

雷达手册

第一分册

[美] M.I. 斯科尔尼克 主编



国防工业出版社

雷 达 手 册

(第 一 分 册)

〔美〕 M.I. 斯科尔尼克 主编

谢 卓 译 张直中等 校

國 防 工 業 出 版 社

1 9 7 4

内 容 简 介

本《手册》系根据[美]M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书译出。

全《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。

《雷达手册》第一分册共有四章，即第一、二、三、四章。第一章 雷达概论；第二章 雷达距离估算；第三章 波形设计；第四章 雷达测量精度。

本《手册》可供所有从事雷达工程的工人、科技人员和大院校师生参考。

Radar Handbook
M. I. Skolnik
McGraw-Hill, Inc. 1970

雷 达 手 册

(第一分册)

【美】M. I. 斯科尔尼克 主编
谢 卓 译 张直中等 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

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

787×1092¹/₁₆ 印张9 207千字

1974年2月第一版 1974年2月第一次印刷 印数：0,001—10,000册

统一书号：15034·1349 定价：0.80元

出版者的话

为了适应我国电子工业迅速发展的形势，我们组织翻译了由〔美〕M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书，以帮助读者了解雷达方面的情况。

在原书中，编者试图包含雷达技术领域的各种主要问题。看来，本书的内容比较广泛，但不很深。它省略了一般雷达方面的书籍中通常有的数学推导和详细说明。其实，讨论的许多题目本身都可以写成单独的书籍。为了帮助读者深入研究，原书的每章都提供了许多参考文献。

本《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。第一分册包括雷达简介、雷达检测能力、波形设计；第二分册包括目标特性、气候影响、电磁兼容性；第三分册包括接收机、显示器、自动检测理论、数字信号处理；第四分册专论发射机；第五分册包括馈线、移相器；第六分册包括天线、天线罩；第七分册包括连续波、调频、脉冲压缩和动目标显示雷达；第八分册包括脉冲多卜勒、跟踪、测高和合成孔径雷达；第九分册包括固态、民用航海、卫星监视、天文和航天雷达；第十分册包括多基地、激光雷达，以及雷达信标和无源检测。这十个分册先后出版以后，另外再出版一部分合订本。

原书主编者在前言中对全书未能采用单一标准符号作了说明。他认为，由于当前没有一致通用的符号，如果本书采用某种单一的标准符号，就意味着武断地确定某一种符号是优先选用的，因此，原书允许各章的作者采用自己惯用的符号，只要对它作出确切的定义就行。例如，雷达方程这样一种被认为是标准的和常见的公式，在本《手册》的几个不同部分就写成稍有不同但又是等效的形式，用不同的符号来表示距离、功率、最小可检测信号等等。我们认为上述处理办法是可行的，因此，我们对译文全书的符号也没有统一。

