

雷达摄影测量

肖国超 朱彩英 编著



地震出版社

雷达摄影测量

肖国超 朱彩英 编著

地震出版社

2001

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达摄影测量/肖国超, 朱彩英编著. —北京: 地震出版社, 2001. 12
ISBN 7-5028-1944-4

I. 雷… II. ①肖…②朱… III. 雷达摄影—摄影测量 IV. P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 059450 号

内 容 提 要

本书较系统地叙述了雷达摄影测量的基本理论和方法, 其中包括雷达摄影测量的定义和特点; 雷达构像原理; 雷达图像特性; 雷达构像的数字模型; 雷达图像的几何纠正和辐射校正; 干涉合成孔径雷达测量; 雷达影像与多光谱影像的融合及雷达影像的解析摄影测量处理方法等。

本书可作为摄影测量与遥感专业教学用书, 也可供其他有关专业师生、工程技术人员学习参考。

雷达摄影测量

肖国超 朱彩英 编著

责任编辑: 李和文

责任校对: 王花芝

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2001 年 12 月第一版 2001 年 12 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 298 千字

印张: 11.625 插页: 1

印数: 0001~1000

书号: ISBN 7-5028-1944-4/P·1090 (2495)

定价: 24.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

本书较系统地叙述了雷达摄影测量的基本理论和方法，其中包括雷达摄影测量的定义和特点；雷达构像原理；雷达图像特性；雷达构像的教学模型；雷达图像的几何纠正和辐射校正；干涉合成孔径雷达测量；雷达影像与多光谱影像的融合及雷达影像的解析摄影测量处理方法等。可作为摄影测量与遥感专业教学用书，也可供其他有关专业师生，工程技术人员学习参考。

本书是在郑州测绘学院教学和专题研究成果的基础上，并参阅了国内外有关文献资料而编写的。书中除第八章由朱彩英副教授编写外，其余各章皆由肖国超教授编写。书稿承钱曾波教授审阅，提出了许多宝贵意见。邢章保等同志绘制了插图。编写中得到了蒋继旺副教授，耿则勋和刘智博士的热情帮助，也得到了教务部、摄影测量教研室的领导和同志的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写中，力求深入浅出，重点突出，便于自学。但由于雷达摄影测量发展迅速，又因编者水平有限，错误和不妥之处，敬请读者指正。

肖国超 朱彩英

目 录

| | |
|----------------------|--------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 第一节 雷达摄影测量的定义和特点 | (1) |
| 第二节 雷达图像发展概况 | (4) |
| 第三节 雷达遥感在军事测绘中的应用 | (12) |
| [一] SAR 立体图像定位与测图 | (12) |
| [二] SAR 影像几何精纠正 | (14) |
| [三] 干涉合成孔径雷达 | (14) |
| 第二章 雷达构像原理 | (16) |
| 第一节 雷达遥感原理 | (16) |
| [一] 真实孔径雷达 | (16) |
| [二] 合成孔径雷达 | (17) |
| 第二节 雷达成像处理原理 | (19) |
| [一] Chirp Scaling 算法 | (19) |
| [二] 距离/多普勒算法 | (21) |
| 第三节 雷达参数的选择 | (23) |
| [一] 波段 | (24) |
| [二] 极化 | (25) |
| [三] 脉冲重复频率、天线尺寸和测绘带宽 | (26) |
| 第三章 雷达图像特性 | (29) |
| 第一节 雷达图像的辐射特性 | (29) |
| [一] 极化的影响 | (29) |
| [二] 复介电常数的影响 | (31) |
| [三] 表面粗糙度的影响 | (32) |
| [四] 硬目标的影响 | (34) |
| [五] 雷达光斑的影响 | (35) |
| [六] 阴影的影响 | (35) |
| 第二节 雷达图像的几何特性 | (36) |
| [一] 斜距显示与地距显示 | (37) |
| [二] 近距离压缩 | (37) |
| [三] 透视收缩 | (38) |
| [四] 叠掩 | (39) |
| [五] 地形起伏引起的影像移位 | (40) |

