

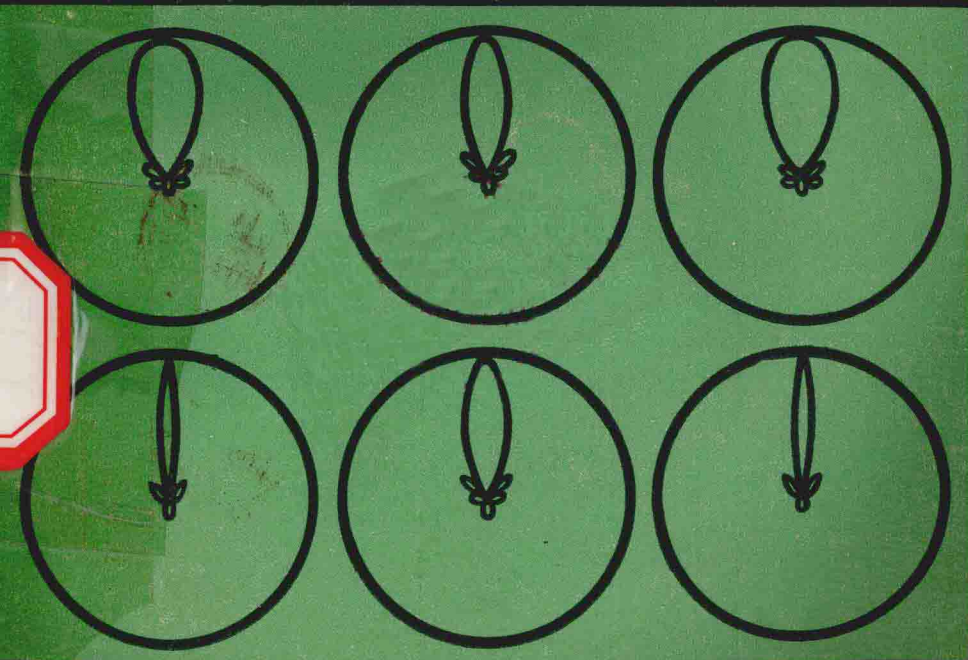
陆地和海洋的 雷达反射特性

[美] M.W.朗 著

陈春林 顾昌贤 译

常茂森 校

国防工业出版社



陆地和海洋的雷达反射特性

〔美〕 M. W. 朗 著

陈春林 顾昌贤 译

常茂森 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了用雷达遥感方法所获取的有关陆地和海洋反射特性方面的大量实验数据,并给出了有关的基本理论、设计公式和曲线图表。书中内容基本上反映了雷达遥感散射实验结果的现状。本书可供从事雷达、导航工程的科研设计人员以及高等院校遥感专业的师生参考。

Radar Reflectivity of Land and Sea

M. W. Long

D. C. Heath and Company 1975

*

陆地和海洋的雷达反射特性

〔美〕M. W. 朗 著

陈春林 顾昌贤 译

常茂森 校

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张11³/₄ 298千字

1983年7月第一版 1983年7月第一次印刷 印数: 0,001—1,400册

统一书号: 15034·2499 定价: 1.45元

译 序

自航空摄影问世那天起，遥感技术就已服务于人类了，但遥感这一术语却是 1960 年才提出来的。所谓遥感，系指利用敏感仪器，通过电磁波从远距离获取目标信息的过程。用于遥感的电磁波谱是很宽的，它包括紫外线、可见光、红外线和微波等。前三种遥感电磁波受天气影响很严重，而微波则几乎是全天候的，所以，它在现代遥感技术中得到了广泛的应用。

微波遥感所采用的主要仪器是雷达。它不仅是一种优良的军事侦察遥感手段，同时，它还是地球资源勘探，陆地和海洋反射特性研究，生态环境调查等的主要遥感工具。美国 1975 年出版的“Radar Reflectivity of Land and Sea”一书，系统地介绍了用雷达遥感方法获取的有关陆地和海洋反射特性方面大量实用的实验资料。还给出了有关的基本理论、设计公式和图表曲线。为满足从事这方面工作的读者需要，我们翻译了这本书。

