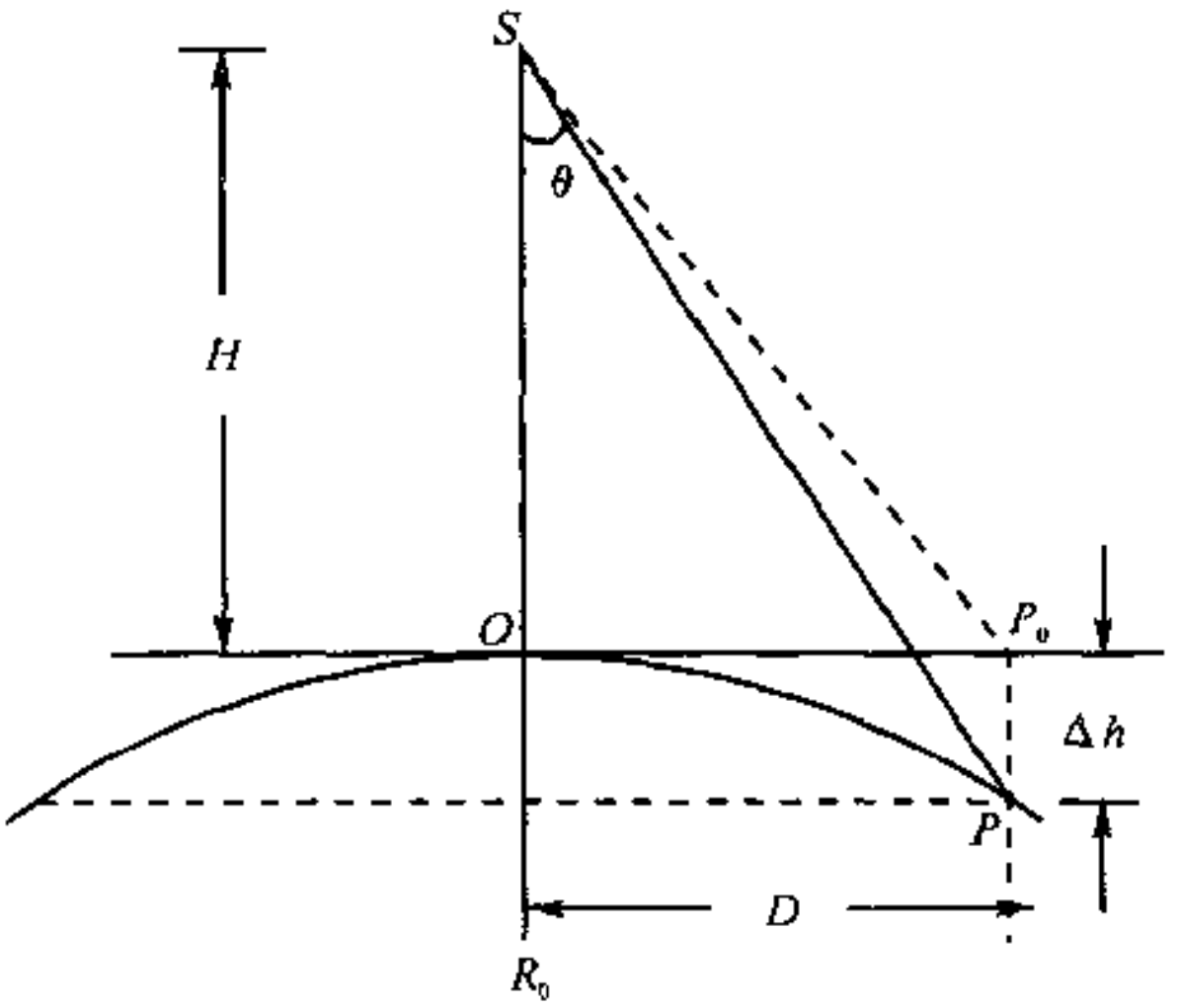



图 5-1-7　地球曲率的影响

$$h_y = -\frac{H^2}{2R_0}\frac{y^2}{f^2} = -\frac{H^2}{2R_0}(\mathrm{tg}\theta)^2 \qquad (5\text{-}1\text{-}13)$$

式中 $\theta$ 是相应于地面点 $P$ 的仰角。

## 五、大气折射的影响

对于光波或电磁波的传播而言，大气层并非一个均匀的介质，因为它的密度随离地面的高度增加而递减，所以光波或电磁波在大气层中传播的折射率也随高度而变，这样使电磁波传播的路径不是一条直线而是一条曲线，故而引起了像点位移。这就是大气折射的影响。

侧视雷达图像是斜距投影，雷达电磁波在大气中传播时，同样会因大气折射率随高度的递减而产生路径的弯曲。但大气折射对图像的影响不是通过电磁波传播方向的改变，面是通过电磁波传播路径长度的改变，以及电磁波传播时间的改变来起作用的。如图 5-1-8 所示，在无大气折射影响下，地面点 $P$ 的斜距为 $R$，而有大气折射时，电磁波则通过弧距 $R_c$ 到达 $P$ 点，其等效的斜距为 $R' = R_c$，从而使图像点从 $p$ 位移到 $p'$，即 $\Delta y = pp'$。显然，由于雷达波路径长度改变引起的像点位移误差为

$$\Delta y = \lambda(R' - R) \qquad (5\text{-}1\text{-}14)$$

其中，路径的长度改变 $\Delta R = (R' - R)$ 可用弧长 $R_c$ 与弧长 $R$ 之差来表达。设弧线 $R_c$ 的曲率半径为 $\delta$，则

$$\Delta R = R_c - 2\delta\sin(R_c/2\delta) \approx \frac{1}{24}\frac{R_c^3}{\delta^2} \qquad (5\text{-}1\text{-}15)$$

式中，$\delta$ 可用下式来估计：

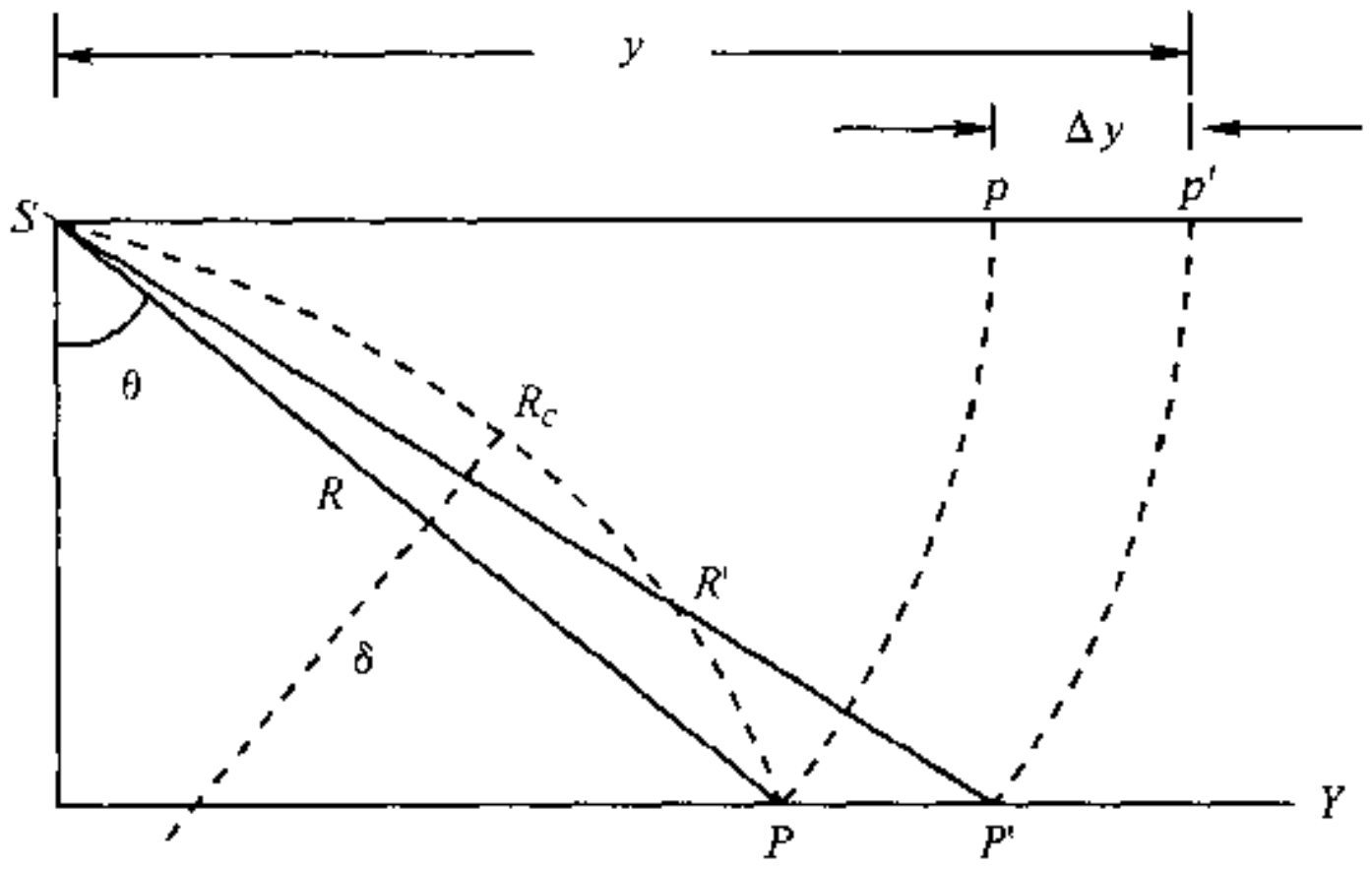



图 5-1-8　大气折射对雷达图像的影响

$$\delta = \frac{n}{|\partial n/\partial H| \sin\theta} \tag{5-1-16}$$

其中，$n=1.00035$，是海平面上的大气折射系数；

$\theta$ 为 $P$ 点的成像角，$\sin\theta \approx f/y$；

$\partial n/\partial H = -4\times10^{-8}$，是折射率随高度变化之梯度。

把式(5-1-16)和式(5-1-15)代入式(5-1-14)后可得像点位移的估计公式(同时考虑到 $y=\lambda R_t$；$\lambda=f/H$)，即式(5-1-17)。

$$\Delta y = \frac{H^2}{24}\left(\frac{4\times10^{-8}}{1.00035}\right)^2 y \tag{5-1-17}$$

大气折射对电磁波传播的影响还体现在传播时间的增加上，由此引起的斜距变化为

$$\Delta R_t = R'(n'-1) \tag{5-1-18}$$

其中，$n' \approx n + (H/2)(\partial n/\partial H)$，$n'$ 为大气层中的平均折射系数。

由此引起的像点位移为

$$\Delta y = \lambda \Delta R_t \approx (0.00035 - 2\times10^{-8}H)y \tag{5-1-19}$$

通过按(5-1-17)式和(5-1-19)式的比较计算，可发现由大气折射引起之路程变化的影响极小，可忽略不计。而时间变化的影响，不能忽略，需加以改正。

### 六、地球自转的影响

在静态传感器(例如常规框摄影机)成像的情况下，地球自转不会引起图像变形，因为其整幅图像是在瞬间一次曝光成像的。地球自转主要是对动态传感器的图像产生变形影响，特别是对卫星遥感图像。当卫星由北向南运行的同时，地球表面也在由西向东自转，由于卫星图像每条扫描线的成

像时间不同，因而造成扫描线在地面上的投影依次向西平移，最终使得图像发生扭曲。

图 5-1-9 显示了地球静止的图像（*oncba*）与地球自转的图像（*onc′b′a′*）在地面上投影的情况。由图可见，由于地球自转的影响，产生了图像底边中

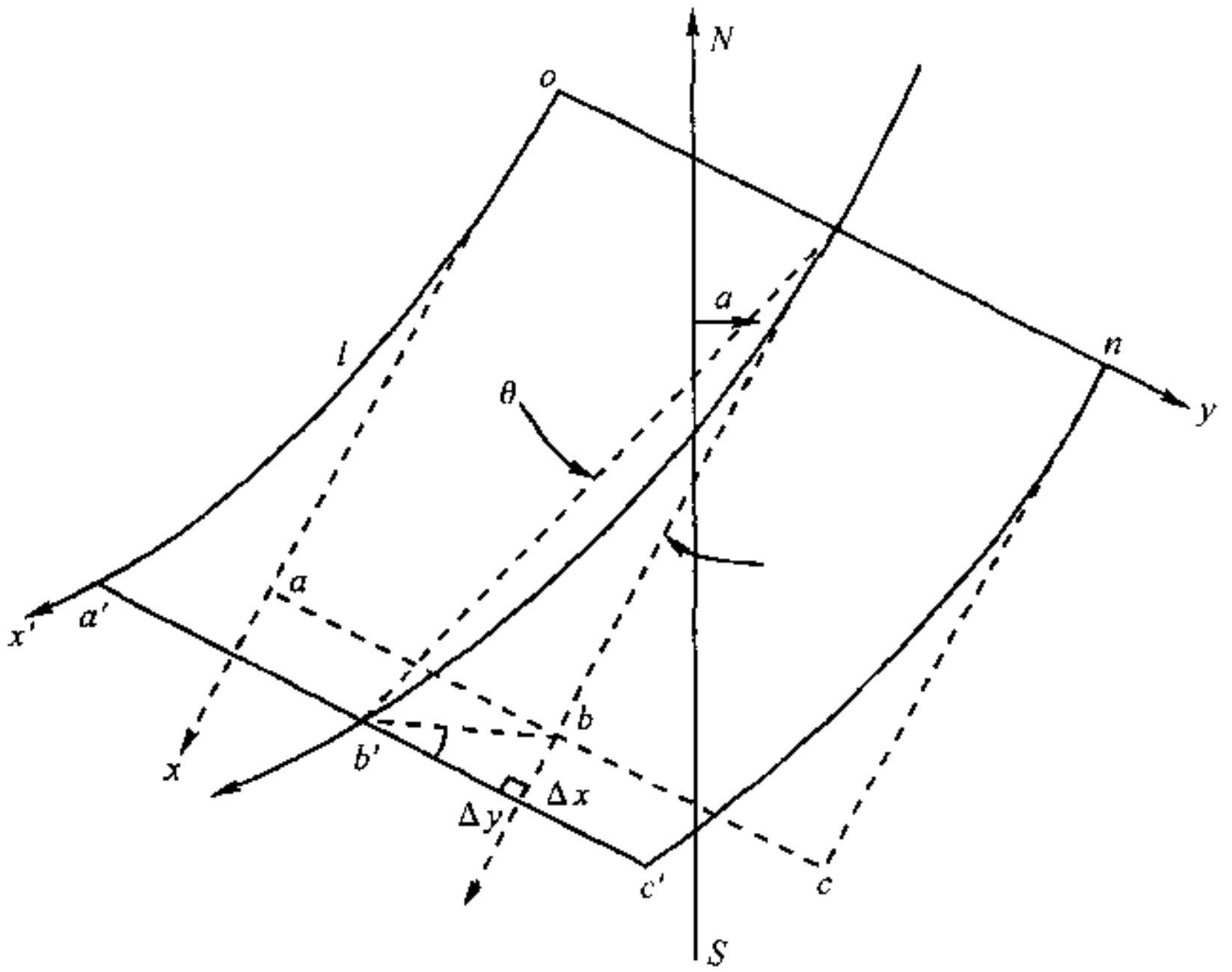



**图 5-1-9　地球自转的影响**

点的坐标位移 $\Delta x$ 和 $\Delta y$，以及平均航偏角 $\theta$。显然

$$\begin{cases} \Delta x = bb' \sin\alpha \cdot \lambda_x \\ \Delta y = bb' \cos\alpha \cdot \lambda_y \\ \theta = \Delta y / l \end{cases} \tag{5-1-20}$$

式中 $bb'$ 是地球自转引起的图像底边的中点的地面偏移；$\alpha$ 为卫星运行到图像中心点位置时的航向角；$l$ 为图像 $x$ 方向边长；$\lambda_x$ 和 $\lambda_y$ 是图像 $x$ 和 $y$ 方向的比例尺。

首先求 $bb'$。

设卫星从图像首行到末行的运行时间为 $t$，则

$$t = \frac{(l/\lambda_x)}{R_e \cdot \omega_s} \tag{5-1-21}$$

式中，$R_e$ 为地球平均曲率半径；$\omega_s$ 为卫星沿轨道面运行角速度。于是，

$$bb' = (R_e \cdot \cos\varphi) \cdot \omega_s \cdot t = (1/\lambda_x) \cdot (\omega_e/\omega_s) \cdot \cos\varphi \tag{5-1-22}$$

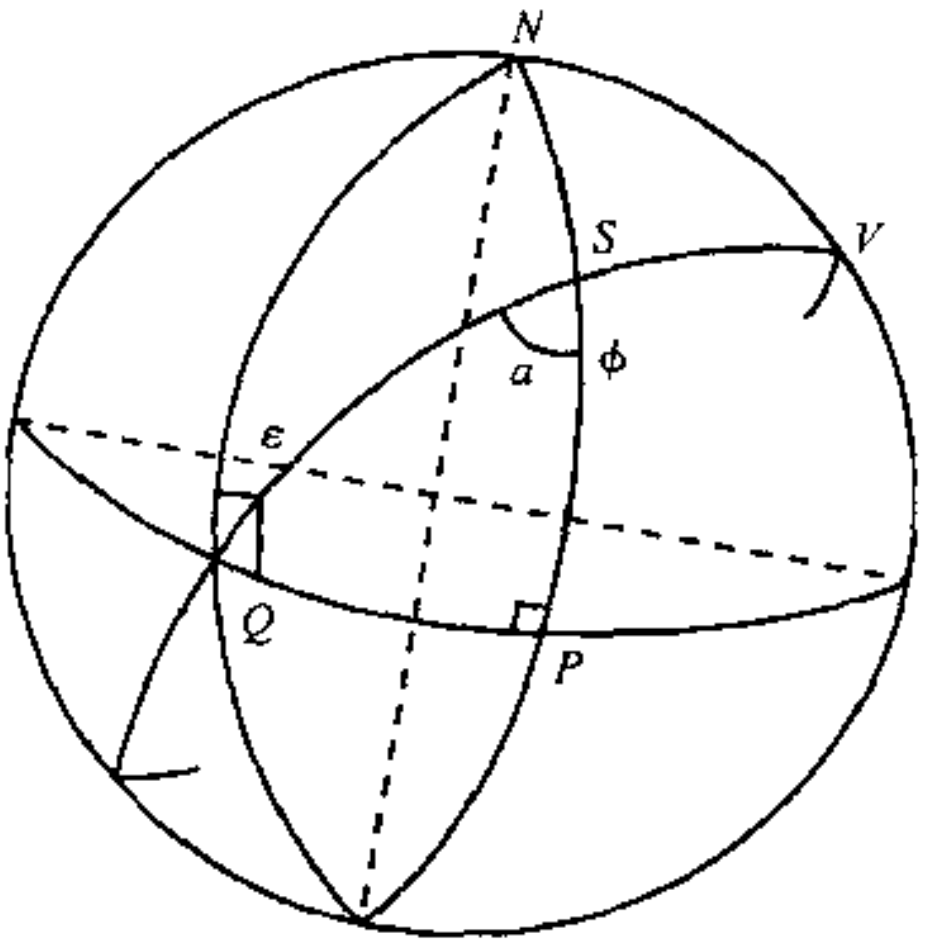



图 5-1-10　球面三角形 $\Delta SQP$

其中 $\omega_e$ 是地球自转角速度；$\varphi$ 是图像底边中点的地理纬度。

然后需要确定 $\alpha$。

设卫星轨道面的偏角为 $\epsilon$，则由图 5-1-10 的球面三角形 $\Delta SQP$，可见：

$$\sin\alpha = \frac{\sin\epsilon}{\cos\varphi} \tag{5-1-23}$$

故而

$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{\cos^2\varphi - \sin^2\epsilon}}{\cos\varphi} \tag{5-1-24}$$

将(5-1-22)式、(5-1-23)式和(5-1-24)式代入(5-1-20)式，并令 $l = x$（或 $y$），则得地球自转引起的图像变形误差公式：

$$\begin{cases} \Delta x = (\omega_e/\omega_s) \cdot \sin\epsilon \cdot x \\ \Delta y = (\lambda_y/\lambda_x) \cdot (\omega_e/\omega_s) \cdot \sqrt{\cos^2\varphi - \sin^2\epsilon} \cdot y \\ \theta = (\lambda_y/\lambda_x) \cdot (\omega_e/\omega_s) \cdot \sqrt{\cos^2\varphi - \sin^2\epsilon} \end{cases} \tag{5-1-25}$$

## 第二节　侧视雷达图像的构像方程

侧视雷达有真实孔径雷达和合成孔径(相干)雷达两种。其工作方式又分平面扫描和圆锥扫描(图 5-2-2)等几种。因此，对它们的构像方程亦有不同的表达。

当侧视雷达按回波向平面方式工作时，其成像几何形态如图 5-2-1 所

示，其中 $S-U,V,W$ 为传感器坐标系，其 $U$ 轴指向航行方向，$V$ 轴指向侧向扫描方向，$S_y$ 代表雷达图像($X=U=0$)；$oy'$代表等效的框幅摄影机图像，其等效焦距 $f$ 可由(5-2-1)式确定，即

$$f = 2v \cdot H/C \tag{5-2-1}$$

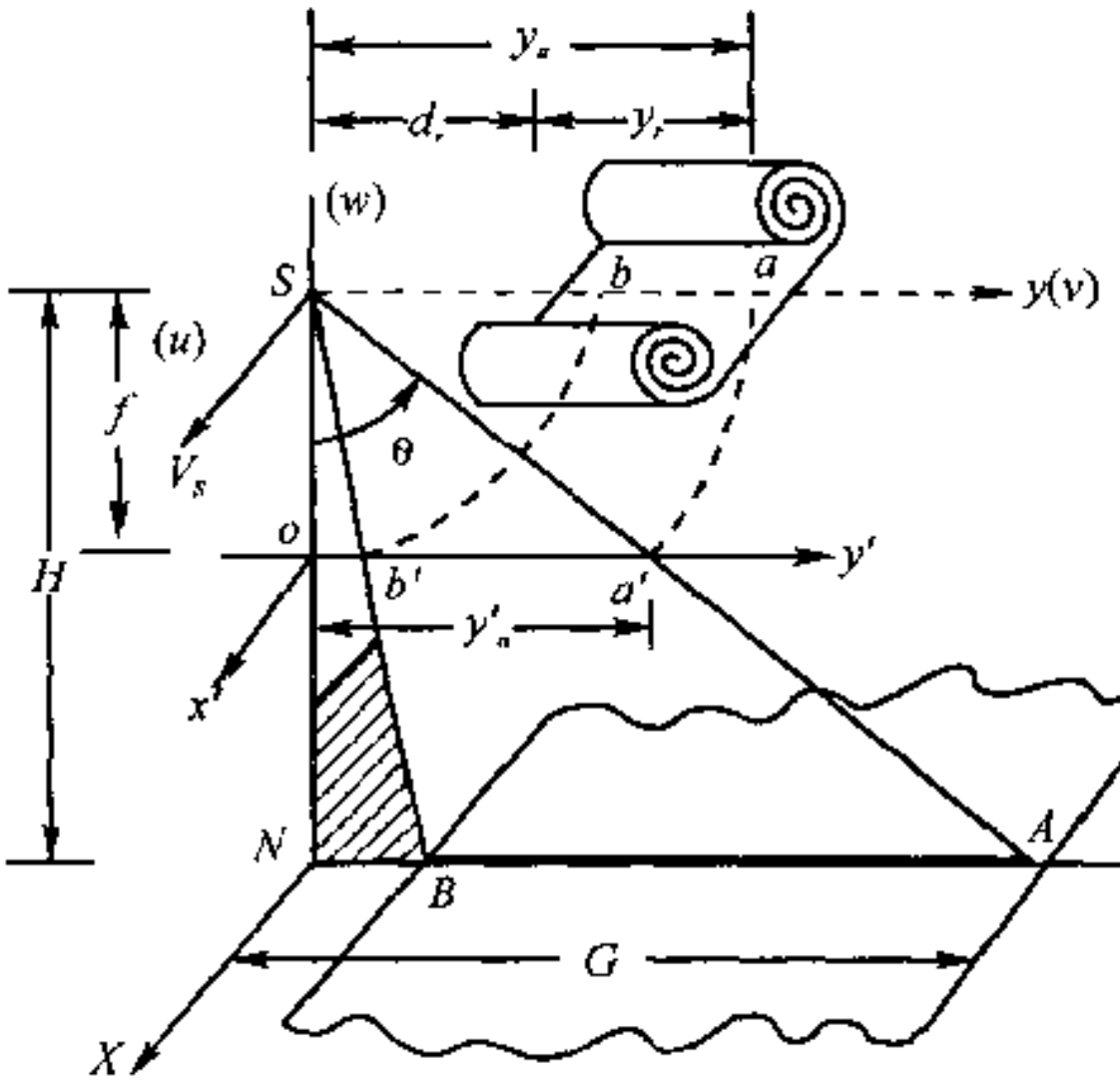



图 5-2-1　侧视雷达的成像几何形态

对于任一地物点 $A$，其雷达图像坐标和等效框幅图像坐标分别为 $y_a$ 和 $y_a'$，它们之间的关系为

$$y_a' = [Sa^2 - f^2]^{1/2} = [y_a^2 - f^2]^{1/2} \tag{5-2-2}$$

然而，在雷达图像上实际可量测的坐标为 $y_r = ba$。其中 $b$ 为 $y$ 坐标量测原点。它是雷达成像"死区"$NB$ 的端点 $B$ 的成像点；其对应的雷达图像坐标值 $d_r$ 称为雷达成像阴极射线管亮点扫描的拂掠延迟，这是一个仪器常数。

$$d_r = (f/H)SB \approx f \tag{5-2-3}$$

于是，(5-2-2)式可表达为

$$y_a' = [(d_r + y_r)^2 - f^2]^{1/2} \tag{5-2-4}$$

进而，可以依据上述原理得传感器坐标系统中 $A$ 点的坐标为

$$[u_p, v_p, w_p] = [0, ((d_r + y_r)^2 - f^2)^{1/2}, -f]\lambda_p \tag{5-2-5}$$

$$\lambda_p = H/f = C/2v \tag{5-2-6}$$

其中，$C$、$v$ 的含义与(5-1-1)式中的 $C$、$v$ 的含义相同。

侧视雷达的构像方程为

$$0 = -f\frac{(X)}{(Z)}$$

$$\sqrt{(d_r + y_r)^2 - f^2} = -f\frac{(Y)}{(Z)} \tag{5-2-7}$$

其中$(X)$、$(Y)$、$(Z)$的表达式与框幅图像共线方程中的表达式相同,即

$$\begin{cases} (X) = a_{11}(X_p - X_s) + a_{21}(Y_p - Y_s) + a_{31}(Z_p - Z_s) \\ (Y) = a_{12}(X_p - X_s) + a_{22}(Y_p - Y_s) + a_{32}(Z_p - Z_s) \\ (Z) = a_{13}(X_p - X_s) + a_{23}(Y_p - Y_s) + a_{33}(Z_p - Z_s) \end{cases} \tag{5-2-8}$$

这里,$a_{ij}$分别为

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_{12} &= -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_{13} &= -\sin\varphi\cos\omega \\ a_{21} &= \cos\omega\sin\kappa \\ a_{22} &= \cos\omega\cos\kappa \\ a_{23} &= -\sin\omega \\ a_{31} &= \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_{32} &= -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_{33} &= \cos\varphi\cos\omega \end{aligned}$$

对于合成孔径雷达,由于其成像过程是以雷达相对于地物点的运行速度为基础的(参见图 5-1-4),此时,由(5-2-8)式表达的方向余弦已不能反映雷达成像几何的实质,而需要重新定义。可令传感器坐标系三轴的单位向量为$\vec{i},\vec{j},\vec{k}$,并定义为

$$\begin{cases} \vec{i} = \dfrac{\vec{V}_s}{|\vec{V}_s|} = (i_x, i_y, i_z) \\ \vec{j} = \dfrac{(\vec{p} - \vec{s}) \times \vec{i}}{|\vec{p} - \vec{s} \times \vec{i}|} = (j_x, j_y, j_z) \\ \vec{k} = \dfrac{\vec{i} \times \vec{j}}{|\vec{i} \times \vec{j}|} = (k_x, k_y, k_z) \end{cases} \tag{5-2-9}$$

则新定义的方向余弦为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{bmatrix} \tag{5-2-10}$$

这里,$\vec{i}$为标准化的速度矢量$\vec{V}_s$,$\vec{i} = (i_x, i_y, i_z) = (v_x, v_y, v_z)$分别与方向余弦$(a_{11}, a_{21}, a_{31})$对应。这时(5-2-7)式可由下式来代替:

$$\begin{cases} 0 = \vec{i}(\vec{P} - \vec{S}) \\ R = |\vec{P} - \vec{S}| \end{cases} \tag{5-2-11}$$

其中，$\vec{P} = (X_p, Y_p, Z_p)$，为地物点 $A$ 的坐标矢量；$\vec{S} = (X_s, Y_s, Z_s)$，为天线 $S$ 的坐标矢量；$R = \lambda_p(d_r + y_r)$，为天线 $S$ 到地物点 $A$ 的空间距离。(5-2-11)式的第一式表示侧向扫描平面恒垂直于航行速度矢量方向；第二式反映了斜距投影的特点。其展开式为

$$\begin{cases} 0 = V_x(X_p - X_s) + V_y(Y_p - Y_s) + V_z(Z_p - Z_s) \\ d_r + y_r = (1/\lambda_p)\sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2} \end{cases} \tag{5-2-12}$$

当侧视雷达按圆锥扫描方式工作时，其成像几何形态如图 5-2-2 所示，此时雷达天线的发射轴线具有一个固定的航向倾角($\tau$)，并以($u$)轴为旋转轴按扫描角 $\theta$ 向侧向扫描。对于任一地物点 $A$，设其斜距为 $R$，则：

$$R = \lambda_p y_a \tag{5-2-13}$$

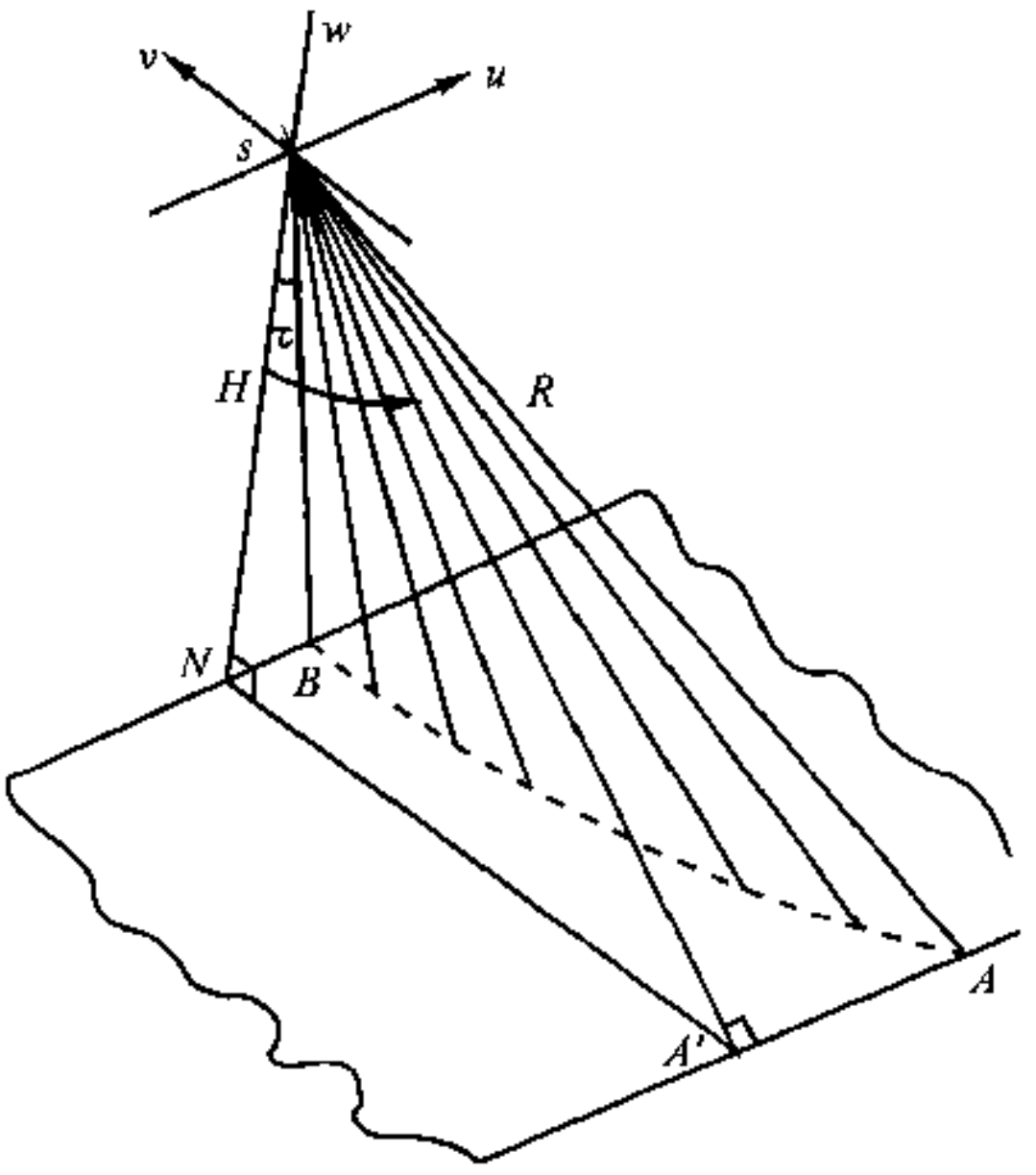



图 5-2-2　圆锥扫描侧视雷达的成像几何形态

同时从图中可以导出

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\sin\tau \\ (R^2\cos^2\tau - H^2)^{1/2} \\ -H \end{bmatrix} = \lambda_p \begin{bmatrix} y_a\sin\tau \\ ((y_a\cos\tau)^2 - f^2)^{1/2} \\ -f \end{bmatrix} \tag{5-2-14}$$