| | | |
|-----|---------------------------|------|
| 第三节 | 雷达立体图像 | (40) |
| [一] | 雷达立体图像获取方式 | (40) |
| [二] | 雷达立体图像的视差 | (41) |
| [三] | 雷达立体图像的基高比 | (42) |
| [四] | 雷达图像立体观察 | (43) |
| 第四节 | 雷达图像与光学摄影像片之间的差异 | (43) |
| [一] | 辐射特性的差异 | (43) |
| [二] | 几何特性的差异 | (45) |
| [三] | 影像分辨率的差异 | (46) |
| 第四章 | 雷达图像构像的数学模型 | (48) |
| 第一节 | 雷达摄影测量中常用的坐标系 | (48) |
| [一] | 图像平面坐标系 | (48) |
| [二] | 大地坐标系 | (48) |
| [三] | 局部坐标系 | (49) |
| 第二节 | 常用坐标系之间的变换 | (49) |
| [一] | 高斯投影公式 | (50) |
| [二] | 大地坐标与地心空间直角坐标的变换 | (51) |
| [三] | 地心空间直角坐标与局部坐标的变换 | (51) |
| [四] | 地心大地纬度、大地高与地心纬度、向径的关系 | (53) |
| 第三节 | F. Leberl 公式及其线性化 | (54) |
| [一] | F. Leberl 公式 | (54) |
| [二] | F. Leberl 公式线性化 | (55) |
| 第四节 | G. Konecny 公式和斜距投影公式及其线性化 | (57) |
| [一] | G. Konecny 公式和斜距投影公式 | (57) |
| [二] | 斜距投影公式线性化 | (60) |
| 第五节 | 行中心投影公式及其线性化 | (62) |
| [一] | 行中心投影公式 | (63) |
| [二] | 行中心投影公式线性化 | (65) |
| 第六节 | 雷达图像构像的数学模型述评 | (66) |
| 第七节 | ERS-1 SAR 像素标定算法 | (67) |
| 第五章 | 雷达图像的几何纠正和辐射校正 | (69) |
| 第一节 | 多项式纠正法 | (69) |
| [一] | 多项式纠正原理 | (69) |
| [二] | 多项式纠正法评述 | (70) |
| 第二节 | 雷达影像数字微分纠正的基本原理 | (71) |
| [一] | 直接法(正解法)数字微分纠正 | (71) |
| [二] | 间接法(反解法)数字微分纠正 | (72) |
| [三] | 直接法与间接法相结合的数字微分纠正 | (73) |
| 第三节 | 雷达影像数字微分纠正方法 | (74) |

| | |
|--------------------------|---------|
| [一] 数据准备 | (74) |
| [二] 外方位元素的解算 | (74) |
| [三] 锚点坐标的计算 | (77) |
| [四] 灰度内插与赋值 | (77) |
| 第四节 模拟图像纠正法 | (78) |
| 第五节 雷达影像辐射畸变区标识图的生成 | (79) |
| [一] 阴影区标识图的生成 | (80) |
| [二] 叠掩区标识图的生成 | (82) |
| [三] 透视收缩区标识图的生成 | (84) |
| 第六节 雷达影像辐射畸变校正方法 | (86) |
| [一] 叠掩区辐射畸变校正 | (86) |
| [二] 透视收缩区辐射畸变校正 | (87) |
| [三] 阴影区的影像置换处理 | (88) |
| 第七节 雷达图像斑点噪声消除方法 | (89) |
| [一] 成像前的多视平滑预处理 | (90) |
| [二] 成像后的滤波处理 | (90) |
| 第八节 地形坡度和坡向的计算 | (94) |
| [一] 坡度和坡向的基本概念 | (94) |
| [二] 由 DEM 格网点拟合一平面之坡度和坡向 | (94) |
| 第六章 干涉合成孔径雷达测量 | (97) |
| 第一节 概述 | (97) |
| 第二节 干涉合成孔径雷达测量原理 | (98) |
| [一] 横跨轨迹干涉测量 | (98) |
| [二] 重复轨道干涉测量 | (100) |
| [三] 沿轨道干涉测量 | (101) |
| 第三节 重复轨道与横跨轨迹干涉测量的利弊 | (101) |
| [一] 重复轨道干涉测量 | (101) |
| [二] 横跨轨迹干涉测量 | (102) |
| 第四节 目标点高程精度评估 | (103) |
| [一] 不考虑地球曲率影响的高程精度 | (103) |
| [二] 考虑地球曲率影响的高程精度 | (103) |
| 第五节 干涉合成孔径雷达测量数据处理 | (104) |
| [一] 影像配准 | (104) |
| [二] 干涉影像相位图 | (108) |
| [三] 相位解缠 | (108) |
| [四] 建立数字高程模型 | (113) |
| 第六节 干涉合成孔径雷达测量的应用 | (113) |
| [一] 数字高程模型的制作 | (113) |
| [二] 地表监测与分析 | (113) |

| | |
|--------------------------------------|-------|
| 第七章 雷达影像与多光谱影像的融合 | (116) |
| 第一节 概述 | (116) |
| 第二节 彩色变换 | (117) |
| [一] RGB 空间与 IHS 空间 | (117) |
| [二] RGB 颜色模型与 IHS 颜色模型的变换 | (119) |
| 第三节 IHS 变换融合法 | (122) |
| [一] I 融合法 | (122) |
| [二] S 融合法 | (125) |
| [三] IS 融合法 | (126) |
| 第四节 基于小波理论的影像融合法 | (127) |
| [一] 遥感影像经小波分解后的数据特性..... | (127) |
| [二] 基于特征的影像融合法..... | (128) |
| [三] 基于梯度选择的影像融合法..... | (129) |
| [四] 改进的 IHS 变换融合法 | (129) |
| 第五节 融合影像质量评价 | (130) |
| [一] 主观评价..... | (130) |
| [二] 客观评价..... | (131) |
| [三] 融合影像质量评价方法的应用..... | (133) |
| 第八章 雷达图像的解析摄影测量处理 | (136) |
| 第一节 概述 | (136) |
| 第二节 利用单飞雷达图像进行目标点二维定位 | (137) |
| [一] 平坦地区单飞雷达图像的二维定位..... | (137) |
| [二] 起伏地区单飞雷达图像的二维定位..... | (146) |
| 第三节 利用雷达立体图像进行目标点的三维定位 | (147) |
| [一] 基本原理..... | (147) |
| [二] 作业步骤..... | (150) |
| [三] 雷达立体模型的误差分析及提高精度的措施..... | (152) |
| [四] 用聚类分析法进行粗差定位..... | (156) |
| [五] 用聚类分析法进行粗差定位的实验结果..... | (160) |
| 第四节 SAR 立体图像的解析测图 | (164) |
| [一] SAR 立体图像解析测图原理 | (164) |
| [二] SAR 立体图像测图软件包 | (172) |
| [三] 实验结果分析..... | (174) |
| 附录 用聚类分析法进行粗差定位时分类标准的证明 | (177) |