在翻译过程中，钱仲青同志对本书有关章节提出过不少宝贵意见，在此表示深切地感谢。由于我们水平所限，译校中的不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

序 言

为了探索先进的技术和方法以扩展雷达遥感的应用，本书准备给出一系列有关反射特性方面的实用数据。这些数据资料是根据雷达回波特性提出来的，它们对于导航、地形分类以及海面特性的测定都很有价值。对已知的陆地和海洋的雷达反射特性，给出了大量的实验数据，并且，在汇集这些数据时，尽可能简要地说明各种被观测特性产生的主要原因。

本书的重点放在阐述微波后向散射方面。但由于在许多情况下，来自陆地和海洋的前向散射波会强烈地影响雷达的性能，所以，本书对前向散射方面的问题也适当地作了讨论。书中也讨论了较长波长（几兆赫或几兆赫以上的频率）的一些问题，因为在过去几年中，对1千英里或更远距离的宽阔海域内施行遥感的情况表明，以这类波长工作的多普勒雷达是很有发展前途的。因此，象超视距之类的雷达，其迅速的发展趋势是可以预料的，因为这类雷达能在不受气象条件影响的情况下，提供连续监视的能力。

本书适用于一年级研究生，或大学中具有牢固电磁学基础的高年级学生。作者深信：本书内容反映了雷达散射实验结果的现状，因而对从事设计的工程师和遥感雷达数据的使用者，同样具有重要的参考价值。

目 录

第一章 雷达遥感	1
技术状况	1
§ 1.1 综述	1
§ 1.2 第二次世界大战结束时雷达的能力	6
§ 1.3 带状地图 (Strip Maps) 和侧视雷达	12
表面影响和新兴技术	17
§ 1.4 表面特性的影响	17
§ 1.5 新兴技术	23
参考文献	30
第二章 基本概念和定义	33
雷达反射特性	33
§ 2.1 自由空间雷达方程	35
§ 2.2 目标的雷达截面积	36
§ 2.3 归一化的雷达截面积	37
§ 2.4 瑞利粗糙度准则	39
§ 2.5 散射场的相干性和非相干性	40
§ 2.6 雷达目标的远区场	41
§ 2.7 自相关函数与功率密度谱之间的关系	42
§ 2.8 起伏统计特性	45
地球及其对雷达的影响	50
§ 2.9 地球曲率和折射的影响	50
§ 2.10 干涉对目标的影响	52
§ 2.11 海面和风速的统计特性	54
§ 2.12 超视距传播	59
§ 2.13 大气的衰减和散射	60
参考文献	62

第三章 极化、去极化和散射理论	66
极化和去极化	66
§ 3.1 极化散射矩阵	66
§ 3.2 线极化和圆极化之间的关系	69
§ 3.3 随机取向偶极子	71
§ 3.4 双平面反射器	73
§ 3.5 随机取向偶极子的集合体所引起的去极化	75
粗糙表面的雷达截面积理论	77
§ 3.6 简化模型	78
§ 3.7 经典干涉理论	80
§ 3.8 切面近似法	81
§ 3.9 极粗糙表面	82
§ 3.10 小平面对模型	83
§ 3.11 稍粗糙平面	83
§ 3.12 水面涟漪	88
§ 3.13 植物模型	89
§ 3.14 组合表面	90
§ 3.15 海面回波的多普勒频谱	92
参考文献	95
第四章 地球表面的影响	99
基本概念	99
§ 4.1 地球曲率和折射的影响	99
§ 4.2 反射系数和扩散因子	102
§ 4.3 平滑地面的反射系数	103
§ 4.4 地形对目标回波的影响	109
平滑地面上方的目标回波	112
§ 4.5 平滑地面上方小物体的距离和俯角的关系	113
§ 4.6 平滑地面上方垂直延伸的物体	115
§ 4.7 平滑地面上方圆极化、水平极化和垂直极化 的传播因子	118
§ 4.8 平滑地面上方散射体云的传播因子	122
表面粗糙度对前向散射场的影响	124