相应的构像方程为

$$\begin{cases} y_a \sin\tau = -f\dfrac{(X)}{(Z)} \\ \sqrt{y_a^2\cos^2\tau - f^2} = -f\dfrac{(Y)}{(Z)} \end{cases} \tag{5-2-15}$$

## 第三节　微波辐射计图像的构像方程及图像几何变形分析

微波辐射计通过某种扫描方式(如天线扫描)接收地物的微波辐射信号,因此与可见光、红外扫描仪的成像方式一样,属于全景投影一类。如图5-3-1,$y_P$ 为地面 $P$ 点在辐射计图像上的在扫描方向上的坐标,平台飞行方向为 $x$ 方向。其等效的焦距为 $f$,$S$ 为投影中心(或天线旋转中心),$y'_P$ 为

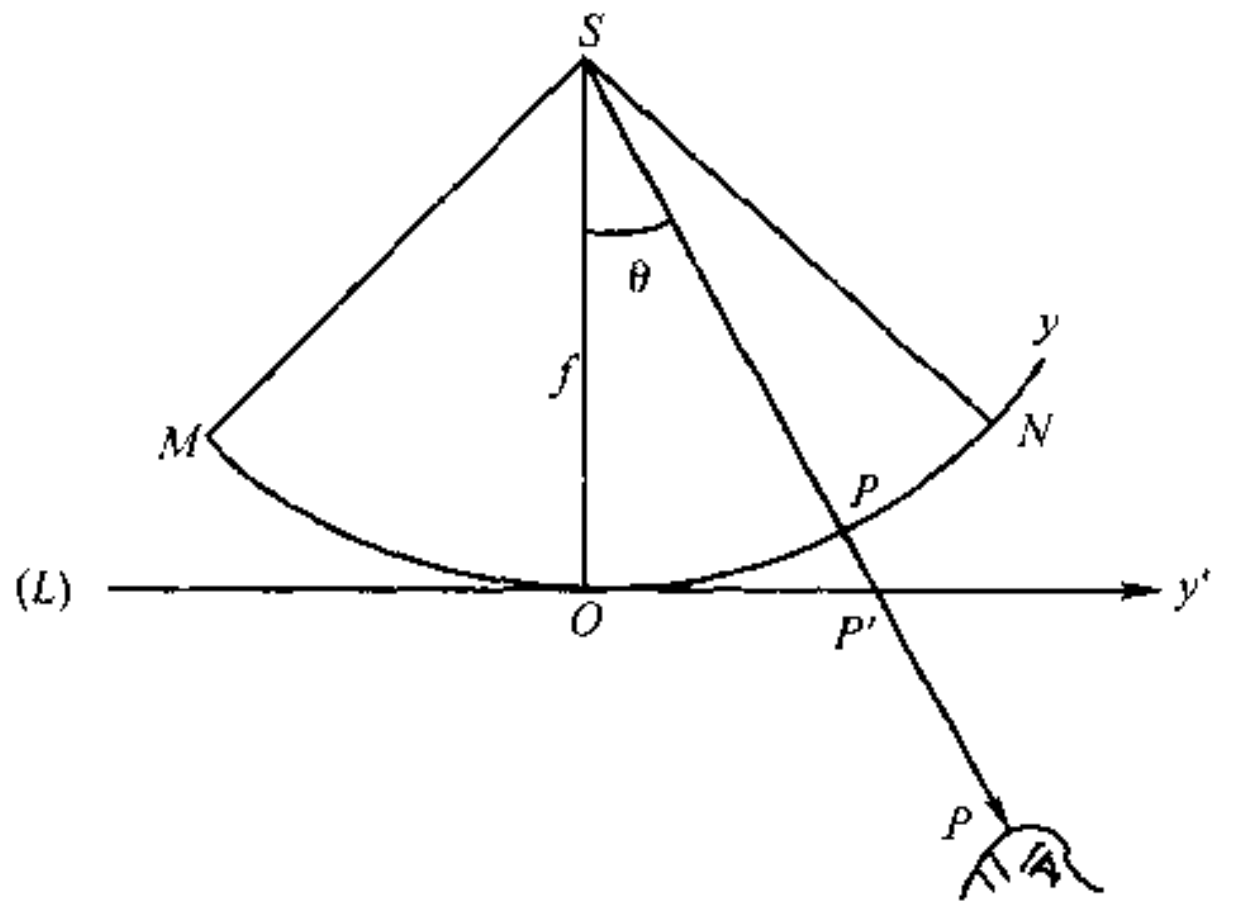



图 5-3-1　全景投影

等效中心摄影方式下的图像坐标,扫描角 $\theta$ 为 $SP$ 与底点方向的夹角,于是

$$y_P = f \cdot \theta \tag{5-3-1}$$

$$y'_P = f \cdot \mathrm{tg}\theta = f \cdot \mathrm{tg}(y_P/f) \tag{5-3-2}$$

由于可以将辐射计图像上任一点的图像坐标转化为等效中心投影方式下的坐标,如同第二节一样,微波辐射计图像的构像方程可以写成

$$0 = -(X)/(Z)$$

$$f \cdot \mathrm{tg}(y_P/f) = -(Y)/(Z) \tag{5-3-3}$$

事实上辐射计图像上每一点都有其投影中心,这样,在其坐标转化为等效中心投影图像坐标时,每一点的 $x$ 方向坐标都为0。

这种全景图像的变形分析如同对可见光、红外扫描仪图像(如 *TM* 图

像)的变形分析一样。首先,由(5-3-1)式和(5-3-2)式可以得到全景投影变形的公式为

$$dy = y_P - y'_P = f(\theta - \mathrm{tg}\theta) \tag{5-3-4}$$

从该式可见,随着扫描角的增大,图像的变形也增大。

由(5-3-3)式,可以分析外方位元素的影响,由于对中心投影图像的变形分析是基于构像方程的微分,在考虑姿态角都是很小的角度的情况下,有

$$\begin{aligned} dx &= -(f/H)dX_s - (x/H)dZ_s - f(1 + x^2/f^2)d\varphi - (xy/f)d\omega + ydk \\ dy &= -(f/H)dY_s - (y/H)dZ_s - (xy/f)d\varphi - f(1 + y^2/f^2)d\omega - xdk \end{aligned} \tag{5-3-5}$$

将 $x=0, y=f\mathrm{tg}\theta$ 代入(5-3-5)式,即得到辐射计图像由外方位元素变化所造成的图像形变公式:

$$\begin{cases} dx = -(f/H)dX_s - fd\varphi + f\mathrm{tg}\theta dk \\ dy = -(f/H)dY_s - (f/H)\mathrm{tg}\theta dZ_s - f(1 + \mathrm{tg}^2\theta)d\omega \end{cases} \tag{5-3-6}$$

由中心投影方式的构像方程可以推导出地形起伏的影响公式,即

$$\begin{cases} dx = -f\dfrac{a_{31}(Z)dZ_p - a_{33}(X)dZ_p}{(Z)^2} \\ dy = -f\dfrac{a_{32}(Z)dZ_p - a_{33}(Y)dZ_p}{(Z)^2} \end{cases} \tag{5-3-7}$$

当考虑姿态角很小,进一步得到

$$\begin{cases} dx = \dfrac{x}{Z_s - Z_p}dZ_p = \dfrac{x}{Z_s - Z_p}h \\ dy = \dfrac{y}{Z_s - Z_p}h \end{cases} \tag{5-3-8}$$

于是由 $y = f\mathrm{tg}(y_r/f)$,有 $y_r = f\mathrm{arctg}(y/f)$,这里 $y_r$ 表示辐射计图像坐标。

$$\begin{aligned} dy &= \frac{f^2}{f^2 + y_r^2}dy_r \qquad dy_r = \frac{f^2 + y_r^2}{f^2}dy \\ dy_r &= \frac{1}{f}\,\frac{\mathrm{tg}(y_r/f)}{Z_s - Z_p}(f^2 + y_r^2)\cdot h \end{aligned} \tag{5-3-9}$$

$x$ 方向因 $x \equiv 0$,有 $dx = 0$。

由上一节可以知道,在中心投影方式下因地球曲率造成的图像形变可表示为

$$h_y = -\frac{1}{2R_0}\,\frac{H^2}{f^2}y^2 \tag{5-3-10}$$

则对于辐射计图像有

$$h_y = -\frac{1}{2R_0}\,\frac{H^2}{f^2}[f\mathrm{tg}(y_r/f)]^2 = -\frac{H^2}{2R_0}\mathrm{tg}^2(y_r/f) \tag{5-3-11}$$

由于全景投影性质，在 $x$ 方向，地球曲率影响为零。

大气折射的影响，可参考可见光红外扫描仪图像相关公式，有

$$\Delta y = K(y + y^3/f) \tag{5-3-12}$$

其中

$$K = \left[\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250}\frac{h}{H}\right]$$

至于地球自转的影响，可以参照上一节针对雷达图像的分析。事实上，各类卫星图像因地球自转造成的形变分析，均是按那些公式进行的。

## 第四节　普通几何校正方法和利用模拟图像的方法

这一节和下一节主要讨论雷达图像的几何校正。对于辐射计图像而言，采用多项式，或利用模拟图像的方法，原理上都是相同的。

### 一、利用多项式的几何校正方法

在侧视雷达图像的几何校正过程中，考虑到各种因素，如地形起伏、精度要求、已有计算机软件条件和应用的要求等，所采用的方法有所不同。一般在地形起伏不大（低丘，平原地区），精度要求不高或应用过程中时没有高级复杂的计算机软件（以侧视雷达构像方程为数学模型的软件），一般采用多项式几何校正方法。这种方法在各类图像处理系统中均有相应软件作为支持，方法简单，易于操作，在所涉地区高差不大的情况下，是比较方便的。

例：由中国航空遥感服务公司使用 GOODYEAR 公司的 GEMS 机载 SAR 在北京良乡地区所获侧视雷达图像资料在数字化后利用多项式进行纠正，其结果由检查点上的残差和中误差表示其精度，见表 5-4-1。

表 5-4-1　检查点残差及中误差（以北京良乡地区侧视雷达图像为例）

| 点　号 | X(m) | Y(m) | 点　号 | X(m) | Y(m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16.305 | −15.191 | 12 | 5.601 | 28.381 |
| 3 | −29.870 | −4.293 | 13 | 6.630 | 13.348 |
| 4 | 18.515 | −15.055 | 14 | 15.650 | −9.975 |
| 5 | 16.935 | −5.994 | 15 | −5.100 | 6.596 |
| 6 | 2.540 | −15.371 | 16 | −28.410 | −2.416 |
| 8 | 8.495 | 10.552 | 17 | −25.735 | −7.369 |
| 9 | −7.240 | 0.474 | 18 | 11.745 | 3.594 |
| 10 | -0.115 | 34.131 | 19 | 8.655 | 19.721 |
| 11 | 2.920 | 16.598 | | | |
| | | $M_x = 15.724$m | | $M_y = 14.589$m | |

这幅图像所在地区东部为平原，西部是山地和丘陵，高差为 1000m 左右，地形起伏对图像变形的影响是很大的。在这种地区利用多项式进行图像几何纠正是很不够的。下一节将介绍利用共线方程进行纠正的效果。

### 二、利用模拟图像的几何校正法

第四章已介绍了模拟图像的生成方法，并已指出模拟图像的功用之一就是用于几何校正，既然对于所研究地区已经可以利用该地区数字高程模型按照雷达的构像规律和叠掩、透视收缩及阴影等特点产生一幅无畸变的图像，就可以考虑利用这一模拟图像与实际雷达图像之间的对应关系，对实际图像进行几何校正。

这里采用的几何校正方法就是首先分别在实际图像和模拟图像上选取相应的控制点，然后采用多项式内插法作图像配准，最后完成实际图像的几何校正。

## 第五节　利用构像方程的几何校正方法

第二节已介绍了侧视雷达图像的构像方程，描述了图像坐标和相应地面点坐标的严密的坐标几何关系。按构像方程实施几何校正，由于考虑了地面点的高程，这样就可以消除因地形起伏造成的图像几何形变或投影差。但具体实施显然涉及复杂的计算，需要较多的时间。利用计算机进行校正时，时间因素是应加以考虑的，所以必须采用某种策略，本节中所介绍的锚点法就是出于这种考虑。

### 一、基于地心直角坐标系的构像方程

第二节所介绍的构像方程是建立在切平面坐标系内的，但是由于卫星侧视雷达图像数据一般伴有星历参数，这些星历参数均以地心直角坐标系作为参照坐标系，当建立以地心直角坐标系为基础的构像方程时就能直接应用这些参数。另外在地心直角坐标系的基础上，可以比较方便地转换为地理坐标，进而可转换为任意一种所需的地图投影坐标。故此，首先建立起基于地心直角坐标系的构像方程。

#### 1. 基于地心直角坐标系的构像方程

第二节所介绍的构像方程为

$$0 = V_x(X_p - X_s) + V_y(Y_p - Y_s) + V_z(Z_p - Z_s) \qquad (5\text{-}5\text{-}1)$$

$$d_r + y_r = (1/\lambda_p)\sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2}$$

其中$(X_p, Y_p, Z_p)$和$(X_s, Y_s, Z_s)$为地面点 $P$ 和侧视雷达天线 $S$ 的地面坐标,这是建立在切平面坐标系内的。倘将这些坐标连同速度矢量$(V_x, V_y, V_z)$都作为地心直角坐标,则上式即为以地心直角坐标系为基础的构像方程。

2. 地心直角坐标系与地理坐标系之间的变换关系

地物点地心坐标若用地理坐标表示,有

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H)\cos B\cos L \\ (N + H)\cos B\sin L \\ (N + H)(1 - e^2)\sin B \end{bmatrix} \tag{5-5-2}$$

其中 $e$ 为地球椭球体第一偏心率,$e = \sqrt{(a^2 - b^2)/a^2}$,$a$,$b$ 分别是地球椭球体长半轴和矩半轴,$a = 6378245\text{m}$,$b = 6356863\text{m}$,故 $e = 0.00699342162297$。这些为相应于克拉索夫斯基参考椭球体的参数。$N$ 为相应于纬度 $B$ 的卯酉圈曲率半径,其表达式为

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2 B}} \tag{5-5-3}$$

$H$ 为空间地物点的海拔高度,$L$ 为经度。从(5-5-2)式很容易推导出用地心坐标表示经纬度的公式。

3. 地理经纬度与地图投影坐标系之间的转换

这里的地图投影坐标系主要是指高斯—克吕格横轴圆柱正形投影坐标。我国的基本比例尺地形图均采用这一坐标系统。用地形图上的一点坐标$(XY)$表示该点的经纬度的公式如下:

$$\begin{aligned} B &= B_f - \frac{t_f}{2M_f \cdot N_f}Y_m^2 + \frac{t_f}{24M_f \cdot N_f^3}(5 + 3t_f^2 + \eta_f^2 - 9\eta_f^2 t_f^2)\,Y_m^4 \\ &\quad - \frac{t_f}{720M_f \cdot N_f^3}(61 + 90t_f^2 + 45t_f^4)\,Y_m^6 \\ L &= L_o + \frac{1}{N_f \cdot \cos B_f}Y_m - \frac{1}{6N_f^3 \cdot \cos B_f}(1 + 2t_f^2 + \eta_f^2)\,Y_m^3 \\ &\quad + \frac{1}{120N_f^5 \cos B_f}(5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8\eta_f^2 t_f^2)\,Y_m^5 \end{aligned} \tag{5-5-4}$$

式中 $B_f$ 为地图上一点 $P$ 在 $X$ 轴上的投影点 $Q(X_{mq} = X_{mp}, Y_{mq} = 0)$的纬度$(B_q = B_f, L_q = L_o, L_o$ 是中央子午线经度),可由 $P$ 点坐标 $X_{mp}$ 在《高斯投影坐标计算表》中的子午线弧长表中查到。上式中 $M_f$ 和 $N_f$ 分别为 $Q$ 点处的子午圈曲率半径和卯酉圈半径。

$N_f = \dfrac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_f}}$，$N_f$ 为底点 $Q$ 处的卯酉圈半径；

$M_f = \dfrac{a(1-e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B_f)^{3/2}}$，$M_f$ 为底点 $Q$ 处的子午圈曲率半径；

$t_f = \mathrm{tg} B_f$；

$\eta_f = e' \cos B_f$，这里 $e'$ 为地球椭球体第二偏心率，$(e')^2 \approx 0.00674$。

## 二、独立参数及其解算

分析上述基于地心直角坐标系的构像方程(5-5-1)式，和(5-5-2)式，可以看出，由于雷达天线地心坐标是星下点 S 的地理经纬度 $L_s$，$B_s$ 和卫星飞行高度 $H_s$ 的函数，速度分量 $V_x$，$V_y$，$V_z$ 则是独立变量，所以构像方程中的独立参量共有六个，即 $L_s$，$B_s$，$H_s$，$V_x$，$V_y$，$V_z$。

由(5-5-1)式微分建立图像坐标的观测值方程，即

$$\begin{aligned} V(x) = {} & \frac{\partial(x)}{\partial L_s}\Delta L_s + \frac{\partial(x)}{\partial B_s}\Delta B_s + \frac{\partial(x)}{\partial H_s}\Delta H_s \\ & + \frac{\partial(x)}{\partial V_x}\Delta V_x + \frac{\partial(x)}{\partial V_y}\Delta V_y + \frac{\partial(x)}{\partial V_z}\Delta V_z \\ & + \frac{\partial(x)}{\partial X_p}\Delta X_p + \frac{\partial(x)}{\partial Y_p}\Delta Y_p + \frac{\partial(x)}{\partial Z_p}\Delta Z_p - l_x \end{aligned} \qquad (5\text{-}5\text{-}5)$$

$$\begin{aligned} V(y) = {} & \frac{\partial(y)}{\partial L_s}\Delta L_s + \frac{\partial(y)}{\partial B_s}\Delta B_s + \frac{\partial(y)}{\partial H_s}\Delta H_s \\ & + \frac{\partial(y)}{\partial X_p}\Delta X_p + \frac{\partial(y)}{\partial Y_p}\Delta Y_p + \frac{\partial(y)}{\partial Z_p}\Delta Z_p - l_y \end{aligned}$$

上述中各偏微分系数和常系数的表达式如下：

$$\partial(x)/\partial L_s = V_x Y_s - V_y X_s$$

$$\partial(x)/\partial B_s = V_x X_s \mathrm{tg}B + V_y Y_s \mathrm{tg}B - V_z Z_s \mathrm{ctg}B$$

$$\partial(x)/\partial H_s = -[V_x X_s + V_y Y_s + V_z Z_s]/(N + H)$$

$$\partial(x)/\partial V_x = X_p - X_s$$

$$\partial(x)/\partial V_y = Y_p - Y_s$$

$$\partial(x)/\partial V_z = Z_p - Z_s$$

$$\partial(x)/\partial X_p = V_x$$

$$\partial(x)/\partial Y_p = V_y$$

$$\partial(x)/\partial Z_p = V_z$$

$$l_x = -[V_x'(X_p' - X_s') + V_y'(Y_p' - Y_s') + V_z'(Z_p' - Z_s')]$$

$$\partial(y)/\partial L_s = [X_p Y_s - Y_p X_s]/(\lambda_p \cdot R)$$

$$\partial(y)/\partial B_s = [(X_p - X_s)\mathrm{tg}B + (Y_p - Y_s)\mathrm{tg}B$$

$$
\begin{aligned}
&-(Z_p - Z_s)\mathrm{ctg}B]/(\lambda_p \cdot R)\\
\partial(y)/\partial H_s &= [(X_p - X_s)X_s + (Y_p - Y_s)Y_s\\
&\quad + (Z_p - Z_s)Z_s]/[(\lambda_p \cdot R)(N + H)]\\
\partial(y)/\partial X_p &= (X_p - X_s)/(\lambda_p \cdot R)\\
\partial(y)/\partial Y_p &= (Y_p - Y_s)/(\lambda_p \cdot R)\\
\partial(y)/\partial Z_p &= (Z_p - Z_s)/(\lambda_p \cdot R)\\
l_y &= (y_r + d_r) - [(X_p' - X_s')^2 + (Y_p' - Y_s')^2\\
&\quad + (Z_p' - Z_s')^2]^{1/2}/\lambda_p
\end{aligned}
\tag{5-5-6}
$$

若加上控制点地面坐标的观测值误差,则有

$$
\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_p - X_p' \\ Y_p - Y_p' \\ Z_p - Z_p' \end{bmatrix} \tag{5-5-7}
$$

其中 $X_p'$、$Y_p'$、$Z_p'$为控制点地面坐标在每次迭代后加上改正数 $\Delta X$、$\Delta Y$、$\Delta Z$ 所得。将上述两类误差方程放为一起,组成总体误差方程式如下:

$$
\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \tag{5-5-8}
$$

其中

$V_1 = [V(x)\ V(y)]^{\mathrm{T}}$,权阵为 $P_1$。

$V_2 = [v_x \quad v_y \quad v_z]^{\mathrm{T}}$,权阵为 $P_2$。 (5-5-9)

$A_1$ 矩阵的元素为

$a_{i1} = \partial(x)/\partial L_s, a_{i2} = \partial(x)/\partial B_s, a_{i3} = \partial(x)/\partial H_s;$

$a_{i4} = \partial(x)/\partial V_x, a_{i5} = \partial(x)/\partial V_y, a_{i6} = \partial(x)/\partial V_z;$

$a_{(i+1)1} = \partial(y)/\partial L_s, a_{(i+1)2} = \partial(y)/\partial B_s, a_{(i+1)3} = \partial(y)/\partial H_s;$

$a_{(i+1)4} = a_{(i+1)5} = a_{(i+1)6} = 0$

$i = 1,3,5,\cdots 2^n - 1$;$n$ 为控制点的数目。 (5-5-10)

$B_1$ 矩阵中的元素为

$b_{i1} = \partial(x)/\partial X_p, b_{i2} = \partial(x)/\partial Y_p, b_{i3} = \partial(x)/\partial Z_p;$

$b_{(i+1)1} = \partial(y)/\partial X_p, b_{(i+1)2} = \partial(y)/\partial Y_p, b_{(i+1)3} = \partial(y)/\partial Z_p;$

$i = 1,3,5,\cdots 2^n - 1$。 (5-5-11)

$i$ 的含义与(5-4-10)式中的相同。$B_2$ 为单位矩阵。而

$$
\begin{aligned}
\Delta A &= [\Delta L_s \quad \Delta B_s \quad \Delta H_s \quad \Delta V_x \quad \Delta V_y \quad \Delta V_z]^{\mathrm{T}}\\
\Delta B &= [\Delta X_p \quad \Delta Y_p \quad \Delta Z_p]^{\mathrm{T}}
\end{aligned}
\tag{5-5-12}
$$

上述构像方程和相应观测值误差方程式的讨论是以图像一个点的成像机理为基础的。对于一个控制点可以建立五个误差方程式，待解算的参量有九个，对于 $n$ 个控制点，则可以建立 $5n$ 个误差方程式，但待解算的参量则不是9个，因为图像中的一行上的所有点事实上共有一套独立参数，不同的行各有自己的一套独立参数，若解算出第一行的参数，则后续行的参数可认为是第一行参数加上按时间或行数的改变量，如

$$Lsi = Lso + i \cdot \Delta L_s \tag{5-5-13}$$

这里 $i$ 是行序号，$Lso$ 是第一行的星下点经度参数。这样只要解算出第一行的六个参数及其行序改变量，则任意行的参数均可以算出来。故此，不考虑控制点地面坐标观测值的改变量，待解算的参量只有十二个。这样，只要有六个以上控制点，即可解算出所有参量。

在建立误差方程式和法方程式的过程中，涉及到各图像控制点所在行对应的独立参量，需要对第一行的参量和行序改变量的初值作出估计，为此，要根据所提供的星历参量确定初值。如 ERS－1 图像的参量文件中已给出第一行的“状态矢量”即相应于第一行的卫星坐标(地心坐标)和速度矢量，同时给出了图像四角点的经纬度和图像中心点的经纬度，这就为估算相应第一行和其它各行的星下点经纬度提供了依据。

标称的航行高度可以作为 $H$ 的初值，其行序改变量初值可定为零。

相应于第一行的卫星速度已有提供的数据作为初值则相当精确的了。速度行序改变量初值则可以确定为零。参数的解算是一个迭代过程，只有当第 $i+1$ 次解算结果与第 $i$ 次解算结果十分接近，其差的绝对值少于给定的阈值时，迭代即可停止。

### 三、锚点校正法

逐个像元按构像方程进行校正是不可取的，因为这相当耗费机时，为此可按锚点法进行，即预先在地形图上确定一个格网，格网的间距可以按地形情况确定，然后读取格网点上的高程，建立数字高程模型，仅仅是在这些格网点上才按构像方程计算图像坐标，得到每一格网点上的坐标矢量：

$$c(i,j) = \{X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}, x_{ij}, y_{ij}\} \tag{5-5-14}$$

式中 $X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}$ 可以是高斯坐标，$i, j$ 表示锚点格网中的第 $i$ 行和第 $j$ 列。

此后，由于每一格网的四个点的坐标矢量已经知道，用它们作为控制，对网格内的点，只要按一次多项式内插即可。校正图像的产生就是在这最后的网格内插中实现的。

以北京良乡地区侧视雷达图像为例，按构像方程进行校正，按参量解算的结果在控制点上的残差及其中误差，有如表 5-5-1 所示，在检查点上的残差及其中误差如表 5-5-2 所示。从这两个表的数据可以看出，在高差很大

*的地区必须按构像方程进行校正。这两个表与表 5-4-1 和表 5-4-2 对照可*以说明，构像方程的方法可以获得很高的精度，它对于改正由于地形起伏所造成的投影差是十分必要的。

以上所介绍的利用侧视雷达图像构像方程进行几何校正的原理，其基本思路同样适用于对于微波辐射计图像，只须将(5-5-1)式改为辐射计图像的构像方程。将独立参量视为与中心投影方式图像构像方程的独立参量相似，即中心行的外方位元素，每一行的外方位元素参照(5-5-13)式写出，对误差方程式重新加以推导即可，这里就不赘述。

此外，文献[13]中介绍了一种方法，考虑到距离向上因地形起伏造成的图像变形，采用将数字高程模型按成像时平台(卫星或飞机)的运动方向重新组织数据，根据地面每一点的高程和地距坐标，计算投影差，进而对图像进行纠正的方法，颇有新意，可以借鉴。

**表 5-5-1　检查点残差及中误差(以北京良乡地区侧视雷达图像为例)**

| 点　号 | X(mm) | Y(mm) | 点　号 | X(mm) | Y(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −0.16 | 0.34 | 8 | −0.13 | −0.21 |
| 2 | −0.27 | 0.52 | 9 | −0.06 | 0.10 |
| 3 | 0.04 | 0.41 | 10 | 0.08 | −0.19 |
| 4 | 0.26 | 0.50 | 11 | 0.19 | −0.15 |
| 5 | 0.30 | 0.29 | 12 | 0.32 | 0.12 |
| 6 | 0.69 | 0.32 | 13 | 0.67 | −0.28 |
| 7 | −0.23 | 0.16 | 14 | 0.56 | −0.10 |
| | | $M_x=6.5$m | $M_y=5.7$m | | |

**表 5-5-2　控制点残差及中误差(以北京良乡地区侧视雷达图像为例)**

| 点　号 | X(mm) | Y(mm) | 点　号 | X(mm) | Y(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −0.093 | 0.060 | 12 | 0.058 | 0.007 |
| 3 | −0.006 | −0.071 | 13 | −0.076 | −0.065 |
| 4 | 0.019 | 0.048 | 14 | −0.055 | −0.095 |
| 5 | 0.104 | −0.101 | 15 | 0.073 | −0.007 |
| 6 | −0.108 | 0.002 | 16 | 0.007 | 0.068 |
| 8 | 0.074 | −0.960 | 17 | 0.002 | 0.064 |
| 9 | 0.044 | −0.015 | 18 | 0.015 | −0.010 |
| 10 | 0.078 | 0.004 | 19 | 0.037 | 0.002 |
| 11 | 0.058 | −0.007 | | | |
| | | $M_x=3.6$m | $M_y=3.1$m | | |

**思考题：**

1. 图像几何变形的含义是什么？
2. 什么叫等效中心投影？

3. 为什么分析投影变形时要与中心投影的情况进行对比?

4. 试说明速度矢量变化对合成孔径侧视雷达图像变形的影响。

5. 在讨论雷达图像坐标与等效中心投影坐标的关系时,为什么总有 $x=0$?