第一章 绪 论

第一节 雷达摄影测量的定义和特点

伴随合成孔径雷达成像技术、航空、航天技术、电子技术的发展，摄影测量学派生了一个分支——雷达摄影测量。

雷达摄影测量 (Radar Photogrammetry) 是利用合成孔径雷达 (SAR—Synthetic Aperture Radar) 获取的图像信息，进行定性识别和量测处理，测定所摄目标的形状、大小、空间位置及其性质的技术。

雷达摄影测量包括雷达摄影定位和雷达图像测图等内容。利用雷达图像上量测的像点坐标和飞行平台的有关数据，根据雷达图像构像的数学模型，测定目标点的几何位置，称雷达摄影定位。如果是单飞雷达图像，则只能进行目标点的二维坐标定位；如果是立体雷达图像，则可以进行目标点的三维坐标定位。利用雷达图像 (立体雷达图像、既有幅度又有相位的雷达复值图像、雷达数字图像) 测绘地形图、生成数字地面模型 (DEM) 和制作正射影像图的理论和方法，称雷达像片测图。

雷达摄影测量与雷达遥感技术有紧密的亲缘关系，两者都是研究“由影像到重建空间物体”的科学与技术，只是在图像应用的侧重点和图像处理的某些方法上有区别。雷达摄影测量着重于研究物体的几何属性，主要关心图像的几何信息的量测和表达精度，即提取影像目标的形状、大小和位置的几何空间信息，对地面目标进行定位和测图，因此，雷达摄影测量基本上是属于几何信息处理体系。雷达遥感技术偏重于研究物体的物理属性，主要应用图像的物理特性，提取景物信息而进行各种专业的定性判释，而对图像的几何精度，相对而言要求较低。从图像处理的方法来说，雷达遥感技术主要采用数字图像处理方法，因而更多地借助于电子技术、信号处理技术和模式识别技术来提取影像的物理特征 (辐射特征)。雷达摄影测量除了采用数字图像处理方法外，还可采用解析计算方法定位和解析测图仪测图。但是随着摄影测量步入数字摄影测量时代，雷达摄影测量与雷达遥感技术在研究的侧重点和图像处理方法上的差异就发生了根本的变化，两者完全能够集成为一个系统来研究目标的几何特性与物理特性。而雷达摄影测量就会从单一的目标点定位和地形测图的应用领域，扩展到广泛的资源与环境动态信息服务的应用领域中。

随着合成孔径雷达影像分辨率的提高和遥感应应用深入发展，在 90 年代又掀起雷达遥感的高潮，而干涉合成孔径雷达 (INSAR—Interferometric Synthetic Aperture Rader) 的飞速发展，又显示出雷达遥感在测绘中有广阔的应用前景。为什么雷达遥感会成为目前国际上遥感技术发展的重点之一，它究竟有什么特点呢？

1. 雷达具有全天候，全天时的工作能力

雷达是“无线电探测与测距” (Radio Detection and Ranging) 的缩写 Radar 的译音词。它的工作波段为电磁波谱的射频与微波段，波长在 1m 至 1mm 之间，相应频率是 300MHz

至 100×10^4 MHz。

大气是由许多气体和水蒸气混合而成。其中还含有许多悬浮的微粒（微水滴、雾、烟、灰尘等），这些微粒的大小约在 $5 \sim 5000 \mu\text{m}$ 范围内。

电磁波在大气中传输因大气的吸收和散射作用，要导致电磁波强度的衰减。大气散射将使人射的电磁波能量在空间重新分配。大气吸收将使人射的电磁波能量转换成大气组成分子的运动。大气对人射的电磁波能量的衰减是散射和吸收的总和。当某种波长的电磁波与大气的分子或原子发生共振时，大气对这种波长的电磁波辐射产生了吸收作用，其吸收的强度以特定的波长为中心变化。在大气成分中，对微波段辐射产生吸收作用的主要成分是氧气和水蒸气。由于吸收作用的强弱，对波长是有选择性的，因此可以通过选择微波波长，以减小大气吸收而引起的衰减。