§ 4.9 粗糙表面的反射系数	124
§ 4.10 遮挡	128
§ 4.11 去极化	129
实际粗糙地面上方的目标回波	131
§ 4.12 回波功率随距离的变化	131
§ 4.13 理想化的 R^{-4} 和 R^{-8} 曲线相交点的距离	133
§ 4.14 圆极化情况下的相对截面积	133
§ 4.15 散射体云	136
§ 4.16 漫射分量对目标回波的影响	138
关于陆地和海洋回波的干涉效应	139
§ 4.17 前向散射对海面 σ^0 的影响	139
§ 4.18 局部干涉	141
§ 4.19 经典干涉效应和局部干涉效应之间的比较	142
参考文献	144
第五章 回波的起伏	147
地面回波的起伏	149
§ 5.1 地面回波的性质	149
§ 5.2 地形回波的幅度分布	150
§ 5.3 陆地回波的频谱和自相关函数	159
海洋回波的视觉观察结果	172
§ 5.4 A型显示器所揭示的特性	172
§ 5.5 固定距离取样的结果	174
§ 5.6 雷达和光学系统的主观比较	178
§ 5.7 异常情况	179
海面回波的统计特性和频谱	180
§ 5.8 幅度分布	181
§ 5.9 用非相干雷达观察的频谱	190
§ 5.10 自相关函数	192
§ 5.11 频谱及其与海面表面结构的关系	197
§ 5.12 快起伏和慢起伏情况下的相对功率	202
§ 5.13 相位相干多普勒频谱	204
参考文献	209

第六章 平均截面积和中值截面积	213
引言	213
§ 6.1 σ° 的一般特性	213
§ 6.2 平均值与中值之间的差异	215
§ 6.3 粗糙度可与波长相比拟 (或更小) 的平坦表面	216
§ 6.4 很小的入射角	217
§ 6.5 接近垂直入射	220
§ 6.6 经典干涉效应	221
陆地的雷达截面积	222
§ 6.7 陆地 σ° 的性质	222
§ 6.8 各种地形的平均 σ°	223
§ 6.9 各种地形的 σ° 中值	246
§ 6.10 与入射角和极化的关系	253
§ 6.11 适用于陆地的波长关系	255
§ 6.12 关于陆地 σ° 的讨论	257
海面的雷达截面积	261
§ 6.13 海面 σ° 的性质	261
§ 6.14 小入射角时的距离关系	262
§ 6.15 σ° 与入射角的关系	268
§ 6.16 在低频情况下的入射角关系	277
§ 6.17 σ° 与极化的关系	282
§ 6.18 σ° 与风以及海面的关系	287
§ 6.19 海面回波的预测	295
§ 6.20 海面的波长关系	300
§ 6.21 油膜水面	310
§ 6.22 关于海面 σ° 的讨论	310
参考文献	311
第七章 几种极化特性的相互关系	317
引言	317
§ 7.1 一般的观察结果	317
§ 7.2 相干性、统计独立性和相关性	319
§ 7.3 粗糙地形的简化极化模型	323

§ 7.4 极化模型用于月球	328
以树林为主体的陆地回波	332
§ 7.5 幅度起伏	332
§ 7.6 正交极化回波的幅度和相位间的相互关系	334
§ 7.7 平均值和中值数据及其与俯角的关系	339
§ 7.8 树林产生的相干和非相干散射的相对值	343
海面回波	346
§ 7.9 正交极化分量的起伏	346
§ 7.10 线极化的平均值和中值	352
§ 7.11 线极化和圆极化的平均值和中值的相互关系	360
§ 7.12 海面产生的相干和非相干散射	365
参考文献	366

