

陆地和海面的 雷达波散射特性

(雷达遥感的理论与实践)



[美] M. W. 朗 著

科学出版社

陆地和海面的雷达波散射特性

(雷达遥感的理论与实践)

[美] M. W. 朗 著

薛德镛 译

王福山 校

HK38/05



C0161110

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书系统地介绍了雷达遥感的基本理论与实验方法,着重讨论了各种不同的陆地和海面对雷达波的后向散射特性,其中包括雷达频率、极化、表面的性质与粗糙度以及入射余角等与回波的关系,并列举了内容广泛的大量实验资料。

本书可供与雷达遥感有关的各学科以及从事雷达设计工作的科技研究人员、高等院校师生参考。

M. W. Long

RADAR REFLECTIVITY OF LAND AND SEA

D. C. Heath and Company

1975

陆地和海面的雷达波散射特性

(雷达遥感的理论与实验)

[美] M. W. 朗 著

薛德福 译

王福山 校

责任编辑 姚岁寒

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

1981年11月第一次印刷 印张: 15

印数: 0001—2,000 字数: 339,000

统一书号: 15031·369

本社书号: 2360·15—10

定价: 3.10 元

译 者 的 话

遥感技术是一门新兴的综合性很强的学科,它的应用十分广泛。雷达遥感是遥感技术中最复杂、最有发展前途的领域之一,特别是它的全天候、全天时工作特性是其它传感器所无法媲美的。由于合成孔径侧视雷达的问世,尽管所需的信息处理技术比较复杂,它的分辨力已经达到可见光传感器的数量级,甚至优于可见光传感器的分辨力。众所周知,许多海洋要素和陆地的观测都需要使用雷达,而其在海洋遥感中更具有特殊的重要意义。

本书*译稿由复旦大学王福山教授审校。毕国箴先生以及我所张国才、刘宝银、吕常五和何良彪等同志在翻译过程中给予了很多的帮助。译者特表示深切的谢意。

限于水平,译文中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

译 者

1979年10月于青岛,国家海洋局第一研究所

• 本书副题系译者加注。

作 者 序

编著本书的目的在于提供读者关于陆地和海面对雷达波的反射特性的资料；随着科学技术和方法的日臻完善，这些资料对于扩大雷达遥感的效用是十分有益的。本书给出了可用于导航、地面分类以及确定海面特征的雷达回波特性的资料；并通过总结大量实验数据，介绍了陆地和海面对雷达波的一些已知的反射特性；而且对于各种观测到的回波特性的基本起因都尽可能地加以扼要的阐述并讨论了它们间的相关性。

本书的重点是讨论微波后向散射。由于在许多情况下，陆地和海面的前向散射对雷达性能影响很大，所以书中对前向散射也有所讨论。此外，由于近年来，工作于较长波长（频率为几兆赫或稍大些）上的多普勒雷达从一千英里或更远的距离遥感大面积海况方面显示出广阔的发展前景，所以书中也包括了对较长波长的讨论。可以预见，这种会提供连续监测能力、且具有接近全天候特性的地面超视距雷达将会获得迅速的发展。

本书很适合于一年级研究生或应用电磁学基础较好的大学四年级生之用。作者相信，书中内容体现了雷达波后向散射实验知识的目前水平。因此，本书对雷达设计工程师和雷达遥感资料的用户来说，也有重大的参考价值。

目 录

第一章 雷达遥感	1
技术发展水平.....	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 第二次世界大战结束时雷达的探测能力	4
§ 1.3 条幅状雷达图象与侧视雷达	9
地表效应和出现的新技术.....	12
§ 1.4 地表特性对雷达回波的影响	12
§ 1.5 出现的新技术	16
第二章 基本概念与定义	22
雷达波的反射性.....	22
§ 2.1 自由空间的雷达方程	22
§ 2.2 目标的雷达截面积	24
§ 2.3 目标的归一化雷达截面积	25
§ 2.4 瑞利粗糙度判据	26
§ 2.5 散射场的相干性与非相干性	27
§ 2.6 雷达目标的远场	27
§ 2.7 自相关函数与功率密度谱的关系	28
§ 2.8 回波幅度起伏的统计学基础	30
地球及其对雷达波的影响.....	33
§ 2.9 地球曲率与大气折射对电磁波传播的影响	33
§ 2.10 干涉对目标回波的影响.....	35
§ 2.11 海面的基本特征和风速统计法.....	35
§ 2.12 超视距传播.....	39
§ 2.13 雷达波在大气中的衰减与散射.....	39
第三章 极化、去极化和散射理论	43
极化与去极化.....	43
§ 3.1 极化散射矩阵	43
§ 3.2 线极化波的目标截面积与圆极化波的目标截面积之间的关系	45
§ 3.3 随机取向偶极子的雷达截面积	46
§ 3.4 双平面反射器	48
§ 3.5 随机取向的偶极子总体所引起的去极化	49
粗糙表面的雷达截面积理论.....	50
§ 3.6 简化模式	51
§ 3.7 经典干涉理论	53
§ 3.8 切面近似模式	53
§ 3.9 适用于非常粗糙表面的几种方法	54