6. 试说明各种几何校正方法是在什么情况下才采用的。

7. 试推导微波辐射计图像采用构像方程进行几何校正时的观测值方程。

# 第六章　微波图像与测量

本章讨论有关侧视雷达图像的测量问题，微波辐射计图像的测量问题，可以这样作一个说明，只须先对辐射计图像进行几何校正，然后就可以进行图上平面测量。至于立体测量，完全可以参照 SPOT 图像，但这里须说明的是辐射计图像不同于 SPOT 图像具有侧向扫描功能，其"基线一航高比"不一定能满足要求。

## 第一节　简单的图上量测

### 一、平面测量

利用单张雷达图像进行量测时，须注意以下三点：

1．一般所用雷达图像应是平坦地区或地面起伏较小的地区，在这类地区按照雷达成像的基本几何关系是可以保证一定的量测精度的。

2．在量测图像上某一目标的长度时，要注意所谓光点尺寸的补偿。由于雷达图像记录了地面上每一分辨单元中的地物回波信号，若这一分辨单元中有某一地物回波信号很强，即使它在这一分辨单元所占比例很小，它的"贡献"仍然很大。若图像分辨率为 10m，则一个 10m 长的目标可能在两个分辨单元中反映出来，量测时会将它作为 20m 长的地物来看待。所以，一般在量测长度时，要估计到这个情况，并对量测结果减去一个分辨单元的长度。

对于无回波地物或阴影的长度计算则正好相反，须加上一个分辨单元的长度，因为这类地物的两端所处的分辨单元可能因为有回波信号的地物而让那些地物占据了回波信号的主体，淹没了无回波地物或处于阴影中的地物。

3．雷达图像分为两种，即地距表示的图像和斜距表示的图像，因此事先要弄清是何种表示的图像，如果是地距表示的图像，一般就可以直接在图上量测了。对于斜距表示的图像，则要先进行斜距到地距的转换，即

$$D_P = R_P \sin\theta_P \qquad (6\text{-}1\text{-}1)$$

或

$$D_P = \sqrt{R_P{}^2 - H^2} \tag{6-1-2}$$

或

$$D_P = H\mathrm{tg}\theta_P \tag{6-1-3}$$

其中 $D_P$ 是目标 $P$ 的地距(如图 6-1-1),$H$ 为标准航高,$R_P$ 为该目标斜距,$\theta_P$ 为对 $P$ 点的入射角,其数值范围一般由图像技术参数给出,航高及图像比例尺也在图像技术参数中给出。因而在图上量出距离向的目标坐标后,即可估算出该点的地距。

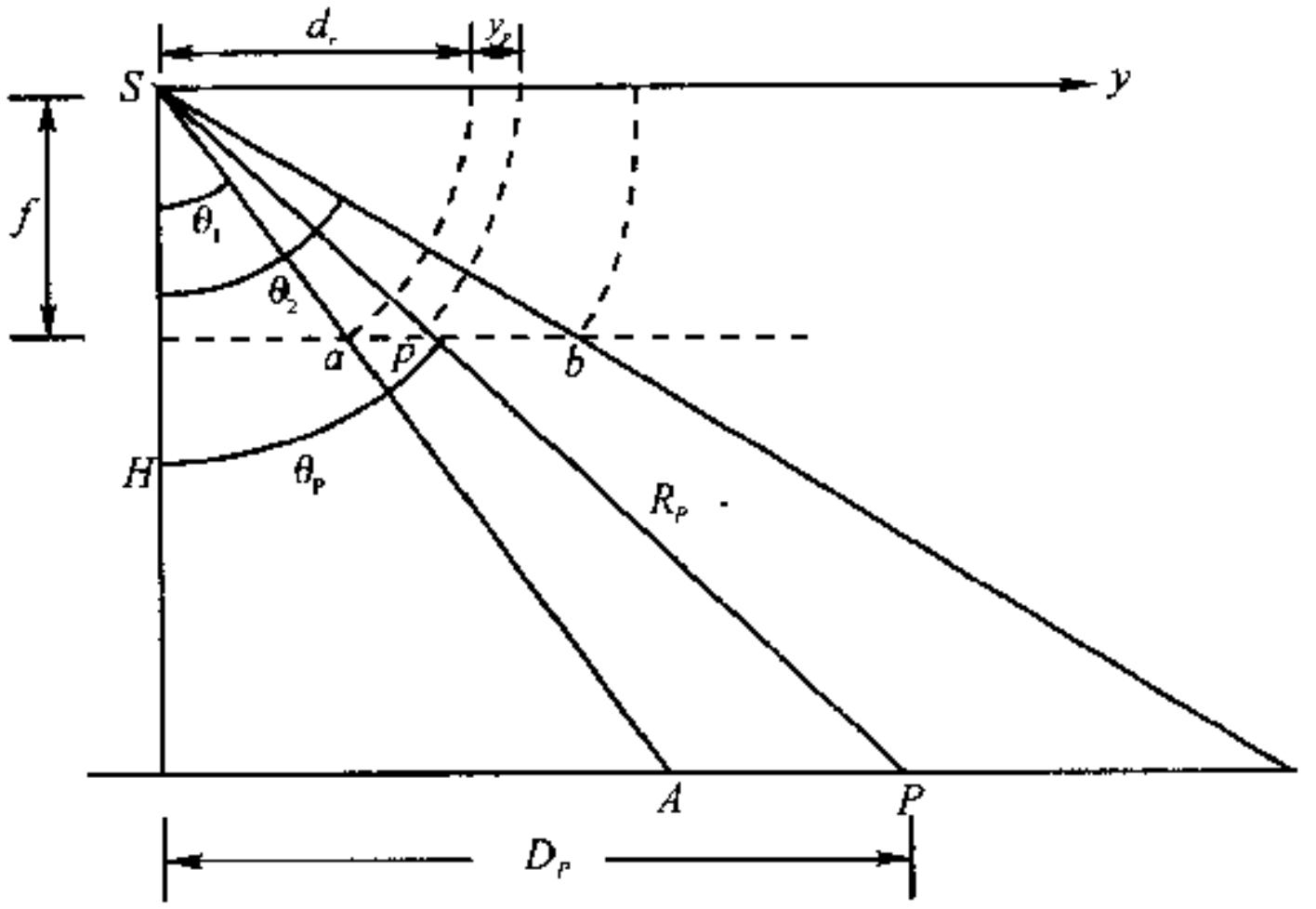



**图 6-1-1　雷达图像地距与斜距的关系**

这里须注意,图上量出目标 $P$ 的坐标 $y_p$ 后,还须加上扫描延迟,这也是在图像技术参数中给出的,如图 6-1-1 中有

$$r_p = d_r + y_p \tag{6-1-4}$$

则

$$R_P = \lambda \cdot r_p \tag{6-1-5}$$

其中 $\lambda$ 为比例尺分母。

若所给入射角范围为 $\theta_1 \sim \theta_2$,如图 6-1-1 其相应的图上近距点为 $a$,远距点为 $b$,则对图上 $P$ 点有

$$\theta_P = \arccos(f/r_p) \tag{6-1-6}$$

在将斜距转换为地距后,即可量测图像上任意两点间的距离,或某一目标的长度,如图 6-1-2,$AB$ 是图像上的两点,或某一目标的两个端点,$CB$ 为距离向,在测量出 $B$、$C$ 两点的地距后即可计算 $BC$ 间的实地距离,再由图像比例尺算出 $AC$ 两点的实际距离,然后就可以计算 $AB$ 两点间的距离了。

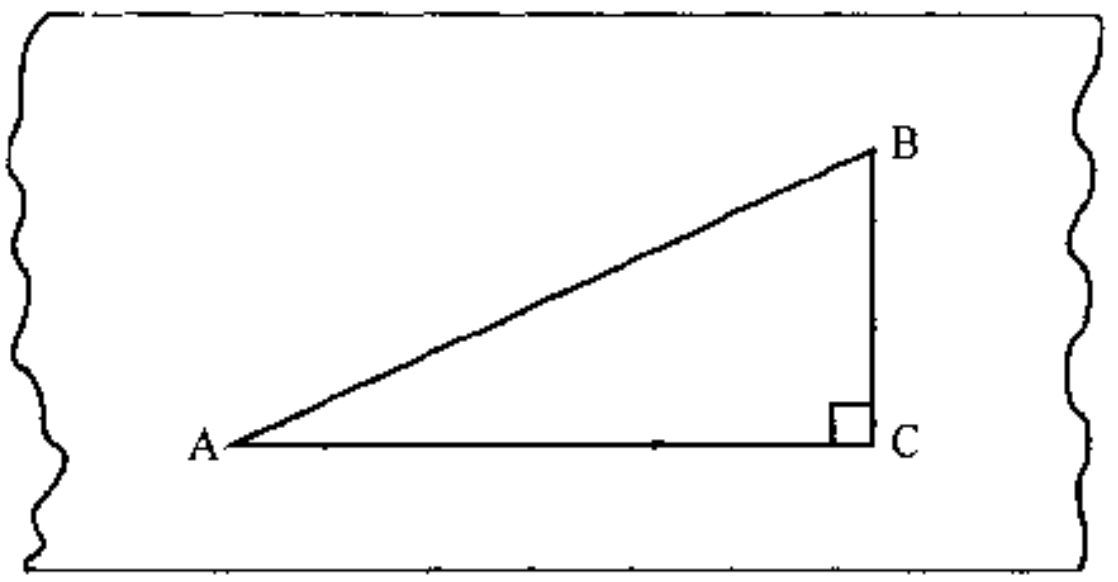



图 6-1-2　雷达图像中两点距离的量测

## 二、根据阴影和叠掩测量独立地物高度

这里有两种情况，一种是像一个独立山丘这样的地物，如图 6-1-3 所示，它是平地中独立的山体，其阴影部分为 $PQ$，在图像上可以量测 $P$ 点和

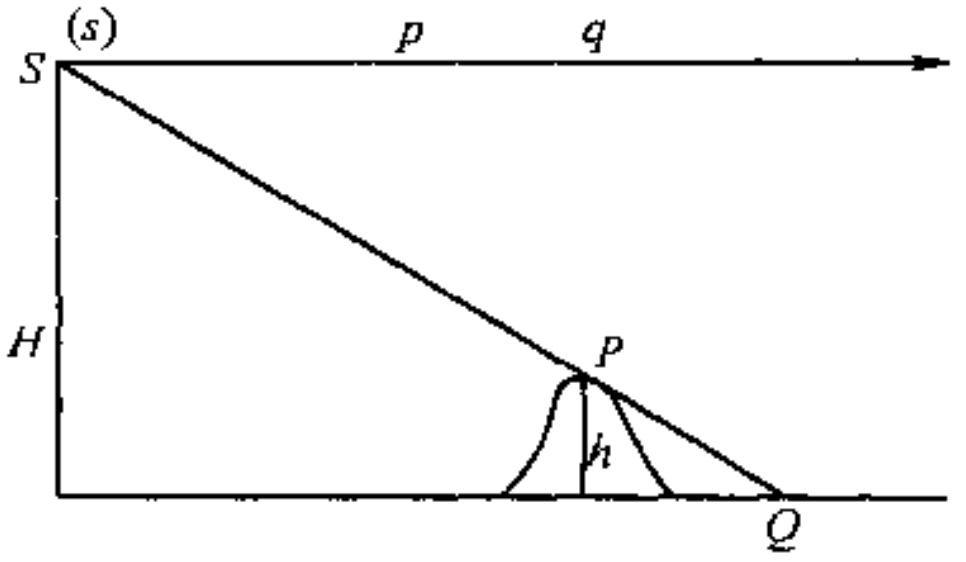



图 6-1-3　根据独立地物阴影量测其高度

$Q$ 点的斜距 $sp$ 和 $sq$，则阴影长度为 $sq - sp$，由于

$$h/PQ = H/SQ \tag{6-1-7}$$

故

$$h = H \cdot PQ/SQ = H(sq - sp)/sq \tag{6-1-8}$$

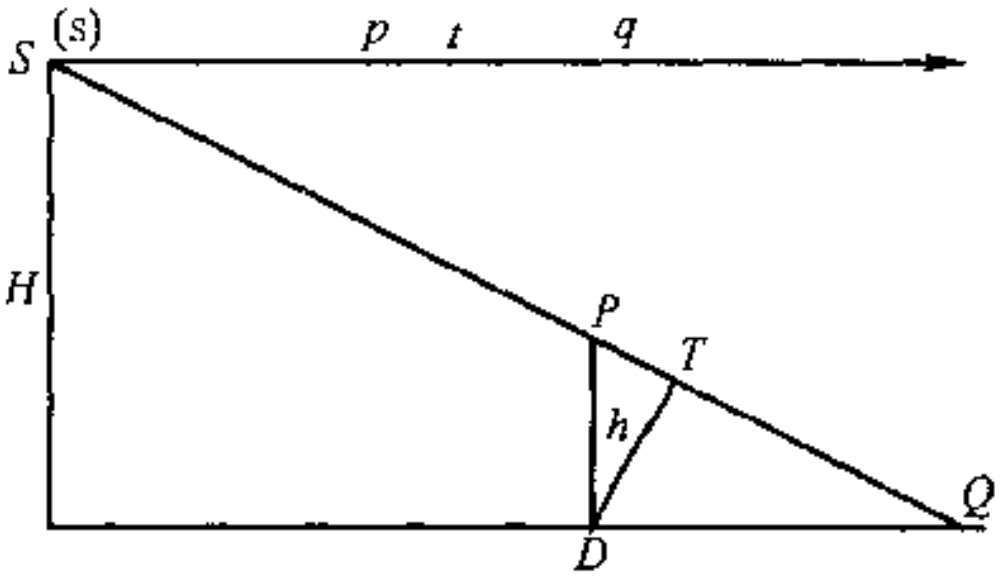



图 6-1-4　图像上有叠掩时，直立地物高度的量测

这样 $P$ 点的相对高程也就可以估算了。

如图6-1-4所示的直立目标，它在图像上具有叠掩部分 $PT$ 的信息 $pt$，

又有阴影部分 $TQ$ 的信息 $tq$，由于

$$h/(PT + TQ) = H/SQ \tag{6-1-9}$$

则

$$h = (PT + TQ)H/SQ = (pt + tq)H/sq \tag{6-1-10}$$

当阴影部分被其它地物掩蔽的情况下，还可单独从叠掩部分测定目标高度，因为由图 6-1-4 可见，

$$h/PT = SQ/H \tag{6-1-11}$$

于是

$$h = SQ \cdot PT/H = (\lambda sq) \cdot (\lambda pt)/H = \lambda^2(sq \cdot pt)/H \tag{6-1-12}$$

### 三、立体测量

侧视雷达图像中因高度产生的像点位移是叠掩的产生，它与光学摄影

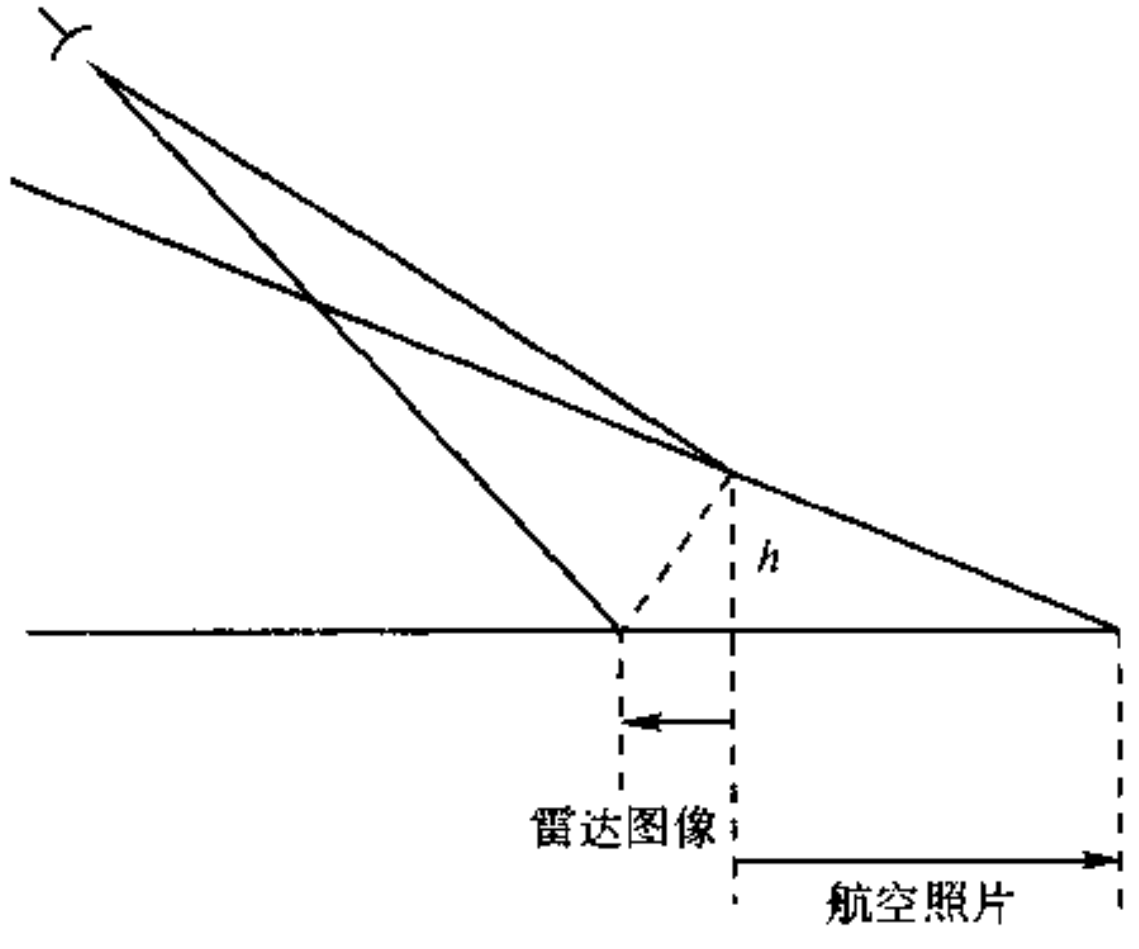
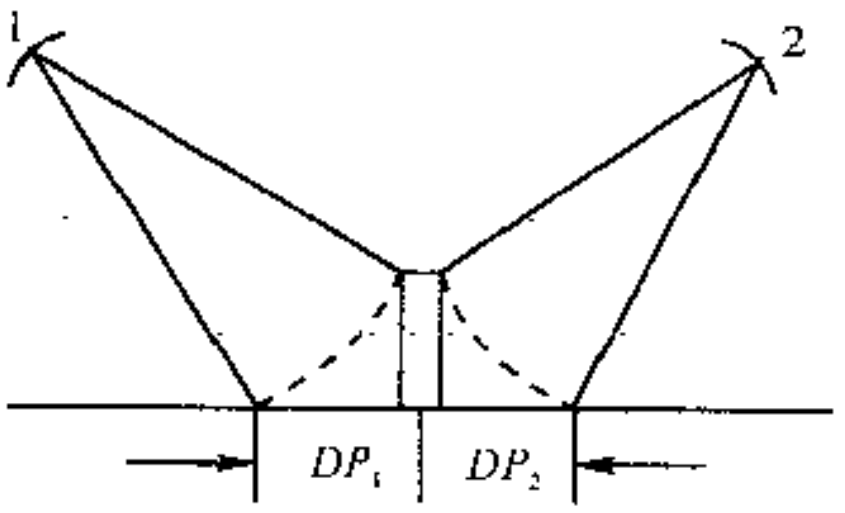


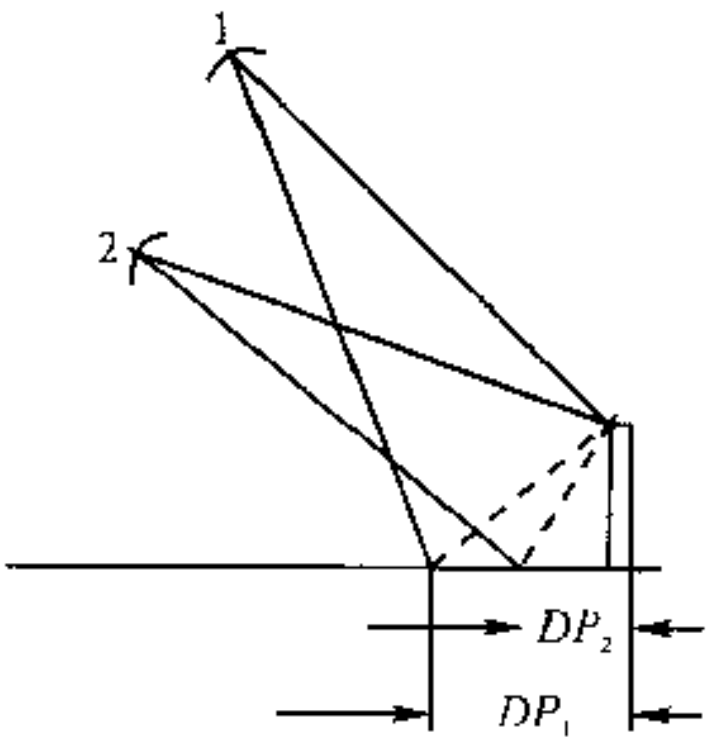

**图 6-1-5　叠掩示意图([8])**

中因高度产生图像位移的方向正好相反，如图 6-1-5 所示，光学摄影中的位移方向是背向像底点，而雷达图像中的位移则朝向像底点。光学摄影中的立体像对是由两个摄影站点上摄取同一地区的影像组成，两摄站点之间的距离称为摄影基线，在立体图像中由于高度产生的位移形成视差，故而可以进行立体观察和立体量测。侧视雷达图像也可以由雷达天线在不同位置收集同一地区的回波信号而构成立体影像，但这时是由目标产生的叠掩引起图像位移，视差是由信号叠掩形成，侧视雷达图像的立体像对可由多种方式产生。如图 6-1-6 所示，在目标的两侧或同侧的不同高度、同侧的不同距离都可产生立体像对。在目标两侧形成立体像对的方式如同早晨和傍晚的光学摄影，但由于雷达成像时，目标如在山丘的前坡，在图像中比较亮，其长度



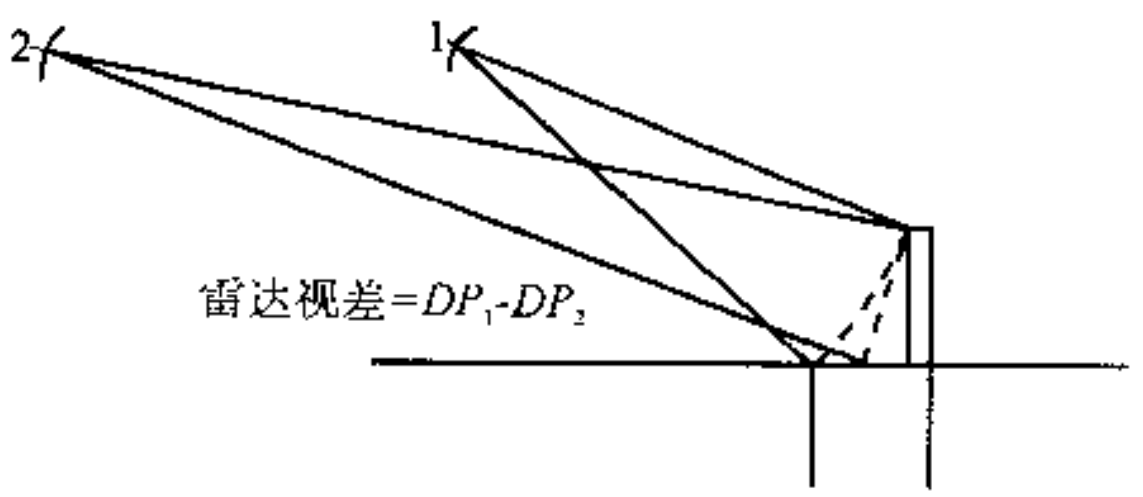

雷达视差 $=DP_1+DP_2$

(a)对侧成像




雷达视差$=DP_1-DP_2$

(b)同侧成像




(c)同侧同高度成像

**图 6-1-6　雷达视差示意图**

可能出现收缩或出现叠掩，背坡则比较暗，其长度或缩短，或接近符合比例的长度，甚至根本看不出来，完全消失在阴影之中，这样在目标两侧构成立体影像时，对目标的观察十分困难。所以目前一般大都采用同侧成像方式，其等效的相机摄影关系如图 6-1-7 所示，图中相机在 $u$，$v$ 两点对目标 $P$ 摄影，$B$ 为基线，$L_f$ 和 $L_n$ 为相应的图像位移在地面上的表示，于是有

$$B/Hc = (L_n - L_f)/h \tag{6-1-13}$$

雷达立体图像的产生则由图 6-1-8 所示，由于其相应的雷达俯角为 $\theta_n$ 和 $\theta_f$，其图像位移在地面上的表示分别为 $L_n$ 和 $L_f$，可见，

$$L_f/h = H_f/R_f = l_f \tag{6-1-14}$$

$$L_n/h = H_n/R_n = l_n \tag{6-1-15}$$

由于量测出 $R_f$ 和 $R_n$ 后，根据 $\theta_n$ 和 $\theta_f$ 即可计算 $H_f$、$H_n$，继而求出 $l_f$ 和 $l_n$，于是有

$$h = (L_n - L_f)/(l_n - l_f) \tag{6-1-16}$$

因为在图像上可以测出视差，然后根据比例尺，即可算出 $L_n - L_f$，然后再计算 $h$ 值。

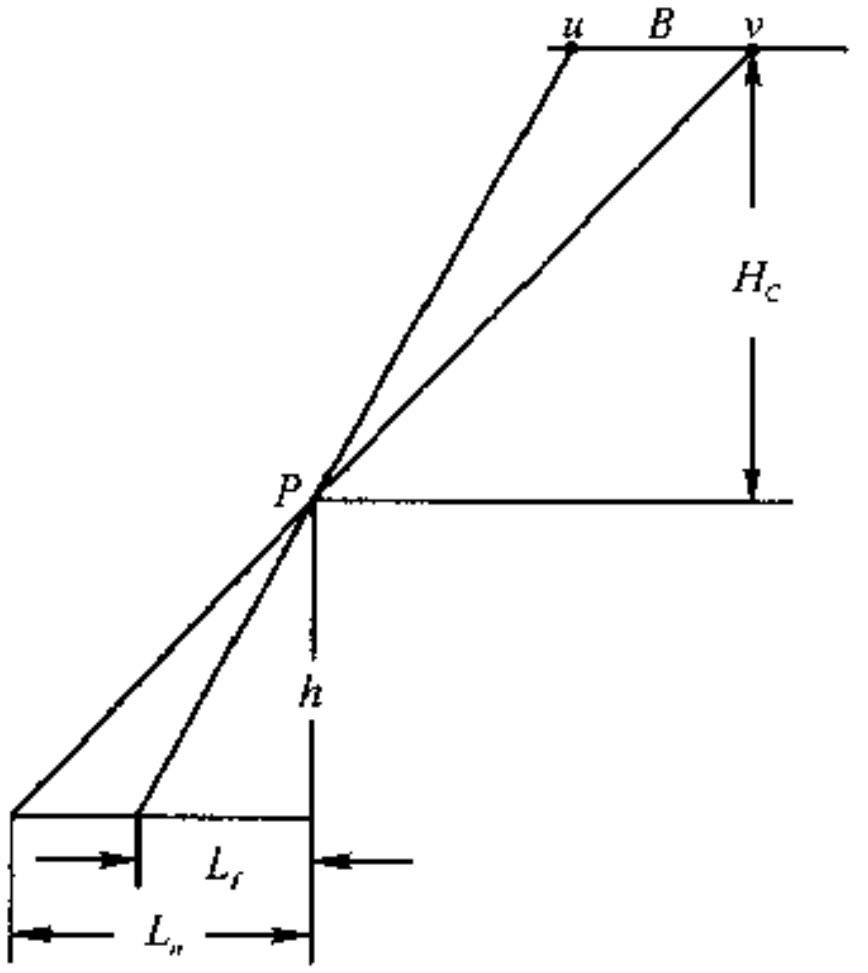
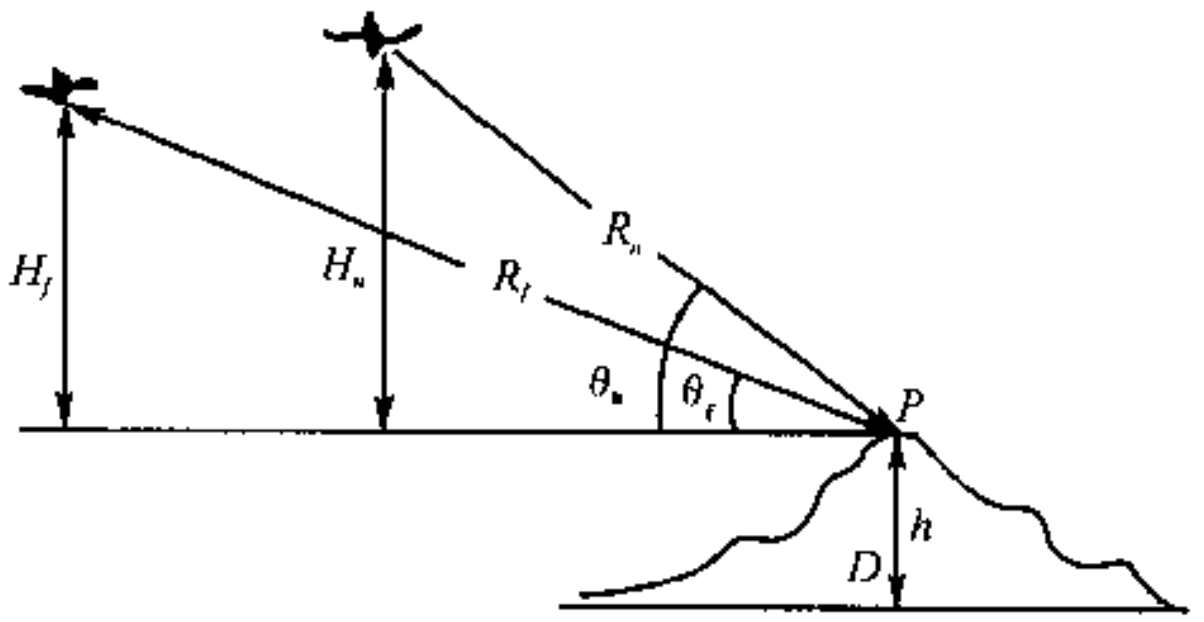
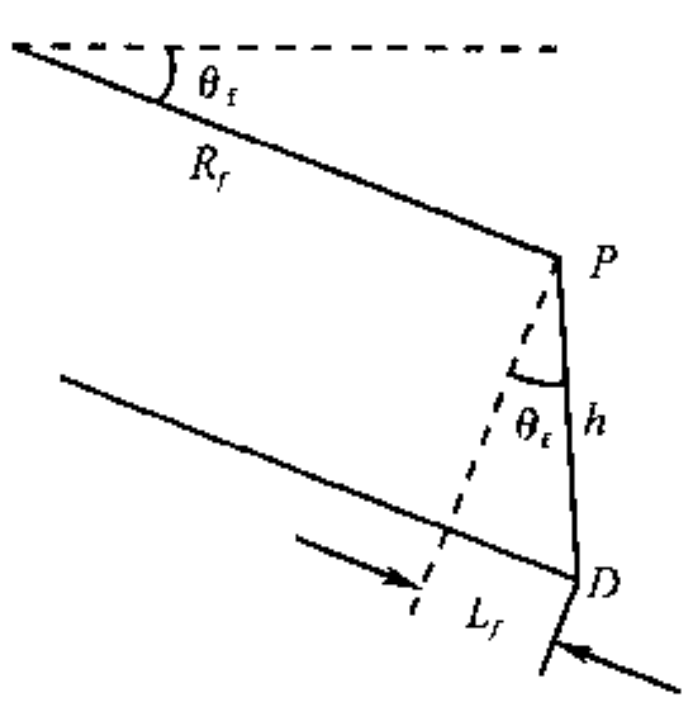



图 6-1-7　对应相机立体观测([8])

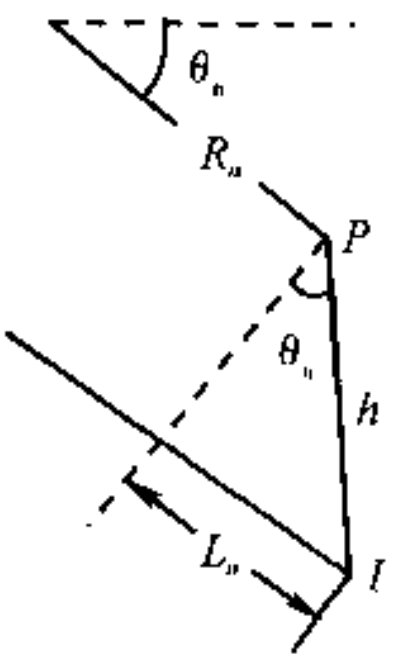
这里的问题是量测叠掩时须有参考点 $D$(见图 6-1-8),倘图中看不到 $D$ 点时,则可在方位向的任一侧选一点作为参考点。




(a)立体成像飞行示意图




(b)远距位移




(c)近距位移

图 6-1-8　雷达立体几何图形([8])

## 第二节　目标点的解析定位

雷达图像是斜距投影，其几何关系如图 6-2-1 所示，图中 $D_r$ 为扫描延迟在斜距上的表示（其原意为延迟时间）；$R_s$ 为地面点 $P$ 到雷达天线的斜距；$R_g$ 为地面点 $P$ 到雷达天线的地距；$H$ 为天线到基准面的相对航高；$y_s$ 是斜距显示图像中距离向的影像坐标；$m_y$ 是距离向图像比例尺；$r_o$ 为 $D_r$ 在基准面上的投影。