第一章 雷达遥感

技术状况

§ 1.1 综 述

第二次世界大战期间, 雷达曾被广泛地用于军事上, 并已推广应用到陆地、海洋和空中等许多方面。1972 年 12 月阿波罗 17 号飞行期间, 宇宙航员用雷达所收集的数据, 建立了月球的天体图。而在此以前, 雷达就已经有多种用途了, 其中包括大地测绘; 庄稼、森林和洪水灾害的评定; 水源和矿物的地志研究; 冰山和海洋表面 (浪高、风速以及表面水流的方向和速度等) 的监视。

现在, 雷达已被用来勘测地球的辽阔区域。大于两百万平方英里的南美洲, 经常被大量的云层所遮蔽, 现已用雷达测绘出了它们的地图。雷达能监视冰山的位置、运动和寿命, 以改善海洋上的安全。在研究各大洋水流以及在气象学、水文学、矿物勘查、地形测绘、土地利用监视、农业和森林等方面的应用, 雷达也是很有成效的。植物的雷达截面积不同, 所产生的图象色调和结构也不同。利用这些差异, 可构成庄稼和森林的土地利用图, 并可指示出森林火灾的破坏情况。

采用短波 (无线电) 电磁波, 雷达能辨别环境状况。300 兆赫到 30 千兆赫的频率范围称为微波波段; 对应的波长分别为 1 米和 1 厘米。30 千兆赫 (10 毫米) 到 300 千兆赫 (1 毫米) 称为毫米波段。虽然毫米波雷达正日益被广泛地使用, 但绝大多数雷达则还是工作于微波波段。有些工作于数兆赫的频率, 有些则使用光学波长。通常所用的雷达频段列于表 1-1 中。

波段名称K、X、S、L和P是第二次世界大战期间使用的密码字母。

表1-1 雷达波段名称

频 段	频 率	波 长
P	300~1,000兆赫	30~100厘米
L	1,000~2,000兆赫	15~30厘米
S	2,000~4,000兆赫	7.5~15厘米
C	4,000~8,000兆赫	3.75~7.5厘米
X	8,000~12,500兆赫	2.4~3.75厘米
K _a	12,500~18,000兆赫 (12.5~18.0千兆赫)	1.67~2.4厘米
K	18.0~26.5千兆赫	1.1~1.67厘米
K _a	26.5~40.0千兆赫	0.75~1.1厘米

第一部雷达使用数米的波长。1940年开始使用微波波长，到1945年工作频段扩展到K波段；从1950年开始使用K_a波段，而1960年的实验雷达已工作于70千兆赫。此后，就有一些毫米波系统，波长扩展到1毫米左右。

在给定天线尺寸的条件下，较高频率（更短波长）的优点是可获得较窄的波束，其缺点是由于大气吸收（和散射）所引起的信号强度损失较大、内部系统损耗较大以及发射机功率较低。

为达到获得窄波束（和简单地探明未知情况）的目的，采用了微波技术的雷达，其波长已发展到短于1毫米。当然，雷达目前已经扩展到了红外和光学波长范围内。其初期则工作于分米波波长，这是因为当时微波技术尚未突破。现在，为了“洞察”植物和地球表面，人们又重新对这些波长发生了兴趣。此外，分米波长能够通过电离层的反射（见§2.9）来探测很远距离（超视距）的目标；例如，工作于分米波段的多普勒雷达，可用来观察宽阔海域的海面状况（见§5.13）。长的波长和短的波长的联合使用，可同时改善穿透性、方向性和目标分类。

雷达获得的数据和采用红外线、可见光及紫外线波段的无源

系统所获得的照片是可互相补充的。对于微波来说，大气本质上是透明的[●]。因此，在所有气象情况下，无论白天或晚上，当不能使用航空摄影时，雷达却具有检测信息的能力。虽然雷达地图在许多方面与照片相类似，但雷达地图能突出不同的特征。譬如，雷达对垂直尺寸是敏感的，因而突出了地形特征。

