

物探化探遥感地质 文摘

侧视雷达在地学中的应用



一九八六年
增刊二

WUTAN HUASAN YAGANDIEN WENZHAI

物探化探遥感地质文摘编辑部 编辑

本专辑由刘洪学主编；舒世光审校；

杜娟、尹淑婕、张勤、杨清华、孔冰翻译；

责任编辑：陈德志、李惠民、於月珍

前 言

八十年代微波遥感技术在迅速发展。航天飞机装载的合成孔径侧视雷达传感器，成功地拍摄了世界各地的雷达图象，标志着微波遥感技术和应用水平已进入一个新的阶段。今天，借助于卫星、航天飞机和各种飞行器作为平台，人们可以在任何天候条件下，对人类赖以生存的地球上的各个角落获取雷达图象。过去一直被称为世界上最大的制图空白区已为侧视雷达填补，侧视雷达已成为遥感技术中一支具有全天候探测能力的佼佼者。侧视雷达图象广泛地应用于各个学科领域，在地学、海洋学、农业土壤、植物分类、土地利用和规划、国土整治、资源调查、冰川冻土等方面，无不发挥着重要作用。而且，随着时间的推进，将会更显示出它在各个领域的潜在的应用能力。

侧视雷达在地学领域取得的惊人成就，赢得了地质学界的普遍注意。人们越来越认识到成象雷达在区域地质调查中的重要价值。可以相信，成象雷达终究将成为地质学家获取难以填图和不利于摄影地区地质信息的有效手段。因此，地质遥感界的许多学者，非常重视侧视雷达技术的发展动向及应用效果。为了向读者介绍这方面的最新进展，本刊编辑部特约请地矿部地质遥感中心研究所编译了这本文集，以供地学界从事遥感技术的科技人员参考。

论文集主要搜集了国外八十年代发表的有关侧视雷达的论文23篇。涉及的主要内容有：合成孔径侧视雷达的基础原理、技术方法、数据收录和预处理技术、雷达图象的计算机信息提取、处理技术及解译方法，以及在地质填图、资源调查等方面的应用效果。

在编译过程中，得到地矿部地质遥感中心领导的关心。曾朝铭、何裕盛、张雍等同志给予了支持和帮助，赵伶俐、王艳军同志绘制了部分图件，在此一并感谢。

由于编译者水平所限，文集中错误和缺点在所难免，敬请读者批评指正。

物探化探遥感地质文摘编辑部

侧视雷达在地学中的应用

侧视雷达在地学中的应用

目 录

前 言

航空侧视雷达——地质调查的新手段.....	(1)
雷达遥感成象概况.....	(9)
雷达遥感应用导论.....	(13)
侧视雷达成为地质调查的一种工具.....	(22)
用于地学研究的多射束合成孔径雷达的设计原理.....	(44)
合成孔径雷达部分相干现象的处理.....	(52)
合成孔径雷达数据的地面数字预处理.....	(70)
合成孔径雷达图象的最佳信息提取.....	(76)
合成孔径雷达资料的处理.....	(85)
应用“CRAY—1”超大型计算机进行合成孔径雷达数据的数字处理.....	(96)
雷达图象目标识别的误差概率和辐射分辨率.....	(100)
航天飞机成象雷达试验.....	(106)
雷达传感器的地质应用.....	(116)
台湾山区侧视雷达图象的地质解译.....	(128)
不同极化信号的机载雷达测量及其在地质中的应用.....	(135)
雷达遥感用于加利福尼亚州卡坦博盆地内断层的探测.....	(138)
用海洋卫星合成孔径雷达资料在逆掩断层带上进行地质填图的评价.....	(142)
泰国南半岛的航天飞机成象雷达图象——塔库巴——宋卡地区的雷达地质解译	(147)
应用航天飞机雷达图象对撒哈拉沙漠中地下古河道和古地质特征的探测.....	(153)
雷达图象用于农作物分类.....	(155)
多波段雷达在作物分类中的对比.....	(173)
机载雷达对土壤湿度的响应.....	(183)
合成孔径雷达在城市土地利用分类中的应用.....	(194)
雷达图象在哥伦比亚地区亚马孙河流域雨林地形半定量分类中的应用.....	(205)

航空侧视雷达—地质调查的新手段

刘 洪 学

航空侧视雷达是探测地球资源的先进技术手段。然而，只是在七十年代，才以它在南美洲地区的应用获得出乎意料的成功而吸引了地质界的普遍注意。

雷达 (RADAR) 一词是取自 Radio Detection and Ranging (无线电探测和测距) 的缩写词，它不仅能探测，而且能测距。雷达自二十年代开始，在军事目标的探测和侦察中初露头角。可是，由于它一直处于军用状态，从而它的应用受到极大限制。第二次世界大战使空中侦察手段进入雷达时代，尤其是侧视雷达的出现，在短时间成为大面积快速探测地表地物的一种极为有效的工具。

到了五十年代后期，航空成象雷达逐渐用于军事以外的其它领域。最早引起地质学上对雷达图象感兴趣的是用成象平面定位雷达拍摄的苏格兰地区地质断层图象，有几条从没被人所知的断层，在雷达图象上清晰可见。