大气散射的性质与强度取决于大气分子或微粒的半径与电磁波的波长。由半径大于 $1/10$ 波长的微粒引起的散射称米氏散射（Mie scattering）。其散射强度与波长几乎无关。由半径小于 $1/10$ 波长的微粒引起的散射称瑞利散射（Rayleigh scattering）。其散射强度与波长的 4 次方成反比，瑞利散射属选择性散射，即对短波辐射的散射很强，对长波辐射的散射较弱。微波波长是可见光波长的 10^5 倍，根据瑞利散射公式，可以计算出波长是微波的 $1/1000$ 的可见光，它的散射强度比微波高 10^{12} 倍，由此可见，大气中的瑞利散射对可见光影响较大，而对微波的影响可以忽略不计。

云和雾是液态水滴与冰晶粒子群所组成，它们的直径在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 左右，比微波波长要小一个量级以上，它们对微波的散射作用显然满足瑞利散射条件。冰云对微波的传输几乎没有影响。水云仅在波长短于 2cm 时，才有明显的影响。自然降水的粒子主要由水滴、冰粒、雪花和干湿冰雹所组成。它们的直径都在 $100 \mu\text{m}$ 以上，有的雨滴可达几毫米，冰雹则更大，达几个厘米。故自然降水对微波的散射作用和吸收作用相比，一般不能再忽略，即雨比云对微波传输有更大的影响。但当波长约长于 4cm 时，这种影响也可以忽略，只有当波长为 2cm 左右的量级而雨极大时，这种影响才变得严重。

由上述可知，微波能穿透云雾并在一定程度上也能穿透雨区，具有全天候工作能力。合成孔径雷达是一种主动微波遥感系统，雷达天线发射探测用的微波并接收地物目标的回波，而不依赖于太阳的辐射和地物目标的辐射来成像，因此雷达遥感可以昼夜工作，具有全天候的特点。

雷达遥感具有全天候、全天时观测的特点，使其在瞬息变化的战场态势的探测、自然环境的动态监测（如洪水、森林火灾）、恶劣气候地区测绘等方面都有广泛应用。1991 年海湾战争中美军利用“长曲棍球”（Lacrosse）卫星获取的高分辨率的 SAR 图像，准确地测制出伊拉克的各种军事设施图，特别是当燃烧的石油浓烟密布天空时，长曲棍球卫星获取的 SAR 图像，成为多国部队收集军事情报信息的主要来源。

2. 雷达波对地物具有一定的穿透能力

雷达波投射到介质表面，一部分能量被表面散射，一部分能量穿透界面进入介质内部，雷达波对介质的穿透的程度，用穿透深度来表征。若电场在介质中的衰减常数为 α ，则穿透深度 δ_p 为^[2]：

$$\delta_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (1-1-1)$$

对于 $\epsilon''_1/\epsilon'_1 \ll 1$ (例如 $\epsilon''_1/\epsilon'_1 < 0.1$) 的介质, δ_p 可表示成

$$\delta_p \approx \frac{\lambda \sqrt{\epsilon''_1}}{2\pi\epsilon'_1} \quad (1-1-2)$$

式中: λ 为雷达波长, ϵ'_1 和 ϵ''_1 分别为复介电常数的实部和虚部。

δ_p 的上述表达式适用于除水体以外的大多数的自然界地物目标。

由 (1-2-2) 式可知, 对于具体的地表面而言, 雷达波的穿透深度由它的波长、地物目标 (或土壤) 的介电质常数、电导率等因素决定。较长波长的雷达系统, 不仅能接收地表面的散射信号, 而且还能接受地表下层物体的反射信号, 其接受信号强度主要取决于地表层土壤的几何形状和电介质特性。雷达波对多种地表土壤的穿透深度有很大的差别。实验结果表明: 雷达波的穿透深度随土壤含水量的增加而急剧减小, 对于潮湿土壤, 穿透深度只有几厘米到几米; 对于干燥土壤, 穿透深度最深可达几十米。雷达波的穿透深度也随波长的增长而增加, 在 1m 波长上, 对土壤的穿透深度为 30~0.14m; 在 3cm 波长上, 对土壤的穿透深度为 4.8~0.016m。

雷达波能穿透天然植被、人工伪装和地表层一定深度的土壤, 为揭露军事目标和设施的伪装提供了有效的手段, 也能用于测量地面的许多特征, 如土壤湿度、雪被深度和地质构造等。1981 年美国哥伦比亚航天飞机载的 L 波段成像雷达 SIR-A, 飞过埃及和苏丹西部的沙漠地区, 从雷达图像上可以观察到埋在沙土下 1m 或几米深处的古河道和其他地质特征。1984 年利用海洋卫星 SAR 对美国西部莫哈韦沙漠 (Mojave Desert) 的分析, 揭示出被冲击扇埋藏的岩墙。我国利用内蒙古阿拉坦敖包 SIR-A 雷达图像进行地质应用研究, 发现表面平滑的沙层地带, 在 SIR-A 图像上清晰地呈现一亮回波体, 从亮度及其纹理分析, 这是该地区基岩散射特性的表征, 经野外验证表明, 将沙层挖至 1m 左右深度, 见石露出。以上都是雷达波对地表层具有一定穿透能力的典型实例, 但雷达波的穿透理论是一个非常复杂的问题, 也是许多学者长期以来探索的课题, 我国对雷达电磁波穿透特性的研究起步较晚, 需要研究的问题尚多, 例如不同的地物类型、不同波段、不同参量 (如入射角、极化方式等) 的变化与穿透深度的关系, 都有待深入研究。