雷达地图从根本上摆脱了透视的困难。用设计合理的设备和使用平面位置显示器（PPI），或者用更现代的机载雷达侧视扫描（图 1-1）所得的图形就可代表真实的平面视图，而不需要考虑被观察目标位置的俯角。图 1-2 将从科德角（Cape Cod）顶端俯视的雷达图形与同时由飞机飞越科德角海湾（Cape Cod Bay）上空摄取的正向照片作了比较。雷达图形的优越性是不容置疑的，因为在晚上或在能见度较差的天气情况下，雷达图形不受影响，而摄影方法或常规的目视方法便会失效。

平面位置显示器显示的坐标适合于与地图相对照，但显示器亮度的图案与地形特征间的关系决定于反射特性。雷达地图上各种地貌的识别和相关，是在介于几种强度（如地面和水、山和山谷以及建筑区和开阔平地）之间的强度对比的基础上进行的。这种方法，实质上还是第二次世界大战结束时的技术状态。

自二次世界大战以来，出现了新的突破。这是由于广泛的重视，以及采用先进的微波、红外、紫外和信号处理等技术，使航空摄影技术得到了重大的发展所致。遥感技术与常规的摄影技术相组合，对各国产生了重大的经济效果。今天，广大公众都已熟悉从高空飞机和人造卫星所获得的大型照片，从照片所取得的数据已用于气象的预测和分析以及土地利用的一般研究。

虽然雷达测绘技术已发展到一个完善的水平，而用于地形测绘的技术水平仍然在迅速地发展着。这些发展正为各国改善生活水平提供新的可能。例如，从 4000 英尺高度的飞机上所取得的