机载侧视雷达图象是成象雷达中的一种，是主动式遥感装置。一九五三年，美国密执安大学开始研制机载侧视雷达，并把它作为侦察军事目标的有力工具。一九五四年美国古德伊尔公司的卡尔·维利 (Carl Wiley) 对航空侧视雷达天线提出合成孔径思路，这是在侧视雷达天线孔径理论方面的一个重要突破，从而找到了在飞机平台上用合成孔径取代大孔径真实天线的途径。随之密执安的研究人员 W.E. 维维安 (W.E. Vivian)、L.T. 卡特罗娜 (L.T. Cutrona) 及 E.N. 莱思 (E.N. Leith)，对合成孔径雷达进行了大量的研究工作，从而奠定了合成孔径侧视雷达的理论基础。一九五七年美国研制成功用于军事目的的机载侧视雷达成象系统 AN/APQ-56。五十年代末期，地质学家对雷达图象上得到的地质信息开展研究。首先应用月球轨道雷达卫星 (Lunar Orbital Radar Satellite) 获得的雷达图象研究月球表面，对表面的粗糙度和成分做了分析，并和地球上的火山和干旱区做了对比。

六十年代中期，合成孔径侧视雷达已不成为秘密，它不仅用于军事上作为侦察手段，而且也逐步地渗入到国民经济的各个部门。由于侧视雷达具有侧视、全天候、测绘面积大和速度快等特点，因而在其它领域得到越来越广泛的应用和迅速的发展。一九六一年维斯汀豪斯电气公司研制成功侧视雷达系统 AN/APQ-97，该系统为真实孔径，使用 Ka 波段，单侧视。随之在六十年代中期，该公司相继与美国地质调查所和国家宇航局的地球资源计划合作，把这种系统用于实际工作中。经过六年之后，美国瑞森自动化 (Ratheon) 公司，于一九六七年使用机载侧视雷达第一次在多云雾的巴拿马的达连省取得遥感图象，侧视雷达覆盖面积达 $16,000\text{km}^2$ ，这是第一次大规模的民用航空雷达探测。这个地区一年四季被云雾笼罩，不可能得到航空摄影照片，由于开展了这项工作，该区成为应用航空侧视雷达取得遥感图象的范例。

苏联从六十年代开始研制侧视雷达，苏联地质部航空方法实试室 (ЛИАМ)，制造

了“托罗斯”(ТОРОС)型号的侧视雷达,并于一九六八年开始面积性的试验工作,首先用于极地的地质—地理以及海冰的研究。

可控极化机载侧视雷达是苏联重视研究的方向,采用不同极化方式做侧视雷达探测可以大大增加地质信息。对于每一具体的地质体都存在着一种或几种最佳极化,就是说,在发射的电讯号最佳极化条件下,从目标返回的回波强度最强。但是,由于地质体极化性质的随机性,选择无线电波的最佳极化是困难的。因此,为了增加地质信息量,采用接收不同极化的回波信号。

一九七三年,苏联把可控极化侧视雷达应用到地质调查中取得效果。为了得到同一地区两种不同极化方式的雷达图象,要做两次不同极化方式发射无线电波的飞行,而且要求两次飞行高度保持一致。用不同极化方式进行雷达探测,更便于追踪地质体边界。从试验结果中得到,对于同一个水库,由于极化方式不同,图象效果不同,利用图象可以查明水库中的浅滩和发育的植被轮廓。对于洪积平原所做的试验表明,不同极化方式可以追踪出干河床和松散层下的地质构造界线。苏联已经把这种可控极化侧视雷达系统用于地质区域测量和矿产普查。

一九七一年美国航空服务公司使用古德伊尔航天公司制造的合成孔径侧视雷达系统,做了一系列的民用飞行。在一九六九年和一九七一年,在美国加利福尼亚州做了机载侧视雷达探测,使用的雷达波长为25cm。侧视雷达安装在美国宇航局的CONVAIR—990喷气飞机上。得到的原始雷达图象的比例尺为1:60万,射程分辨率为60—100m,方位分辨率为20m。该次雷达探测取得的图象主要用于解决地质问题。

自六十年代末期到七十年代初期,在拉丁美洲、非洲和亚洲部分地区做了航空侧视雷达探测,其中最大规模的要算巴西的RADAM计划。一九七〇年和一九七一年巴西用机载X-波段合成孔径雷达探测面积达450万 km^2 。随后根据RADAMBRASIL计划又飞行430万 km^2 。这项计划后来一直扩展到整个巴西领土。对所取得的雷达图象,在地质、地貌、土壤、植被、土地利用、区域规划等方面做了全面的解译。和这项计划同时还做了陆地卫星多波段摄影和红外航空摄影。直到一九七八年才完成RADAM计划的研究报告和图件(1:100万和1:25万比例尺)。

继巴拿马计划之后,一九七二年哥伦比亚制定出PRORADAM计划,用侧视雷达覆盖了亚马逊地区35万 km^2 的面积,工作一直进行到一九七九年,在完成这项工作之后,出版了1:50万比例尺的地质、土壤和植被图。在委内瑞拉制定了CODESUR计划,厄瓜多尔、秘鲁和玻利维亚,都相继测得本领土尚未制图地区的雷达图象。拉丁美洲的亚马逊地区,已被侧视雷达快速覆盖,添补了世界上最大的制图空白区。在此期间美国石油公司和采矿公司已开始在地质勘探活动中采用航空侧视雷达。一九七〇年——一九七四年期间,在印度尼西亚以探查石油和矿产为目的的侧视雷达,覆盖面积达50万 km^2 ,其中25%用于矿产普查。