3. 雷达遥感能获取光学遥感以外的信息

微观研究结果表明, 可见光的产生来源于物质外层电子的激励。红外线的产生是由于物质的分子振动和晶格振动。微波的产生则是由于物质的分子旋转和反转、电子自转与磁场之间的相互作用而引起^[3]。由此说明雷达遥感图像的成像机理与光学遥感图像的成像机理有着本质上的不同。

光学遥感 (可见光, 近红外和短波红外) 图像是地物目标对太阳光反射能量的纪录。由于可见光穿透能力较差, 基本上不存在体散射 (电磁波经多路径反射后所产生的总的有效散射), 故光学遥感图像反映地物目标特征的信息比较单一。雷达遥感图像所记录与表达的是地物目标对某种波长、入射角、极化方式, 的雷达信号的散射回波在一定极化方向上的能量大小。随着雷达系统的工作参数 (如波长、入射角、极化方式) 和地域参数 (如粗糙度、介电常数、线性地物的排列方向等) 的不同, 而在雷达图像上产生不同的色调和纹理。同时雷达波具有较强的穿透能力, 因而会产生体散射效应。例如雷达波束照射森林, 就会经多个平面多路径反射产生最后的雷达回波, 森林回波的一部分就是波束从叶子到细枝, 可能再到树干然后返回雷达的能量所构成。因此, 雷达遥感可以获取不同于光学遥感获取的地物目标信

息，将雷达遥感影像与光学遥感影像相融合，有利于地物目标的判读和分析。

应特别指出的是雷达遥感还能提供复值影像数据，即能提供地物目标后向散射的幅度信息和相位信息，从而可以进行干涉雷达测量，这更是光学遥感所不能企及的。

雷达遥感图像与光学遥感图像相比较也有不足之处。从几何特征来说，由于雷达成像属斜距投影类型，当地面有起伏时，会产生透视收缩和叠掩（顶底位移，多点成像于一点）引起的畸变，因此，对雷达遥感图像进行几何处理，要比对光学图像进行几何处理更困难。从辐射特性而言，由于合成孔径雷达发射相干电磁波，故分辨单元内许多小散射体所产生的回波相互也是相干的，因此在雷达图像上就必然产生雷达光斑效应。当斑点噪声严重时，甚至可能淹没地物目标特征，故对雷达图像影像进行辐射校正也比光学遥感影像难度更大。

第二节 雷达图像发展概况

雷达遥感的发展与雷达技术的发展紧密相联。早在 30 年代后期，由于第二次世界大战的军事需要，雷达技术获得飞速发展。当时主要参战国都已拥有脉冲雷达系统，其工作波长是米波或分米波，其应用目的是对飞机和舰艇进行定位。50 年代初期，美国研制成功了工作在微波频率的能够产生地面图像的机载真实孔径侧视雷达（Real Aperture Side-Looking Airborne Radar 简称 RA-SLAR）。随后相继研制了许多不同类型的机载真实孔径侧视雷达系统，但由于保密的原因，这些雷达系统直到 60 年代初期，才用于地球资源探测。真实孔径侧视雷达，虽然可通过脉冲压缩技术获取距离向的高分辨率，但方位向的分辨率与波长和观测距离成正比，与天线孔径成反比。若要提高方位向分辨率，则飞行平台必须携带一个孔径很大的天线或缩短雷达工作波长。显然前者在雷达结构上会受到限制，后者会削弱雷达全天候工作能力。即使用加大天线孔径和缩短波长来改善图像方位向分辨率，但观测距离仍要受到限制，因此，真实孔径侧视雷达在遥感中的应用就有极大的局限性。

为了解决雷达设计中高分辨率要求与大天线、短波长之间的矛盾，1951 年 6 月美国古德依尔（Goodyear）宇航公司的卡尔·威莱（Carl Wiley）首先提出了合成孔径侧视雷达的概念，并于 1952 年研制了一种称之为“多普勒波束锐化”的系统，这就是合成孔径雷达的最初型式。1953 年 7 月，依利诺斯大学控制系统实验室用机载 X 波段相干脉冲雷达对地面和海面的反射信号进行了研究，第一次证明了合成孔径雷达原理，获取了第一张合成孔径雷达图像。1956~1957 年，美国密执安大学雷达和光学实验室研制成功第一部采用光学处理的合成孔径雷达，并于 1957 年 8 月进行了飞行试验，得到的数据胶片，经地面光学透镜组处理，获得了高分辨率的聚焦型合成孔径雷达图像。从雷达信号处理来说，早期的雷达信号处理是采用光学处理的方法，将贮存在胶片上的雷达信号转换成图像，其处理设备比较简单，但不能实时传输成像，也难以进行误差改正。随着电子信号处理技术的发展，在 60 年代的中期，非实时地实现了 SAR 的模拟式电子信号处理。在 60 年代的后期，非实时地实现了 SAR 的数字式电子信号处理。70 年代初期，实现了带运动补偿的实时数字式合成孔径雷达。