§ 3.10 小面模式	54
§ 3.11 稍粗糙平面表面的雷达截面积	54
§ 3.12 水面波纹	57
§ 3.13 植被模式	58
§ 3.14 组合表面模式	58
§ 3.15 海面回波的多普勒谱	59
第四章 地球表面效应	64
基本概念	64
§ 4.1 地球曲率与折射效应	64
§ 4.2 反射系数与散度因子	66
§ 4.3 光滑平面地表的反射系数	66
§ 4.4 地面对目标回波强度的影响	70
位于光滑平面地表上的目标的回波	73
§ 4.5 光滑地表上一个目标的回波与探测距离和入射角的关系	73
§ 4.6 光滑地表上的垂直扩展目标	75
§ 4.7 光滑地表上圆极化波、水平极化波和垂直极化波的传播因数	76
§ 4.8 光滑地表上散射元大总体的传播因数	79
表面粗糙度对前向散射场的影响	80
§ 4.9 粗糙表面的反射系数	80
§ 4.10 遮蔽作用	83
§ 4.11 去极化	83
位于物理粗糙地表上的目标的回波	84
§ 4.12 回波功率随探测距离的变化规律	85
§ 4.13 理想化的 R^{-4} 区与 R^{-3} 区曲线交点处的探测距离	85
§ 4.14 目标的圆极化相对截面积	86
§ 4.15 散射元大总体的雷达截面积	87
§ 4.16 漫射分量对目标回波的影响	89
干涉作用对陆地和海面回波的影响	89
§ 4.17 前向散射对海面 σ^0 的影响	89
§ 4.18 局部干涉作用	90
§ 4.19 经典干涉作用与局部干涉作用的比较	91
第五章 回波起伏	94
陆地回波的起伏	95
§ 5.1 陆地回波的性质	95
§ 5.2 陆地回波的幅度分布	97
§ 5.3 陆地回波的频谱和自相关函数	102
海面回波的目视观测	110
§ 5.4 在 A 型显示器上观测到的回波特征	111
§ 5.5 由定距离取样所获的结果	112
§ 5.6 雷达与光学观测的主观比较	114
§ 5.7 VV 回波和 HH 回波的异常情况	115
海面回波的统计学与频谱	115

§ 5.8 海面回波的幅度分布	115
§ 5.9 非相干雷达的海面回波观测谱	122
§ 5.10 自相关函数	124
§ 5.11 海面回波的频谱及其与海面机制的关系	126
§ 5.12 海面回波快起伏与慢起伏的相对功率	130
§ 5.13 相位相干多普勒谱	131
第六章 雷达截面积的平均值和中值	137
概述	137
§ 6.1 目标的归一化雷达截面积的一般特性	137
§ 6.2 雷达截面积的平均值与中值的区别	138
§ 6.3 粗糙度接近于或小于雷达波长的平面地表	139
§ 6.4 近切向入射	140
§ 6.5 近垂直入射	141
§ 6.6 经典干涉作用	142
陆地的雷达截面积	143
§ 6.7 陆地 σ° 的性质	143
§ 6.8 几种地面的 σ° 的平均值	143
§ 6.9 几种地面的 σ° 的中值	158
§ 6.10 陆地回波与入射余角和极化的关系	161
§ 6.11 陆地的 σ° 与雷达波长的关系	165
§ 6.12 关于陆地 σ° 的讨论	166
海面的雷达截面积	168
§ 6.13 海面 σ° 的性质	168
§ 6.14 在小入射余角上 σ° 与探测距离的关系	169
§ 6.15 海面 σ° 与入射余角的关系	173
§ 6.16 在低频率上 σ° 与入射余角的关系	178
§ 6.17 海面 σ° 与极化的关系	181
§ 6.18 海面 σ° 与风场和风浪的关系	185
§ 6.19 海面回波的估算	188
§ 6.20 海面 σ° 与雷达波长的关系	191
§ 6.21 海面油溢对回波的影响	196
§ 6.22 关于海面 σ° 的讨论	196
第七章 极化特性的相互关系	200
概述	200
§ 7.1 一般的观测结果	200
§ 7.2 相干性、统计独立和相关	200
§ 7.3 粗糙地面的一种简化极化模式	204
§ 7.4 利用月球回波对简化极化模式的验证	207
陆地回波(主要讨论树林的回波)	209
§ 7.5 幅度起伏	209
§ 7.6 正交极化回波的幅度和相位的相互关系	210

§7.7 回波的平均值和中值数据及其与入射余角的关系	214
§7.8 树林的相干散射与非相干散射的相对幅值	215
海面回波.....	217
§7.9 正交极化分量的起伏	217
§7.10 线极化 σ° 的平均值与中值.....	220
§7.11 线极化和圆极化 σ° 的平均值和中值的相互关系	224
§7.12 海面的相干散射与非相干散射.....	227

第一章 雷达遥感

技术发展水平

§1.1 概述

在第二次世界大战时,军事部门就已经广泛地使用了雷达,现在它的应用领域已遍及陆地、海洋和大气中的许多方面。在1972年12月阿波罗-17登月飞船的那次飞行中,宇航员曾用雷达获取了月球资料,以绘制月球图。今后,雷达具有较大用途的应用范围包括地球测绘、农作物和森林的估产、洪水灾害的估计、为开发水资源和矿藏所需的地形研究、冰山和海洋表层(波高、风速、表层流的流向和速度等)的监测等。