星载雷达图象是由阿波罗-17号在飞往月球期间,在阿波罗月球探测器的试验中得到的第一张图象。第一颗携带雷达系统的地球轨道卫星,是一九七八年五月发射的海洋卫星,该计划促进了雷达用于航天探测的发展。它的目的是得到海洋、北极冰块和北美沿海地区的图象,而且陆地卫星可以得到全球的图象。海洋卫星上安装的侧视雷达波长为

23.5cm (L波段), 地面覆盖条带宽度为100km, 地面分辨率为25m, 极化方式为水平极化发射, 水平极化接收。

在海洋卫星发射之前, 所有的地球雷达图象都是来自机载雷达, 而轨道卫星雷达在研究地球表面具有更大的优越性。F.F.萨宾用海洋卫星雷达图象, 研究了加里福尼亚的圣安德瑞斯大断裂, 并把雷达图象和下列遥感图象做了对比: 一九七五年拍摄的陆地卫星图象, 一九七三年的天空实验室-3 红外摄影, 一九六五年美国宇航局和美国地质调查所做的Ka波段的雷达图象。通过对比表明, 在所有的遥感图象上, 圣安德瑞斯大断裂都没有明显的反映, 只有在海洋卫星雷达图象上显示出大断裂的存在。雷达卫星对于地学研究有着重要价值, 为了对雷达卫星的应用做出评价, 加拿大发射了专用的监视卫星。

机载和星载侧视雷达只是在视线高度角、行星曲率的假设和轨道参数方面有差异。机载侧视雷达的高度角变化很大, 从 40° (近距) 变化到 80° (远距), 而星载雷达从近距到远距的高度角很小, 可以在接近常数视角的条件下获得图象, 这种图象更适用于地学的应用。

一九八一年欧洲航天公司进行了合成孔径雷达SAR-580实验, 从而把欧洲的遥感科学家的注意力吸引到使用合成孔径侧视雷达探测地球上来了。

一九八三年空间实验室采用X-波段合成孔径侧视雷达进行微波遥感实验。八十年代后半期, 一个比较明显的发展特点是用航天航空侧视雷达探测地球资源的计划逐渐地多起来。欧洲和亚洲都在推进这方面的计划实施。欧洲航天公司将于一九八七—一九八八年发射地球资源卫星ERS-1, 并已着手研制C波段合成孔径雷达。一九八八—一九九〇年美国将发射雷达卫星系统SAME-A-D (L、C-波段, 分辨率为35m)。一九八九加拿大将发射雷达卫星(RADARSAT, C-波段, 分辨率为25m)。日本也将要实行地球资源卫星ERS (L、C、X波段) 计划, 要在一九九〇年前发射若干个以微波遥感为主的遥感卫星。

利用航天航空平台探测地球资源的飞速进展, 使得遥感学家很重视雷达传感器的技术改进和性能提高。为了更有效地把侧视雷达用于自然资源的开发利用方面, 对传感器不断地提出了新的技术思路, 开展了双波段和多极化方式, 或者可控极化方式侧视雷达的研制, 使得在解决不同专业问题中发挥独到作用。

由于侧视雷达应用领域的扩大, 在雷达波段范围的使用上也在开展新的探索。从资料分析可知, 不论是星载还是机载侧视雷达, 基本上是利用电磁波的两个大气传输窗口, 即K、X和L窗口。进入八十年代以来, 有些国家正在大力推进C波段合成孔径雷达的研制, 并探讨其应用效果。有资料表明, 英国和美国合作正在开展这方面的研究试验工作。应该指出, 加拿大在这方面的进展是比较快的, 它已在CV-580飞机上装配了C-波段合成孔径雷达, 并于一九八一年在加拿大和欧洲完成了大量的飞行工作。

继第一颗携带雷达探测系统的地球轨道海洋卫星之后, 一九八一年十一月十二日, 美国哥伦比亚号航天飞机首次载着侧视雷达系统SIR-A进入地球轨道, 并成功地获得了雷达图象。这些图象要比海洋卫星侧视雷达图象更便于研究陆地资源和环境问题。哥伦比亚号航天飞机轨道高度为259km, 所载侧视雷达工作了480分钟, 在全世界的总覆

盖面积约达1000万 km^2 。航天飞机侧视雷达使用波长为23.5cm (L波段), 地面探测幅宽为50km, 地面分辨率为40m, 这个分辨率高于陆地卫星图象的分辨率(陆地卫星图象的分辨率为 $52 \times 79\text{m}$)。航天飞机侧视雷达的电磁波束入射角可达 50° , 而海洋卫星雷达的电磁波入射角为 20° 。用航天飞机遥感平台得到的雷达图象更适用于探测地球资源。

美国地质调查所的研究人员从埃及南部和苏丹撒哈拉沙漠的雷达图象上解译出地下古河道, 但陆地卫星所拍的同一地区的照片以及野外实地勘察的资料证实, 这里的地表是一片沙漠。研究人员认为, 航天飞机侧视雷达SIR-A, 具有穿透干沙5m左右的能力, 因而可以发现沙漠下面的古河道和一些地区的地质构造。