合成孔径雷达从 50 年代初提出并研制，到 60 年代初就进入实用阶段。从科技转化为生产力的周期仅用了 10 余年，这样短的转化周期，在科学发展史上也是少见的，这也从一个侧面反映了 SAR 具有突出的优点和重大的实用价值。例如聚焦型合成孔径雷达方位向的分

分辨率与观测距离和波长无关，且理论上方位向分辨率是雷达天线真实孔径长度的一半，这就使 SAR 不仅在航空遥感中得到广泛应用，而且在航天遥感中更具有实用价值。

1972 年 12 月美国“阿波罗 17 号”登月宇宙飞船首次将 SAR 载入空间。1978 年 6 月美国宇航局 (NASA) 发射了第一颗装载 SAR 的海洋卫星 (Seasat)，标志星载 SAR 时代的开始。该星采用近极地轨道，轨道高度 800km，波长 23cm (L 波段)，水平极化 (HH)，固定视角 20° ，扫描带宽 100km。采用光学和数字两种方法进行数据处理，光学处理后的图像分辨率：距离向 45m，方位向 25m。数字处理后的图像分辨率，在两个方向上皆为 25m，比例尺为 1:50 万。虽然海洋卫星因电源短路仅在轨道空间工作了 3 个月，但它成功地对地球表面进行了 1 亿 km^2 面积的观测，其中有 6500 万 km^2 是陆地，所获取的 SAR 图像对海浪、海水内波 (陷波形式的重力波) 和海冰的监测，对地质构造和岩性制图，对土壤湿度测量和土地利用类型等方面都得到很好的应用，极大地推动了星载 SAR 技术的发展。

美国航天飞机成像雷达的成功飞行，标志着星载 SAR 技术的进一步完善和成熟。航天飞机 SAR 有 3 种型号：SIR-A、SIR-B 和 SIR-C。1981 年 11 月，美国“哥伦比亚号” (Columbia) 航天飞机第二次飞行时携带 SIR-A 合成孔径雷达，它与海洋卫星 SAR 基本相同，也是一台具有单一工作频率 (L 波段) 和单一极化方式 (HH) 的合成孔径雷达，与海洋卫星 SAR 不同的只是信号的记录和天线波束的入射角。海洋卫星 SAR 是一个实时数据收集系统，卫星上没有记录 SAR 数据的能力，雷达回波信号连同基准频率和脉冲重复频率实时模拟传输给地面站，再进行光学或数字处理成像。该星主要目的是对海洋进行观测，故视角固定为 20° (实验表明，测量海冰和海面粗糙度视角为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 合适)。SIR-A 接收数据采用机上光学记录，然后在地面进行成像处理。为了地质应用需要，视角增大到 50° 。SIR-A 获取了大量的雷达图像 (其中包括我国青岛—新疆、烟台—新疆和西藏—新疆三条航带)，充分显示出 L 波段雷达在干旱沙漠地区有很强的穿透能力。

继 SIR-A 之后，1984 年 7 月携带 SIR-B 的“挑战者号” (Challenger) 航天飞机发射成功，又进一步推动了星载 SAR 技术的发展。SIR-B 的主要目的是研究在轨道空间不同视角的后向散射特性和立体成像能力。SIR-B 与 SIR-A 的工作参数基本相同，其区别有两方面，其一是 SIR-B 采用了可变的多视角技术，首次在航天高度实现了立体成像。即视角在 $15^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内可变 (通过改变航天飞机的姿态方式实现)，从而实现立体成像。其二是 SIR-B 增加了数字记录，而 SIR-A 仅采用光学记录和光学成像处理。

航天飞机成像雷达第 3 种型号及 X 波段合成孔径雷达 (SIR-C/X-SAR) 于 1994 年 4 月和 10 月进行了两次飞行，该系统共有 3 个工作波段，美国研制 L、C 波段雷达，德国和意大利联合研制 X 波段雷达。L、C 波段均有 4 种极化方式 (HH、VV、HV、VH)，X 波段有两种极化方式 (HH、HV)。每个波段可同时工作，也可独立工作。视角在 $15^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内可变。数据主要在机上记录并储存，少部分数据通过中继卫星实时传输至地面处理。SIR-C/X-SAR 发展并采用了 4 种先进技术，即干涉雷达成像技术、扫描雷达成像技术、定标技术及 SAR 数据实时处理技术。利用重复轨道干涉测量原理，在 SIR-C 第 2 次飞行的后 3 天，进行了干涉雷达飞行，并获取了包括中国试验区在内的干涉雷达数据。出于对大尺度资源环境探测及技术试验的需要，两次飞行均用了扫描雷达模式成像，扫描雷达成像条带宽度可达 200km。进行了雷达辐射定标，可直接从 SIR-C 数据求出地物的雷达散射系数，这使得雷达遥感定量研究成为可能。研制成功 SAR 地面实时处理器，可连续输出 SAR