目前,人们正在使用雷达来勘察地球上的广大地区。在南美洲,经常被浓密的云层所覆盖的超过二百万平方英里的地区已用雷达进行了测绘。为了保障海运的安全性,可用雷达来监测冰山的位置、运动和年龄。在海洋和海流的研究方面以及在地球物理学、水文学、探矿、地形测绘、土地利用的勘测、农业和林业的应用中,雷达是一种有效的传感器。各种植被的雷达截面积的差异使得它们的图象具有不同的色调与纹理结构。根据这种色调与纹理结构的变化就可绘制出农作物和森林的土地利用图,并可示出森林火灾所造成的损失。

雷达是用波长较短的(射频)电磁波来探测周围环境的。频率从300兆赫(MHz)到30千兆赫(GHz)这一范围称为微波波段,所对应的波长分别为1米和1厘米。从30千兆赫(10毫米)到300千兆赫(1毫米)称为毫米波段*。尽管目前毫米波雷达用得越来越多,但大多数雷达仍工作于微波波段。此外,还有工作频率为几兆赫的雷达以及工作于光学波长的雷达。常用的雷达波段列于表1-1。

表 1-1 雷达波段代号

波 段	频 率	波长(厘米)
P	300—1000 兆赫	30—100
L	1—2 千兆赫	15—30
S	2—4 千兆赫	7.5—15
C	4—8 千兆赫	3.75—7.5
X	8—12.5 千兆赫	2.4—3.75
K _a	12.5—18.0 千兆赫	1.67—2.4
K	18.0—26.5 千兆赫	1.1—1.67
K _a	26.5—40.0 千兆赫	0.75—1.1

波段代号 K, X, S, L 和 P 是第二次世界大战时所使用的密码,字序 K-X-S-L-P 可用“King Xerxes Seduced Lovely Princesses”这一句子来帮助记忆。第一批雷达使用了波

* 一般把毫米波段也归于微波波段。——译者注

长为数米的载频。到 1940 年时使用了微波, 1945 年时雷达的工作频率已扩展到 K 波段, 到 1950 年时使用了 K_u 波段, 1960 年时实验性雷达已工作于 70 千兆赫。自那时以来, 已研制了一些波长约达 1 毫米的毫米波雷达系统。

使用较高频率的优点是, 对于一个给定总尺寸的天线来说, 波束宽度能做得较窄; 缺点是由于大气吸收和散射而引起的信号强度的衰减较大、雷达系统的内部损耗较大、发射机的输出功率较小。

为了获得窄的天线波束宽度, 并实际探索新的领域, 现在已经研制出了采用微波技术的、波长短至 1 毫米的雷达。当然, 也研制了工作于红外谱段与可见光光谱段的雷达。在雷达的早期阶段, 由于微波技术尚不成熟, 所以那时的雷达原先都工作于分米波段。但是, 由于分米波具有“穿透”植被和地表的能力, 所以人们对分米波重新又发生了兴趣。采用分米波, 通过电离层的折射, 可远距离探测目标, 称作超视距探测 (见 § 2.9); 例如: 目前正在使用分米波多普勒雷达观测大面积海区的海况 (见 § 5.13); 也有把长波长和短波长雷达结合起来使用的, 以同时获得较好的穿透力、方向性和对目标进行分类的能力。

对于应用红外、可见光和紫外谱段的被动式系统所拍摄的象片来说, 雷达资料是一种重要的补充。大气层对微波基本上是透明的¹⁾, 因此, 雷达的全天候、全天时工作能力使得人们在使用航空摄影无效的时候也能获取信息。尽管雷达图象在许多方面类似于可见光象片, 然而它能突出不同的象型特征, 譬如: 雷达图象能灵敏地反映出目标垂直方向尺寸