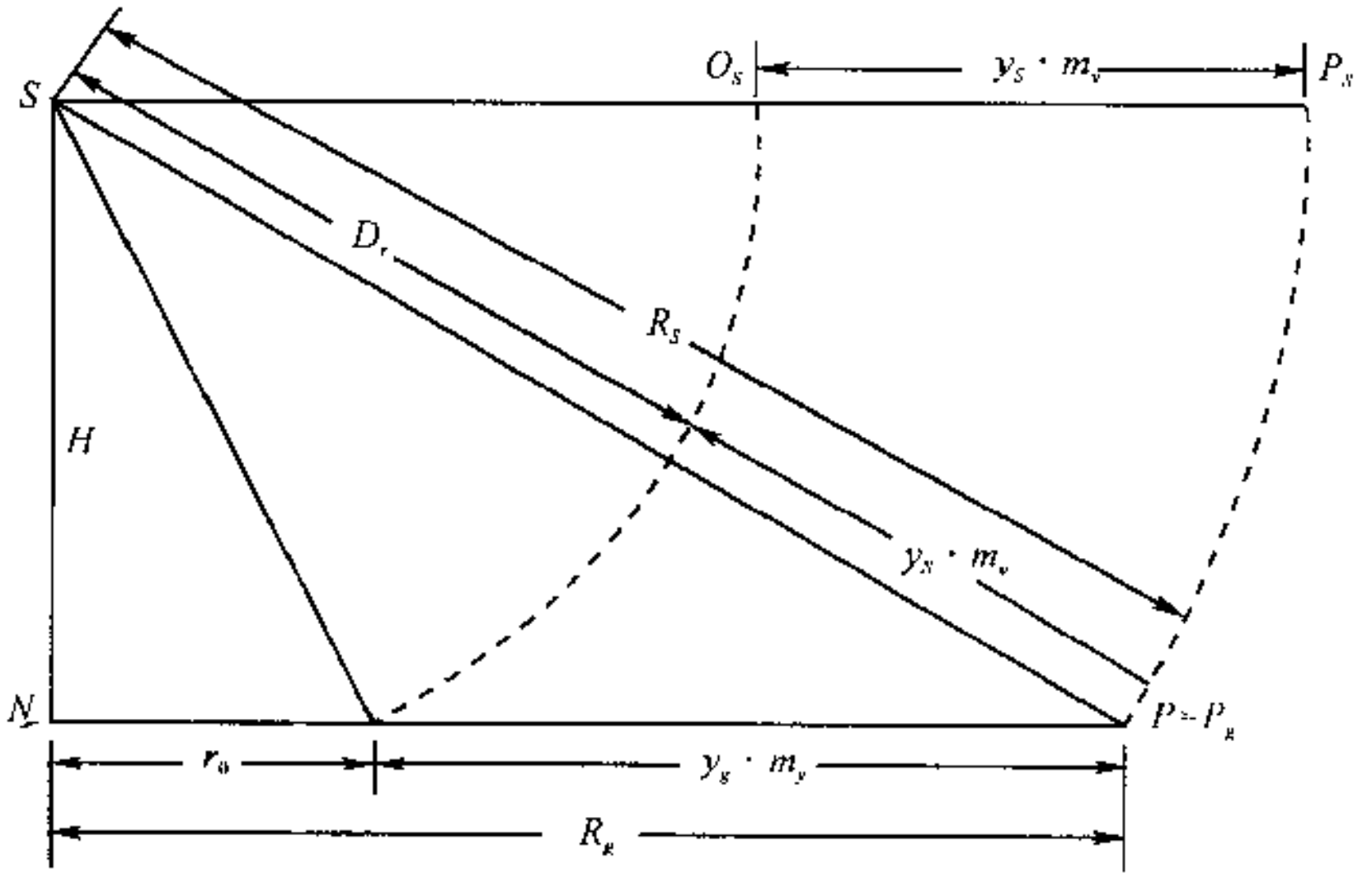



**图 6-2-1　雷达图像斜距投影的几何关系**

由图 6-2-1 可见对于地距显示图像则有

$$R_s = [(m_y \cdot y_g + r_o)^2 + H^2]^{1/2} \tag{6-2-1}$$

$$r_o = (D_r^2 - H^2)^{1/2} \tag{6-2-2}$$

根据雷达图像立体成像原理，在建立数学模型时所需的姿态参数应考虑一幅图像范围内飞行器是沿直线航线匀速飞行的，在此合理假设下，可选取下面七个参数：

$$X_{so}, Y_{so}, Z_{so}, V_{so}, V_{yo}, V_{zo}, r_o$$

其中，$X_{so}$，$Y_{so}$，$Z_{so}$ 为图像中心对应的雷达天线坐标，$V_{so}$，$V_{yo}$，$V_{zo}$ 为飞行器在图像中心对应雷达天线处的速度矢量各分量；$r_o$ 为图像中心相应地面点所在照射带靠近雷达天线的端点到雷达天线的斜距在地面上的投影。

根据雷达成像的几何关系，解算目标点三维坐标的两个条件方程为：

1. 距离条件方程

由图 6-2-1,距离条件方程可表示为:

$$H^2 + (m_y \cdot y_y + r_o)^2 - [(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2]^{1/2} = 0 = F_1 \tag{6-2-3}$$

2. 零多普勒条件方程

由图 6-2-2 可得多普勒条件方程

$$V_{xo}(X - X_s) + V_{yo}(Y - Y_s) + V_{zo}(Z - Z_s) = 0 = F_2 \tag{6-2-4}$$

在(6-2-3)式和(6-2-4)式中,$H$ 为设计航高;$(X\ Y\ Z)$为地面点坐标;$(X_s, Y_s, Z_s)$为地面点对应的雷达天线坐标,它可以表示为

$$\begin{aligned} X_s &= X_{so} + V_{xo} \cdot T \\ Y_s &= Y_{so} + V_{yo} \cdot T \\ Z_s &= Z_{so} + V_{zo} \cdot T \\ T &= m_x \cdot x \end{aligned} \tag{6-2-5}$$

其中 $x, y$ 为像点坐标,$m_x$ 为方位向图像比例尺分母。这样由立体图像上的两个同名像点,可以列出四个条件方程,从而能够确定地面点的三维坐标。

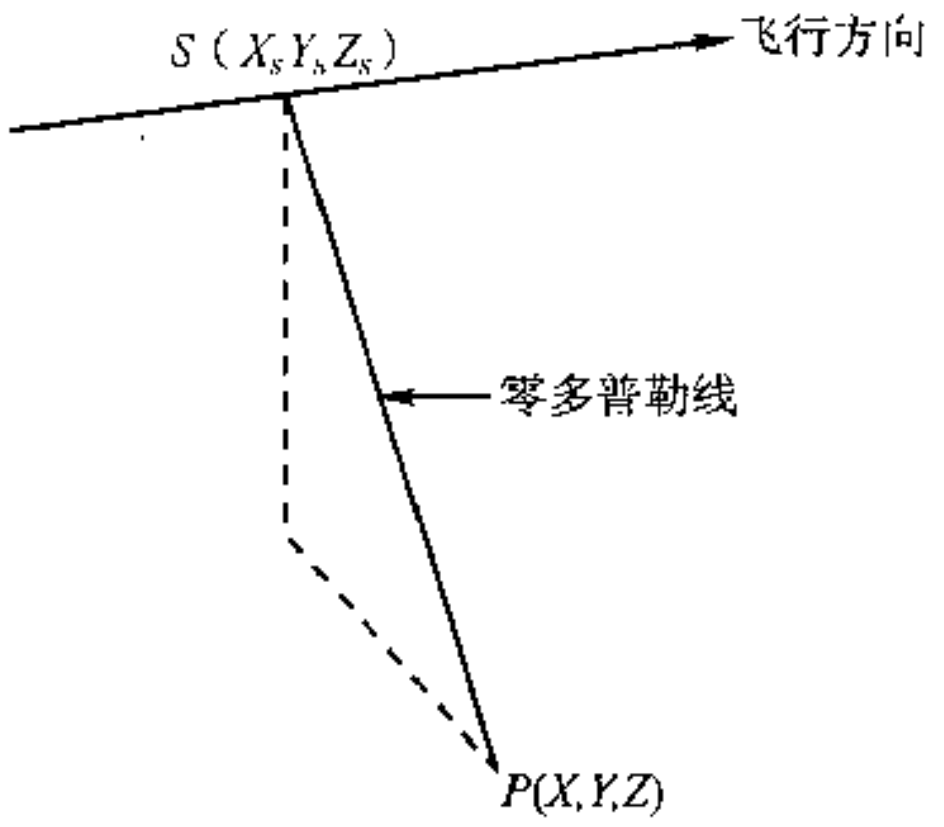



图 6-2-2 零多普勒条件

将(6-2-3)式和(6-2-4)式线性化,得到

$$C \cdot V + B \cdot \Delta + A \cdot E = L \tag{6-2-6}$$

式中,$V = [V_x\ V_y]^{\mathrm{T}}$ 为像点坐标残差矢量;$\Delta = [\Delta X\ \Delta Y\ \Delta Z]^{\mathrm{T}}$ 为地面点坐标改正矢量;$E = [\Delta X_{so}, \Delta Y_{so}, \Delta Z_{so}, \Delta V_{xo}, \Delta V_{yo}, \Delta V_{zo}, \Delta r_o]^{\mathrm{T}}$ 为图像姿态参数改正数矢量;$L = -[F_1\ F_2]^{\mathrm{T}}$ 为常数项矢量;$C$、$B$、$A$ 为相应的系数矩阵。

由(6-2-6)式得到如下法方程式,

$$\begin{bmatrix} B^{\mathrm{T}}N^{-1}B & B^{\mathrm{T}}N^{-1}A \\ A^{\mathrm{T}}N^{-1}B & A^{\mathrm{T}}N^{-1}A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{\mathrm{T}}N^{-1}L \\ A^{\mathrm{T}}N^{-1}L \end{bmatrix} \tag{6-2-7}$$

式中,$N = CQ_{xy}C^{\mathrm{T}}$,$Q_{xy}$为像点量测坐标的协方差矩阵。

已知地面控制点的观测方程为:

$$\left.\begin{aligned} \Delta X &= X_t - X + V_x \\ \Delta Y &= Y_t - Y + V_y \\ \Delta Z &= Z_t - Z + V_z \end{aligned}\right\} \quad \text{权阵 } P_{xyz} \tag{6-2-8}$$

其中,$(X_t, Y_t, Z_t)$为已知坐标,$(X, Y, Z)$为其初值。

根据以上数学模型，以如下过程解算待求点的三维坐标：

1. 量测像点坐标并进行像点坐标的变换；

2. 独立参数初值的计算；

如图 6-2-3 所示，$A$、$B$ 是一条雷达成像航线上的两点，它们的已知坐标为$(X_A, Y_A, Z_A)$和$(X_B, Y_B, Z_B)$，$R(X_R, Y_R, Z_R)$为已知地面点 $I$ 所对

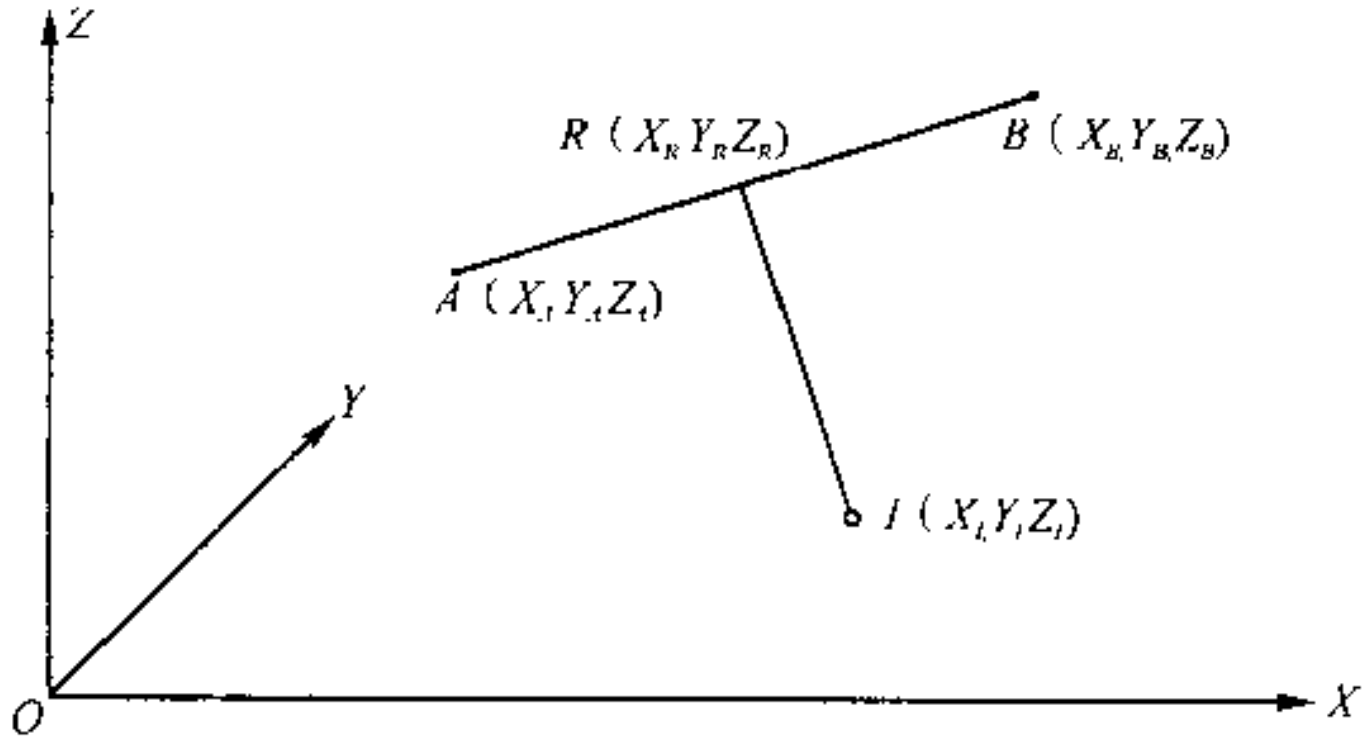



图 6-2-3　地面点 $I$ 的天线位置坐标

应的雷达天线位置的坐标，则解下面三个方程式：

$$\alpha(X_R - X_I) + \beta(Y_R - Y_I) + \gamma(Z_R - Z_I) = 0$$

$$X_R - X_A = \frac{\alpha}{\beta}(Y_R - Y_A) \tag{6-2-9}$$

$$Z_R - Z_A = \frac{\gamma}{\beta}(Y_R - Y_A)$$

可得

$$X_R = \frac{\alpha S}{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} + X_A$$

$$Y_R = \frac{\beta S}{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} + Y_A \tag{6-2-10}$$

$$Z_R = \frac{\gamma S}{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} + Z_A$$

其中，

$$\begin{aligned} S &= \alpha(X_I - X_A) + \beta(Y_I - Y_A) + \gamma(Z_I - Z_A) \\ \alpha &= X_B - X_A \\ \beta &= Y_B - Y_A \\ \gamma &= Z_B - Z_A \end{aligned} \tag{6-2-11}$$

任一地面点所对应的雷达天线位置坐标可由(6-2-5)式求出，即

$$X_r = X_{s0} + V_{x0} \cdot T$$

$$Y_r = Y_{s0} + V_{y0} \cdot T$$

$$\begin{aligned} Z_r &= Z_{so} + V_{zo} \cdot T \\ T &= m_x \cdot x \end{aligned} \tag{6-2-12}$$

由两个以上的地面控制点所对应的雷达天线位置坐标，用最小二乘法可以解算出一幅图像的独立参数($X_{so}$, $Y_{so}$, $Z_{so}$, $V_{xo}$, $V_{yo}$, $V_{zo}$)，参数 $r_o$ 的初值可按(6-2-2)式计算。

3. 地面点坐标初值的计算

利用控制点解算出下列多项式的系数，

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 x + A_2 y + A_3 xy + A_4 x^2 + A_5 y^2 \\ Y &= B_0 + B_1 x + B_2 y + B_3 xy + B_4 x^2 + B_5 y^2 \end{aligned} \tag{6-2-13}$$

然后，计算各地面点的平面坐标($X$, $Y$)，式中($x$, $y$)为像点坐标。

由距离条件，在立体影像中，有

$$\begin{aligned} &H_1^2 + (m_y \cdot y_1 + r_{01})^2 - [(X - X_{R1})^2 + (Y - Y_{R1})^2 + (Z - Z_{R1})^2] = 0 \\ &H_2^2 + (m_y \cdot y_2 + r_{02})^2 - [(X - X_{R2})^2 + (Y - Y_{R2})^2 + (Z - Z_{R2})^2] = 0 \end{aligned} \tag{6-2-14}$$

可得

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{R1} - \sqrt{H_1^2 + (m_y \cdot y_1 + r_{01})^2 - [(X - X_{R1})^2 + (Y - Y_{R1})^2]} \\ Z_2 &= Z_{R2} - \sqrt{H_2^2 + (m_y \cdot y_2 + r_{02})^2 - [(X - X_{R2})^2 + (Y - Y_{R2})^2]} \\ Z &= (Z_1 - Z_2)/2 \end{aligned} \tag{6-2-15}$$

其中，

$$\begin{aligned} X_{R1} &= X_{so_1} + V_{so_1} \cdot T_1 \qquad X_{R2} = X_{so_2} + V_{so_2} \cdot T_2 \\ Y_{R1} &= Y_{so_1} + V_{so_1} \cdot T_1 \qquad Y_{R2} = Y_{so_2} + V_{so_2} \cdot T_2 \\ Z_{R1} &= Z_{so_1} + V_{so_1} \cdot T_1 \qquad Z_{R2} = Z_{so_2} + V_{so_2} \cdot T_2 \end{aligned} \tag{6-2-16}$$

这里($x_1$, $y_1$)，($x_2$, $y_2$)为像点坐标；$H_1$, $H_2$ 为航高；$m_x$, $m_y$ 为方位向和距离向图像比例尺分母。

4. 平差计算

平差计算过程如图 6-2-4 所示。

例：由中国航空遥感服务公司使用 GOODYEAY 公司的 GEMS 机载 SAR 在北京良乡地区，以雷达工作方式 1 和(见表 6-2-1)同侧飞行立体成像。GEMS SAR 的技术参数和图像参数如表 6-2-1 和表 6-2-2。

表 6-2-1　GEMS SAR 技术参数

| 名　　目 | 雷达工作方式 1 | 雷达工作方式 2 |
|---|---|---|
| 作用距离 | 18.51～37km | 37～55.5km |
| 飞行高度 | 3048～10668m | 6096～13000m |
| 天线俯视角 | 4.87～16.22 | 6.51～14.1 |
| 工作波长 | 3cm | 3cm |
| 脉冲宽度 | 1μs | 1μs |
| 几何精度 | 1% | 1% |
| 距离分辨力 | 3m | 3m |
| 方位分辨力 | 3m | 3m |

表 6-2-2　实际图像资料有关技术参数

| 名　　目 | 航线 1 | 航线 2 |
|---|---|---|
| 雷达工作方式 | 方式 1 | 方式 2 |
| 图像显示方式 | 平距显示 | 平距显示 |
| 设计航高 | 10000m | 12000m |
| 扫描延迟 | 126.6μs | 244.0μs |
| 方位向比例尺 | 1:100000 | 1:100000 |
| 距离向比例尺 | 1:100000 | 1:100000 |
| 雷达立体方式 | 同侧立体 | |
| 基高比 | 0.06～0.27 | |

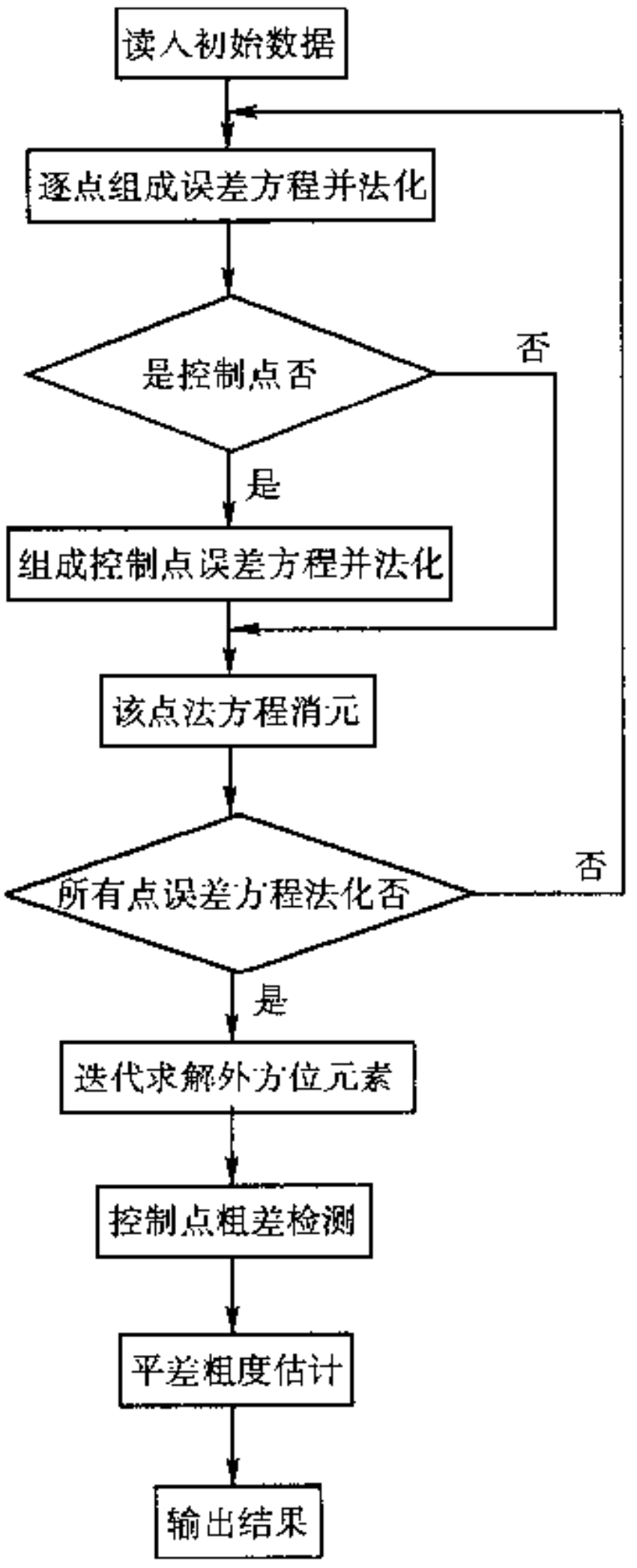



图 6-2-4　平差计算过程框图

目标点的定位结果表明，精度可以达到：

山丘：$m_{xy}=27\text{m}$　　$m_z=25\text{m}$

丘陵：$m_{xy}=26\text{m}$　　$m_z=17\text{m}$

这样的平面位置精度已可满足 1∶10 万比例尺地图修测的要求。至于高程精度，由于机载 *SAR* 的基高比过小，只能满足测制小于 1∶20 万比例尺的地形图的需要。

## 第三节　利用侧视雷达图像的解析测图方法

这里以国产 APS—1 解析测图仪为例，说明利用侧视雷达图像测图的基本思想。

立体雷达图像解析测图所用的条件方程以及相应的姿态参数与确定目标三维坐标时所用的相同，若需考虑比例尺变化，还可增加 $M_x$，$M_y$。由于雷达图像与中心投影像片在成像原理上有着本质上的区别，因此解析测图仪原有的为中心投影像片设计的软件系统并不适用，所以必须根据所采用的 APS—1 型解析测图仪的基本功能，另行设计用于雷达立体图像的测图程序。

APS—1 解析测图仪属于物方型仪器，其 LOOP 程序每隔 20ms 运行一次，可以实时地收集由手轮和脚盘向计算机提供的模型坐标 $X_m$，$Y_m$，$Z_m$。在主机面板键控制下该仪器分别以三种状态工作。图 6-3-1 表示 LOOP 程序中主要的坐标变换关系。

在像片工作状态下，为了完成内定向和像点量测工作，LOOP 程序把输入的 $X_m$，$Y_m$，$Z_m$ 直接当成仪器上像片车架的移动量驱动车架，省略了图 6-3-1 中其他复杂的变换过程。

在模型工作状态下，可以进行图板定向以及其他的模型量测，例如建立 DEM、面积量算等。LOOP 程序根据中心投影构像方程和定向参数，将手轮、脚盘的输入量 $X_m$，$Y_m$，$Z_m$ 逐步换算为像片坐标、像片车架坐标和地面坐标，并由伺服系统驱动像片车架，使测标标定在应有的车架坐标值的位置上。当操作员连续地输入目标点的模型坐标 $X_m$，$Y_m$，$Z_m$ 时，LOOP 程序 20ms 的中断间隔使测图仪能实时地将测标标定在相应像点上，从面使目标点的地面坐标与像点坐标一一对应。在图板定向时，定向点的图板坐标由数控绘图仪的硬件系统直接取得。因此，在模型工作状态下，LOOP 程序的运行路线省略了图 6-3-1 中由 $X_m$，$Y_m$，$Z_m$ 变换为图板坐标的过程。

在联机绘图工作状态下，可在图板上测绘立体模型的地物地貌，注记特

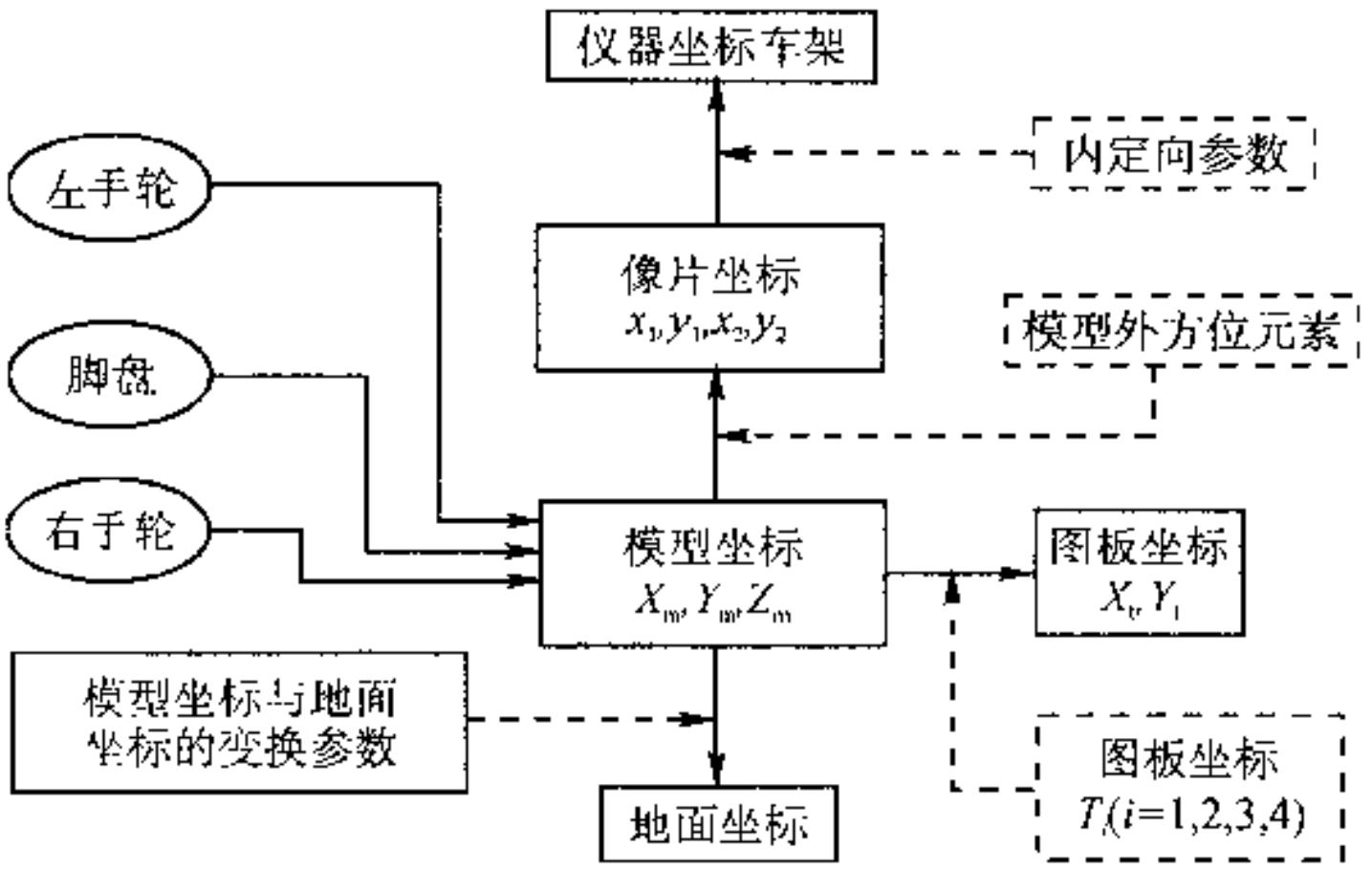



**图 6-3-1　LOOP 程序中坐标的变换**

征点的高程。该工作状态是在模型工作状态的基础上，将目标点的地面坐标用图板定向参数换算为图板坐标，并且用伺服系统在测标标定像点的同时驱动测笔，将测笔标定在图板的相应位置上，因此，在图板工作状态下，可使目标的图上点与像点、物点一一对应。

LOOP 程序运行时，需及时得到图 6-3-1 中所列的各种坐标参数、定向(变换)参数以及工作状态的控制参数等数值。在应用程序如内定向、相对定向等程序中设计一个同样的公用参数区，以此和 LOOP 程序进行数据交换，实现双向控制。

适用于雷达立体图像特点的 LOOP 程序必须满足以下几个条件：

1. 实时条件，即 LOOP 程序的运行周期必须小于 20ms。

2. 对应条件，即 LOOP 程序应使目标点的物方空间坐标与其图像坐标实现一一对应关系。

3. 无视差条件。为了能在一个无视差的立体模型上测绘地形图，LOOP 程序中必须有相应的视差改正程序块。

在设计 LOOP 程序时，采用了 APS—1 解析测图仪上全部电子接口部件以及原有的用于中心投影像片的 LOOP 程序的中断方式、中断时间间隔的设置方法以及使 LOOP 程序常驻计算机内存的功能。

坐标变换的基础是雷达成像方程。由(6-2-3)式，(6-2-4)式和(6-2-5)式可得雷达图像的物理坐标：

$$T = \frac{(X - X_{s0})V_{x0} + (Y - Y_{s0})V_{y0} + (Z - Z_{s0})V_{z0}}{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$R = \sqrt{(X - X_{s0})^2 + (Y - Y_{s0})^2 + (Z - Z_{s0})^2} \qquad (6\text{-}3\text{-}1)$$

根据外部定向参数求出图像平面坐标：

$$x = (T - T_o)/m_x$$
$$y = (\sqrt{R^2 - H^2} - r_o)/m_y \tag{6-3-2}$$

其中，$T$、$R$ 分别为飞行时间和目标至雷达天线的斜距，$T_o$ 为图像原点的时间，其余符号如前所述。LOOP 程序中引入了(6-3-1)式和(6-3-2)式后，可使目标点的物方空间坐标与相应的图像坐标实现一一对应关系。

由于(6-2-5)式只取一次项，因此(6-3-1)式和(6-3-2)式带有近似性。此外，雷达图像坐标的精度还受图像分辨力、地形类别、雷达天线位置、天线姿态参数、地面控制点、立体模型的几何特性、基高比以及雷达观测角等因素的影响，致使用(6-3-2)式计算得到的图像坐标与观测值产生差异。为此在 LOOP 程序中采用多层二次曲面拟合技术对每一个被量测的点进行视差改正，从而得到一个无视差的立体模型。

雷达立体图像解析测图的 LOOP 程序结构框图如图 6-3-2 所示。

雷达立体图像解析测图软件包除 LOOP 程序外，还包括内定向、像点量测、外定向参数的计算、参数的输入、图板定向以及联机绘图等应用程序。

例：所用资料系由 GEMS 机载 SAR 在北京良乡地区所获取的一个山地立体模型。用于定向的控制点以及用于检核定向精度的检查点，一部分是野外控制点，另一部分则选自 1∶5 万地形图。

在 APS—1 上测图的精度列于表 6-3-1。

**表 6-3-1　APS—1 上测图精度**

| 检查点数 | 控制点数 | 控制点残差中误差 | | 检查点残差中误差 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 22 | 9 | $X_m = 13.8$m<br>$Y_m = 16.2$m | $Z_m = 13.2$m | $X_m = 26.7$m<br>$Y_m = 23.9$m | $Z_m = 33.1$m |

将表 6-3-1 所列结果与前面第二节的结果相比较，可以看出前者确定点位的精度略低，这是因为在解析测图实验中只在一个立体模型内计算定向参数，而且没有采用更有效的剔除粗差的方法所致。