随之美国进行了第二个航天飞机侧视雷达传感器系统试验。一九八四年七月, 美国“挑战者”号航天飞机进入轨道, 机上装载了入射角可以改变的成像雷达SIR-B (L波段, 分辨率35m)。侧视雷达成功地拍摄了地球表面图象, 实验的主要任务是进一步探讨雷达对沙漠的穿透能力。由于采用不同的入射角发射电磁波, 拍摄了立体图象, 三维成像试验获得成功。计划之中一九八七年将再次实验航天飞机侧视雷达SIR-B1和一九九三年发射侧视雷达SIR-D。新的航天飞机雷达发射计划将增加波段, 并采用多极化和多人射角的工作方式。美国航天飞机成像雷达SIR系列主要是以陆地表面为研究对象, 将为探测地球资源提供新的信息。

日本正在建立研究主动式微波遥感技术的机构, 并大力发展可供观察地球的星载微波传感器。日本国家空间研究中心自一九七九年开始研制主动式微波传感器。日本研制的L波段合成孔径侧视雷达与海洋卫星雷达类似, 正在致力于新的天线系统的研究。日本对主动式微波遥感技术用于地学和环境研究是很重视的。日本在很短时间里完成了本土全境的侧视雷达面积覆盖。

迅速发展起来的航天航空侧视雷达, 是一门新兴的微波遥感技术, 它在遥感技术领域中的位置, 将随着时间的推移越来越显露出来, 许多先进国家把侧视雷达作为发展遥感技术的重要组成部分。笔者认为, 未来发展的趋势是多波段、多极化取代单波段和一种极化方式的侧视雷达。雷达回波信号也从光学胶片记录形式向磁带数字记录过渡, 未来的合成孔径雷达传感器将提供数字数据, 发展雷达实时成像技术。雷达图象的数字处理是提取信息的重要途径, 应用现代计算技术进行图象数字处理及自动成图, 将是图象自动解译的重要发展内容。

随着微波遥感技术的发展, 侧视雷达可能成为向地质学家提供大量分析数据的重要工具。越来越明显, 成像雷达系统终究会成为区域地质调查中最有价值的信息来源手段。在用其它遥感方法难以填图的地区, 在需要进行区域性调查地区, 以及在不利于用摄影方法拍摄图象的地区, 应该是侧视雷达最能显示其优越性的场所。

参 考 文 献

- Deane, R.A. and Domville, A.R., 1973, Side Looking Radar Systems and Their Potential Application to Earth-Resource Surveys. ESRO Report CR. 137B, Vol.3.

- De Loor, G.P., 1982, Dielectric Properties of Wet Materials, Proc. IGARSS'82 Conference, Munich.
- De Loor, G.P., 1983, Introduction and Some General Aspects of Image Formation in Radar Remote Sensing, Remote Sensing Reviews, 1983, Vol.1, pp. 3—18.
- Elachi, C., 1982, The Shuttle Imaging Radar (SIR-A) Sensor and Experiment. 1982, International Geoscience and Remote Sensing Symposium Digest, Vol.II, June 1—4, 1982.
- Elachi, C., et al. Shuttle Imaging Radar Experiment. Science, Vol. 218, 3, December, 1982, pp. 996—1003.
- Gellnet, R.H., 1978, Importance of Look Direction and Depression Angles in Geological Applications of SLAR, Motorola Aerial R.S. Inc., Tech. Rept. TR 04823, Phoenix, Arizona, pp.15.
- Koopmans, B.N., 1971, Aplicacion de Radar en Geologia. Proc. Sem. Percepcion Remota en Rec. Nat., Bogota, Colombia.
- Koopmans, B.N., 1973, Drainage Analysis on Radar Images, ITC Journal. 1973-3, pp. 464—479.
- Koopmans, B.N., 1974, Should Stereo SLAR Imagery Be Preferred to Single Strip Imagery for Thematic Mapping, ITC Journal. 1974-3, pp. 434—445.
- Koopmans, B.N., 1975, Variable Flight-Parameters for Side Looking Radar Surveys. Phot. Eng. and Remote Sensing, 41(3), pp. 299—306.
- Koopmans, B.N., 1983, Side-Looking Radar, A Tool for Geological Surveys, Remote Sensing Reviews, Vol.1. pp. 19—69.
- Matsumoto, K., Kishida, H., Yamada, H., Hisada, Y., 1982, Development of Active Microwave Sensors in Japan. 1982 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Digest, Vol.I.
- Newton, A.R., 1973, Pseudo Stereoscapy with Radar Imagery. Photogr. Eng., 39. pp. 1055—1058.
- Rouse, J.W., Jr., MacDonald, H.C., Waite, W.P., 1969, Geoscience Applications of Radar Sensors, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. GE-7, No1, pp. 2—19.
- Sabins, Floyd F., Jr., Blom Ronald and Elachi C., 1980, Seasat Radar Image of San Andreas Fault, California, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. V. 64, No5, pp. 619—628.
- Schaber, G. G., Berlin, G.L., Brown, W.E., 1976, Variations in Surface Roughness within Death Valley, California; Geologic Evaluation of 25-cm-Wavelength Radar Images, Geological

Society of America Bulletin, V. 87, pp. 29—41.
Schaber, G.G. and Brown, W.E. Jr, 1972, Long-Wavelength Radar
Images of Northern Arizona-A Geologic Evaluation, U.S.
Geol. Survey Prof. Paper 800-B, pp. 3175—3181.