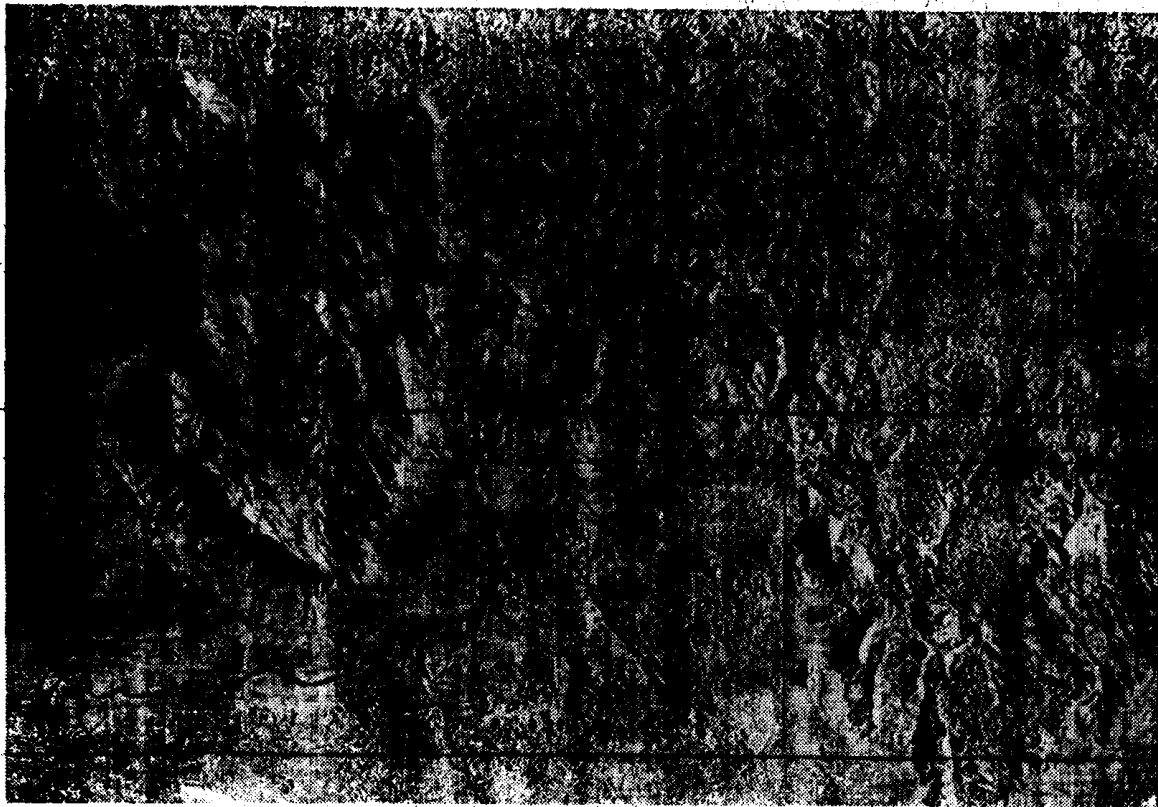


图 1-1 委内瑞拉境内 100 英里宽的地面观测带侧视雷达图象
(取自 Goodyear Aerospace Corporation, 1972)

1) 如果希望具有全天候的特性, 那就不能使用 K 波段的中间频率 (见第二章 § 2.13)。

的变化,从而使地形特征显示得更加突出。

雷达图象对透视法的使用基本上没有什么困难。只要合理设计设备并使用平面位置显示器(PPI)或更现代化的机载雷达侧视显示装置(侧视显示的图象见图1-1),不管以多大的人射余角来观测目标,所获的图象都可转换成合乎标准的平面图。图1-2示出了科德角端部的雷达图象和海图以及在科德角湾上空同时从飞机上直接拍摄的象片,以作比较。显然,雷达图象的优越性是无可疑的。即使是在夜间或多雾天气下,获取的雷达图象都不受影响,而可见光摄影或一般的视觉就无能为力了。

平面位置显示器上显示的坐标能帮助我们把它与地图作比较,但是在图象上由亮度所构成的象型与地面的地形特征间的相关性取决于地面的反射率特性。雷达图象上各地表特征的识别与相关是根据回波强度间的对比度来进行的。这种对比度可分为数类,譬如:陆地与水面之间的对比度、山与谷的对比度、布满建筑物的地区与开阔农村之间的对