上述第二节和第三节所介绍的内容为郑州测绘学院有关科研成果。

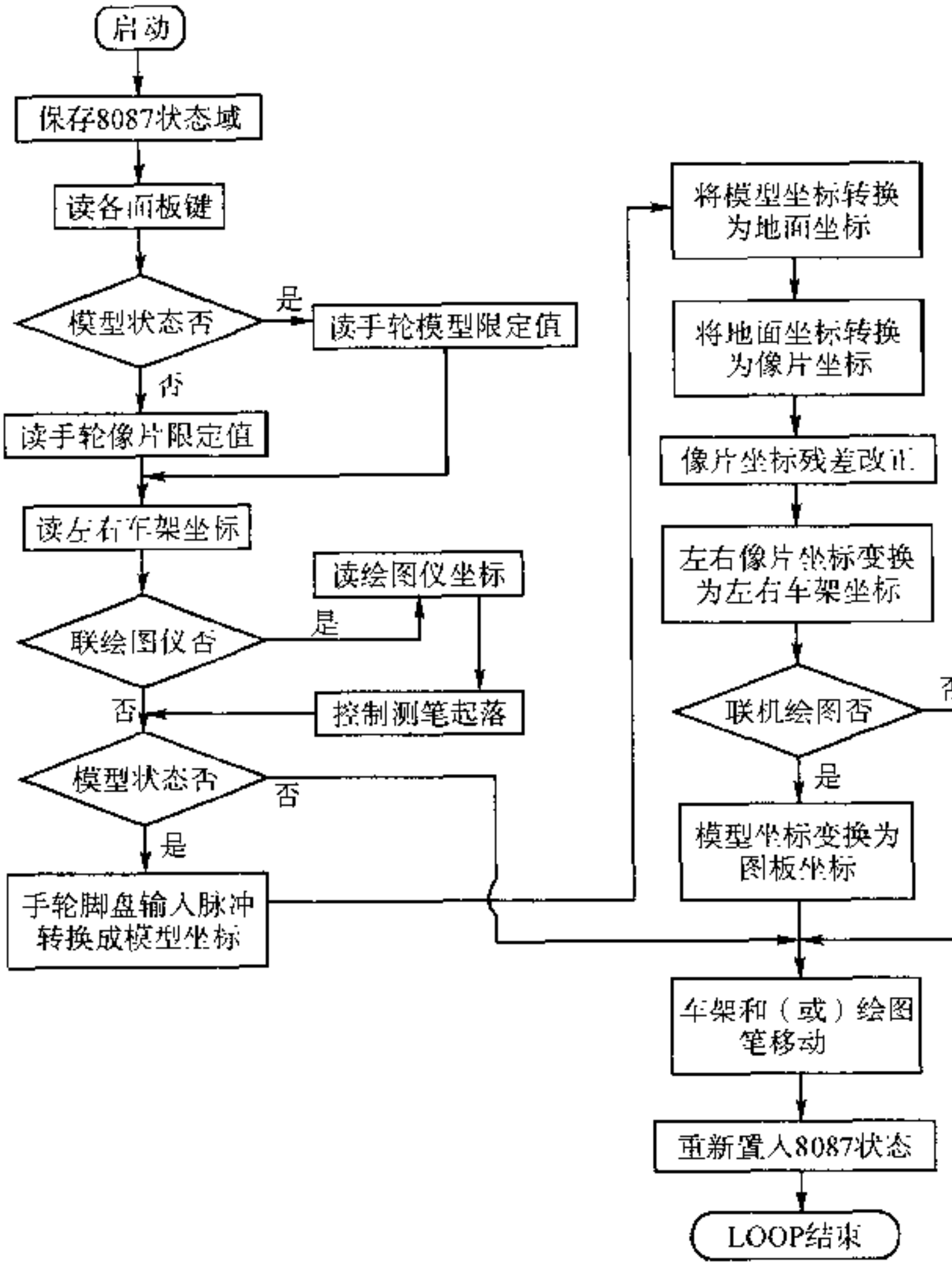



**图 6-3-2　LOOP 程序结构框图**

**思考题：**

1. 在雷达图像上作平面测量时，为什么要作光点尺寸的补偿？
2. 为什么侧视雷达图像立体量测采取同侧立体方式较好？
3. 在雷达图像上根据阴影和叠掩量测地物高度的前提是什么？
4. 怎样理解图 6-1-6 和图 6-1-8 中的视差？
5. 设 s 为天线、p 为独立地物，雷达天线高度为 H，试绘出 p 点在雷达图像上的位置，并标明图像上哪一段为叠掩，哪一段为阴影，然后说明如何利用叠掩或阴影量测 p 点高度 h。

# 第七章　微波图像的目视解译和计算机处理

目前在雷达图像的分析、应用中主要采取目视解译方法。在利用雷达图像进行解译时必须熟悉其成像机制和图像信息特点。在此基础上，充分了解雷达图像解译标志的特点和各类地物的解译规律是十分必要的。另一方面，由于星载雷达图像多是数字图像，对于这类数字图像的处理和研究也越来越多，并且有的效果很好，所以掌握这方面的方法也显得非常重要。

## 第一节　雷达图像的解译标志特点

雷达遥感图像不同于可见光和红外图像。这里主要指侧视雷达图像，由于它是主动遥感，以斜距成像，有多种极化方式，且目前多是以单一频率的雷达波束进行工作，人们常以单色的雷达图像作处理分析，故其解译标志有着许多与其它图像不同的地方。

通常对图像进行解译时须首先针对不同地物目标建立起其解译标志，即分析它们在色调，形状，大小，阴影，纹理，相对位置关系等方面的特点，借以区分不同的地物。虽然对雷达图像上的地物目标也需要按上述诸方面建立起它们各自的解译标志，但这些解译标志已经有不同于其它图像的特点，在解译过程中必须充分注意。

图像色调是雷达回波强弱的表现，它与许多因素有关，这已在第三章雷达图像特点的分析中作了详尽的介绍。其中有波长、入射角、极化方式、地物目标的方位、复介电常数、表面粗糙度、是否构成角反射器等。因此，在分析图像色调时，必须考虑这些因素。

形状是指地物的周界或轮廓所构成的一种空间形式，在可见光和红外图像上反映得比较清楚，周边的色调一般比较一致，虽然也存在某种程度的变形，须作几何校正，不过一般不会造成视觉上的很大差异。雷达图像不同，大多数地物目标在雷达图像上的形状与其在人们的视觉中的形象相差很大，而且常常是实际目标的部分轮廓，例如一座平顶楼房，在图像上一般

表现为“L”形，因为楼房的平顶无回波，在这栋楼房占据了数个分辨单元时，它就会在图像上出现与人们想象不同的形状，在分析地物形状时，需要注意这种情况。

反映在图像上的地物大小与图像的分辨率有关，低分辨率的情况下不可能反映地物大小，分辨率高的情况下，又取决于它的回波信号与邻近地物的差异，否则无法辨别出它的大小。另外，地物所处的位置也是必须注意的，如果在坡面上，因为透视收缩，叠掩和阴影会造成很大变形。

雷达图像上的阴影与其它图像上的阴影不同，它是雷达波束照射不到的部位，在解译时，须将阴影部分靠近判读人员，亮的部分则远离判读人员，否则会造成错觉，将原本是凸起的地形看成是凹下的。阴影是地形起伏或高大地物的标志，它掩盖了在这一部位的地物。

纹理是色调变化的空间频率，在雷达图像上的纹理是其分辨率的函数，它一般可以分为三种，即细微纹理、中等纹理和宏观纹理。细微纹理与分辨单元的大小和分辨单元内的独立地物的多少有关，所以它是系统固有的一种特征，倘有高分辨率的图像，就能发现地物纹理上的差异，比如不同类型的植被等。中等纹理是细微纹理的包络，它是由数个分辨单元为尺度的纹理特征，由多个分辨单元中的同一目标色调的不均匀性或不同目标的不同色调构成，比如在有露生树种的森林，再如沼泽中各种土壤和植被的分布，其图像中的纹理带有斑点或亮点，有的则是颗粒状的，同一类型的地物的中等纹理则比较有规律。中等纹理特征是雷达图像解译所用的纹理特征，它在图像分析中起着重要的作用。宏观纹理是以数百个甚至更多的分辨单元为尺度的色调变化特征，它主要反映地形结构特征。由于雷达回波随地形结构变化改变了雷达波束与地物目标之间的几何关系和入射角，从而造成宏观纹理的变化，宏观纹理是地形地貌和地质判读中的关键因素。

地物的相对位置关系同样在雷达图像的判读中起着十分重要的作用，因为某种固有的位置关系，在目标信号不明显的情况下，往往可以通过与其位置关系紧密的地物，发现目标的存在。比如道路与路旁的树，有时邻近地物的回波可能掩盖道路的信息，但其两旁的目标如树却可以在图像上表现为亮线条，从而把道路的信息“透视”出来。

## 第二节　雷达图像中各类地物的解译

这里主要介绍利用侧视雷达图像在解译各类地物时的一些特点和规律。

## 一、植被

植被的解译是图像解译中的重要内容，因为地面上大部分为植被覆盖，植被的信息不仅关系到它本身，而且关系到与它有联系的其它地物，例如不同土壤上生长不同的植被，再如植被类型、密度与某种地质结构和岩石类型相关联等。

与可见光和红外图像一样，虽然雷达图像中不同的植被具有不同的回波强度，但同类植被也可能有不同的回波，不同类植被有时也可能有相同的回波信号，如何区分不同类型植被，需要对影响植被回波的因素进行分析。

影响植被回波的主要因素有含水量、粗糙度、密度、结构等，对于人工种植的植物来讲，还有种植的几何形状等。一般说来，含水量大的植被回波信号要强，例如，雨后植被回波比雨前强，沼泽地植被的回波比干燥地上的回波要强。植被的粗糙度也可分为微粗糙度，中等粗糙度和宏粗糙度。微粗糙度的尺度小于一个分辨单元，仅与植物本身的状况如叶面大小、树冠疏密、枝叶密度等有关，其回波强度因波长和俯角而异，比如一般落叶树比针叶树的回波强。中等粗糙度一般以数十甚至数百个分辨单元为尺度，它与植被的密度、高差及分布有关，与图像的纹理有直接关系，一般分布着稀疏植物的地面和农作物的图像纹理比较均匀、细致，而自然植被的图像有更多的斑点，通常根据图像的纹理和色调可以部分地画出各类植被之间的界线。宏粗糙度实际上是地貌粗糙度，其图像上的回波强度主要受坡度的影响。雷达观测方向和俯角在植被分析中是十分重要的雷达参数。合适的观测方向可以获得清楚显示植被界线的图像，并可以利用阴影估算植株的高度。合适的俯角可以使植被下的土壤特性的影响减至最小。一般说来，有利于植被类型和植被表面状态分析的侧视雷达系统应具备高于 8GHz 的频率，采用中等俯角，因为低频雷达波束和近垂直入射会增加穿透力，使土壤的回波干扰增加。

至于说极化方式，如果要能很好地区分不同农作物，则 VV 极化在同极化方式中是较好的，但农作物表面常常是一个粗糙面，具有去极化作用，故利用交叉极化信息能提高分类精度。

不同的季节对植物回波的影响也是明显的，因为不同的季节含水量不同，植物枝叶密度不同，植被表面粗糙度也不同，利用多时相雷达系统，结合多极化方式，会有助于更好地区分不同农作物。单频图像或单极化图像的分析效果往往并不太好，因为不同农作物的回波差异通常是很小的，将多极化图像与多时相图像结合起来分析不同的农作物，有时分类精度可以达到 90％左右。

## 二、土壤

土壤的回波主要与土壤的含水量、粗糙度和土壤颗粒结构类型有关。一般说来，土壤的含水量增加，其表面对电磁波的反射增加，回波增强，穿透减弱。实验表明，X 波段的雷达波束在干砂土中可穿透 100cm 左右，若含水量增加 3%，则穿透深度减少一个数量级，土壤湿度再增加，就不再存在穿透。不同类型的土壤形成表面粗糙度的因素各不相同，另外由于其不同的土壤颗粒结构，接收和存贮水的情况不同，这些都是借以分析不同土壤类型的基础。在没有植被覆盖的情况下，需要依照其含水量和粗糙度加以区分，在有植被覆盖的情况下，由于不同类型的土壤的含水量不同，影响植被的长势和类型，通过植被的回波可反映土壤的情况。

土壤湿度的确定是一个重要的内容，它关系到农作物的生长、旱灾和火灾的预测等。但影响土壤雷达回波的因素不仅有土壤的湿度，而且还有土壤粗糙度和植被的影响，所以必须将粗糙度和植被的影响尽可能减小，同时要对雷达图像进行定标，以便作定量分析。另外，还需要减小回波对土壤不同颗粒结构类型的依赖程度。根据大量实验的结果，表明频率为 5GHz 左右，入射角为 7 到 17 之间，采用 HH 或 VV 极化，可以使土壤粗糙度的影响减至最低。把土壤湿度表示为归一化的含水量 $m_f$（田间含水量的百分数），可以减小土壤颗粒结构类型的影响。在这些条件下，裸土散射系数（表示成分贝）与 $m_f$ 的关系式为（见文献[8]）

$$\sigma^0 = 0.148 m_f - 15.96 \tag{7-2-1}$$

这时 $\sigma^0$ 与 $m_f$ 的相关系数为 0.85。在有植被覆盖的情况下，则有

$$\sigma^0 = 0.133 m_f - 13.84 \tag{7-2-2}$$

这时两者的相关系数为 0.92。

## 三、岩石和地质构造

在雷达图像上识别和分析岩石类型，主要利用岩石的表面粗糙度、风化特点和地貌形态。粗糙度是岩石的表面特征，它是决定岩石图像色调的重要因素，不同岩性的岩石由于风化的作用会形成不同的地表形态，反映在雷达图像上则是不同的纹理。在解译岩石的岩性的过程中，主要根据不同岩性形成的特殊的图像特征和水系网、植被、耕地等有关信息，例如，喀斯特地貌是潮湿地区石灰岩和白云石岩的主要解译依据，这种地貌的雷达图像特征是干草堆形或丘形，丘形特征喀斯特地貌中，没有水系图型，只有因圆形的灰岩孔中可能有的积水形成无回波的圆点。再如干燥地区的石灰岩常常有块状破裂，造成许多角反射器，在雷达图像上出现强回波。

雷达图像对于地质构造分析是十分有意义的，从色调、阴影、特别是中

等和宏观纹理的分析中，不仅可以得到地势、地貌的信息，更直观的信息就是地质构造的信息。这一点特别与雷达波束的方向和俯角等参数关系密切，当雷达波束方向与占优势的线性构造方向垂直或接近垂直时，线性构造的信息反映得最为丰富、详尽。因为这种情况下线性构造在纹理上表现得十分明显。而如果俯角适中，不至于因为阴影过多、叠掩过多、透视收缩过大，造成图像信息的损失或变形，则地质构造的信息通过纹理分析更容易表现出来。通过纹理分析，将地貌、地势信息与地质结构信息综合为一体，更进一步为区域板块构造运动的认识和了解奠定了基础。

## 四、水

一般平静的水面总是造成镜面反射，无回波信号，在图像上为黑色调，这样有时与雷达阴影发生混淆，如面积很小的水面。另外在起伏较大的地区由于阴影干扰，难于提取水的信息，不过，因为水面的周围地物与水面形成不同的回波信号，利用这种关系，总可以解译出水面来。当水面有波浪时，则由于这种形式的粗糙度，在雷达图像上出现明暗相间的色调变化，这种情况下很容易发现水面。

对于河流而言，由于河流的流向与雷达波束方向所形成的角度各异，图像上就有不同的表现。当河流流向与雷达波束方向垂直或它们之间的夹角比较大时，很容易发现河流，这时近距离河岸是近距离端的均匀色调与无回波河面暗色调的分界线，远距离河岸由于河堤或岸边的树，形成角反射器，在图像上产生强回波，与河面形成较大的反差。若近距离河岸也有一行行的树，也会造成较强的回波，这时树的阴影可能使河面似乎显得更宽，而远距离的河岸上的树则可能造成叠掩，使河面显得窄了，所以要注意分析和判断。

在河流流向与雷达波束方向近乎一致时，河岸地物所形成的角反射器效应就会消失，河流的边界不会有明显强回波作为镶边。

## 五、冰雪

冰雪是一类重要的地物。由于冰雪的不同结构、含水量和介电常数等，对雷达波束的反射不一，图像上色调也出现不同的情况。

新雪是空气和冰的混合物，在温度低于冰点时，一般密度比较低，干燥，多呈片状，相对介电常数为 1.6 或更低，因此，雷达波束对它穿透作用较强，其表面的反射很小，它对雷达波束能量的衰减较小，在雷达图像中可以观测到雪下物质的回波。这时雪的粗糙度不起作用。当雪存在的时间较长，密度增高时，介电常数随之增加，直至达到冰的介电常数 3.17，对雷达波束的反射增加，当温度接近冰点时，出现液态水，成为空气、冰和水的混合物，介

电常数进一步增加，随着水的含量的增加，冰雪表面的反射能力增强，表面的粗糙度才起到越来越重要的作用。

冰雪存在的时间越长，因为压力和再结晶，空气的含量越来越少，形成冰川冰，其结晶颗粒半径甚至接近雷达波长，产生很强回波。要判断冰的"年龄"，需从色调和纹理上分析，一般一年生冰无回波，或回波较弱，只是在形成冰脊的边缘回波较强，二年生冰有比较均匀的中等灰度色调，有缓慢变化的斑纹，多年生冰的表面通常有风化脊、深洞和水道，色调比较亮。

海上的不同类型的冰具有不同的色调，没有浮冰的水和光滑的冰在雷达图像上具有相似的色调，浮冰一般呈现暗灰色调，碎冰色调明亮，冰山是有阴影的明亮斑点，等等。

## 六、房屋与城市

房屋一般具有较强回波信号。单独建筑物的四个侧面和顶面总有两面受到雷达波束照射，侧面与地面等可能组成多个角反射器，故回波较强。平顶建筑物屋顶大多形成镜面反射，于是整个建筑物在图像上呈现 L 形，如果是人字形屋顶，这样图像上就不再是 L 形，而是出现很亮的点状目标，因为屋顶的瓦面构成了漫反射。

村庄、集镇在雷达图像上表现为集聚成一片的亮点群，回波强度偏高。

城市的建筑物密集，排列多很整齐，由于排列方向的不同，有时回波很强，有时却可能消失，它不像单独的建筑物可以构成角反射器，密集的排列使得在某些情况下不存在角反射器效应。在高低不一的建筑物之间才可能形成多个角反射器。

城市的飞机场面积大，具有多种地面设施如机库、停机坪、跑道、指挥塔、候机厅等，一般飞机和建筑物回波强，跑道和停机坪等无回波，其间的草坪又具有中等回波，这样在图像上形成特有的机场图案，容易识别出来。

## 七、公路，铁路与桥梁

公路路面对 X 波段和 K 波段来说，一般可认为是平滑表面，图像上是无回波的暗线条，当分辨率很低时，这个暗线条也无法辨别，但道路两旁的地物如建筑物、树林等却可能与道路构成角反射器，而在图像上形成亮线条，暗示着道路的存在，高速公路在两个单行道之间常有隔离物如水泥墙墩、栏杆，或一条植被覆盖带，隔离物在两条暗线条间形成亮线条。

暗线条有时不一定是公路，其它地物如灌溉渠道等，也会形成暗线条，这时需根据相关的目标进行分析，比如桥梁、水体、建筑物等。

铁路在雷达图像上的色调变化很大，有时很强，有时很弱。当铁路的延伸方向与雷达图像的距离向一致时，图像上的信息为一暗线条，加上铁路路

面窄，在分辨率低时，铁路的信息就会被掩盖。在铁路与航向平行时，铁轨与路面，铁路与两旁的树木，路基与两侧地面构成二面角，图像上出现强线条。

桥梁的桥面一般因镜面反射在图像上无回波，但是由于桥梁各部分，如扶墙、栏杆、横档等之间能形成许多角反射器，因此在很窄的指向角范围内都具有强回波。此外，桥墩和水面所形成的二面角反射器也能贡献强回波，在图像分辨率很高的情况下，甚至可以分出桥墩的数目。但桥墩和水面在一定条件可能在图像上形成虚桥，即图像上可以看到两条靠得很近的桥，其中较亮的那条是实际存在的桥，较暗的那条为虚桥，这是在判读时需要注意的。

## 第三节　微波辐射计图像解译

微波辐射计接收的是地面各种地物的发射辐射，与地物的发射率 $\varepsilon$ 有关，而地物的发射率与地物的反射率 $\rho$、透射率的关系式是

$$1 = \varepsilon + \rho + \tau \tag{7-3-1}$$

若透射率 $\tau$ 为零，则

$$1 = \varepsilon + \rho \tag{7-3-2}$$

对于许多透射率很低的物体，如水，它被认为对于微波系统所用波长来讲，是一种良好的反射体，这时可以利用(7-3-2)式进行分析，图 7-3-1 和图 7-3-2 分别是按理论计算结果给出水的反射率和发射率随俯角变化的曲线。

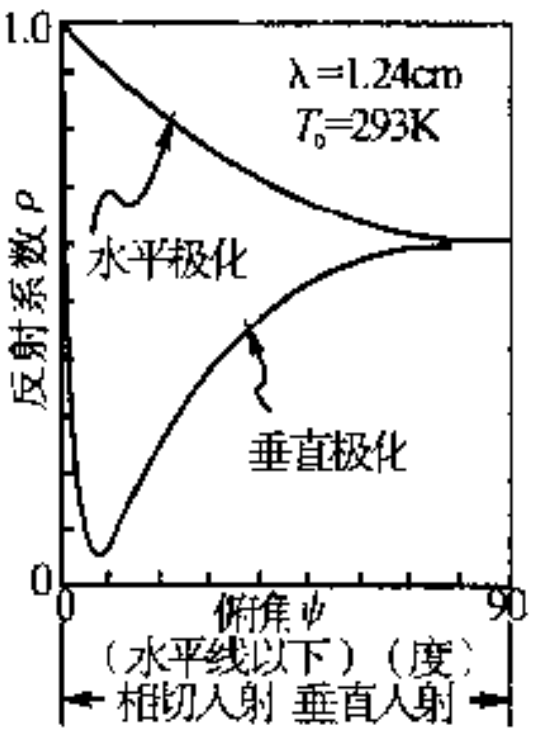



图 7-3-1　理论计算得出的水面的反射系数

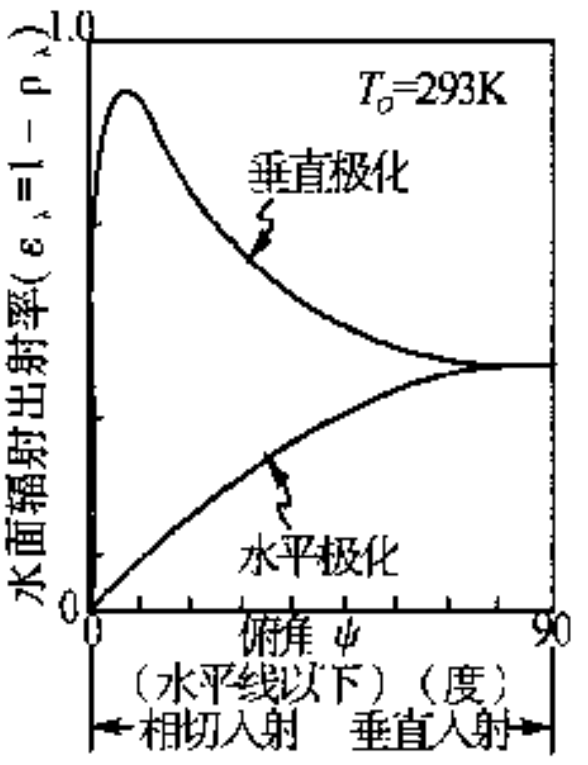



图 7-3-2　理论计算得出的水面的发射率

由于大多数地物的透射率都很小，可以看作为零，在分析这些地物的发射特性时，都可以按照(7-3-2)式进行分析。另一方面，大多数地物表面的反射特性对极化灵敏，如水、水泥、沥青和冰等，因而其发射特性也对极化灵敏，图7-3-2可以明显看出水的发射率在不同极化情况下的差异。

地物表面的粗糙度会影响辐射的极化特征，一般说来，粗糙度小的地物表面，具有明显的辐射极化特征，而粗糙度大的地物表面，会产生向各个方向的辐射，这些地物称为漫射体，如草、灌木和农作物就是这类地物，它们的辐射极化特征不明显，如图7-3-3草地和杂草的表观温度曲线即是一例。

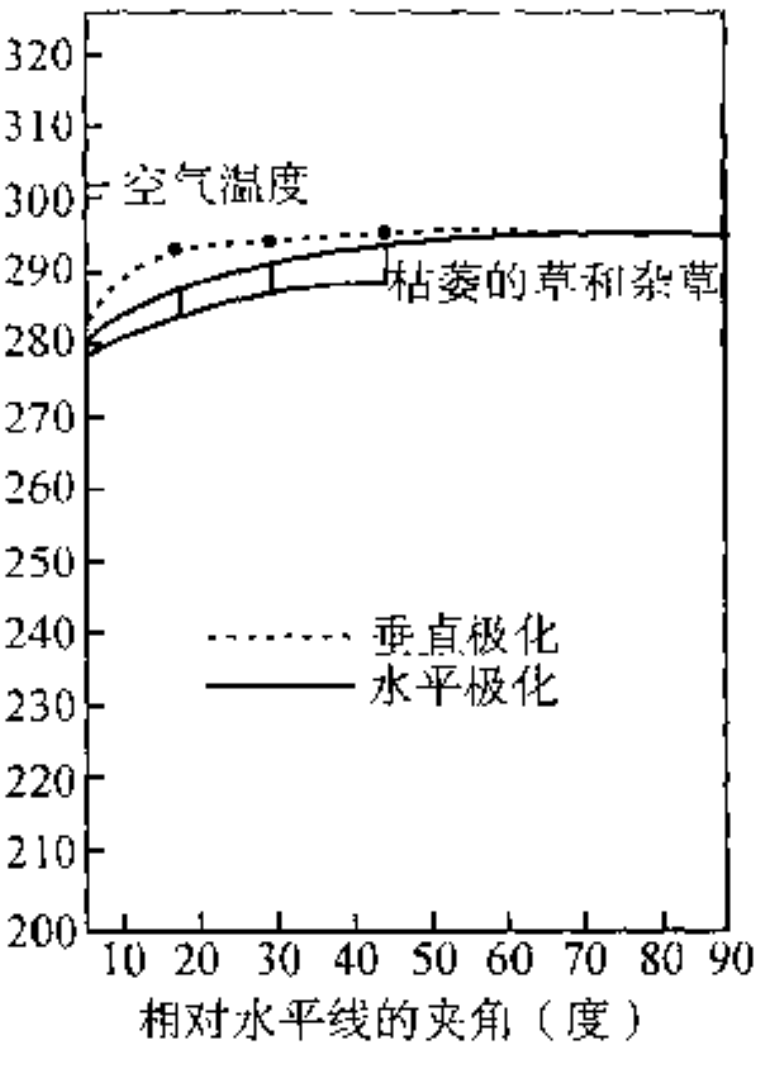



图7-3-3 草地和杂草的温度

图7-3-4表示了辐射计天线接收的所有能量的情况，除了地面辐射外，还包括大气向上的辐射 $\varepsilon_a T_a$，地面对天空辐射的反射 $(1-\varepsilon_g)T_s$，地面对大气向下辐射的反射 $\varepsilon_a T_a(1-\varepsilon_g)$，辐射计测得的能量用表观亮度温度 $T_A$ 表示，很明显，表观温度与目标的有效温度 $T_g$ 是不同的。从天线"视场"的分析来看，也是这样。由于天线主瓣范围往往比地物的面积大，而且旁瓣又会使天线接收其它地物辐射，使表观温度所含辐射成份变得复杂。

上面的分析以温度表示辐射能量，这是因为根据瑞利—金斯公式，在微波范围内，辐射亮度与绝对温度的一次方成正比，表观亮度温度就直接代表了辐射能量，这与红外辐射是不相同的，根据玻耳兹曼定律，红外辐射能量与绝对温度的四次方成正比。微波辐射计测得的表观亮度温度直接与实际地物的温度相关。这样，随着时间的变化，实际地物温度的波动，天空温度的变化，物体反射与发射特性的变化，表观温度具有反映灵敏的特点。

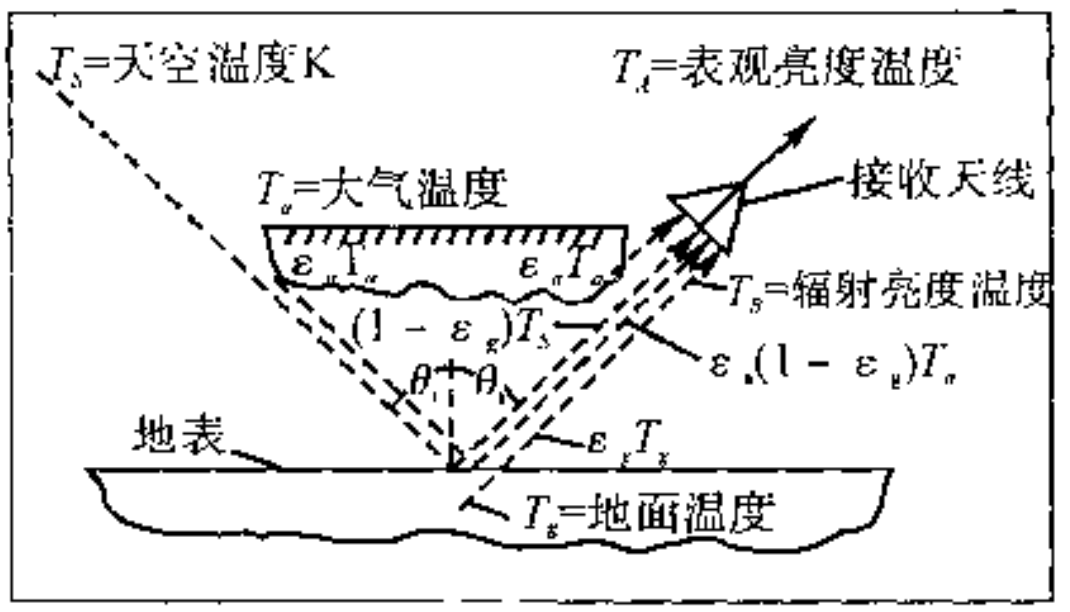



图7-3-4 一个"辐射－透射"模型

辐射计所获得的图像取决于不同目标的表观亮度温度的差异及地物目

标和背景之间的表观亮度温度之差，由于这种辐射温度差可以是 5 度至 200 度左右，如道路与两旁的草的辐射温度差可达 20 度以上，金属物体与周围的草的温度则可以达到 200 度左右。在温差较大的情况下，辐射图像是可以区分不同的地物的。辐射计系统的分辨率主要取决于目标辐射温度差，系统噪声等。

下面以 $\delta T$ 表示最小可探测温差的均方根，它与系统噪声的均方根值大致相当。目前 $\delta T$ 已可以达到 0.02K。辐射计的灵敏度也往往用 $\delta T$ 表示。辐射计的信噪比则以下式给出

$$S/N = \Delta T/\delta T \tag{7-3-3}$$

其中

$$\Delta T = \Omega\gamma\Delta T' \tag{7-3-4}$$

$\Omega$ 是目标的立体角与天线波束的立体角之比，$\gamma$ 为大气衰减因数，$\Delta T'$ 为目标辐射温差。

图 7-3-5 为辐射计图像与同时拍摄的光学像片，由于当时云层很厚，光学像片上只有云层顶部的信息，而辐射计图像则清晰地反映出道路、农田、湖泊、建筑物等信息，这是各种地物的微波辐射能够穿透云层的结果。从这个图例可见，辐射计图像可以用来分析各种土地利用类型状况。这里须注意，图像为正片，亮的地方相当于冷的地物，暗的地方则是辐射较强的热的地物，河流、水体、建筑物显得较亮。

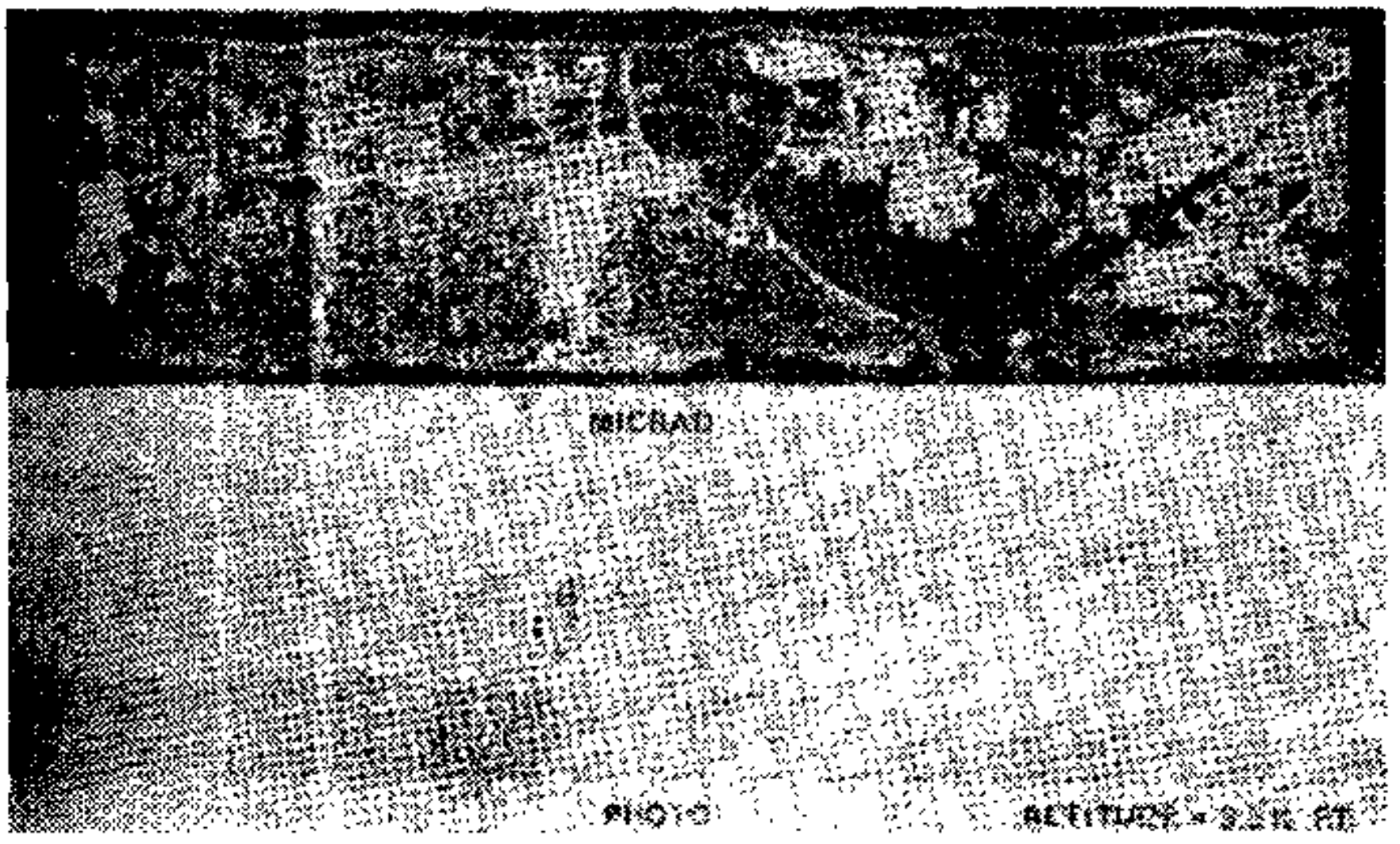



**图 7-3-5　在加利福尼亚州巴克斯菲尔德地区透过云层获取的被动微波图像**

云层高 1500 英尺

MICRAD—微波辐射图像；PHOTO—像片；高度＝3500 英尺；倾斜范围＝4200～8000 英尺

图 7-3-6 为农村地区辐射计图像，其中 A 地为水浇地，B 处为干旱裸土，水浇地显出浅色调。干旱裸土的辐射较强，相对水浇地却显得色调深

些,这也是辐射计图像正片的特征。




**图 7-3-6　1973 年 10 月 17 日在加利福尼亚州洛斯特地区 760 米(2500 英尺)上空飞行时取得的微波辐射图像**(从其上不难看出运河和集油槽以及 A 处的水浇地和 B 处的干旱裸土)

表 7-3-1 是不同土壤的微波发射率,从这个表可以看出,不同的土壤因其含水量不同,发射率也不同,含水量多反射的比例大,透射和吸收的比例小,故而发射率较低,在图像上就应呈现较暗的色调,若是正片,则相反。