图像条带，每秒钟可处理 7km 成像带的图像数据。

航天飞机成像雷达 SIR-C 及 X 波段合成孔径雷达 (SIR-C/X-SAR) 有 3 个显著的特点：①运行在地球轨道高度的第一个多波段同时成像雷达系统；②地球轨道高度的第一个多极化同时成像雷达系统；③具有干涉测量能力的雷达系统。该系统采用多波段、多极化、多视角的观测方式，探索了不同成像参数的成像效果，代表了 20 世纪内最先进的航天成像雷达系统。虽然该系统两次升空分别只进行了为期 10 天的对地观测，但获取了全球 300 多个试验区的雷达数据，除美国、德国和意大利外，还有澳大利亚、加拿大、中国、英国、法国、日本等 13 个国家的科学家参与该系统对地观测计划的共 52 个研究项目的研究。SIR-C/X-SAR 中国试验区取得了一系列的研究成果，干涉区雷达穿透性实验表明，长波段 SAR 可穿透数十厘米至数米的干沙层。在 SIR-C 图像上发现了西昆仑山区 5 个以前未知的火山口及两种熔岩。区分出位于宁夏与陕西交界处的不同时代的长城，并识别部分被干沙覆盖的古长城。研究表明，多波段、多极化、多视角航天成像雷达，在地球资源探测和环境监测中有广泛应用。

航天飞机成像雷达 SIR-C 于 2000 年 2 月 12 日再次发射并飞行 10 天（标称高度为 233km），完成“航天飞机雷达地形测绘飞行任务”（SRTM - Shuttle Radar Topography Mission）。SRTM 是将数台改进型的特殊雷达载入航天飞机，用获取的 C 波段和 X 波段的 SAR 数据进行干涉雷达测量，以采集北纬 60°至南纬 56°之间的约占全球 80% 陆地面积的地形数据，并生产数字地形图产品。SRTM 采用了 1994 年 SIR-C 两次飞行成熟的硬件设备，其主要改进是研制了一根直径为 1.12m，长度为 60m 的天线杆，这是当时航天飞行中最长的构件。在航天飞机载荷舱内安置一副天线，而在航天飞机左侧长度为 60m 的天线杆的末端安置了另一副天线，这样就构成了具有固定基线的单轨式横跨轨迹干涉雷达测量系统，以高效率采集地面高程数据。由于将原始雷达数据转换为地形图非常复杂，数据处理将需要长达 1 年的时间。其处理后的数据产品可用于地球物理、地震研究、火山监测、土地利用规划及军事上作战环境测绘保障和精确武器制导等领域。

1987 年 7 月，前苏联发射成功钻石 (Almaz) 雷达卫星，获取了世界上不同自然景观的大批雷达图像，由于该星初期仍处于保密阶段，故美国将其定名为 Cosmos-1870。1991 年 3 月，苏联又发射了一颗 Almaz 雷达卫星，分辨率达 15~30m，波长 9.6cm (S 波段)，HH 极化，可对地球上 78°N~78°S 的地区成像，回波信号数字记录后传输到地面站，经处理可提磁带或胶片。Almaz 是国际上首次携带 SAR 的商业卫星，在地质、海洋、农业和环境监测等领域都有广泛的应用。

1991 年 7 月，欧空局 (ESA) 发射了 ERS-1 卫星 (European Remote Sensing Satellite)。该星轨道高度为 785km，轨道倾角为 98.5°，轨道周期约为 100 分钟。ERS-1 携带的主动微波仪 (AMI) 由三部分组成：成像模式合成孔径雷达。波模式合成孔径雷达和风散射计。其中 SAR 用于对海洋、极地、沿海和陆地成像。风散射计则用于测量海洋表面风的速度与方向。ERS-1 SAR 为右侧视，视角为 23°，工作频率为 5.3GHz (C 波段)，VV 极化，距离向分辨率为 26m，方位向分辨率为 30m，辐射宽度为 100km，采用数字记录和数字处理。该星主要应用于研究海洋环流、洋流、潮汐及内波传播，了解全球风与波浪的关系，分析极地冰盖及海冰，测量浅水区的海底地形并监测海面温度。也可应用于地质、农业、森林等领域。1995 年春发射的 ERS-2 卫星，所携带的 SAR 与 ERS-1 携带的 SAR 完

全一样，这样就使两颗相同的卫星（ERS-1，ERS-2）在同一轨道上串接飞行，以一天的时间差访问同一地区，以便产生干涉图像来提取数字高程模型（DEM）。

JERS-1（Japanese Earth Resources Satellite-1）是日本宇宙开发事业团（National Space Development Agency，简称NASDA）于1992年2月发射的地球资源卫星。该星轨道高度（赤道上空高度）为568.023km，轨道倾角为97.662°，偏心率小于0.0015，半长轴为6946.165km，轨道重复周期44天，轨道周期为96.146分钟。该星装载两种传感器，即合成孔径雷达和光学传感器（OPS-Optical Sensor）。在同一时间可能有三个不同的区域成像，SAR为35°侧视，OPS波段4（远红外波段）在星下点正前方15°成像，OPS其他波段（可见光，近红外波段3，立体波段1）在星下点成像。SAR的工作波段为23.5cm（L波段），HH极化，视角为35°，距离向和方位向的分辨率皆为18m，成像宽度为75km，星上由高密度磁带机记录数据，然后传输到地面处理，具有获取全球雷达图像能力（南北极部分地区除外）。该星主要应用于资源探测、森林和农业管理、环境保护、灾害预防和海洋监测等。