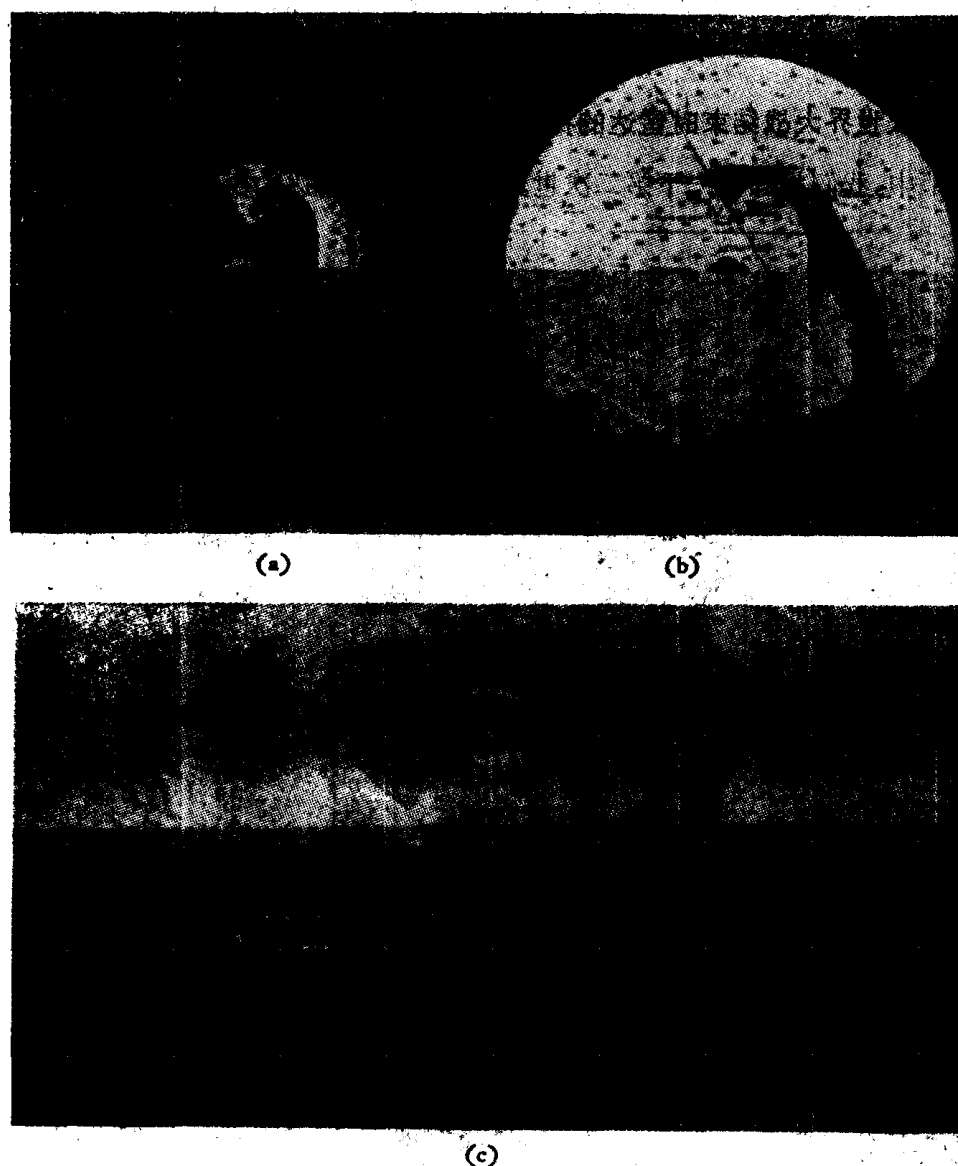


图 1-2 马萨诸塞州科德角的雷达图象、海图和可见光象片
(取自 L. N. Ridenour, *Radar System Engineering*, McGraw-Hill, 1947.)

比度。这大体上就是第二次世界大战结束时的技术水平。

自从第二次世界大战以来,由于广泛的兴趣以及航空摄影技术有了重大的发展,使用了复杂的微波、红外、紫外和信息处理技术,出现了新的推动力。这些探测技术,结合了常规的摄影术,正在对各国产生重大的经济影响。现在,人们已经熟悉了从高空飞机和卫星上拍摄的覆盖范围很大的象片。这种象片资料可用于天气预报与分析以及土地利用的总体研究。

尽管雷达测绘技术现已发展到了高度复杂的程度,地面测绘的技术水平仍以飞快的速度不断提高。这些发展给予人们改善各国生活水平的一些新的可能。例如:在飞行高度为 40000 英尺的飞机上所获取的雷达图象资料正在用来把亚马孙地区与巴西的其它地区衔接起来。图 1-1 示出了这种类型的一张雷达象片,它摄自巴西密林区的上空,这样的林区实际上是不能从陆路进入的,而且当地经常有云覆盖,所以也不能用其它监测技术加以探测。雷达图象正在用来估算矿物资源、林业与牧业资源、淡水供应、新的运输通道和农业待开发区。雷达在重要的经济发展与社会改造方面的应用前景是无限广阔的。