**表 7-3-1　不同土壤的微波发射率**

| 土壤类型 | 特　征 | 波长(厘米) | 微波发射率 | 气温(℃) |
|---|---|---|---|---|
| 干　沙 | 厚 25cm | 3.2 | 0.927±0.015 | 25.5±1.5 |
| 湿　沙 | 厚 25cm,水浸湿 | 3.2 | 0.749±0.008 | 24±2 |
| 粘　土 | 土层水分 9% | 3.2 | 0.902 | 15 |
| 土　壤 | 层厚 20cm,表层水 34.6%,底层水 20.3% | 3.2 | 0.668 | 22.5 |

农作物在其不同的生长期在图像上呈现不同色调,这也与其生长茂密程度有关,一般说来,观测的微波频率越高,作物长得越茂密,测得的微波亮度温度与作物的相关性越大。如 21cm 波长(频率 1.4GHz)的辐射计可以穿透植被直接量测土壤湿度,而 0.8cm 波长(频率 37GHz)的辐射计只能测量植被的微波辐射特性,几乎不能穿透植被。因此可以用 0.8cm 波长的辐射计来量测农作物,根据测得的亮度温度可以判别农作物的生长状况,甚至农作物的病虫害。因为不同的亮度温度即不同的图像色调代表了不同的发射率,而作物不同生长状况发射率是显然不同的,这点在图 7-3-3 中已经可以看得出来。

同样,对于森林种类,灾情监测和病虫害预报等也可以利用微波辐射计图像,例如在环境温度为 20℃测得 3.2cm 波长上厚 10cm 松树枝叶发射率为 0.878,而在环境温度为 16.5℃时可测得厚 20cm 的白桦树枝叶在 3.2cm 波长上的发射率为 0.882,表明不同树叶形状、疏密程度在辐射计图像上的色调是不会一样的。这里所用的辐射计的频率也要比较高才好,一般在 10GHz 以上。

## 第四节　图像变换、彩色合成与目标解译

目前机载和星载雷达图像多是单波段、单极化图像，也有机载多极化(如我国 CAS/SAR)和星载多极化多波段(如 SIR－C)图像，如何充分利用这些图像的信息以及将这些图像与其它传感器(如 TM)获取的图像结合起来进行分析，一直是国内外科研人员和应用人员所关注的一个问题，已经有不少的文献介绍了这方面的研究成果。下面就图像变换处理、彩色合成和多极化图像分析等方面的方法与解译效果作一个简要的叙述。

### 一、多极化图像处理与分析

一般来说，多极化图像上同类地物所表现的回波强度是不一样的，不同地物的情况也不相同，这点在第三章已作过分析。当有了多极化图像数据后，如何综合利用这些数据以达到提取地物目标信息的目的，是值得研究的内容。

一种利用方式是将每一种极化图像进行逐一分析和对比分析，以求从对比中掌握某些具有规律性的信号特征，为某一专题信息的提取总结解译的方法。文献[11]中提到 1980 年美国圣海伦火山喷发时利用 AN－APQ－102 合成孔径雷达装置所获四个极化图像进行火山区域地物地貌分析的经验，指出通过对比分析，发现交叉极化(HV 或 VH)图像上所显示的塌方、泥流、砍伐迹地和熔岩焦灼区比同极化图像(VV 或 HH)图像更为清晰，植被倒伏区与直立树林在交叉极化图像上的反差大，亮暗区边缘与倒伏区吻合得很好，对确定倒伏区的范围有利。分析的结果表明，倒伏区和火山灰覆盖区基本上无去极化现象，回波较弱，而直立植被的反射强，体反射作用明显，回波较强。另一方面，对镜面反射体如湖面，在入射角小(＜5°)的情况下，在 HV 图像上较暗，而在 HH 图像上却比较亮，表明对交叉极化和同极化的回波强度差异很大，当入射角较大(＞10°)时，两种极化图像上湖面均呈暗灰色。这些分析说明多极化图像上的地物特征有着一定的差异，综合利用多极化图像十分必要。对于典型的地物，需要总结带有规律性的图像特征，以便正确地分析和解译地物目标。

另一种利用多极化图像的方式是作假彩色合成，以便更好地突出地物差异细节，提取所需的目标信息。如北京农业大学农业遥感中心曾利用 HH、VV、VH 三种极化图像，分别作为 RGB 的各分量作彩色合成，发现能有效区分麦地和非麦地。

## 二、图像变换与合成

在利用 SAR(合成孔径雷达)图像分析地物目标信息的过程中,考虑到地物在可见光、红外和微波各波段的反射特性,将 SAR 和得到广泛应用的 TM 数据结合起来,以更充分的信息去识别和解译,得到国内外科研及应用工作人员的重视,并被认为是一种十分有效的方法。另一方面,一些有效的遥感数字图像处理方法也得到了巧妙的应用,这其中各种图像变换方法在 SAR 图像与 TM 数据复合处理中的应用已有成功的事例。有必要以这些方法在地质信息分析中的应用为例作一介绍。

SAR 图像和 TM 图像在地质信息分析中各有所长,SAR 图像在地质构造解译中具有很大的优势,因为雷达波束对地形变化十分敏感,对地表的不同覆盖类型和粗糙度的反应也比较明显。TM 图像由于有多个波段,特别是第五和第七波段对岩性分析是比较有利的,将 TM 多波段图像进行增强、比值变换、主分量变换等处理后,也是十分有利岩性分析的,故遥感地质工作者十分看重 SAR 与 TM 的结合。

为要有效利用两类图像,必须进行校正和配准,一般均需首先对两类图像分别借助控制点建立图像与地图之间的坐标关系数学模型分别对两类图像进行精校正,然后再对校正后的两类图像以少量控制点按多项式方法作配准。由于两类图像的像素分辨率不一致,考虑到须利用多波段 TM 图像,一般以 TM 图像作为配准的基准图像。

在两类图像复合之前,考虑到 SAR 图像往往在岩石出露区因很大的回波强度而具有很高亮度值,而 TM 除热红外波段外,岩石出露区的亮度值相对比较低。这样 TM 图像信息在复合时常常被 SAR 图像信息所掩盖。故首先对雷达图像作反变换,然后再作直方图调整,以经过线性拉伸后的 TM 图像的均值和标准差作参考基准,调整直方图。这样得到的雷达图像与线性拉伸后的 TM 图像复合时就可以作到既保留地形地貌特征和地质构造信息,又提高了岩性分辨能力。

比值变换是多波段图像处理中对地质体识别十分有效的一种方法,它可以减少地形坡度、坡向的影响,可以使各类岩石的可分性增强。在内蒙古 SAR 图像与 TM 图像的比值变换中,曾有以 SIR—A/TM4、TM5/TM4、TM7/TM5 的比值图像作彩色合成,取得岩性识别成功的事例,其中辉长岩显现为粉红,黑云母花岗石表现为暗红色,混合花岗岩为鲜黄色,在其它图像上难以与辉长岩相区别的石墨矿,则以明显的白色得到突出。另一种比值合成图像是 TM7/SIR－A、TM4/SIR－A、TM1/SIR－A 比值合成图像,它很好地保留了地质构造信息,对岩性区分也较有效。

IHS 变换是一种彩色变换,$I$ 为亮度,$H$ 为色调,$S$ 为饱和度。一般取

三个波段的图像作 IHS 变换，得到 $I$、$H$、$S$ 三个成分，然后将其中某一个成分作增强处理后再作反变换得到新的 $R$、$G$、$B$ 三个分量，最后合成的效果比原三个波段的合成效果更好。利用内蒙古 SAR 图像和 TM 图像进行 IHS 变换的成功事例是首先对 TM 第七、第四和第一波段作 IHS 变换，然后取其 $H$ 成分，以 SAR 图像作为 $I$ 成分，而不取 IHS 变换后的 $I$ 成分，$S$ 成分置为均值，再作 IHS 反变换，最后合成的效果比比值合成的效果还好。

关于雷达图像的变换及与 TM 的合成，还有不少研究，这方面的应用研究还在不断深入。

## 第五节　计算机处理与识别

目前已有的星载 SAR 图像大多为数字图像，且大多是单波段单极化图像，不能像 TM、SPOT 图像那样，采取多波段的计算机处理和地类识别方法（即自动分类方法），但仍然可以采用某种计算机处理方法对这类单波段、单极化数字图像进行分析。有关的研究表明，通过图像预处理、纹理结构单元类型分析和图像空间结构分析，衍生出特征图像，就可以按通常采用的自动分类方法进行地类自动识别，提取所需要的各种信息。

### 一、图像预处理

机载 SAR 图像常常需要作预处理，如消除航迹向条带，去光斑等，星载 SAR 图像不存在航迹向条带，是否需要去光斑，应视图像本身的情况而定。

对于机载 SAR 图像，若存在明显的航迹向条带，地物信息不清，就需要进行图像恢复的工作，消去条带，并使地物信息得到增强，其实质是解决模/数转换过程中的量化噪声，使地物的微波辐射特性得以清晰地显示出来，以便进一步分析。

一般首先采用直方图均衡的方法进行图像增强，其具体步骤是：

1. 统计整幅图像的直方图 $H(i)$。

2. 计算频数均值：

$$M_h = \frac{1}{N}\sum_{i=g_{min}}^{g_{max}} H(i) \qquad (7\text{-}5\text{-}1)$$

其中 $g_{min}$、$g_{max}$为灰度最小值与最大值，$N$ 为灰度级数。

3. 确定新的灰度级数：

令 $m=1, g_1=g_{min}$，若

$$\sum_{i=g_1}^{g_k} H(i) < M_h, \text{而} \sum_{i=g_1}^{g_{k+1}} H(i) > M_h$$

则 $g_1$、$g_2$、$\cdots g_k$ 均改赋为 $g'_m$，一般令 $g'_m = m$，若

$$\sum_{i=g_{k+1}}^{g_j} H(i) < M_h, \text{而} \sum_{i=g_{k+1}}^{g_{j+1}} H(i) > M_h$$

则 $m=2$，$g_{k+1}$、$g_{k+2}$、$\cdots g_j$ 均改赋 $g_{m+1}'$。

如此继续，直至 $g_{\max}$。（在上述分析过程中，若某一 $H(n)>M_h$，则单独将原灰度 $n$ 改赋新值）最后的 $m$ 值即新的灰度级数。

4. 新的灰度范围拉伸

$$g_i' = (255/m) \cdot i \tag{7-5-2}$$

此后，分析条带内的灰度均值与整幅图像灰度均值的差异即

$$m_d = | m_s - m_w | \tag{7-5-3}$$

其中，$m_s$ 为条带内的灰度均值，$m_w$ 为整幅图像灰度均值。若 $m_s < m_w$，则对条带内每一像元的灰度值均加上 $m_d$。

最后，以 $5\times5$ 的滑动窗（即卷积窗）作中值滤波，这样得到的新的图像效果既消去了条带，又使图像反差得以增强。

消除光斑可采用 $\delta$ 滤波法，其步骤如下：

同样采取 $5\times5$ 的滑动窗，窗口每移动一次，即计算一次窗口内的灰度均值 $X_{\text{mean}}$，和标准差 $\delta$，

如果 $X_{\text{mean}}-2\delta<X_{ij}<X_{\text{mean}}+2\delta$，则 $L_{ij}=1$。否则 $L_{ij}=0$。这里 $X_{ij}$ 为窗口内的每一个像元的灰度值。当使 $L_{ij}=0$ 的像元数小于等于阈值 $K$ 时，新的灰度值为

$$X_{ij}' = \sum_i \sum_j X_{ij} \cdot L_{ij} / \sum_i \sum_j L_{ij} \tag{7-5-4}$$

否则，$X_{ij}'$ 取其相邻四个像元的均值。

这样处理后若光斑没有完全清除，可以重复进行，直至清除所有图像光斑。

近来，有关方面的科研人员还提出了一种“方向溶解算子”（文献[11]），在消除斑点的同时，又保护了边缘信息，这是具有实际意义和参考价值的。

## 二、纹理结构分析

纹理是指灰度的空间分布及其变化频率。它是地物的空间位置关系和空间分布的反映，对 SAR 数字图像进行纹理结构的分析对于地物的识别是十分有益的。

实际的处理中，一般是将每一像元及其 8 个相邻像元作为一个纹理结构单元，即图像中的一个 $3\times3$ 的窗口。中心像元与相邻 8 个像元的灰度值

比较和分析，可以反映出局部的纹理信息。

设 $V=\{v_0,v_1,v_2,\cdots v_8\}$，$v_0$ 为中心像元灰度值，$v_1,v_2,\cdots v_8$ 为相邻8个像元的灰度值。

若 $v_i=v_0$，则记 $E_i=1$，若 $v_i<v_0$，则 $E_i=0$，若 $v_i>v_0$，则有 $E_i=2$，这样在一个窗口即一纹理结构单元内，可以得到一个排列，$A=\{E_1,E_2,\cdots E_8\}$。这种排列在理论上应有6561种。

经过整幅图像针对每一像元及其相邻八个像元的灰度差异分析后，可以得到许多种排列。每种排列的重复表明同一纹理形态，即同一地物分布特征。

统计每一排列 $Ai(i=1,2,\cdots m)$ 的出现的频数 $H(Ai)$，就可以得到图像纹理结构的直方图及其曲线，分析曲线峰值及其对应的地物，选取几种或十几种纹理结构单元形态，并对所选每一种形态赋以代码，代码值范围为0至255即与灰度值范围相同，然后将图像内各像元按其所对应的纹理形态赋以相应代码，得到可显示的“图像”，而其中每一数字则代表着一种地物覆盖空间特性。

在上述赋以特征代码的过程中，对于未被选取的纹理形态，可以按照相近的所选纹理形态的代码赋值。

## 三、图像结构指标分析

除了图像纹理结构分析可以反映地物空间分布的特性外，还有一些统计指标可以从另外的角度说明地物空间分布特点，从灰度共现矩阵出发所进行的分析，即是其中一种方法。

所谓灰度共现矩阵，是指在图像某一窗口（通常取5×5像元窗口）内，不同灰度的像元互为相邻像元出现的次数，如下面共现矩阵中，

$$\begin{bmatrix} p_{11}\,p_{12}\cdots p_{1m} \\ p_{21}\,p_{22}\cdots p_{2m} \\ \cdots \\ p_{n1}\,p_{n2}\cdots p_{nm} \end{bmatrix}$$

$p_{ij}$ 表示灰度 $i$ 与灰度 $j$ 相邻的次数，其中灰度1到灰度 $m$ 即通常的0～255的灰度区间，而在局部窗口内，灰度级一般只有十多个，相邻像元可从八个方向（(0,1),(1,0),(1,1),(1,−1),…）去考虑，由此在统计得出灰度共现矩阵后，进而按某一个或某几个指标分析，如反差指标 CONT(Contrast)、角二阶矩指标 ASM(Angle-Second-order-Matrix)、熵指标 ENT(Entropy)和相关性指标 COR(Correlation)等：

$$\mathrm{CONT}=\sum_{i=N_1}^{N_g}\sum_{j=N_1}^{N_g}(i-j)^2P(i,j)$$

$$\mathrm{ENT} = \sum_{i=N_1}^{N_g}\sum_{j=N_1}^{N_g} - P(i,j)\lg(P(i,j)) \qquad (7\text{-}5\ 5)$$

$$\mathrm{ASM} = \sum_{i=N_1}^{N_g}\sum_{j=N_1}^{N_g} P(i,j)^2$$

$$\mathrm{COR} = \sum_{i=N_1}^{N_g}\sum_{j=N_1}^{N_g}[i \cdot j \cdot P(i,j) - \mu_x\mu_y]/\delta_x\delta_y$$

其中

$$P(i,j) = P_{ij}/\sum_{l=N_1}^{N_g}\sum_{k=N_1}^{N_g} P_{lk}$$

$N_1$、$N_g$ 为窗口内灰度最小值与最大值，$\mu_x$、$\sigma_x$ 为共现矩阵中行的方向均值和标准差，$\mu_y$、$\sigma_y$ 则是列方向上的均值和标准差。这些指标的计算结果一般赋予窗口的中心像元。将所有计算结果按灰度数值范围 0～255 重新配赋之后，就形成了所谓结构特征图像。每一个指标都可以得到一个特征图像，从中选择一个反映地物空间分布最明显，或对于区分各类地物最合适的特征图像，就可以用于自动分类。例如中国科学院遥感应用研究所在利用 SAR 数据作岩性识别时，按(1，－1)方向计算出 ASM、CONT 和 ENT 三种特征图像，发现 ENT 对分析辉长岩最佳，而原始图像则难以识别。这就表明数字图像特征提取的方法是十分重要的。这里要指出，共现矩阵是一个 256×256 的大矩阵，实际处理时，最好作压缩处理即减少灰度级数，详细方法见文献[11]。

### 四、计算机自动分类

经过预处理得到的图像，经过纹理结构分析得到的图像和由共现矩阵分析得到的空间特征图像都是由单波段单极化图像衍生出来的图像，反映了各类地物的辐射特性、纹理特性和空间分布特性，以此三个图像作为特征分量，即可对各种地物进行分析，这相当于多光谱数据或从多光谱数据中选取的相关性较小的几个波段或经特征提取所得到的分量(如经主分量变换得到的前三个分量)，利用它们作自动分类，可以将各类地物划分出来。采取常用的方法如最大似然法、最小距离法等进行自动分类就可以获得较好的结果。这一方法曾用于我国机载 CAS/SAR 雷达图像在山东烟台地区(*X* 波段，*HH* 极化)的试验分析之中，取得了很好的结果。

一般卫星雷达图像只是一种极化方式，一个波段，可采取图像分割算法进行计算机处理。而加拿大的 RADARSAT 卫星图像由于具有多种成像模式，可以进行综合应用。如可以进行主成分分析，算术运算，并在此基础上进行计算机分类，结合对 TM 图像的分析，为专题信息提取提供十分有价

值的数据。文献[14]对此作了许多介绍。

**思考题：**

1. 试说明雷达图像解译标志与可见光、红外图像不同之处。
2. 为什么高于 8GHz 的频率和中等俯角有利于雷达图像中的植被分析？
3. 对冰雪而言，什么情况下粗糙度对回波有影响？
4. 试比较微波辐射计图像与雷达图像(从图像信号的物理意义，图像投影方式，图像变形受地形影响的情况，复介电常数、波长、极化方式、地物表面粗糙度对图仪信号的影响等方面进行比较)

# 第八章　雷达遥感图像的研究与应用

加拿大 RADARSAT INTERNATIONAL 公司为 RADARSAT 发射升空后的图像应用和市场开拓进行了许多前期的准备工作，其中包括组织编写了一本“近期与加拿大 RADARSAT 有关的雷达图像研究一览”(1992,6,30)一书，书中论述了雷达遥感图像的多方面应用潜力，应用现状和应用研究，这是对各国机载和星载侧视雷达图像应用和研究工作的一个很好的介绍和综合。本章将这本书的主要论述和介绍有关应用的章节编译出来，使大家对雷达图像应用和研究的全貌有一个认识和了解。

## 第一节　农业方面的应用

SAR(合成孔径雷达)图像在农业方面的应用主要涉及对农作物的识别、农作物生长状况的估计及土壤湿度的分析等。

### 一、识别农作物的类型

农作物类型的研究，时下主要针对雷达—目标的相互作用。影响这一相互作用有许多因素：

(1)SAR 参数：

波长(频率)，入射角，极化方式，定标。

(2)作物参数：

表面粗糙度，含水量，表面湿度，生长期，高度，密度，叶面指数，生物量，物冠结构，农业小气候，周日变化，盖度，作物行向，杂草侵害程度。

(3)土壤参数：

湿度，表面粗糙度，纹理，田地大小，行效应，松密度，盐度，温度，有机物成分。

大部分研究对这些参量之间的关系已经有了很好的了解，一些主要的发现是：

(1)VV 极化 C 波段 SAR(ERS－1)数据比 HH 极化 C 波段 SAR(即 RADARSAT)更利于植被种类的识别，特别在潮湿情况下，更明显，更有效。

(2)多时域或多种传感器数据(如结合 TM，SAR 数据可达到 75% 分类

精度)可以提高分类精度,减少相近作物间的混淆。

(3)早期作物分类是十分困难的,但是利用 SAR 比可见光和红外图像要强。

(4)需要大于 40°的入射角以减少土壤表面粗糙度的效应,减少对物冠的穿透。

(5)在入射角大于 45°时,露水对雷达后向散射没有影响。若探测露水,C－HH 数据(即 C 波段 HH 极化)入射角在 20°左右时最佳。

(6)观察方向一般不会对图像色调产生影响,除非像土豆那样按行种植的作物,解译时有赖于地面信息。

(7)可能需要昼夜两种图像以识别作物,因为两种图像表现周日的不同形态,在入射角大于 45°时,白天无论何时图像都对分类精度不会产生大的影响。

(8)C－HH 图像的作物行效应很强。

## 二、作物状况估计

作物状况估计即估计作物是否健康或达到所期望的程度。影响作物生长状况的因素有病虫害,干旱,洪涝,暴风,冰雹等,这些因素会改变作物的高度,密度,叶面积,物盖结构等,进而影响雷达—目标的相互作用。

研究表明雷达后向散射与叶面积具有正比关系,但如何结合气象观测数据将这一关系引入估产还缺乏稳健的模型。

利用 SAR 图像色调可将干燥的小麦从其它的作物中区分出来,倘利用纹理信息,分析结果还会改进,但由于空间分辨力较低,限制了这方面的应用。

## 三、土壤湿度的确定

这是有关土壤含水量的相对量测。湿度信息有利于作物估产。尽管后向散射与土壤复介电特性强相关,仍有众多因素影响后向散射(如前所述),很难孤立地将土壤湿度对后向散射的影响区分出来。当入射角较高时,后向散射与作物湿度相关,低入射角时(如 ERS—1 的 23°),后向散射与土壤湿度相关,因为此时有更多的穿透物盖的信息。但是在缺乏物盖状况和表面粗糙度的先验知识的情况下,单靠图像信息不可能精确地确定土壤湿度。这方面需要研究表土湿度与下层湿度的关系模型,因为下层湿度在根系发达时确定了作物的生长状况。雷达的穿透深度近乎与波长成正比,因此,在土壤最佳条件下,C 波段可望提供 5cm 深度的土壤湿度信息。

土壤湿度成图的可操作性有赖于从多种传感器和多个时域获得数据。

以上所述均处于应用研究阶段。

## 第二节　测绘方面的应用

SAR 图像在制图方面的应用目前处于中等规模的实验阶段。

SAR 可用于中小比例尺地形图制作和一般的土地利用图的制作。存在的困难在于侧视雷达图像的某些特性的不定性。如在山地，透视收缩与阴影造成图像形变，这一问题可利用多视向数据或其它传感器所获数据得到克服。随着更多星载 SAR 数据的启用，制图技术和精度都将会得到改进。

制图是 SAR 的重要应用领域，其在地形图更新方面的应用已得到广泛研究。

一些国家的有关部门利用雷达测量方法测制地形图的操作性演示都说明是成功的。如 Intera STARMAP 公司利用 STAR—1 和 STAR—2 机载侧视雷达高分辨率图像测制的地图可满足 1:5 万地形图精度，USGS 利用 SEASAT 和 SIR－B 图像在立体测图仪上测图，ERIM 利用机载 SAR 数据测图的平均高程误差为 ± 13.5m，欧洲 Kern DSR－1 解析测图仪的 SMART 软件也成功地用于 Varan－S 机载 SAR 数据测图工作之中。计算机摄影测量装置的运用使雷达图像立体测图已具有操作可能。

数字雷达图像立体测图有助于生成 DEM，作地形图更新。具有较高空间分辨力的 SAR 图像用于测图可减少地面量测和航摄费用。在热带地区，常有云层、雨雾，可见光和红外摄影都受到很大限制，而雷达测量的应用有助于无图区的基本图件测制。SAR 的全天候特性使其在多云覆盖区域得到广泛应用，多重重迭的图像将有助于提高其测图精度。

利用干涉测量的地形图测绘方法近年来已经得到深入研究。

干涉测量是两个雷达信号相位差的计算，俯角和距离确定了目标的位置和它与雷达天线的相对高差，地面高度可通过相邻航线上一行雷达图像信号的最小相位差进行估算。

这种利用干涉测量的测图方法的应用研究和中试已通过星载 SAR 图像的应用而展开，美国 JPL(喷气推进试验室)的试验表明，这种测图方法是可行的。如果以毫弧级差的不同视角对地观测，沿航向的视距线量测即可确定图像上一给定点的三维地面坐标，所绘制的等高线图与 USGS 等高线图可以作到高度重合。采取干涉测量方法利用欧洲的 ERS—1 卫星图像对于提取 1:100000 图上等高线信息将具有较高精度。

利用阴影—形状的地形图测绘是又一种测图方法。

阴影—形状是由像素灰度反算出可比的相对亮度值,以利用辐射标定的 SAR 数据确定坡度值。

阴影—形状技术用于确定每一雷达距离扫视行上的高程断面。

加拿大遥感中心 CCRS 的试验表明,利用 SEASAT 图像生成 DEM 时坡度估算精度可达 1°到 2°,但由于 SEASAT 入射角很高,故对于坡度在 10°到 15°的地区不能利用它进行测图。加拿大 RADARSAT 的可变入射角则将可以提供比以往传感器更加灵活方便的测图功能。

另外一些试验说明阴影对地表面的低频地形变化成分的信息提取不利。

阴影—形状技术结合立体雷达图像测量有利于进行更多的地形碎部测绘,这是加拿大 Intera of Brazeau Range Alberta 的试验中得出的结论。这说明一个基于雷达图像的理想测图系统应包含几种技术以保证精度。

科研人员建议将 SAR 与其它传感器图像结合起来进行测图,说这将会提高精度(Trinder et al 1986;Raggam 和 ALmer 1991)。但这还没有进行全面的试验,首先要确定的是在 SPOT 或 LANDSAT 覆盖的地区是否需要利用 SAR。由于 SAR 的可靠性,它可用于修正光学传感器所获取数据。

上述所有方面的测图试验表明在地图更新和基本地形图测绘方面都可由卫星微波遥感进行。这些都已有操作性演示,而热带地区雷达测量、干涉测量、阴影—形状技术的应用,将开辟一个新的市场。

## 第三节　海岸带和海洋方面的应用

海岸带即沿海地带。雷达遥感图像的应用主要是在海岸带和海洋地区对自然(包括海冰)和人造地物的物理参量的识别量测和监测。

海岸带应用将是 SAR 数据最大的应用范围之一。因为世界上人类的人口大部分和工业活动的大部分都集中在这一地带。由于城市化,资源勘探开发和航海等,使这一环境敏感地带处于越来越大的压力下。海洋占据了地球表面的 75%,由于资源勘探和开发,也处于与日俱增的压力之下。影响海岸带和海洋环境的海洋变化进程以及需要量测的参量均是动态的,如几小时以前的海波信息对于航行用户就已是过时的了。

亚洲—太平洋,欧洲和北美可望是 SAR 数据在海洋、海岸带应用方面最重要的地理信息市场,这是因为这些地区承受着沉重的经济和环境压力、频繁的云雾覆盖、以及不断扩展的需进行监测的海岸线所致。

可望应用 SAR 信息的主要用户将是海岸带工程技术人员,航海人员,

国防海岸卫队，地貌研究人员，海洋研究人员，生态学家，环境保护机构和渔业部门等。

## 一、海岸带测绘

这主要包括海岸带的地形特征识别，测绘和变迁监测。对于海岸和近海地区地形特征，需要量测形状，大小和侵蚀、沉积所致的地貌类型分布。自然进程是动态的（比如三角洲），其变化监测须是按日、按年或几年进行的。

这方面处于应用研究阶段。SAR 可为这些多雾地区提供极为有用的数据，地貌和海岸科研人员可用它监测变化，因为这些变化影响到海岸工程项目、风景区规划、造船和导航，以及资源勘探开发。

SAR 对海岸地区地图测绘中的特征变化探测和绘制是极有价值的，例如，由于潮汐或洪涝所造成的永久性或暂时性湿地分布变化，可以从 SAR 图像上获取可靠信息。许多政府机构目前正在和已经利用机载系统作海岸测绘，而其它一些地区的海岸测绘尚待开展，因而 SAR 数据和其它星载、机载数据将会发挥作用。

## 二、海底地形测量

海底地形测量对于航海和海岸工程至关重要，这主要包括：

——探测未测出的或错定位的可能危及航海的海水淹没地物特征。

——确定这些危险地物的边界和位置。

——提取精确的、详尽的和完全的水深信息。

浅水地物特征须识别出来，这包括浅水中的堤、浅滩、暗礁。海浪与海岸的相互作用造成海岸断面的变化，和周期性的近海海床变化。深水地物特征包括海底山脉、山脊、沙堤和大陆架边缘。这些都有可能利用 SAR 图像进行分析推断。

目前利用 SAR 进行海底地形测量处于应用开发阶段，眼下大量研究都是基于 SEASAT 数据（L 波段比 RADARSAT 频率低，波长要长）。SAR 图像中的某些形态可用于浅海和深海中海底地形特征的推断，由于这些海底地形影响到海面波浪的形态变化，而 SAR 可以反映这些变化，其机理是微波与洋流的相互作用，即海底地形变化影响海水表面洋流，因而改变了海面波形和波形场。从海床量测的角度看，水深变化影响到潮汐流速度，进而影响到表面波浪，而 SAR 能探测到表面波形变化，这就为地底地形分析提供了可能。

SAR 的海面成像机理尚未被很好地掌握，且仍有一些争议。荷兰近期研究工作表明海底地物与雷达后向散射的关系是雷达频率、极化方式和水

文气象条件的函数(Hesseslans,1992)。利用机载 SAR 系统的最佳结果是利用 P 波段 VV 极化方式数据,它提供了沙丘地壳的 25m 位置精度。

据研究,同一地域不同波浪状况多次观测或宽波段的一次观测的模型和算法对获取海底地形的最佳估计是可行的。

由 RADARSAT 提供的海底地形信息比已有信息源在一定范围将更可靠、精确和完全,且会减少导航中的危险。

## 三、海洋环流特征测图

海洋环流特征包括内波、表面洋流边界、旋涡、涌流等。SAR 是惟一可提供这些方面的非常细微的信息的数据源,任何影响洋面粗糙度的物理过程均在 SAR 图像上得到反映。然而在实际操作中,想要提供某一个单一特征时,由于另一特征的掩盖而常常不太可能,例如在风浪小时,细小的洋流结构可在 SAR 上成像,但风大时就看不到了。因而这就要求以一种可靠的方法将成因——效果关系按各个成分理顺出来。这些目前都处于应用研究阶段,现在利用信息的方法和按一定规律可靠地探测某一特征的可行性还有待研究,多数研究工作还停留在量测各种参量的数学模型上。