虽然本书偏重于雷达系统方面，但除了对从事雷达系统方面的工程技术人员有用外，还可供其他所有从事雷达工程的有关人员参考。

虽然本《手册》篇幅较大，但在有关厂、所、院校的大力协同下，译校工作开展得比较顺利。在此，谨向为《雷达手册》一书的出版作了不少工作的单位和个人表示衷心感谢。

由于水平有限，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

目 录

第一章 雷达概论 (1)●	1-5
1.1 雷达描述	1-5
1.2 雷达方程	1-7
1.2.1 跟踪	1-9
1.2.2 立体搜索	1-9
1.2.3 干扰	1-9
1.2.4 杂波	1-10
1.3 雷达回波中可取得的信息	1-11
1.3.1 距离	1-11
1.3.2 相对速度	1-12
1.3.3 角方向	1-12
1.3.4 目标尺寸	1-12
1.3.5 形状	1-13
1.3.6 目标的其他信息	1-13
1.4 雷达频率	1-13
1.4.1 高频以下 (低于 3 兆赫)	1-14
1.4.2 高频 (3~30兆赫)	1-14
1.4.3 甚高频 (30~300兆赫)	1-15
1.4.4 超高频 (300~大约1000兆赫)	1-15
1.4.5 L波段 (1000~2000兆赫)	1-15
1.4.6 S波段 (2000~4000兆赫)	1-15
1.4.7 C波段 (4000~8000兆赫)	1-15
1.4.8 X波段 (8~12.5千兆赫)	1-15
1.4.9 K_u , K和 K_a 波段 (12.5~40千兆赫)	1-16
1.4.10 毫米波长	1-16
1.4.11 激光频率	1-16
1.5 美国雷达命名规范	1-16
参考文献	1-17
第二章 雷达距离估算 (2)	1-19
2.1 引言	1-19
2.1.1 准则	1-19
2.1.2 对距离估算的观点	1-19
2.1.3 历史记述	1-19
2.2 距离方程	1-20
2.2.1 雷达传播方程	1-20
2.2.2 最大距离方程	1-21
2.2.3 脉冲雷达方程	1-22
2.2.4 关于概率的说明	1-23

● 为了便于读者查对原书,在译文各章标题后的圆括号内用阿拉伯数字注明了相应的原书章次。——译注

2.2.5 自动检测情况下的距离方程	1-23
2.2.6 双站雷达方程	1-24
2.2.7 实用单位制方程式	1-24
2.3 距离诸因子的定义及计算	1-25
2.3.1 发射机功率及脉冲宽度	1-25
2.3.2 天线增益	1-26
2.3.3 天线波束宽度	1-27
2.3.4 目标截面积	1-27
2.3.5 波长(频率)	1-28
2.3.6 带宽及匹配系数	1-28
2.4 最小检测信噪比	1-30
2.4.1 信号积累	1-30
2.4.2 概率的计算	1-31
2.4.3 所需信噪比	1-32
2.4.4 检波规律	1-35
2.4.5 视觉检测曲线	1-38
2.4.6 其他检测方法	1-40
2.5 系统噪声温度	1-40
2.5.1 天线噪声温度	1-42
2.5.2 传输线噪声温度	1-43
2.5.3 接收机噪声温度	1-44
2.6 方向图传播因子	1-44
2.6.1 平面地面反射	1-46
2.6.2 粗糙表面反射系数	1-48
2.6.3 球面地面反射	1-49
2.6.4 过渡区	1-52
2.6.5 折射和威力图	1-54
2.7 损耗系数	1-56
2.7.1 天线方向图损耗	1-57
2.7.2 大气吸收损耗	1-58
2.7.3 丢失损耗	1-66
2.7.4 另外几种损耗	1-67
2.7.5 积累损耗及操作员损耗	1-68
2.7.6 系统衰退损耗	1-68
2.8 干扰及杂波	1-69
2.8.1 干扰	1-69
2.8.2 存在噪声干扰情况下的距离方程	1-69
2.8.3 杂波	1-70
2.8.4 杂波中的目标	1-70
2.9 尖头信号扫描比及累积概率	1-71
2.9.1 尖头信号扫描比与距离的关系	1-72
2.9.2 累积概率及操作员因子	1-73
2.10 距离估算的精确度	1-73
2.11 雷达距离估算步骤	1-75
参考文献	1-77
第三章 波形设计(3)	1-80