§ 1.2 第二次世界大战结束时雷达的探测能力

在本节中,我们将回顾一下第二次世界大战结束时雷达的探测能力,并附以象片用来

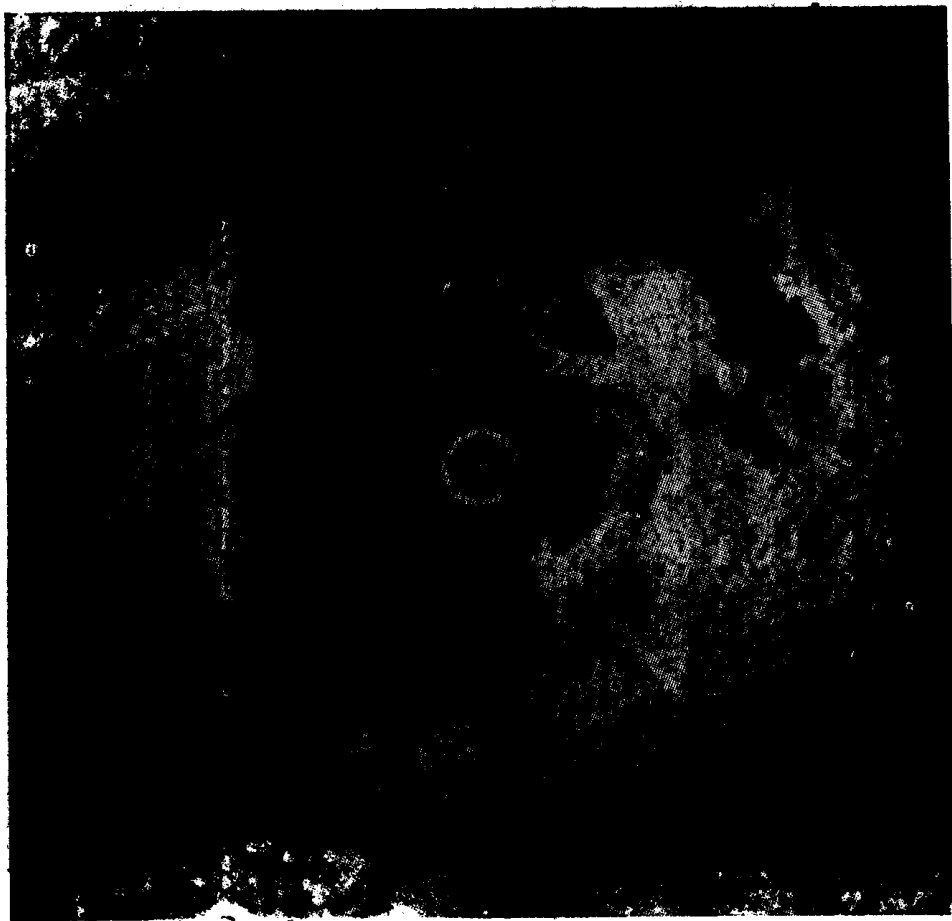


图 1-3 巴拿马运河区克利斯托巴尔的雷达图象

(取自 L. N. Ridenour, *Radar System Engineering*, McGraw-Hill, 1947.)

证实和解释陆地与海面反射特性的作用。关于这方面的大部分资料取自 L. N. Ridenour (1947) 和 J. S. Hall (1947)。

读者只要参看一下本章附图中的象片, 就会发现雷达图象比普通航空象片更能突出各种不同的地表特征。当然, 被突出的细节, 对航空象片和雷达图象来说, 都与观测角度(入射余角)有关。

在第二次世界大战时, 人们把雷达获取的关于目标距离、方位和信号强度的基本信息转化成平面位置显示器上的雷达图象。使用了雷达, 地表各基本单元在图象上常常呈现出类似于它们各自的地形特征的象型; 不过雷达图象与实际地表间的对应关系是随着雷达参数、地表类型、探测高度(决定了入射余角)和目标区的观测方向而变化的。

最明显而易于识别的地表特征通常是水陆界面。平静光滑的水面沿雷达观测方向的后向散射能量很小; 陆地表面的特点是比较粗糙, 使得雷达波能量沿所有方向散射, 因而陆地的回波信号比水面的要强些。对于波浪大的粗糙海面来说, 后向散射能量增大, 以致有可能导致陆海界线模糊不清。在图 1-3 中我们可清楚地看到海面回波, 不过在这里并不妨碍对陆地的识别。

建筑物密集的城市地区能把雷达能量有效地反射回雷达方向, 也就是后向散射能量大, 因而产生强的回波信号。在小的入射余角(对机载雷达来说, 则为小的俯角)上观测

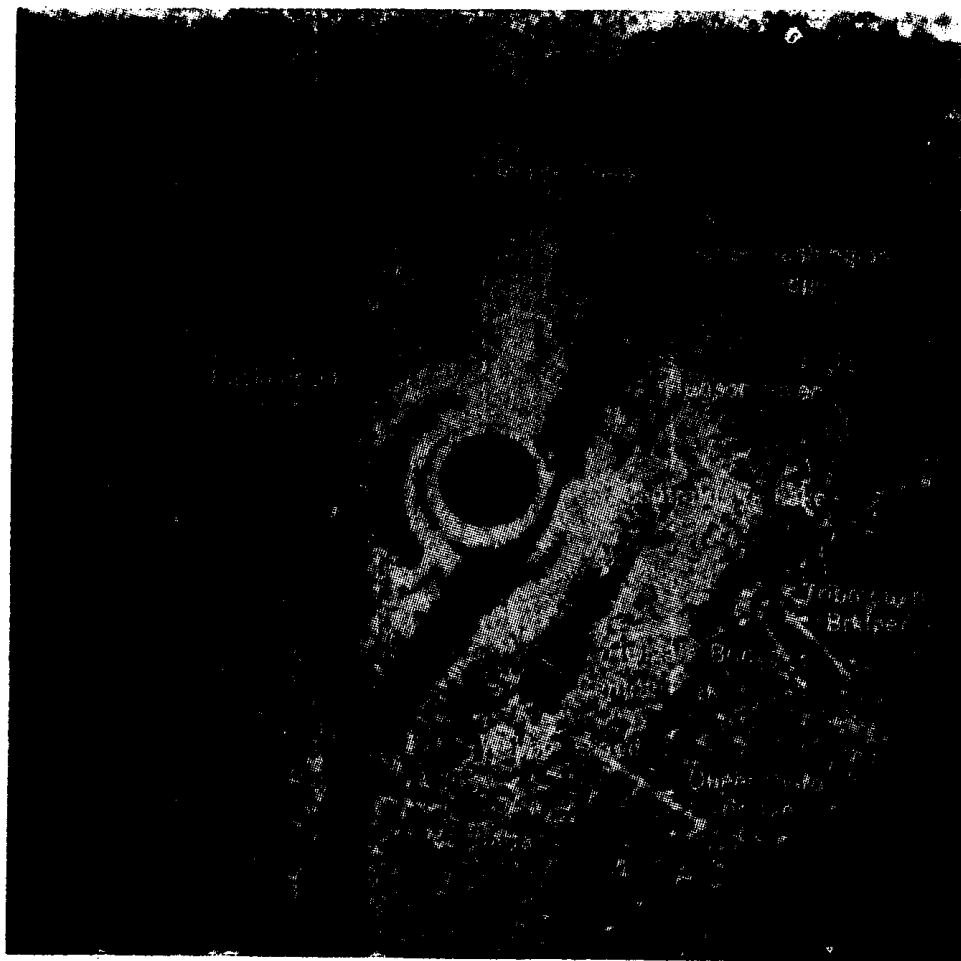


图 1-4 纽约市的雷达图象

(取自 J. S. Hall, *Radar Aids to Navigation*, McGraw-Hill, 1947.)