中等规模的特征测绘已通过卫星遥感很好地实现了,因为卫星遥感的覆盖范围极大,(例如 RADARSAT 的扫描带宽有 500 公里)。机载系统可进行小规模特征的测绘,但要作监测工作则开销太大,故一般用作实验。

SAR 被认为是测绘内波的最佳传感器,虽然这一特征可用光学传感器进行探测,但它受限于云层覆盖的情况。

利用 SAR 测绘海湾暴风的气流前锋是完全可能的,当然用 NOAA/AVHRR 数据亦可得到这一信息。NOAA 数据的优点在于其频繁的大面积的覆盖,然而海洋上扩展开来的云层覆盖严重限制了它的应用,因而 SAR 数据可以起到弥补的作用。

近海岸中小规模的特征如旋涡可以用机载和星载 SAR 进行测绘,空间平台上低分辨力光学装置不可能在这方面提供足够的细节。洋流定位的测绘以较高分辨力的传感器可以达到较高精度(Hirose,1991)。

## 四、波浪谱的导出

洋面波由气象条件和海洋内部运动生成。波浪谱信息可用于海浪预报以利航海人员的工作,因而需要近实时的预测。

这一信息还可用于以更严密的方法描述海洋动态进程,以便诸如管道建设安装工程的结构安全性和操作规划的设计工作的开展(Hirose,1991),海浪气象研究的周期应比海浪预报的周期短。

目前这方面的工作处于运作性演示阶段,RADARSAT 能提供波长大

于 100 米的海浪信息。

在浅水区,三种影响海面状况的机理是:

——海面波浪进入海岸区域时波长和传播方向的改变;

——海面波浪在非规则的海床地形之上的传播

——海床地形起伏地区的强大海流

海底地形调节近海面的水流,水流通过雷达波束与海面细小起伏的相互作用而反映在雷达图像上。海浪这一深水运动表象是由海流与海底的堤、山丘、大陆架边缘和坡面,及深水海沟的相互作用引起的。两种结构特征是有记录可查的:两波段的更替(海浪波长 400—5000 米)和单波段边界的表象(Chelomei,1990)

风速及浪高预报是航海的最重要的海洋信息,但这只能由地区气象中心提供,SAR 是办不到的。

## 五、油漏探测

油漏探测是对从油罐、油船或近海钻井平台渗漏到海面的浮油进行标识和监测的工作。

油漏点的探测原理是在 SAR 图像上利用油漏点较暗的回波信息与周围较亮的回波信息的反差进行识别,SAR 图像上的周围海洋的回波强度是 SAR 成像系统成像时环境条件(风,海浪)、视角、频率和极化方式的函数。垂直同向极化方式的 SAR 如欧洲 ERS—1 上的雷达装置比 RADARSAT 水平同向极化的 SAR 更灵敏些,它可以得到更亮的回波信号。

很多发达国家有计划地用机载传感器(包括 SAR 或 SLAR)探测油漏现象。这些油漏可能是事故,也可能是并非故意的溢出。油面由于其表面张力大,在微风中不易波动,与水不同,因而其微波后向散射要小于水,这样在 SAR 图像上色调要暗。但有时油漏可能与某些其它自然现象(如内波上涌流,海藻等)发生混淆。

这些探测工作处于运作演示阶段。目前研究表明:

——利用空间 SAR 数据可人工勾绘出油漏的浮油面轮廓。

——当入射角垂直于海浪时,自动分类方法可改进探测。

——油漏的浮油面的形状和位置易于确定,但厚度不能确定。

——入射角加大,探测的概率也增大。

——可探测的程度是环境状况(风速和波浪状况)和油的特性(如粘性)的函数。

挪威人对 ERS—1 SAR 探测油漏的可操作性(快速数据周转)能力作出了评价,对这一信息源在监测计划中的作用作出了估计,在 4 幅 ERS—1 C—VV SAR 图像中有两幅可以发现人造油漏点。

SAR可以作为目前机载污染监测系统的一个补充，特别是对海岸线长的国家，污染监测是需很大花费的，对于大范围油漏监测可采用RADARSAT中的SCANSAR方式，其分辨率为100m。

### 六、船舰探测

船舰探测是通过波谱信号和尾浪痕迹分析，对海洋上的渔船、军舰、油轮进行探测和定位。大部分发达国家目前已有在其领海利用机载监测系统监视船舰的计划，这方面星载SAR可提供补充手段，特别是对领海面积很大或对很远的船舰，机载系统费用太大时更需要如此。

这方面已处于中试阶段。目前海域监测中须作到船舰目标信息提取与自动分类，因而需要利用某种软件算法。近期这方面大部分研究都集中在研制成熟的算法，利用工作站系统作船舰及尾浪探测，但尾浪长度在100m以内时不可能作到可靠探测。船舰与其它目标的混淆是这方面的一个困难，需要更多地研究分析算法。

## 第四节　森林方面的应用

在森林方面的应用有关森林植被特征的探测，遥感数据可帮助识别林种，森林灾害，林的密度，年龄，健康情况等。

森林信息有时每年需要收集一次，以监视生长情况，伐木活动等，并更新森林信息，对于北方和温带地区，星载SAR可提供森林基本图件更新的保证。

所有SAR都适于对热带区域的观测，对有的热带区域SAR将是森林信息惟一的信息源。热带森林毁林的监测将是SAR的重要应用领域，因为这有关森林的生长和全球环境。拉丁美洲和东南亚可望是森林SAR数据的最大用户。

温带和北方区域森林SAR数据的主要用户是林业公司，环保机构和政府有关部门，热带也是这样。这通常是由国际发展援助组织资助的。

近年来相当多的报道都是有关C波段散射计和机载SAR在这一领域的研究。

### 一、采伐区域测图

SAR在这方面表明是能发挥作用的，很多文章介绍了SAR在这方面的应用研究和中试情况，目前还未达到操作性阶段。

人们已尝试在森林有关图件的更新过程中单独利用 SAR，或结合其它图像进行。关键是用户方面是否愿意采用 SAR。光学摄影或其它信息源如地面观测仍是森林工作人员的重要数据源。如果星载 SAR 用于林区监测，因为林区边缘阴影线很长，边界回波比较亮，造成勾绘采伐区边界不够精确，所以需要作更多的研究，以解决这一问题。在这方面多时域 SAR 可望增加信息内容并提高精度。SAR 将对森林变化监测的可靠手段起到补充信息源的作用。

在长年被云层覆盖的热带地区，SAR 将是森林资源和采伐活动监测的很好的手段，在那些地区，有时 SAR 甚至是惟一的信息源。

森林采伐情况的信息价值重大，有了 SAR，林业公司可节省航空量测和地面量测费用，以作林图更新，而政府和环保部门则可有效地监测采伐活动。

### 二、林种分类

这里包括树种和林种分类。

树种识别方面，林学家需要精确的信息。一些科研人员试图将树种与后向散射信息联系起来，但后向散射受限于多种因素，如树冠结构、植被湿度、地形等，许多树种的交错重叠的雷达信号致使分类困难，所以单独用 SAR 不行，必须配以其它数据。

林种分类方面 SAR 将大有可为，它在交通阻隔地区的测量成图和再生监测方面都将是节省开支的，目前这一工作处于应用研究阶段。

### 三、生物量估计

近期一些研究表明，人们正试图建立森林生物量与后向散射的相关关系。倘后向散射与森林参数与树高，年龄等联系起来，生物量是可以估算出来的，因为人们早已发现林龄增长，生物量增加时后向散射信号就加强了。

这方面信息的最大用户将是林业部门，因为这有助于确定最佳采伐期。可操作的专家系统利用 SAR 作为输入可以估算出林木生物量。

林种分类和生物量估计需要多频段、多极化的 SAR 数据，所以多种 SAR 数据和其它遥感数据的结合将有助于提取这些信息。

## 第五节　地质方面的应用

这方面的应用有关地表物质和基岩的分布及其物理特征信息提取。地

质应用是 SAR 的一个重要领域，因为世界上有众多用户已利用遥感开展地质工作，他们最早利用 SAR 技术。

在发展中地区（亚洲及太平洋区域，拉美，中东）可望是 SAR 的最大市场。那些地区正进行大规模资源开发，而 SAR 在所有数据源中最具有竞争力，当然这方面并非需要各时域的数据以作监测，只需一个时期的数据就足够了。

地质应用的主要用户为地质勘探工作者（包括对碳水化合物、基础金属、建筑材料、水的探测），政府部门，工业方面的地质工程师。

## 一、地质构造图测绘

构造特征包括褶皱、断层、切割、线性构造等，它们通过基岩的表面露头部分，或由植被的分布表现或反映出来，这些信息十分重要，它们提供了热运动、液态物质、碳水化合物和矿产的探测线索。构造图测绘处于操作性演示阶段，机载 SAR 已用于碳水化合物质的勘探。尤其在亚洲、拉美地区，由于复杂的地质地形情况，露头信息少，云层覆盖多，还有未勘探区域的切割规模，都使传统方法受限。雷达图像的判读揭示了无图区的结构复杂性，对勘探计划起到了指导作用。

从 SAR 图像可提取构造信息的数量随入射角和视向而变，双视向（如 RADARAST 在升轨和降轨两种情况下获取同一地区的图像）将提供更多可识别的线性构造信息。

在其它地区，机载和星载雷达数据都已经证明是陆地卫星、航摄影片、航磁测量等普查规模测图时的极好补充数据源，雷达数据的参与，显著增强了利用其它数据提取有价值的地质信息的能力。不同的数据的综合分析，为掌握植被、表面物质、基岩岩性和构造之间的复杂关系，提供了方便。SAR 还是区域规模的研究如地震灾害估计的有用工具。

在这方面的应用研究集中在对其它不同数据如地球物理探测和地质野外勘察工作所获数据的补充作用。

机载 SAR 已经证明是地质野外勘察计划的最佳费用—效率手段。

## 二、岩性测绘

岩性测绘有关不同岩石的分布和相互关系。地质学家依靠很多岩石特性和技术区分和测绘不同岩性，如纹理、宏观微观特征、地球化学、地球物理分析方法、成矿复合分析等。岩性的表面粗糙度，依不同岩石（火成岩，沉积岩等）、成矿复合、气候性质等而异，表面粗糙度是影响后向散射的重要特征，也是 SAR 岩性成图的基础，它有赖岩性地貌（如粗糙的火山角砾岩和平滑的熔岩流）和形变、侵蚀的程度。

飞船成像雷达(SIR—B)在勾绘熔岩流表面纹理变化和分布,大规模朝向雷达的坡面地形特征的测绘,识别扩展沉积物等方面证明极有用。

在火山方面的应用还不明朗,建立一个云层经常覆盖地区的火山 SAR 图像数据对研究区域性火山和地壳构造成因是值得研究的(Mouganis)。

这方面主要的研究方向是星载 SAR 在近期火山地形测绘中的应用。

## 三、土地测绘

土地测绘有关地表物质(砂砾、沙、流沙、淤泥)、土地形态(鼓丘、蛇丘)的分布和类型以及冰丘演变历史和地区地层等物理特征调查,地面信息可用于工程景观调查(公路路线规划,砂砾搜寻,填土定位等),水文地质研究和浅滩远景规划。加拿大一些项目对机载 SAR 提供第四纪/地表信息的能力作出了评价,结论是 SAR 是 TM 的极好补充信息源,SAR 提供更多地形特征,而 TM 则对植被类型和分布调查有利,SAR 和 TM 的彩色合成图像对第四纪地质是最有用的。

由于对含水量和地表物质纹理敏感,SAR 将是地表信息测绘的新的信息源。在一次研究中机载 SAR 和多光谱数据揭示了黑白航片未曾表现出来的信息。在某些情况下,甚至对覆盖有均一表面物的平坦地区,下表层信息也可由下表层物质特性的不同所造成的土壤湿度反差而推断出来(Kenny,1991)。

## 四、构造和地表的 SAR 响应

构造和地表地物在 SAR 图像上的表象有赖于地物和周围的地形差异,表面粗糙度或纹理,表面湿度,SAR 相应这些地物的方位(入射角和视向)和 SAR 的分辨力,故而微波信号和这些目标之间的关系相当简单且易理解。一般说来大的入射角(如 50°)可较好地反映微小的构造特征,因为当垂直于视向时,回波信号亮,最易发现,但在岩性和地表测绘中尚无最佳 SAR 参数的结论。

## 五、基本图件绘制

从事勘探和开发的地质工作者和工程师需要 SAR 作平面测图应用,也可将图像作基本图件以作景观评价和规划。基本图包含不同土地利用信息(公路、湖泊、河流、森林、电力线、铁路等),一个地区的人文活动程度影响到这些地图过时的速率。SAR 可能是开展早期开发区域(如印尼,哥伦比亚)基本图测绘或更新的有用工具,那些区域现存图已不适用,航片又因云盖、雾霾所限。

资源开发机构已利用机载 SAR 在非洲、拉美生成中小比例尺图的

DEM 以便区域规划的工作，故而这一机载雷达应用可认为是操作性演示阶段，利用星载 SAR 产生 DEM 则处于中试阶段，更多的工作正利用 ERS—1 数据展开。

SAR 在生成中小比例尺图件所能提供的有价值信息有赖于地形和地物特征(方位、形状、表面粗糙度、湿度)。在山地用 SAR 绘制基本图有许多问题，如阴影和叠掩等会掩盖掉某些信息如公路和森林采伐信息。

主要应用将可能是世界上那些无图或图件过时和常年云遮雾障的地区。

### 六、地质条件评价

这主要有关地面地物及其对工程和发展项目的潜在影响估计，那些项目包括公路、桥、坝、矿区建设、道路设计、和填土区确定等，此外这一方面的应用还包括由滑坡作地震灾害估计。

这方面正由应用研究向中试阶段发展。从 SAR 所得到的作地质条件估计的信息是一种综合信息，它同时可用于构造分析、地表分析和土壤湿度(水文)等方面调查工作之中，许多文献指出 SAR 将是普查评价工作中利用 TM、SPOT 等的有用的补充信息源。

## 第六节　水文方面的应用

水文方面的应用有关固态、液态内陆水的探测、监测和量测(土壤湿度、新鲜冰雪、水体等)。由于水的可变特性，水文参数必须经常监测。某些水文应用还需要近实时的处理和经常性观测，星载 SAR 数据在这方面具有很大的潜力。

中东、亚太、欧洲、北美可望是星载 SAR 数据在水文应用方面的主要地理信息市场。SAR 可对农田作土壤湿度监测，在人口密集的受季风影响区域，SAR 可用于监测洪水淹没范围和洪涝灾害估计，对于后者，星载 SAR 可提供经常性的有时间保证的不受天气条件限制的数据。

### 一、洪水测图

洪水测图包括洪水淹没地界勾绘以便作灾害估计和洪水预测。SAR 很适于洪水监测，因为淹没与未淹没地的图像反差很大。洪泛区测图研究主要在北美进行，加拿大 CCRS 进行了利用 C 波段 SAR 在圣约翰河谷洪水区测图的重大项目，其它应用演示由美国夏威夷大学和 NASA/GSFC 等作

出。Imhoff 和 Gesch 检验了热带地区(孟加拉)洪水测绘的可能性,取得了一些成功。根据已有的研究,C 波段装载到 RADASAT 上将可为非森林地带的洪水测图提供最有用的工具,也将可用于森林淹没区的探测。

由于 SAR 的全天候特点,它的主要优点就是洪水测图应用,最大淹没面积常常发生在坏天气条件下,其它数据是不可能发挥作用的。

## 二、土壤湿度探测与流域径流

有关土壤含水量分布的量测有助于预报流域径流和农田作物估产。

雷达后向散射受湿度很大影响,潮湿土壤有较高的复介电常数,因而在 SAR 图像上比干燥土地更亮。

农田有很多参量影响雷达后向散射,如土壤湿度、土壤表面粗糙度、作物种类、作物行向等,因而很难将单一的土壤湿度对后向散射的影响区分开来。

在河谷地区利用 SAR 进行土壤湿度估计以引入到径流模型的潜力是存在的,然而 SAR 在这个应用领域要使土壤湿度量测的精度确保实际运作的需要是很困难的。

自 70 年代中期以来的研究都集中在用散射计和成像雷达作土壤湿度量测,但是对土壤湿度定量估计尚未得出结论性意见。

土壤湿度探测还未达到应用 SAR 的可运作性阶段,在精确的流域分布土壤湿度量测方面非常需要有一个可操作的费用有效的系统,土壤湿度探测将是空间 SAR 的一个新市场,因为光学和红外系统在这方面均无能为力,辐射计已表明可行,但分辨力太低。

土壤湿度信息可以得到广泛应用,农业市场管理部门和农产品商会利用 SAR 土壤湿度信息作早期农作物估产,水文学家将用 SAR 作河流流量预测模型的输入,对流域谷地进行研究。

## 三、雪和新鲜水冰的测绘

雪和新鲜水冰的测绘,主要是有关固态水(雪、水冰)湿度的探测,以估计雪的覆盖的范围和雪水的可能流量。

这方面的研究仍处于早期阶段,奥地利已进行了许多基础研究和应用研究项目,并取得了不同程度的成功,要更好地掌握雪的参数及其对雷达后向散射的影响还须作很多工作。

SAR 图像上,雪、冰、新鲜水冰的的信息为雷区成图和水文模型的建立提供了可能。眼下,雷达仅可提供雪区范围,雪深和相应水量定量估计还不很精确。

## 第七节　土地利用调查

土地利用调查是对城市地区不同土地利用类型和农村及无人居住地区不同覆盖类型的识别和分类。美国地质调查所(USGS)制订了一个标准土地利用分类系统,定义了 12 个一级类别,48 个二级类别。

例:

| 一级 | 二级 |
| --- | --- |
| 城市或建设用地 | 居民区 |
| | 商业服务区 |
| | 工业区 |
| | 交通,通讯设施 |
| | 工业和商业混杂区 |
| | 城市和在建设中的混合用地 |
| | 其它 |

土地利用调查可望是星载 SAR 数据的一个逐渐重要的全球应用领域。亚太和拉美由于规律性的云层覆盖问题和土地利用的压力,可望是星载 SAR 的最重要的市场。单一种类图像可能对年度性城市小范围成图是必需的,而多种图像则可能为大范围(农村)成图项目所需。

### 一、城市测绘

城市测绘是对城市地区不同的土地利用类型即居民地、商业区、工业区、交通用地、园林绿化用地、农业用地和水体等的分布进行测绘。在这方面已利用机载 SAR 和 SEASAT SAR 作过相当多的研究,故可认为已处于中试阶段。这些研究主要集中在识别土地利用类型的自动分类技术。因为自动分类是针对回波信号的,而雷达回波受制于诸多因素,故存在许多困难。影响土地利用识别的基本的雷达回波参量有:

——表面粗糙度和目标几何形态,尤其要看目标是否为二面角或三面角反射体。

——地形,包括方位和坡度。

——复介电常数和地物潮湿程度。

——植被类型和范围。

——SAR 入射角和视向。

城市应用中雷达图像解译的主要问题是同一雷达信号响应往往对应着不同的地类,如商业区和居民地的图像亮度和纹理是类似的,城市边缘居民

地密度很低,很难从图像上与邻近的农田/牧草地区分开。

不同视向和俯视角图像的对比可改进土地利用分类,特别是像公路一类具有方向的地物,平行于公路的 SAR 视向不如垂直于公路的视向,那样更易识别。所以在监测城市土地利用变迁时,必须有合适的视向和入射角。

交叉极化图像(HV)比同向极化图像(HH)更有利于城市测图。HH 对于目标相对于雷达视向的方位是更为敏感的,地物表面散射加上体散射在 HH 图像上的效应使各种土地利用类别的色调、纹理的变化幅度减少,这样,不同土地利用类型的表象趋于相近,而相近的地物类型都有不同的色调纹理。在 HV 极化图像上则不尽然,尽管也存在地物表面散射,但其影响并不显著。

当入射角增加到某一值时,目标的可探测性、探测精度和识别错误率都得到了改善,入射角再增大时,这些指标则开始下降,然而在特别的环境条件下也有例外(Henderson,1990)。

这样看来,RADARSAT SAR 结合卫星光学图像数据,将可能满足平地和中等起伏地区一级城市土地利用测图的需要(如 USGS 的定义那样的一级)。

## 二、土地覆盖测绘

这是对乡村和无人居住区域土地覆盖类型的识别和测绘。主要的土地覆盖类型有农田、林地、非林地、水体、湿地和荒地,这些数据可用于环境监测(如森林、农田、矿区变化监测)和规划。

土地覆盖测绘目前处于运作性演示阶段,所需细节的水平低于城市测绘。这样,RADARSAT SAR 等将是很适合于为一级土地覆盖类别提供综合的覆盖信息的,但在山地,由于地形起伏在图像上形成阴影,用 SAR 进行土地利用覆盖是有局限的,同时,乡村地区孤立树和建筑物由于角反射器效应,容易将两者混淆。研究表明将色调和纹理结合起来进行分类,可达到 90% 以上的精度(Ulaby,1986)。SEASAT SAR(25m 分辨力,L 波段 HH 极化方式)可用于平地和山地大于 1.5 公顷(1 公顷 = 10000$m^2$)的水体识别,至于 RADARSAT(C 波段 HH 极化方式)如何,有待验证。

TM MSS 或 SPOT 多光谱数据的应用,结合 SAR 的色调和纹理信息将可提供比单一某种传感器数据更高精度的结果。当每一文件是来自电磁波谱的每个主要窗口时(可见光、近红外、热红外和微波各有一波段数据),结果将是最好的(Haack,1984)。

所以,可以得出结论,在中低山地区域,SAR 结合其它数据,将可能满足一级和二级土地覆盖类型调查。

## 第八节　海冰调查

这一领域的应用有关从 SAR 获得海冰参数信息如冰的密度、冰的类型、冰的特征定位、冰区地形、冰的运动和冰流，这些参数目前在加拿大利用机载 SAR 和 SLAR 已可以获取，并均是可运作的。

冰的信息数据要求在战术和战略上是各不相同的，低分辨力、宽覆盖的数据如 RADARSAT ScanSAR 可望满足战略计划的需求，而能精细分辨和定位的信息则可支持实时决策时的战术要求的。高纬度地区，RADARSAT 每天可以 Wide 方式或 ScanSAR 方式提供数据，在低纬度地区，则不可能做到这样。当需要经常性观测时，RADARSAT 等可替代机载 SAR 运作。

在海冰方面的应用将可望是 SAR 产品的最重要的市场之一。SAR 在冰的调查应用中的研究已是相当多了。机载 SAR 数据目前主要为航海和海冰监测机构所用。目前星载 SAR 的主要市场在北欧、俄罗斯东北海岸带、亚洲和北美，其中政府和私营的冰面监测机构、商业航海公司、油井钻探公司、渔业部门和海岸保卫部门都是主要用户。

### 一、冰的密度探测

冰的密度探测即在某一地区的冰面比例分析。SAR 对区分海水与所有海冰类型是十分有用的，除非是新的薄冰。但是，由于绝大多数在冰海区域的航海都是在薄冰区，所以 SAR 不能探测新的薄冰并非重要。密度估算常常以数十计，海冰覆盖的全部海面即认为是计算密度的海水整体。将所有的海冰密度都计算出来是航海时估计通过某一冰海区的线路时所必需的，低密度信息可保证船只有准备地通过冰海区，减少浮冰撞击的危险。

### 二、冰类分析

用户需要区分一年冰和多年冰。雷达后向散射对冰的物理参量如盐度、气泡含量、晶体结构等和地形特征，如冰脊、融池都是很敏感的。这些参量随着海冰年龄和坚度而异，出海的船只需要得到多年坚冰的位置信息以避免危险。

图像上很多结构都是可见的，因为不同的冰貌、物理特征和冰类，纹理不同。色调亮多是多年冰，而暗色调一般是新生成的。

以 SAR 进行冰类分类依气候条件和其影响冰的后向散射的条件而异。冬天由于冰块冷而干燥，故能很好区分冰类。问题在于溶化时，如果冰或雪盖含水量饱和，要区分冰类就非常困难了，在具有这种湿度的条件下，冰貌

参数(包括浮冰大小、地面形状、成脊程度等)就成为区分冰类的主要参数,这方面需要进一步地研究在冰溶时期不同条件下对确定冰类的影响。

另一个重要参量是冰的边缘位置,即冰水交界线,通常它定义为冰块10%的外缘。冰的边缘位置对商业航海、近海油气开发、渔业和气象研究是十分重要的。很多商船没有撞冰的能力,必须完全避开它。油气开发需要知道浮冰边缘位置以便规划钻井和其它活动。渔民已注意到渔库冗余与冰的边缘的相关关系。冰的边缘和范围又是一个重要的气象指数,它对于长期的全球监测是必需的。

冰缘地区的气候经常是很坏的,云雾共生。很多地区整个冬天处于风和暴风的影响下,因而冰缘是高度活动和变化的特征,所以监测和更新冰缘位置,以一定模型预测其运动是十分重要的。

RADARSAT SAR将证明其为冰缘定位的可靠信息源,因为其冰水图像反差很大。事实上,卫星遥感对冰的调查分析是最佳的,星载SAR可提供极地覆盖的周日信息,其中的冰缘信息将可满足战略计划的需要。

### 三、冰面特征识别

冰的地形特征包括冰脊、冰碴地和冰川,有关这些信息的探测对航海路线的选择和冰类的确定是十分重要的。冰脊和冰碴地有碍和拖延航行,冰川则为船只提供易行和经济的航道,这些特征信息在SAR图像上都是可识别的。

这方面处于中试阶段。SAR可提供冰面地形信息,而这是有助于冰类分析的。

### 四、浮冰跟踪

浮冰跟踪有关利用多时域SAR图像对浮冰运动进行监测以便作好航海计划。浮冰是可以利用SAR进行监测的,因而潜在的危险也就可以避免。浮冰跟踪是SAR的可操作性应用。人们已经通过SEASAT和机载SAR监测浮冰运动,将有关技术发展起来,并研制出许多算法以作计算机处理。主要的技术要求是作冰类特征识别和图像上的时序跟踪。通过时序图像可推出浮冰运动速度矢量,这一矢量可以显示出浮冰运动的区域模型。

图像上的锥状体相关和边界碎块特征提取等浮冰跟踪技术都是很成功的,但仍需改善以提高精度。其中的问题在于冰体旋转和形变。人们提出了旋转不变性相关方法(Vesecky et al,1987)和PSI－S曲线匹配方法(McConnell et al,1989),建议采用这些方法以解决旋转变形问题。

从时序的SAR图像上提取的信息对于短期和中期浮冰预报及其数学模型的建立是十分有用的,所推算出的浮冰速度可用于建立预报模型以预

报三至五天的短期冰情。目前仍需在建模上作更多工作以提高这样一个短期内的预报精度，并将它延展到五天后的预报之中。RADARSAT SAR 数据将可以作为预测模型中的新型输入数据，可用于验证预测的精度。更长时间的预报需要长时间的风势预测，眼下这方面还不能达到足够的可靠性。

高纬度地区的图像周日覆盖将可以为成功地进行周日浮冰监测提供充足的数据。在低纬度地区，RADARSAT 数据可作为机载 SAR 数据的补充，以增加覆盖频数满足预报模型的需要。

### 五、冰块探测

冰块是冰川裂变的结果，探测其位置对近海钻井工作和航海是十分重要的。较大入射角的机载 SAR 可探测出冰块、小的碎冰块和大的冰块聚合体。目前这是探测冰山和成图的主要方法。星载 SAR 可望提供较大冰山的定位信息。

## 思考题

1. 在进行土壤湿度、土壤类型调查时，由于有植被覆盖，对雷达波长、入射角有什么要求，为什么？
2. 试分析利用雷达图像对农作物生长状况进行估计的原理。
3. 若进行不同农作物类型分布的调查，且主要采取微波遥感手段，将如何实施？
4. 雷达图像在森林方面的应用主要优越性在什么地方？
5. 试叙雷达图像在地质方面的主要应用。
6. 为什么雷达图像在水文方面的应用具有很多优势？

# 第九章　微波辐射计图像的应用

微波辐射计图像记录的是地物的微波辐射信号，同样具有全天时、全天候等特点，是可见光和红外传感器所不可比拟的，而且图像几何特点与可见光，红外扫描仪图像相近，没有雷达图像那么复杂，所以受到了广泛重视，并得到日益广泛的应用，在有些国民经济建设部门，已进入了业务应用阶段，如气象、环境保护等方面已可以直接为该部门的工作服务，但大多数国民经济建设部门还处于研究和应用试验阶段。

## 第一节　水文、冰雪探测中的应用

微波辐射计可用于水资源探测、洪水分析、水质监测等方面，成为在水文分析中的重要工具。由于洪水泛滥时期一般为阴雨天气，可见光、红外传感器无法获取地面信息，而微波辐射计则可以发挥作用。水体的微波发射率很低，便于从亮度温度的分析中，划定洪水泛滥的范围及危害的程度。

而在缺水地带、高原和干旱地带，探明地下水的分布是十分重要的工作。由于有地下水或其它水源的地方，亮度温度比周围环境低约 100K 左右，这样利用微波辐射计是可以比较容易地找到水资源的。由于微波的穿透能力，它比起热红外传感器就显得优越得多。

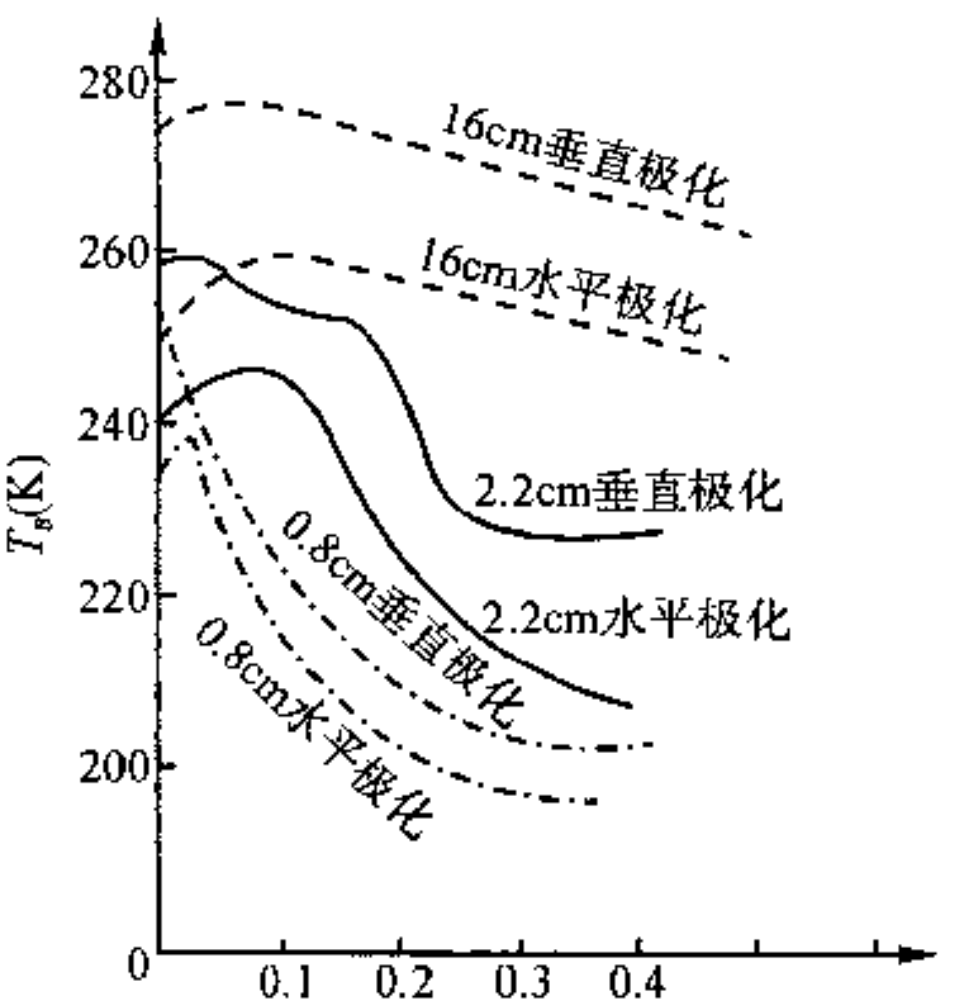



图 9-1-1　不同波长的亮度温度随雪的等效含水量变化

冰雪探测是一项极其重要的工作。因为冰雪覆盖是地面复盖的重要部分，研究和探测冰雪分布、生成与消融及演变，关系到海洋洋流分析、水源和

水害分析、大气环流分析和气候演变分析，对于人类生存环境和农业生态、经济发展关系极大。

雪的分布、厚度、密度、类型等均可由微波辐射计进行探测。这是由于雪有着与其它地物不同的亮度温度，而微波辐射对雪的穿透能力很强，特别对于雪，其穿透深度相当于波长的数百倍。如 0.8cm 波长的辐射计能获得 1.6m 厚度下的雪层信息，而波长越长，穿透深度越深。雪的密度不同，在微波辐射计上也可以得到反映。图 9-1-1 表明雪的密度增大，等效含水量增加时，亮度温度下降的情况。