雷达遥感成像概况

G. P. de Loor

概 述

在地表遥感的三个窗口（近红外、热红外和微波）中，微波居于特殊的地位。通过微波“窗口”探测地球，可以基本上不受大气的影响。微波观测可以透过云层，甚至在雨天也可以探测，这与频率有关。目前使用的微波系统有两种，即：主动系统和被动系统。下面仅介绍主动系统——雷达。

第二次世界大战使人类进入雷达时代。从那时起，雷达的发展速度不断加快，特别是侧视雷达的出现，使雷达成为探测地表的一种极为有用的工具。雷达在卫星（如海洋卫星）或航天飞机（SIR-A）上的使用都证实了它的巨大潜力。

成像的基本概况

侧视雷达是使用电磁波谱微波波段的一种遥感成像系统。雷达有两根固定天线，固定于飞机或航天飞机的两侧（图1）。雷达是一种主动系统，它发射一组微波短脉冲，并记录接收回波，使其在显象管上成一条直线，也就是说，以亮点的形式显示。在接收到测程之内的最后回波之后，新的脉冲组又被发射出去。由于电磁波以光速传播，因此回波周期很短，每秒钟可发射许多脉冲。使用这种技术

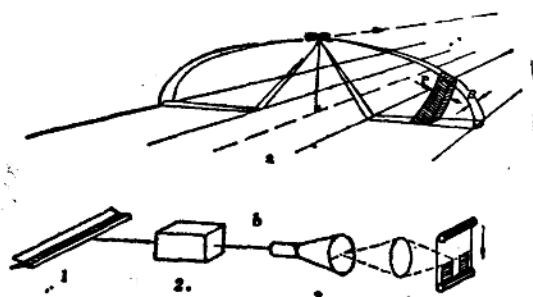


图1 侧视雷达（SLR）

(a) 扫描图 (b) 雷达系统：(1) 天线，(2) 发射器与接收器，(3) 有解度调制的显象管；(4) 在相机系统的移动胶片上形成一幅连续图象

可测出反射目标的距离（发射脉冲到接收回波之间的时间），这对成象是有影响的，所以说雷达成象与航空摄影中使用的球极平面投影是有差异的。当把数据加工成地图时，必须考虑这一点。

侧视雷达的两根天线用于聚集发射能量。飞机平台两侧各有一根天线。图1为该系统的组合示意图。显象管上每次只出现一条线，使这条线在同飞机速度成正比的移动胶卷上成象，便可获得一幅连续图象。飞行方向上的比例尺精度取决于携带雷达的飞行平台速度和胶卷速度之间保持正确的比例精度。

实际上，这种描述只是针对早期机载侧视雷达系统而言，但这种描述却使人们易于了解成象过程，虽然现在的雷达系统要复杂得多，但成象过程基本相同。早期装置的摄影过程是很难讲清楚的，这就为获得后向散射信号的绝对数值造成了障碍，因此现代系统使用的是经过标定的接收器和易于输入计算机的数字记录。

合成孔径雷达（SAR）的记录系统更为复杂，只有当数据经全面处理后，图象才能使用。使用该系统可提高远程几何分辨率，这对侧视雷达在卫星上的使用是十分重要的。合成孔径雷达每秒成象的数目与上述系统相同。

雷达制图比例尺为1:10万与1:100万之间，雷达系统的空间分辨力与制图比例尺是一致的，这种比例尺可用于区域监测。

为了使雷达系统的介绍更加完善，还要对图象的形成过程作更为详细的探讨，特别是那些与航空摄影情况有差异的方面。

成象的几何概念

图象的形成

如前所述，雷达记录的是到反射目标的距离（即发射脉冲与接收回波之间的时间），与测区地形图相比，图象畸变明显（如图2所示）。雷达所记录的是飞行平台到A、B、C等点的距离，而不是指NA、NB、NC等。因为NA、NB、NC等是经过校正的地面距离。因此，必须了解雷达在参考平面上的准确高度。对于高度较低或距离很大（测

距R与高度H的比值R/H很大）的情况，校正值较小，获得的是近正射投影图象，此时，在近地点（R/H值很小）处，图象被压缩了（图2）。

侧视雷达以连续的带状形式使地表逐行成象。这就是说要获得有关地表的准确图象，就需要进行逐行校正。此外，还要考虑到飞机的各种运动，如：歪斜（俯仰），偏转（偏航）、倾斜（翻滚）、偏斜（偏移）及速度和高度等飞行姿态的变化。图3示出了偏转和偏斜的影响，这就要求在装载雷达的平台上配有高度传感器和飞行姿态传感器，使