时,建筑物密集区内的垂直表面会把入射能量中的很大一部分向雷达方向反射回去,所以,与建筑物密集区周围的平坦地面相比,其回波信号要强得多。因此,在雷达图象中,城市通常是作为“强”目标出现的。由图 1-4 可以看出,城市在图象上呈现为具有各种特征性形状的一些亮信号的集合体。根据象图 1-4 那样的在近距离上获取的雷达图象,可以推知,使用分辨力足够高的远程雷达最终也可获取能显示出许多细节的雷达图象。自从第二次世界大战结束以来,人们已经投入了极大的力量以改善在较远的探测距离上所获图象的细节,并提高数据处理的速度以及目标识别的可靠性。

机场跑道的铺面通常比周围地面所产生的后向散射能量要小些,具体情况则取决于入射角的大小。从图 1-5 的雷达图象中可清楚地看出跑道。在第二次世界大战时,四通道公路在当时分辨力较高的雷达图象中呈现为一些暗线,但是大多数公路由于路面太窄而不能分辨。不过,由于在道路的两边一般设有电话线、栽有树木、筑有篱笆围墙、堤岸、广告牌和小的建筑物,来自上述这些物体的反射辐射叠加起来会在平面位置显示器上产生一条对应于公路通道的亮线,从这个意义上来说,公路常常是可以识别的。同样的道理,我们常常可根据图象上的亮线来识别铁路。正如所预料的那样,由于回波相对幅度的不同,我们能够识别穿过沼泽地的铁路线,但不能识别穿过林区的铁路线。



图 1-5 马萨诸塞州贝德福军用机场跑道的雷达图象
(取自 J. S. Hall, *Radar Aids to Navigation*, McGraw-Hill, 1947.)

对山脉来说,由于雷达波照射不到的背阴山坡在图象上呈现为暗黑色,所以山主要是以暗区为标征示出的。在图象上,向着雷达的那些山坡通常回波信号较强,背着雷达的那些山坡没有回波信号,这就形成了一幅与地形图十分类似的雷达图象(见图 1-1)。山地在图象上所形成的亮区与暗区的形状随着不同的入射余角会有很大的变化。入射余角是雷达位置与高度的函数;因此,从一条绵延的山脉中识别出某一特定的山是比较困难的。但是,即使在 1944 和 1945 年美国空军就曾用雷达显示器作为通过阿尔卑斯山脉的一种导航设备。位于地势平坦的农村地区中的一些孤山是很容易识别的,而且这种山可作为飞机导航用的陆标 (Hall, 1947)。

雷达应用于气象学研究已有多数 (Smith, Hardy 和 Glover, 1974)。在第二次世界大战期间,就曾用机载雷达在远至 50 英里的距离上观测到了风暴的雷达回波。由于风暴的回波与其它物体的回波相比,边缘较不清晰,因而易于识别。风暴图象的形状与范围一般都是变化的,而且即使当天线向上方倾斜,以致地面回波信号消失时,也能观测到风暴回波。