当冰雪消融时，其表面亮度温度则呈上升趋势，图 9-1-2 为 5mm 波长微波辐射计测量厚度为 0.8m 的雪层亮度温度随消融时间变化的情况。可以看出，三个小时内，亮度温度升高约为 70K。

冰的发射率比水的发射率大得多，因此其亮度温度的差异十分明显，如在黑海的一次观测中，发现海冰与海水的亮度温度相差约 60K，显然用微波辐射计是可以探测到海洋的信息的。

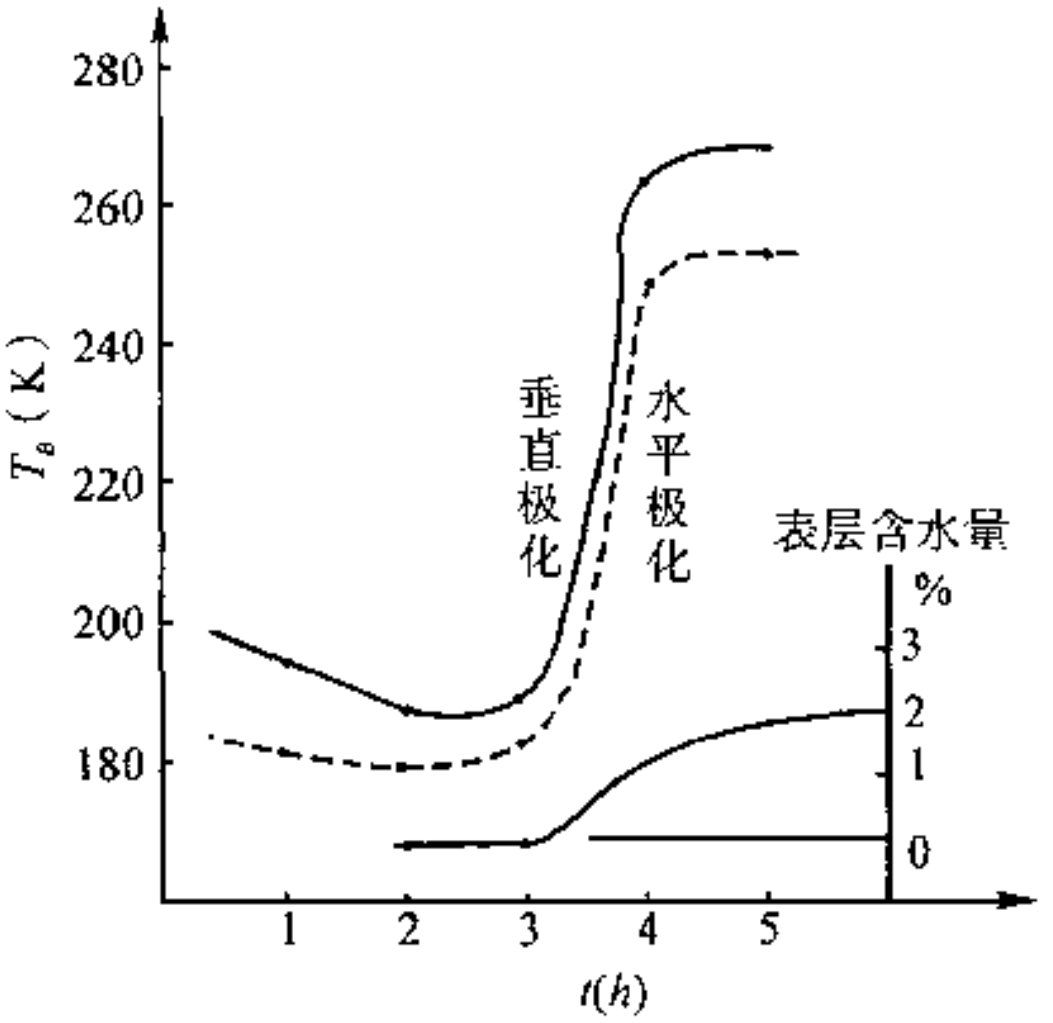



图 9-1-2　5 毫米波段融雪的亮度温度随时间变化

不同类型的冰即一年生冰和多年生冰，也可以用微波辐射计进行探测区分。美国宇航局和地质局曾用机载多频段微波辐射计进行考察，发现 19.35GHz 和 37GHz 辐射计探测一年生冰和多年生冰的亮度温度，结果相差 50K。美国利用卫星上的微波辐射计进行研究的结果表明水平极化的 13.3GHz 和 19.4GHz 在不同海区可测出十一类海冰。

## 第二节　海洋探测中的应用

海洋是现代人类的重要活动领域，随着资源与环境问题日益尖锐，海洋资源探测、海洋环境监测和海洋要素调查等需求日趋迫切。微波辐射计可以在这方面发挥作用，它已可以用于海面温度、盐度、风速量测及石油资源

和淡水资源等调查。

在量测海面温度方面，实际的观测表明需要选择合适的波长和频率，比如当采用 5.4GHz 辐射计时，若海面环境温度为 298K 左右，实际温度上升 1K，亮度温度增加 0.5K，而采用15.8GHz的辐射计，则观测不出亮度温度的变化。所以必须考虑$\partial T_B/\partial T_0$(即亮度温度对于实际温度的偏微分)在不同频率或波长时的变化，取其最大值所对应的波长，作为辐射计的工作波长。

图 9-2-1 表明$\partial T_B/\partial T_0$ 与波长和实际温度的关系，其中未考虑大气等因素的影响。由该图可见，波长为 0.3～0.6cm 和 5～10cm 时，$\partial T_B/\partial T_0$ 的值较大，比较合适，其它的波长如 0.8～1cm，当温度高于 20℃时，$\partial T_B/\partial T_0$ 值较小，只有当温度低于 20℃时比较合适，也就是冬季时可用 0.8～1cm 的辐射计。又如波长为 3cm 时，只适于 10℃以上水温量测，也就是说在夏季可用 3cm 辐射计。从图中曲线的分析可以看出，10cm 波长最适合海面温度的量测。正因为如此，国外研制了 S 波段辐射计，用以量测海面温度。

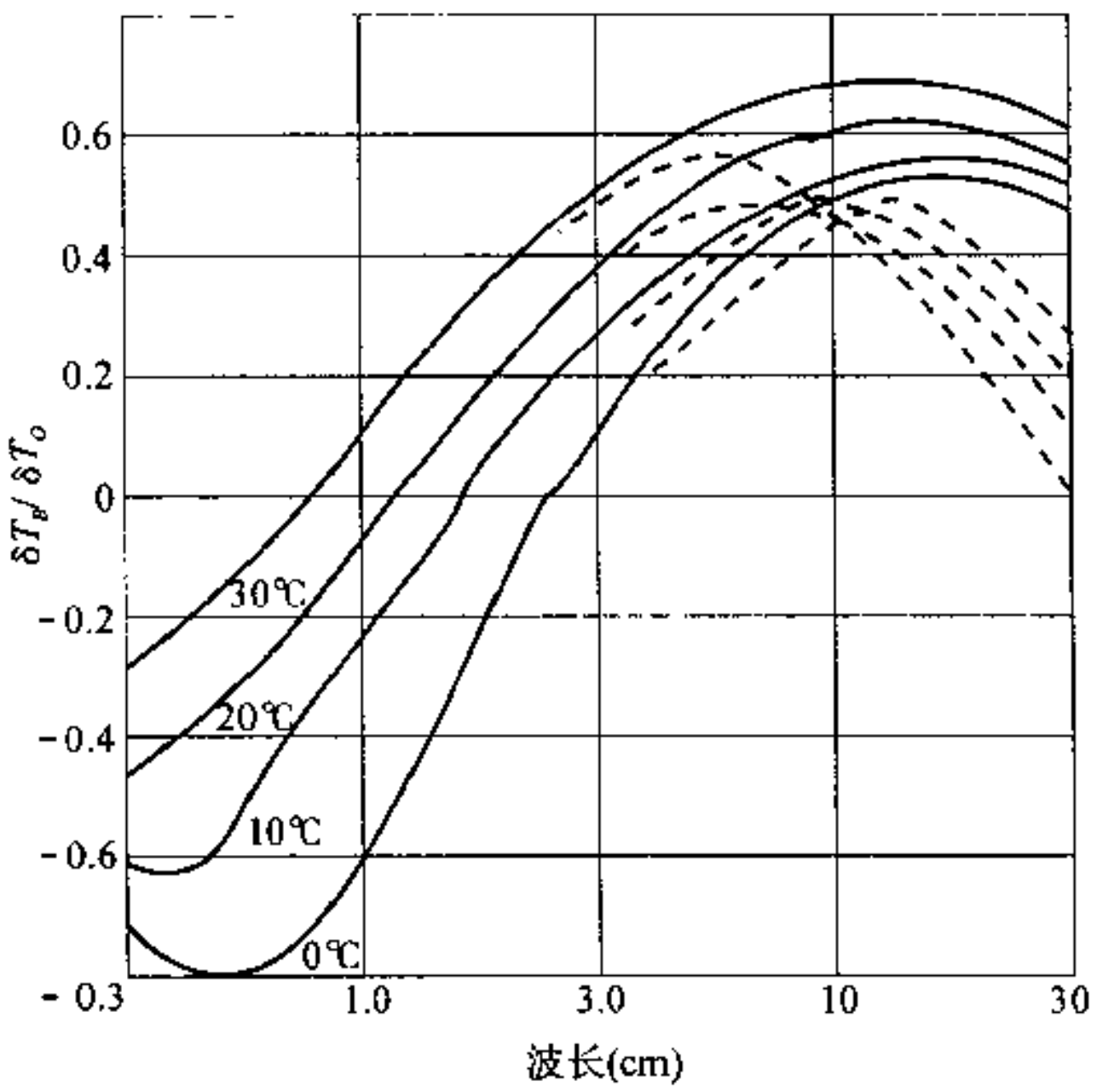



图 9-2-1 $\frac{\partial T_B}{\partial T_0}$与波长及温度的关系

河海交汇处是淡水与咸水混合的地方，其盐度的量测关系到河的悬浮泥沙的运动及其扩散，和其它化学元素的含量，一般通过盐度量测可以估算

出其它化学元素的含量，所以河海交汇处的盐度量测和监测对河流整治、生态平衡、渔业发展及海洋资源开发都有着重要的意义。

一般在微波低频段即波长较长时，海水的微波辐射与含盐量关系密切。研究表明，当频率高于 5.4GHz 时，亮度温度与盐度无关，所以盐度的监测采用较长波段的辐射计，如美国在 1972～1974 年采用 21cm 波长辐射计在密西西比湾等海湾进行了五次盐度遥感实验，其结果如表 9-2-1 所示。

**表 9-2-1　美国 1972—1974 年五次试验的结果**

| 飞机类型 | 实验日期 | 盐度范围 | 水温(℃) | 盐度均方差 |
|---|---|---|---|---|
| 一般飞机 | 1972 年 8 月 25 日 | 10—30 | 20 | 2.0 |
| | 1973 年 11 月 7 日 | 10—30 | 20 | 2.7 |
| | 1974 年 6 月 4 日 | 9—25 | 20 | 2.3 |
| 直升飞机 | 1974 年 4 月 9 日 | 15—30 | 20 | 1.4 |
| | 1974 年 4 月 16 日 | 15—20 | 20 | 1.4 |

微波辐射计可用于测量海面风速，这是因为海风使海面的粗糙度增加，海面的反射率降低，发射率增大，亮度温度发生很大变化。

测量风速与极化方式、入射角有关。在垂直极化方式下，入射角小于 55°时，辐射计测得的亮度温度随风速的增大而增加；但大于 55°时，亮度温度与风速无关。水平极化方式不受入射角影响，不管入射角多大，所测亮度温度都能很好反映海风速度，而且随风速变化的亮度温度变化率较大，1973 年，美国和前苏联在白令海峡上空联合进行试验，采用多波段辐射计，距海面 155m 的探测结果如表 9-2-2 所示。可见，水平极化方式下的探测效果好得多，其探测得到的亮度温度随风速的变化率值在同一条件下比垂直极化方式高出 1～2 倍，另一方面，从不同波长辐射计的量测效果来看，0.8～2.8 cm 波长的辐射计在测量海风速度方面具有更高的灵敏度。

**表 9-2-2　亮度温度随风速的变化率值**

| 波长 λ(cm) | 极　化 | 入射角 | 变化率(K·s/m) |
|---|---|---|---|
| 21.0 | 对　地 | 0° | 0.16±0.04 |
| 6.0 | 垂　直 | 38° | 0.54±0.003 |
| 6.0 | 水　平 | 38° | 0.94±0.13 |
| 2.8 | 垂　直 | 38° | 0.66±0.09 |
| 2.8 | 水　平 | 38° | 1.18±0.07 |
| 1.55 | 对　地 | 0° | 0.90±0.08 |
| 1.55 | 水　平 | 38° | 1.39±0.10 |
| 0.95 | 对　地 | 0° | 0.95±0.06 |
| 0.81 | 垂　直 | 38° | 0.48±0.14 |
| 0.81 | 水　平 | 38° | 1.33±0.38 |

研究表明，微波辐射计测量风速的范围为 7～50m/s，测量精度为 ±2m/s。

在探测海洋淡水资源方面，微波辐射计也可以发挥重要作用。在有淡水资源的海域，淡水区与周围海水具有不同的特征，盐度差约为5，温度差有4℃，所以可以用微波辐射计进行探测。1978年美国有关研究中心用L波段和S波段辐射计及红外辐射计在波多黎哥岛周围海岸附近进行了多次探测，找到了多处海底淡水源。

海洋污染监测，特别是石油污染监测，是海洋环境监测的主要任务，因为目前这是海洋污染中的主要方面，据统计，因为工业排污，船舶排污，海底油井开发和油井事故以及油轮事故，全世界每年约有1000万吨油倾入海洋，所以石油污染监测成为一项海洋监测的重要任务。一些国家采用了包括微波辐射计在内的各种传感器监测海洋石油污染，由于石油的发射率大大高于海水，所以污染海域的微波辐射亮度温度比周围海水要高出数十度，而其油膜越厚，亮度温度越高，因此，采用微波辐射计监测油污是可行的，实验表明0.8cm波长辐射计是最佳选择。目前美国等国已进入采用微波辐射计等多种传感器监测海洋石油污染的业务应用阶段。

## 第三节　农、林、渔业中的应用

如何在农业、林业和渔业中应用微波辐射计是一项重要的研究内容，已有很多研究成果表明微波辐射计的应用潜力。

在农业方面的应用研究主要集中在农作物的识别，土壤湿度估计和农作物估产几个方面。农作物的类型、生长状况，是农作物识别的主要目标。由于不同的农作物其枝叶形状、密度等指数是不一样的，处于不同生长期的农作物其枝叶面积、盖度状况也不尽一致，这样就为微波辐射计的探测提供了可能。因为一般而言，辐射计频率越高，作物越稠密，所测得的亮度温度与作物的相关性越强。如采用37GHz(0.8cm)的辐射计就能很好地反映农作物的信息。这种辐射计波长很短，不能穿透作物枝叶，只能反映作物枝叶表面的状况，所以对农作物识别有利。

土壤湿度调查在农业生产中是一项重要工作，土壤湿度即土壤含水量的多少，利用微波辐射计探测土壤湿度一直是许多研究机构的研究内容。一般而言，亮度温度与土壤湿度的关系是十分显然的，但要确定一个定量关系表达式却不是一件容易的事。美国有关科研人员在亚里桑那州进行试验，采用0.8cm、1.55cm和21cm的辐射计对200余个点上的15cm厚的土壤含水量进行量测，表明21cm辐射计所量测的亮度温度与土壤含水量呈线性关系。美国天空实验室上装载的21cm辐射计也进行过土壤含水量遥

感试验，在得克萨斯州西部和堪萨斯州东部数万平方公里区域内的实测结果，说明所建立起含水量 $S_m$（百分比重量）与亮度温度 $T_B$ 的经验关系式较好地反映了该区域土壤湿度。这个关系式是

$$S_m = 25.03 - 1.4898T_B + 0.002107T_B^2$$

按这一关系式推算其它航线所对应区域的土壤含水量，与实际数据比较的结果说明基本吻合。但是，这些结果并不具有普遍性，因为土壤类型和表面粗糙度等不同，所用辐射计不同（波长不同），土壤含水量与亮度温度的定量关系是不一样的，还需要作进一步深入研究。

在识别农作物和进行土壤含水量估计的基础上，根据农业管理部门详细的气候、作物、农事资料，就可以尝试建立估产数学模型。美国堪萨斯大学及有关单位曾进行过许多农作物估产研究，取得了很大进展。

在林业方面微波辐射计可用于森林种类识别，森林火情监测及病虫害预报等。森林不同种类如针叶林、阔叶林的叶面形状、密度等不同，辐射计所测得的亮度温度也不一样，实测的不同林木种类的发射率表明根据亮度温度可以区分不同种类森林。而当森林地区出现火情或潜在火情时，微波辐射计由于其较高的灵敏度更适合于火情监测预报。森林中的病虫害会造成叶面萎缩枯黄，这会影响辐射计所测亮度温度的变异，所以当同一地区的辐射计图像出现变化时，就可以根据变化的趋势进行评判、推估和预报。由于林区探测主要根据树冠叶面的信息，故开展上述工作时一般采用工作频率较高的微波辐射计，研究表明 10GHz 以上频率的微波辐射计比较合适。

近年来，许多国家利用遥感技术进行渔业特别是海洋渔业的研究，并取得了一定的经济效益，其中也采用了微波辐射计。渔业遥感研究主要包括鱼群探测、渔业监督管理、渔业海况预报等。比如应用微波辐射计探测鱼群分布，主要采用两种方法，其一是根据水面温度及其变化规律量测确定捕鱼的海区范围，其二则是根据盐度分布的量测进行估计。一般鱼群的季节性分布与温度有关，如金枪鱼捕捞量最大的水域，其温度大约为 15℃～20℃，所以，根据温度变化规律和分布规律研究鱼群活动范围，被认为是一种有效的方法，得到渔业部门的重视。不同的鱼类对海水盐度的要求不一样，如近海鱼类一般适于盐度为 20 的海域，所以对海洋盐度分布的监测可以帮助有关部门分析鱼群的分布范围。美国纳萨兰利研究中心和有关渔业部门曾用机载和船载 L 波段和 S 波段微波辐射计测量切萨皮克湾盐度分布图，为鱼群探测分析提供依据，取得了明显效果。

## 第四节　地质和天文方面的应用

在地质学领域微波辐射计已经可以用于识别岩石类型，寻油找矿，探测地热资源和地震预报等。比如岩石类型的识别，由于不同岩石的内部结构、表面形态等各方面的差异，导致其发射率和亮度温度的不同，因而可以在辐射计图像上通过分析，区别不同的岩石分布。表 9-4-1 是利用 37GHz 辐射计量测不同地表物质的亮度温度的情况。这表明利用辐射计图像分析地表物质的分布，并进一步分析成矿条件，可以为找矿工作提供依据。同时由于不同地形地貌与其复杂的地物构成有着密切关系，因而其微波辐射特性也会表现出差异，这就是说可以利用微波辐射计图像分析地形地貌。例如：有关研究人员利用天空试验室 S194L 波段微波辐射计图像进行地质分析，获得了初步的成果。

**表 9-4-1　在 37GHz 频率上不同地表结构的典型发射率和亮度温度 $T_B$**

| 表面类型 | 沙沙岩 | 花岗岩 | 灰　岩 | 平静水 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 垂直极化 | 水平极化 |
| 发射率 | 0.93 | 0.9 | 0.75 | 0.6 | 0.33 |
| $T_B(K)$ | 280 | 270 | 225 | 180 | 100 |

微波辐射计在天文学中的应用则有较长历史，而且具有多方面的应用。通常所谓射电望远镜就是一种微波辐射计。它是天文学由光学天文学进入射电天文学新阶段的重要标志。射电望远镜为探测宇宙发挥了重要的作用。许多奇异天体的发现都是通过射电望远镜的观测得到的，例如脉冲星，现在已发现有 400 多颗，除了其中两颗可以用光学方法观测外，绝大多数是用射电望远镜才发现的。

微波辐射计已广泛用于观测太阳、月亮其它星体，银河系及其它星系变化规律，比如监测太阳黑子的运动、太阳耀斑等。所用的微波辐射计频率从 400MHz 到 22GHz。也有用到 300MHz 以下和 100GHz 微波辐射计的，都取得了显著成效，表明在天文学应用中，它相当成熟。

## 第五节　气象探测和大气科学研究中的应用

灾害性天气的预测预报是气象预报工作中的非常重要的一个部分，微波辐射计可以在这方面发挥重要作用。例如台风或风暴中心及其运动规律的监测，各国都采用微波辐射计。由于风暴中心液态水和水蒸汽的含量非常高，利用液态水对微波信号的衰减和水蒸汽对微波的吸收特性，可以准确发现风暴中心的位置，22.2GHz 是水蒸汽的吸收峰值频率，前苏联宇宙 243 卫星就曾载有这一频率的辐射计和 37.5GHz 的微波辐射计，用于探测太平洋的台风中心。其观测结果表明，台风中心的亮度温度比周围海域高出 40K 到 80K。因此利用微波辐射计探测台风中心是十分有效的。

在气象预报中，测量大气含水量是一个重要的工作，大气中含水量不同会影响到其微波辐射亮度温度的变化，实验证实在含水量不大的情况下，水汽总量与辐射亮度温度具有线性关系，如气象卫星上 1.35cm 辐射计的实测结果就是如此。美国雨云—5 号卫星所载 1.55cm 辐射计第一次测量了世界海洋降水量图，为气象研究提供了重要的资料。

由于海洋上发射率变化小，不像陆地上地物繁多、结构复杂，因此在海上观测降雨比较有效。一般微波辐射计上量测到的亮度温度随降雨量增加而增加，而且不同的微波波长能够量测的降雨量大小也不相同。研究表明，用 0.86cm 波长的辐射计能探测 10mm/h 以内的降雨，1.5cm 辐射计可探测小于 20mm/h 的降雨，3.2cm 的辐射计可探测大于 40mm/h 的降雨，由于 0.86cm 辐射计还可以探测非降雨云的含水量，一般将这种辐射计与 3.2cm 辐射计或 1.55cm 辐射计配合使用，以综合观测云中含水量和降雨量。

大气温度探测数据同样是气象研究和气象预报中的重要数据，自 1961 年有人提出利用 5mm 波长辐射计测量大气温度分布结构以来，人们进行了一系列观测，包括地面、航空观测和卫星的全球观测。美国雨云－5 和雨云－6 号卫星观测结果表明，采用微波辐射计观测大气温度的灵敏度大大高于红外辐射计。雨云－5 号卫星上采用波长分别为 1.35cm、9.55mm、5.6mm、5.45mm 和 5.1mm 的辐射计来探测大气温度层结构，取得了进展。

大气成分探测是大气物理等方面研究的重要资料，在这方面，微波辐射计是一个重要的工具。由于不同的气体具有不同的吸收带，根据这一特点可以选择不同波长的辐射计进行观测，区分不同大气成分，例如氧气的吸收带中心波长为 5mm 和 2.53mm。水蒸汽的吸收主要在1.35cm和 1.66mm。氨气的吸收带中心波长为 1.3cm，二氧化硫的吸收波长在 1.5cm 以下，等等。选择相应波长的辐射计就可以监测相应大气成分的分布。

这里特别要提到大气污染的监测，由于工业废气和平流层的光化学反应，在空间产生了许多有毒有害的气体，如臭氧、一氧化碳、二氧化氮等。这种大气污染对人类生存环境是一种侵害，必须对气体污染的种类、范围、程度进行监测，以采取措施、改善大气质量。根据这些有害气体的吸收特点，选择相应波长的辐射计，是可以实施大气监测的。比如用 2.53mm 波长的辐射计可以探测一氧化碳，2.4mm 波长的辐射计适于探测二氧化氮等。配合以其它红外、可见光、紫外传感器，监测效果更好。

大气层中的气流运动，特别是剧烈的气流运动，飞机航行中必须预先探测，以便避免这类剧烈运动造成飞行事故。晴空湍流就是一种十分危险的气流运动，它常常发生在 8000～16000m 高空的大气层中，是一种气流急剧升降的现象，飞机若遇到这种情况，极易失事。实验与研究表明，这种气流急剧运动会使附近大气层温度升高，一般比周围高出 1℃～5℃，当温度升高 5℃时，飞机就要承受一个重力加速湍流的冲击。为了监测预报这种湍流的方位、距离和强度，目前采用了 5mm 波长的辐射计，它可以在数万米以外探测到晴空湍流，飞机借此可以避开湍流，确保安全。

## 第六节　军事上的应用

微波辐射计在军事上的应用甚至比红外辐射计更具有优越性，因为不同物体在红外波段发射率有的差别不大，而其微波发射率则存在较大差异。表 9-6-1 的对比就说明了这一点。另一方面，微波辐射具有穿透性，能穿透土壤、冰层，利用微波辐射计可以测出人群。人体虽然比土壤、冰层、草地等温度高，但在微波辐射方面，人体只是一个弱辐射体。从表 9-6-2 可以看出在 2～4GHz 频率范围内，人体辐射明显低于冰、土壤、草地，这就有利于对敌方部队隐蔽活动的探测。

表 9-6-1　微波与红外波段的发射率比较

| 目标 | 波长 3cm | 波长 3mm | 波长 10μm | 波长 4μm |
|---|---|---|---|---|
| 钢 | 0.00 | 0.00 | 0.6—0.9 | 0.6—0.9 |
| 水 | 0.38 | 0.63 | 0.99 | 0.96 |
| 干沙 | 0.90 | 0.86 | 0.95 | 0.83 |
| 混凝土 | 0.86 | 0.92 | 0.90 | 0.91 |
| 沥青 | 0.98 | 0.98 | 0.92 | 0.71 |

表 9-6-2　各种介质的微波发射率与复介电常数值

| 介　质 | 温度(℃) | 频率(GHz) | 发射率 | 复介电常数∈ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 实部∈′ | 虚部∈″ |
| 肌肉 | 37 | 3 | 0.42—0.44 | 45—48 | 13—17.6 |
| 肥肉 | 37 | 3 | 0.78—0.88 | 3.9—7.2 | 0.6—1 36 |
| 皮肤 | 37 | 10 | 0.45 | 38.6 | 17 5 |
| 冰 | −12 | 3 | 0.92 | 3.2 | 0.0028 |
| 雪(0.125g/cm$^2$) | −20 | 3 | 0.99 | 1.2 | 0.00036 |
| 雪(0.4g/cm$^2$) | -6 | 3 | 0.99 | 1.5 | 0.0013 |
| 土壤(干沙) | 25 | 3 | 0.95 | 2.55 | 0.0016 |
| 土壤(湿沙) | 25 | 3 | 0.95 | 2.44 | 0.003 |
| 草地(干) | 19 | 2—4 | 0.92 | | |
| 草地(湿) | 17 | 2—4 | 0.8 | | |

利用微波辐射侦察潜艇活动处于试验阶段,潜艇一般在海面以下 300−400m 深处航行,在其实施攻击如发射导弹或鱼雷时,必须上浮到离海面 30m 深度处。潜艇的动力装置释放余热,造成与周围海水 0.1K 的亮度温度差。采用高灵敏度微波辐射计有可能侦察到潜艇上浮时的行踪。

导弹飞行中段运行轨迹量测是微波辐射计应用的一个方面。导弹飞行的中段发动机熄灭,靠惯性运行,军事部门需要测出其中段轨迹。实验表明,处于中段运行的导弹释放出的余热使得它与周围空气亮度温度差 0.02K,可以利用高灵敏度微波辐射计,配合其它相关技术,解决导弹中段轨迹量测问题。

制导则是微波辐射计应用的另一个方面,美国计划在导弹上装备微波辐射计,利用辐射计适时测出飞行地域图,导弹内装有计算机,存贮着地图,在导弹飞行的后期,辐射计实测图与计算机中存贮的地图适时比较,以校准导弹飞行路线,以便最后发现和击中目标。这方面比较合适的辐射计工作波长是 0.3cm、0.8cm、1.55cm 和 2−4cm。

此外,伪装下的坦克群、炮兵阵地和导弹发射井等金属结构目标亮度温度比周围环境低,利用这个特点,选用合适的微波辐射计可以探测出这些目标的存在。

**思考题:**

1. 说明探测大气成分或大气污染为什么都利用吸收特征?
2. 比较微波辐射计和侧视雷达在农业方面的应用。
3. 为什么辐射计能探测大气剧烈流动(湍流)的方位、距离和强度。
4. 综合说明探测海水盐度的意义。
5. 微波辐射计和侧视雷达在林业应用中各有什么优势?

# 参考文献


[1] 杨凯等,《遥感图像处理原理和方法》. 测绘出版社,1988 年。

[2] 卜兆宏,《资源遥感与制图》. 南京工学院出版社,1987 年。

[3] 王宇明,《遥感技术及其应用》. 人民交通出版社,1991 年。

[4] 约翰 E. 埃斯蒂斯等,《遥感手册》第六分册 . 国防工业出版社,1983 年。

[5] 郭树桂,《卫星遥感与制图》. 中国人民解放军测绘学院,1984 年。

[6] 孟侃,《微波遥感》. 华中工学院出版社,1982 年。

[7] 汪国铎等,《微波遥感》. 电子工业出版社,1989 年。

[8] 舒士畏等,《雷达图像及其应用》. 中国铁道出版社,1989 年。

[9] RADARSAT INTERNATIONAL, 《Catalogue of Recent Radar Research Related to Canada's RADARSAT, Main Volume》. June 30, 1992。

[10] CCRS & RADARSAT INTERNATIONAL, 《Introduction to Spaceborne RADAR Remote Sensing Handbook》. 1992 年。

[11] 郭华东主编,《雷达图像分析及地质应用》. 科学出版社,1991 年。

[12] F. T. 乌拉比等,《微波遥感》. 科学出版社,1987 年。

[13] 李德仁主编,《空间信息学及其应用》. 武汉测绘科技大学出版社, 1998 年。

[14] CCRS & Natural Resources Canada, 《RADARSAT for Amazonia: Results of Pro RADAR Investigation》. 1998 年。

[General Information]
书名=微波遥感原理
作者=
页数=190
SS号=0
出版日期=

封面页
书名页
版权页
目录页
第一章　微波遥感基础
　　第一节　引言
　　第二节　电磁波理论与微波
　　第三节　微波与物质的相互作用
　　第四节　无线电谱和微波谱
第二章　微波遥感系统
　　第一节　非成像微波传感器
　　第二节　成像微波传感器
　　第三节　天线、雷达方程和灰度方程
　　第四节　空间微波遥感系统
　　第五节　辐射测量原理
第三章　微波图像的特点
　　第一节　侧视雷达图像参数
　　第二节　侧视雷达图像的几何特点
　　第三节　侧视雷达图像的信息特点
　　第四节　典型地物的散射特性
　　第五节　典型地物的亮度温度
第四章　微波图像的校准、定标与模拟
　　第一节　雷达回波的校准
　　第二节　雷达图像定标
　　第三节　雷达图像模拟
　　第四节　辐射计的校准、定标
第五章　微波图像的几何校正
　　第一节　侧视雷达图像的几何变形分析
　　第二节　侧视雷达图像的构象方程
　　第三节　微波辐射计图像的构像方程及图像几何变形分析
　　第四节　普通几何校正方法和利用模拟图像的方法
　　第五节　利用构像方程的几何校正方法
第六章　微波图像与测量
　　第一节　简单的图上测量
　　第二节　目标点的解析定位
　　第三节　利用侧视雷达图像的解析测图方法
第七章　微波图像的目视解译和计算机处理
　　第一节　雷达图像的解释标志特点
　　第二节　雷达图像中各类地物的解译
　　第三节　微波辐射计图像解译
　　第四节　图像变换、彩色合成与目标解译
　　第五节　计算机处理与识别
第八章　雷达遥感图像的研究与应用
　　第一节　农业方面的应用
　　第二节　测绘方面的应用
　　第三节　海岸带和海洋方面的应用
　　第四节　森林方面的应用
　　第五节　地质方面的应用
　　第六节　水文方面的应用
　　第七节　土地利用调查
　　第八节　海冰调查
第九章　微波辐射计图像的研究与应用
　　第一节　水文、冰雪探测方面的应用
　　第二节　海洋探测中的应用
　　第三节　农、林、渔业中的应用
　　第四节　地质和天文方面的应用
　　第五节　气象探测和大气科学研究中的应用
　　第六节　军事上的应用
参考文献
附录页