1995年11月，加拿大发射了Radarsat卫星，这是一颗兼顾商用和科学实验的运行性系统。该星轨道高度为796km，倾角98.6°，周期为100.7分钟，重复周期24天，每天轨道数14条，设计寿命5年。目前已发射的ERS-1，JERS-1等雷达遥感卫星都是在上午过境，而Radarsat是在黎明（早6点）和傍晚（晚6点）过境，即所谓晨昏（Dawn-Dusk）式轨道。采用此轨道的主要目的是使卫星在升段和降段运行时，总是处于太阳光照条件下，以便利用太阳能发电，为消耗颇大的SAR提供能源，故Radarsat在每条轨道上能工作28分钟（为ERS-1和JERS-1工作时间的两倍）。同时晨昏式轨道在监测农作物和表层土壤湿度昼夜变化方面具有无与伦比的优越性。对农作物监测更适宜于在夜晚进行，因为夜间植被水分含量最高，而土壤湿度的监测宜在白天进行，因为白天植被的水分含量低，对测量结果的影响最小。Radarsat的过境时间分别是黎明和傍晚，正好能满足这一要求。

Radarsat卫星具有7种工作模式，25种波束（入射角10°~59°，可调），分辨率10~100m，观测幅宽50~500km，工作波长5.6cm（C波段），HH极化。现将该卫星工作模式示于图1-1，各波束特性参数列于表1-1。

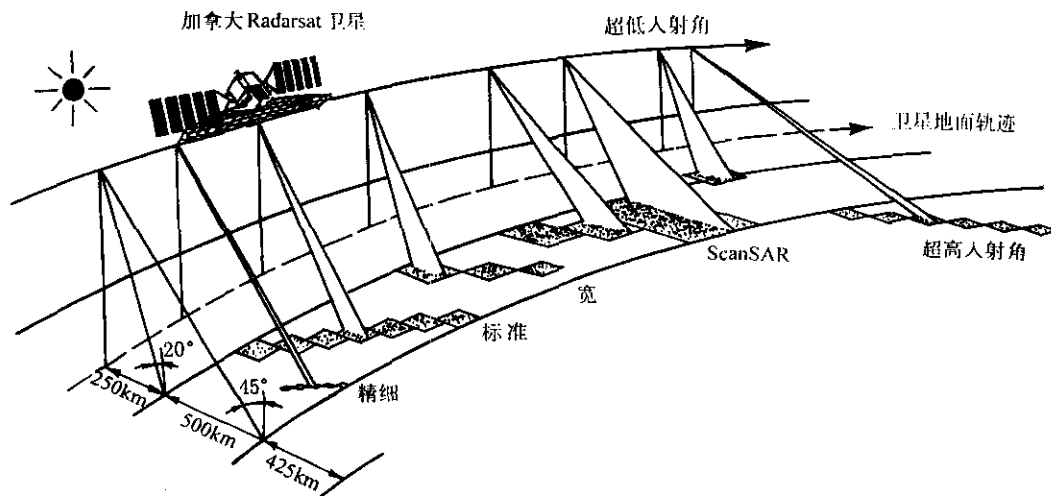


图 1-1

表 1-1

| 工作模式 | 波束位置 | 入射角/ (°) | 分辨率/ m | 图像覆盖/ (km×km) |
|-------------------------|------|-------------|-----------|------------------|
| 精细模式 (5个波束位置) | F1 | 37~40 | 10 | 50×50 |
| | F2 | 39~42 | | |
| | F3 | 41~44 | | |
| | F4 | 43~46 | | |
| | F5 | 45~48 | | |
| 标准模式 (7个波束位置) | S1 | 20~27 | 30 | 100×100 |
| | S2 | 24~31 | | |
| | S3 | 30~37 | | |
| | S4 | 34~40 | | |
| | S5 | 36~42 | | |
| | S6 | 41~46 | | |
| | S7 | 45~49 | | |
| 宽模式 (3个波束位置) | W1 | 20~31 | 30 | 165×165 |
| | W2 | 31~39 | | 150×150 |
| | W3 | 39~45 | | 130×130 |
| 窄幅 Scan SAR (2个波束位置) | SN1 | 20~40 | 50 | 300×300 |
| | SN2 | 31~46 | | |
| 宽幅 Scan SAR | SW1 | 20~49 | 100 | 500×500 |
| 超高入射角模式 (6个波束位置) | H1 | 49~52 | 25 | 75×75 |
| | H2 | 50~53 | | |
| | H3 | 52~55 | | |
| | H4 | 54~57 | | |
| | H5 | 56~58 | | |
| | H6 | 57~59 | | |
| 超低入射角模式 | L1 | 10~23 | 35 | 170×170 |

1. Radarsat 卫星数据产品的处理级别

(1) 信号数据 (Signal Data)

信号数据是未经处理的时间矩阵, 以 CEOS 格式记录, 数据按斜距表示。

(2) 单视复型图像 (Single Look Complex)

单视复型图像的数据按斜距表示, 接收卫星数据时的误差 (包括经纬度位置误差) 已经改正, 这种数据保持了最优的分辨率。