● 如果要求获得全部气象数据，不应使用K波段的中间部分。

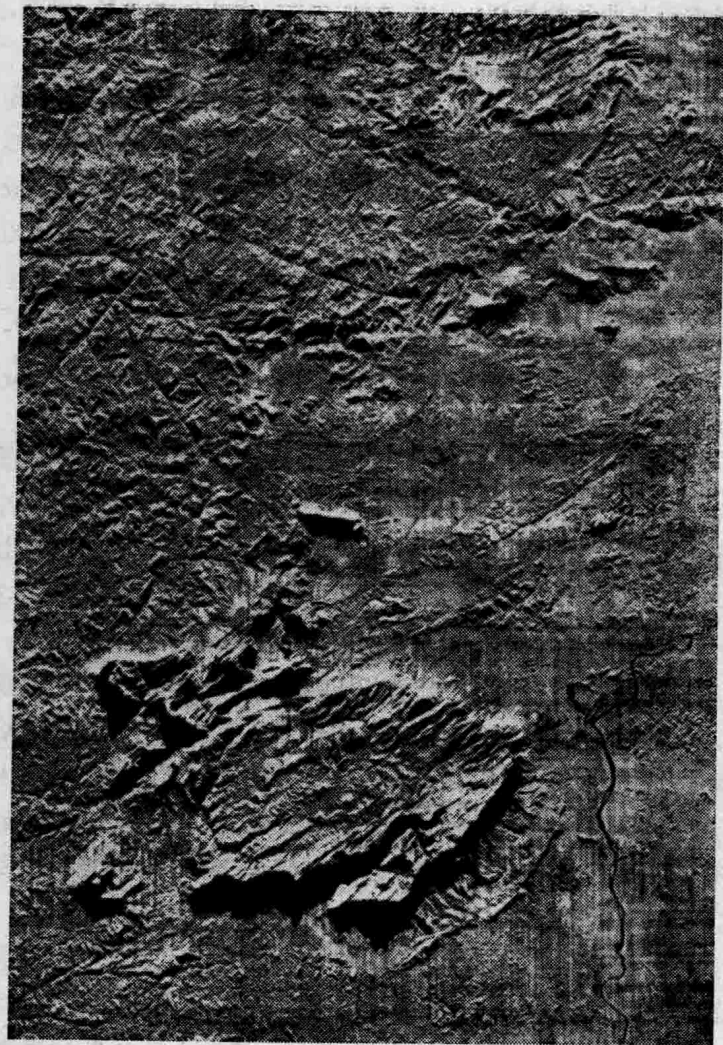
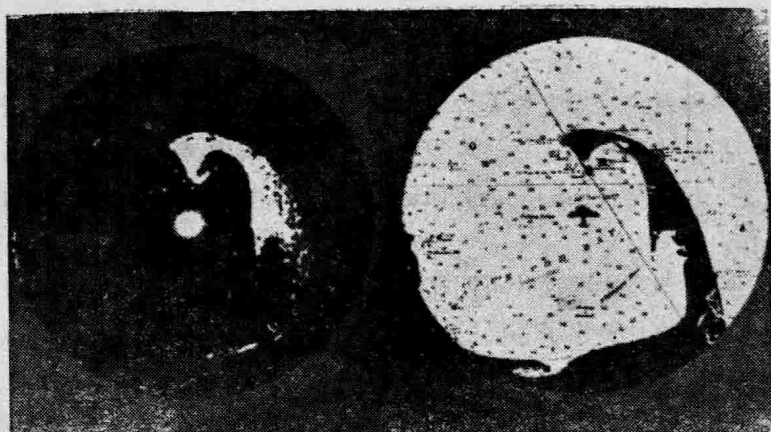
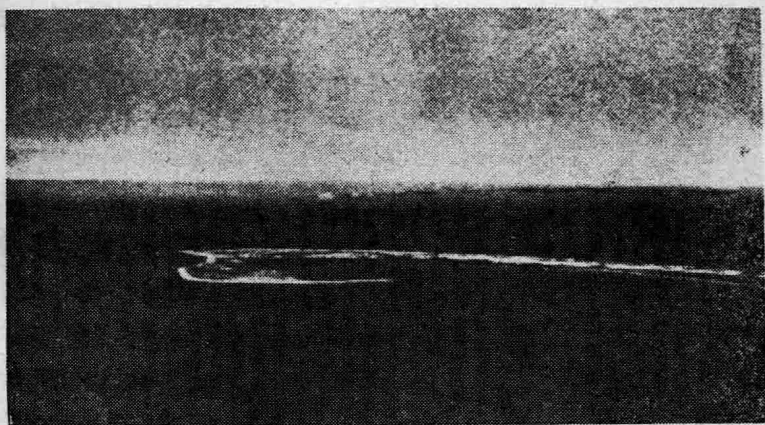


图1-1 委内瑞拉100英里地带



(a)

(b)



(c)

图1-2 马萨诸塞州科德角的雷达显示地图和光学照片

雷达数据，已用来帮助把亚马逊河流域及巴西的其余部分联系起来。图 1-1 是取自委内瑞拉整个稠密森林区的雷达地图，这些地区极为陡峭，从地面不能到达，而且由于有持久的云层覆盖着，其它监视技术也无法探测。雷达地图可提供矿藏的蕴藏量、森林和地区资源、淡水源、新运输路线和耕作区域。对于改善经济和社会福利来说，雷达的应用似乎是无限的。

§ 1.2 第二次世界大战结束时雷达的能力

本节对第二次世界大战结束时雷达的能力作了回顾，并以图示的方法来识别和说明陆地与海洋反射特性的影响。大部分材料来源于赖德诺 (Ridenour) (1947) 和 J. S. 贺尔 (Hall) (1947) 的著作。

观察本章中的图片可明显地看到：与通常航空摄影照片相比，雷达地图更加突出了不同的地貌特征。当然，被突出的细节部分，对于航空摄影和雷达地图来说，都取决于入射角。

第二次世界大战期间，使用雷达取得的基本的距离、方位和信号强度信息，就已用于形成平面显示器图象。对雷达来说，地形的各个要素趋向和它们在地形学上的特性直接相似；但雷达所显示的图象和实际地形之间的相互关系随雷达参数、地形的类别、高度（俯角）和观察目标区域方向的不同而不同。