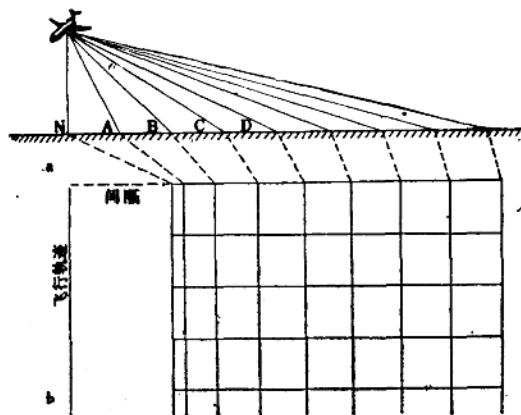


图2 侧视雷达图象距离：(a) 真实位置，(b) 图象
因为成象是从N开始的，因而有一个空隙，图象的起始部分(NA、NB)被压缩

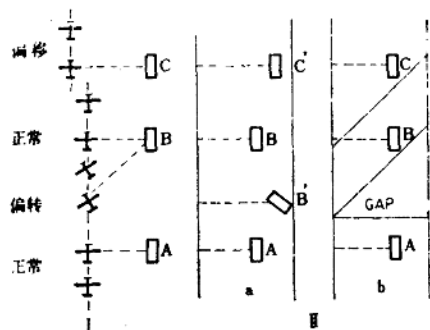


图3 偏转和偏斜对侧视雷达图象的影响

(1) 飞行方式; (2) 图象; (a) 未经校正的, (b) 已校正的

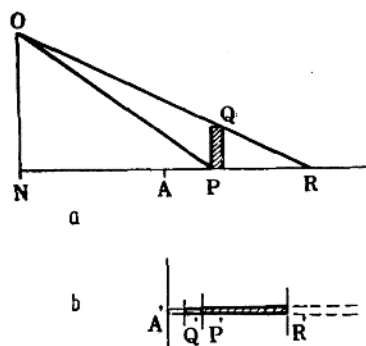


图4 雷达视差

(a) 真实位置 (b) 图象, $Q'P'$, 回波, $P'F'$, 雷达阴影

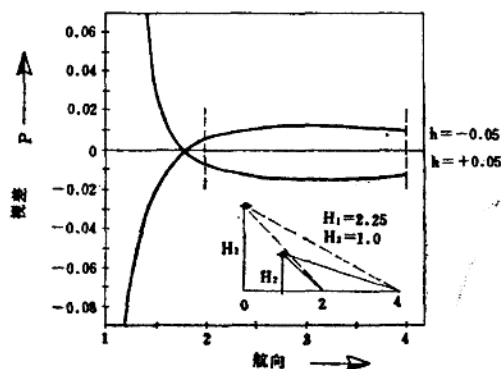


图5 拉·普拉德 (1963) 提出的最佳

“同侧立体探测”方式

R : 测距, H_1 : 飞行高度, h : 地物高度, 均为同一单位度量

这些信号和图象信号同时记录下来。

视差

在雷达图象上存在着两种视差: 回波视差和阴影视差 (图4)。

回波视差

在某个高度飞行时, 对一个有一定高度的物体来说, 雷达首先测到的是该物体顶部到雷达的距离, 后测出到底部的距离。图4中, $OQ < OP$, 则Q点先于P点被记录下来, 随着目标到雷达距离的增加 (R/H 值越大), “倒像”回波迅速减小。1963年, 拉·普拉德 (La Prade)

利用这种效应进行了一次理论性的研究,

并考虑了好几种可能性, 他认为选择的航线应使图象最终能经受普通立体坐标测量仪的检验, 以便区分出同侧立体探测方式和异侧立体探测方式。在第一种情况下, 物体分别受到来自同侧两条航线发出的照射; 在第二种情况下, 物体分别受到来自于异侧两条航线的照射。由于物体在不同的侧面对发射波的散射效果有很大差异, 因而它将在图象间造成严重的不一致性。第二种情况会给观测者进行立体观测带来麻烦。然而, 同侧立体探测方式的效果似乎更好些。图5为这种情况的最佳探测方式 (La Prade,

1963)。

阴影视差

当雷达处于零点时 (图4), 物体PQ屏蔽了物体后面R和F点之间的地形。因此不能把FR记录下来 (无信号), 在图象上就是一个无回波区, 即盲区或阴影。如果雷达阴影清楚地显示在参考面上, 则可用于高度测量。雷达阴影随斜距的增加 (R/H 值的增大) 而扩大, 较高的物体可能会遮蔽位于它后面的其它物体 (前景掩蔽)。在高低起伏的地区, 为了防止这种前景屏蔽作用, 应认真制定飞行计划。阴影还可

用于提高图象的对比度，对于高差变化不大的地区可以通过低空飞行得到增强（例如对河流平原上古河床的照射 De Loor, 1976）。

几何分辨率

决定几何分辨率的参数是沿方位方向（航向）的天线孔径和沿斜距方向（即垂直于航线的）的脉冲宽度（见图1和图6）。天线把微波能量聚集起来，沿着方位角为 β 弧度的孔径以窄波束发射出去。沿航向的分辨率可从雷达波长 λ 和天线孔径 D 的已知关系式

$(\beta = 1.2 \frac{\lambda}{D} \text{ 弧度})$ 求得。沿航向的绝对分辨率随斜距的增大而降低。分辨率决不会小于

天线孔径 D 的尺寸。

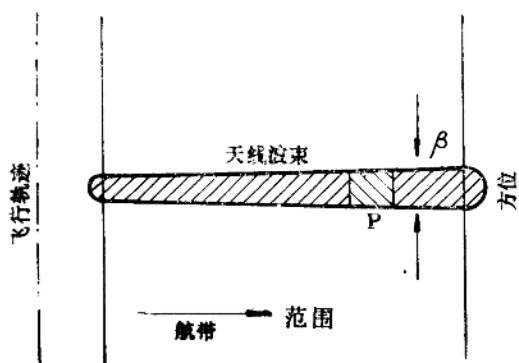


图6 真实孔径雷达的方位（航向）分辨率随测距的增加而降低

λ/D 的比值是可以确定的。就雷达波长范围而言，这个比值要比光学系统的比值大得多，因而它所得到的方位分辨率远小于摄影透镜在光谱可见光部分的分辨率。然而，我们可以控制雷达的照射源以及这种能源的相干性，如果利用飞行平台的前向运动和特殊的记录方式，那么，就有可能把在空间各个连续的天线位置作为一个很长的线性天线阵其中的一个天线单元来处理。这样，可以使方位分辨率与测距无关（以天线孔径的一半为理论极限），随着目标离雷达距离的增加，它被照射的时间就增长，“合成”天线也可以