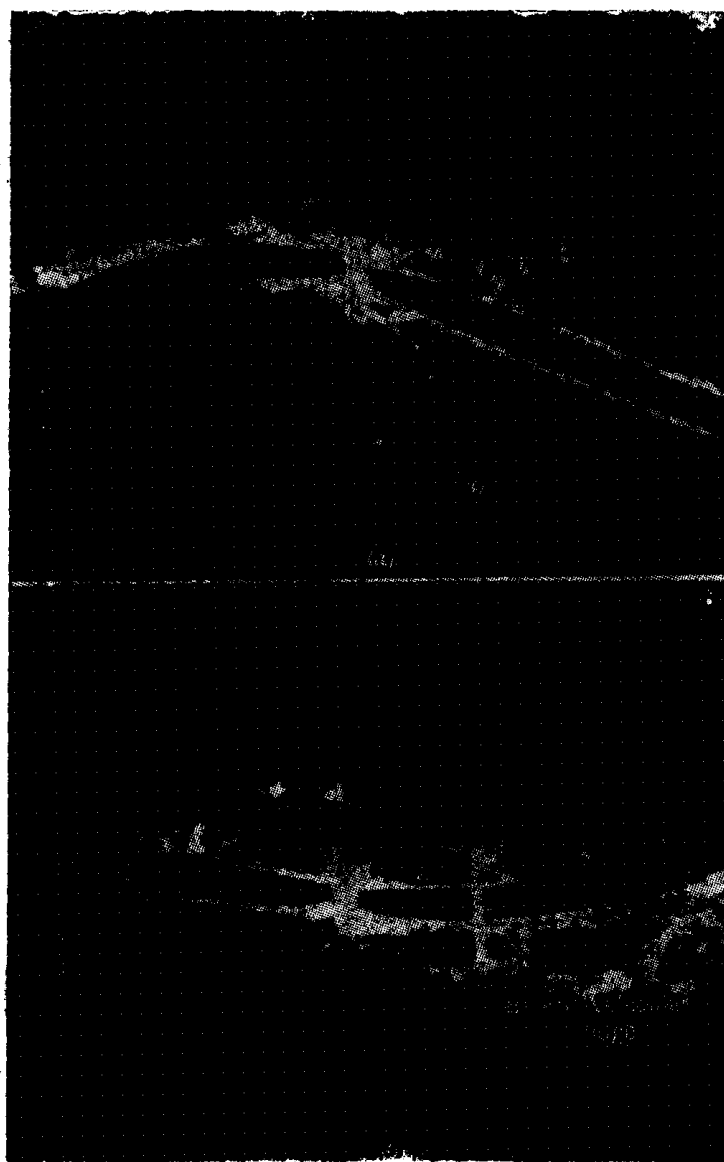


图 1-6 在科德角运河中一艘船上所显示的雷达图象
(取自 J. S. Hall, *Radar Aids to Navigation*, McGraw-Hill, 1947.)

航行于港湾、河流和湖泊上的领航员对雷达的效用都是深有体会的。船载雷达的天线波束宽度通常较窄、脉冲宽度也窄，显示器的扫描频率较高。因此，第二次世界大战时用于船舶导航的雷达的确比飞机上的雷达分辨力要高些。图 1-6 示出了当一艘船通过运河时从船上摄取的一张雷达图象的象片。图中那个圆的直径对应于 2000 码的距离。我们很容易看出，其时，船正好位于运河的中心；运河上的桥也能辨别出来。使用大战期间的雷达已能可靠地识别每一个码头和防波堤。在港口里的船舶一般都开得很慢，足以使得即使是没有经验的领航员也能参照导航图识别平面位置显示器上所显示的雷达图象上的各种目标。

在第二次世界大战结束之时，曾用 10 厘米和 3 厘米波长的雷达探测到了处于许多英里之外的冰山。实践表明，当冰山融化和解体的时候，探测就比较困难。在海面发生大浪的情况下，当海面回波“淹没”了较小的冰山回波时，雷达就不再是发现这类小冰山的一种可靠的手段了。这类小冰山也许只露出水面 5 英尺或 10 英尺，冰山的大部分在水下。

在大战期间，把一个目标从其它目标中分辨出来的主要方法是比较图象上各目标的形状、相对位置和回波强度（对比度）。目标的保留时间提供了另一种用来识别目标的依据。例如：只出现了一个短时间接着就消失的小信号可能是来自波浪、鸟或嬉戏中的鲸与海豚的回波。保留时间长的比较持久的回波信号可能来自局部一片波浪汹涌的水面、一个适淹礁、一片雨云、一个冰山、一条船或其它某种漂浮物。提高雷达探测可靠性的早期方法之一是改善分辨力。图 1-7 示出了在波士顿港摄取的平面位置显示器象片。把天线波束宽度为 1° 的象片与波束宽度为 12° 的象片相比，其分辨力的提高是极为明显的。

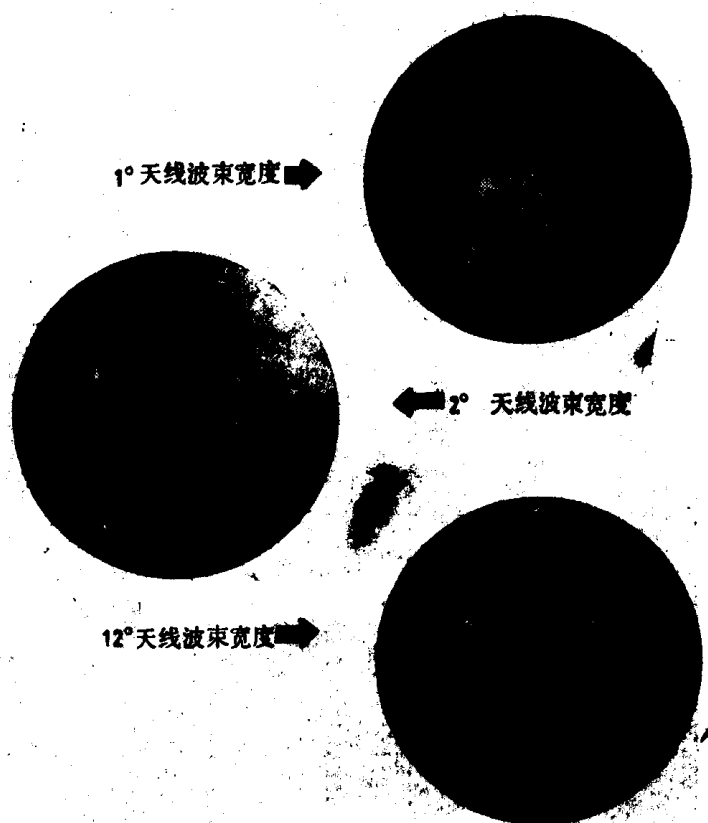


图 1-7 用不同分辨力的三部雷达所获取的同一地区的雷达图象
(取自 J. S. Hall, *Radar Aids to Navigation*, McGraw-Hill, 1947.)