最明显和最容易识别的地形特征通常是陆地和水的交界线。平静的光滑水面，其反射的能量趋向离开雷达，但粗糙地面的特性，使能量向所有的方向散射。粗糙海面也存在着显著的后向散射，这样的表面能消除地面和海面的分界线。在图 1-3 中，海面回波清晰可见，该图没有影响对陆地区域的识别。

城市建筑区产生返回雷达的二次定向辐射特别明显，因而能产生强的雷达信号。小入射余角（空载雷达为小俯角）时，建筑物多的城市市区的垂直表面所产生的返回雷达的反射，远强于其周围平坦地形的反射。因此，城市一般被认为是强目标。图 1-4 示出了城市所产生的特征形状和亮信号。从近距离的雷达地图（图 1-4）可知，图形的许多细节可用具有分辨力很高的远程雷达来得到。二次世界大战结束以来，人们作了很大努力，以期能在更远的雷达距离、更快的数据处理和更可靠的识别目标的情况下改进图形的细节。

根据入射角的不同，机场跑道的铺砌表面，通常比其周围地

面产生较小的后向散射能量。在图 1-5 中，能够看清楚跑道。二次世界大战期间，在当时较高分辨力的雷达上观察到的四条单向行车的公路呈现黑线状，而大多数公路太窄，以致无法区分。可是由于道路常用电话线、栅栏、堤、树、广告牌和小建筑物作为边界，故公路又常常能被辨认。这些物体的反射都在平面位置显示器上对应于公路边界线的位置上，产生亮线。同样，铁路也常常可通过亮线来辨认。正如所预料的那样，由于相对回波的强弱不同，可以分辨跨越沼泽地的铁路，但是不能分辨穿越森林地区的铁路。

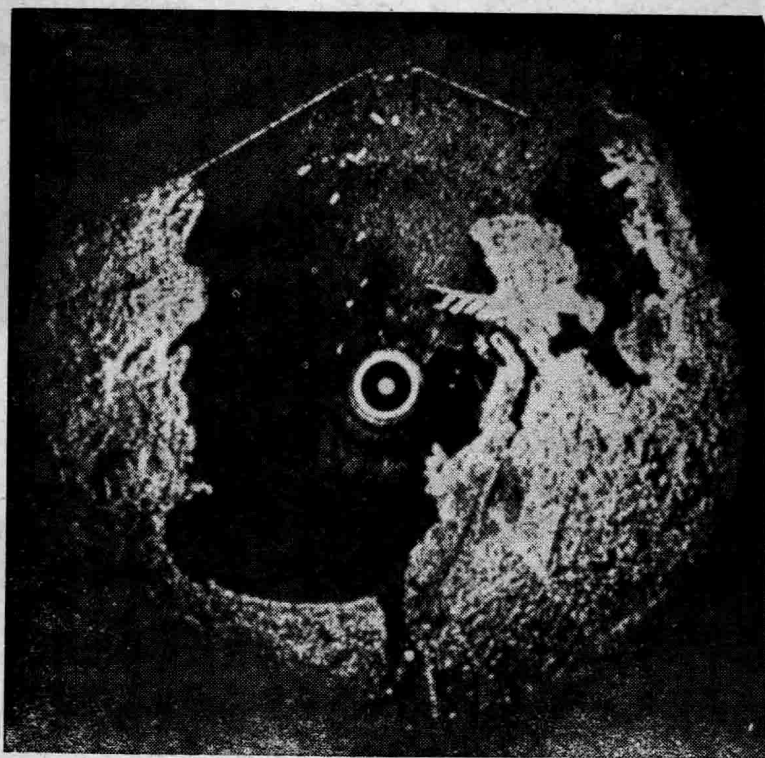


图1-3 巴拿马运河地区克里斯托巴尔 (Cristobal) 的雷达地图