做得更长。在使用卫星或高空飞行器时，只有合成孔径雷达才能获得足够的方位分辨率。海洋卫星合成孔径雷达（几何分辨率为25m）和航天飞机侧视雷达SIR-A（几何分辨率为40m）就属于这类卫星雷达。

雷达在横向上鉴别两个物体前后位置的能力取决于脉冲宽度 P （图1和图6），由于雷达脉冲以光速（300m/ μ s）传播，雷达所记录的是脉冲往返于目标之间所用的时间，即每微秒相当于150m的距离。现在的雷达系统使用的脉冲宽度为0.05—0.3 μ s，其相应的横向分辨率（即距离分辨率）为8—50m。

空间分辨率一般在几米的数量级内变化，但如前所述，制图比例尺（1:10万—1:100万）和距离（15—100km）与几何分辨率是一致的。

成象的物理机制

概述

由于可见光的波长（几十微米）与雷达所使用的微波波长（几厘米）有很大差异，因此使用光谱微波部分的雷达与使用可见光部分的相机所测得的结果就存在着很大的差异。表1列出了一些主要差异。可见光部分所用的波长远比传感器（相机）和物体的尺

寸短得多，而对雷达而言，传感器和物体这两者的尺寸与所用波长大小则处于同一数量级内，这对于最终的成像是有意义的。

表1 用相机或雷达测量的差异

	相 机	雷 达
镜头:	直径 $10^4\lambda$	天线 $60-100\lambda$
数量级:	百万分之一弧度	千分之一弧度
大小:	$>\lambda$	$\sim\lambda$
光谱:		
	表面 $<1/4\lambda$	
变化范围	$<0.1\mu\text{m}$	cm^2/s

另一个重要方面是雷达自己携带着“光源”，它只记录向它本身散射回来的“光源”。雷达的“光源”同时也是相干的，而光谱的可见光部分使用的是外来能源，阳光就是一种重要的外来能源，它很难控制，也无相干性。能源的相干会导致合成孔径雷达图象上出现明显的斑点，并且对陆地和海洋的成象具有某种独特的影响。下面将叙述这方面的问題。

掌握了照射源，就能有效地使用极化效应。如果发射一个水平极化信号，既可接收水平极化信号又可接收垂直极化信号，密执安环境研究所的L和X波段的合成孔径雷达系统和合成孔径雷达—580系统就是这方面的很好例子。

回波参数 γ

一个物体的雷达截面积 σ (m^2) 可由雷达方程确定。由于照射使用的是一种相干能源，且发射信号的波长与目标的大小差不多，所以截面积 σ 与物体的几何大小和形状通常有很大的差异。只有有限的一些物体能够计算出雷达截面积。球体和角反射体就是参考目标的常用物体。

在陆地和海洋的地面回波中，许多目的物都大于天线波束，因此回波必须按单位面积 (1m^2) 以反射系数的形式来定义。常用的两个定义是 σ° 和 γ (Cosgriff等, 1960; De Loor, 1976)。

$$\sigma^\circ = \sigma/A_k \text{ 和 } \gamma = \sigma/A_i$$

σ 为后向散射总截面积； A_k 为雷达系统的照射面积， A_i 为目标位置上的天线照射波束的截面积。 σ° 与 γ 的关系式为：

$$\sigma^\circ = \gamma \cos \theta$$

这里的 θ 为入射角（波束与垂直方向的夹角）。

近年来，进行了大量的有关陆地和海洋的地面回波测量（例如，堪萨斯大学），并已获得大量的数据。用雷达观测的后向散射（雷达目标的截面积 σ ）的总变化可能很大，这主要是由于一些高大建筑物和桥梁等人为目标形成的巨大反射造成的，实际上地面自然物体的回波参数 γ 的总变化是较小的（例如：不同类型植被之间的变化；De Loor等, 1982），仅在10—15分贝之间，因此利用 γ 的变化进行植被判别和农

作物调查等工作时，必须作精确的测量，对于海洋方面的应用也是如此。在雷达的总动态范围内，如不超过20分贝的“窗口”（雷达干扰带）， γ 的测量精度至少要达到1分贝，这是一个严格的条件，并具有典型的意义。

辐射测量的分辨率

自然背景（分布目标）的雷达回波是变化的，这是由相干照射引起的。因为所处理的是复杂的反射体（如，在风中摇曳的植物躯干和叶子），所以雷达是来自于雷达波束中不断变化的散射体组合（见图8），因此，回波信号也会随之而起伏。雷达截面的概率密度函数服从瑞利分布（De Loor等 1974；Moore 1976；Vna Kasteren 和Smit 1977），这就意味着这些独立的单次观测的变化可能很大，甚至超出整个可用“窗口”，这就是大部分自然物体合成孔径雷达图象上所谓的斑点。为了获得 γ 的准确数值，需要求出大量独立观测数据的平均值。如果已知 γ 的概率密度参数，则可以把测量精度当作独立取样次数的函数（见图9）（Van Kasteren Smit 1977；Smit, 1978）。

该图表明，如果精度要求达到 ± 1 分贝，则需要取50个独立的样品（Moore 1976；Smit, 1977）。平均值可根据时间或空间（在有足够数量的象元点条件下）来求得。独立“观测”的次数 N 越多，灰色调就越好，越平滑，其有利于获得回波参数 γ 值。在这方面人的视力要比计算机更实用些，因为人眼能自动对相邻象元组做均化处理。一幅多视次数 $N = 5-10$ 的图象看起来就很好了，但用计算机来处理还是很困难的（ ± 2.5 分贝，图9）。

简而言之，可用几何分辨率取代动态分辨率，这要根据具体应用的需要而定。当进行图象目视解译时， N 可取小些（Moore, 1976），就可获得比计算机处理效果更好的空间分辨率。

图10就是一例，其中一幅图象是通过海

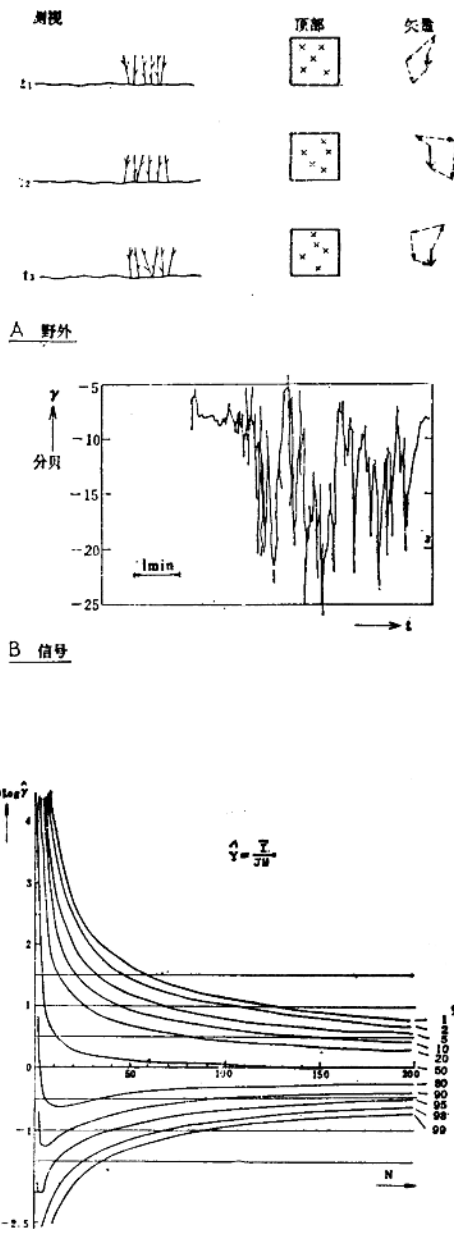


图8 反射变化

洋卫星合成孔径雷达（4次观测）获得的，另一幅是通过荷兰的机载数字雷达（每个象元观测30次）获得的同一地区的图象。两个系统的几何分辨率相近，但由于积累次数（观测次数）较多，因此机载侧视雷达图象上的斑点大大地减少了。

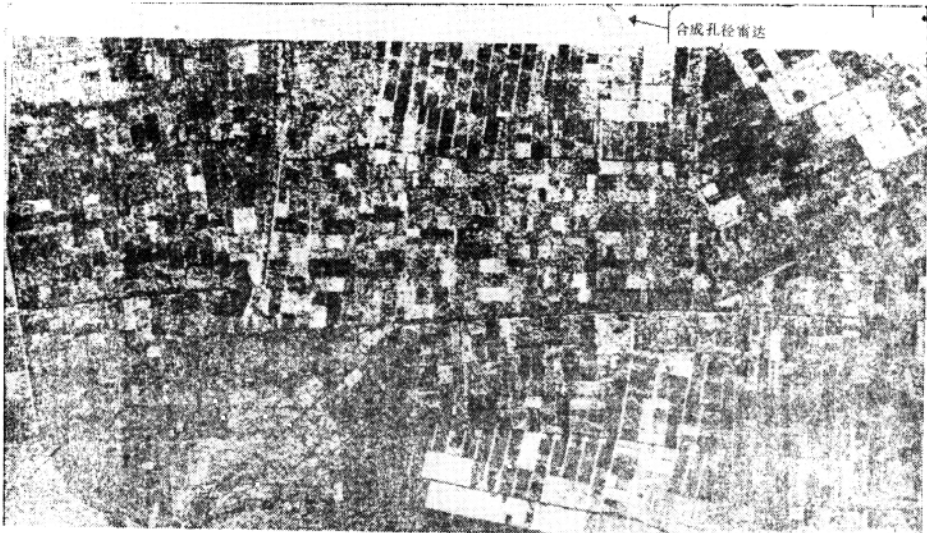


图9 用不同百分比表示的可靠区间随独立采样次数 N 变化而变化的图形
引自Van Kasteren and Smit, 1977; Smit 1978



图10 海洋卫星合成孔径雷达图象(a)和同等几何分辨率的真实孔径机载侧视雷达图象(b)的对比

由于观测次数较多，斑点明显减少；(a)合成孔径雷达 $N=4$ ，(b)机载侧视雷达 $N>4$ ，
(b) $N>30$ 雷达探测方向由箭头标出，SAR，1978年10月9日，SLAR，1980年7月11日