3.1 波形设计的考虑	1-80
3.2 信号和滤波器的表示法	1-81
3.2.1 实信号	1-81
3.2.2 傅里叶变换	1-81
3.2.3 信号的复数表示法	1-83
3.2.4 其他信号形式	1-85
3.2.5 线性滤波器	1-85
3.2.6 能量关系	1-86
3.3 模糊函数	1-86
3.3.1 简要推导	1-86
3.3.2 解释	1-87
3.3.3 模糊函数描述的信号特性	1-88
3.3.4 术语	1-89
3.3.5 惯例	1-89
3.3.6 模糊函数的基本特性	1-90
3.3.7 距离-速度模糊函数的一些形式	1-90
3.3.8 模糊函数的一般化和推广	1-92
3.4 波形分类	1-94
3.4.1 模糊函数类型	1-94
3.4.2 具有刀刃形模糊函数的信号	1-94
3.4.3 具有钉板形模糊函数的信号	1-99
3.4.4 具有围钉形模糊函数的信号	1-104
3.5 距离-速度模糊函数的特性	1-109
3.5.1 模糊函数的最大值	1-109
3.5.2 模糊函数的对称性	1-109
3.5.3 模糊函数的实部和虚部	1-109
3.5.4 模糊函数的变换	1-110
3.5.5 成为模糊函数的必要和充分条件	1-112
3.5.6 模糊函数的唯一性	1-112
3.5.7 二维变换	1-113
3.5.8 特征函数	1-113
3.5.9 $ \chi(\tau, \phi) ^2$ 的特性	1-114
3.6 抑制杂波的波形设计	1-116
3.6.1 杂波功率密度谱	1-116
3.6.2 作为各散射体回波期望和的杂波	1-117
3.6.3 用概率密度函数定义的密集杂波	1-118
3.6.4 Ω 函数	1-118
3.6.5 脉冲串的 Ω 函数	1-119
3.6.6 波形综合	1-120
3.7 符号表	1-121
参考文献	1-122
第四章 雷达测量精度 (3)	1-127
4.1 引言和定义	1-127
4.1.1 雷达参数测量的形式	1-127
4.1.2 精度准则	1-128
4.1.3 所论情况的概述	1-129

4.1.4 下面各节内容提要	1-130
4.2 雷达固有测量精度: 特例	1-130
4.2.1 距离、速度、幅度、相位和径向加速度	1-130
4.3 相加噪声情况下的一般公式	1-134
4.3.1 公式形成	1-134
4.3.2 C_{ij} 的一般表示式	1-135
4.3.3 极限的表示式	1-136
4.3.4 在具体情况下 G_0 和 G 所取的形式	1-137
4.4 对几个问题的说明	1-138
4.4.1 信噪比必须多大?	1-138
4.4.2 其它误差源	1-138
4.4.3 持续时间和带宽的定义	1-139
4.5 其它感兴趣的测量精度问题	1-139
4.5.1 在噪声中对噪声的测量	1-139
4.5.2 空间不均匀噪声	1-139
4.5.3 信号特征分析	1-139
参考文献	1-139

第一章 雷达概论

MERRILL I. SKOLNIK

1.1 雷达描述

雷达的概念是比较简单的,然而在许多情况下它的实际应用并不简单。它以辐射电磁能和检测从物体反射来的回波的存在及回波特性的方式进行工作。雷达是一种有源装置——它用自身控制的照射来探测目标及其特性。雷达的工作既不象辐射计那样依赖于由目标自身放射的能量,也不象光学照象机那样依赖于由非控制源反射回来的能量。雷达的两个主要特征是,它具有远距离探测目标和对目标进行较高精度定位的能力。由于二次世界大战中的军事需要促成了雷达的诞生。虽然雷达技术主要因军事应用而得到了发展,但它也在许多重要的民用事业中得到应用,比如船舶和飞机的导航就是典型的例子。

雷达原理已在几兆赫(高频)至紫外线(激光雷达)的频率内得到应用。这表示有大约 $10^9:1$ 的频率比范围。在这样宽的频率范围内,为实现雷达概念所应用的特定技术有着显著的区别,但是基本原理是不变的。

图 1-1 是一部简单雷达的方框图。发射机产生的雷达信号(通常为重复窄脉冲列)由天线发射到空间。天线收发开关使单个天线可兼作发射和接收之用。反射物或目标截获并反射一部分雷达信号;少量的信号沿雷达方向返回。一些返回信号或回波,由天线收集并由接收机检测。通过对回波能量的检测可发现目标的存在。通过对回波信号和发射信号的比较可获得有关目标的信息,诸如目标位置、大小、形状等,并判断目标是否相对于雷达作移动。对于大多数雷达而言,操作员可在阴极射线管显示器上观察到提取出来的信息。在有些应用中,例如武器控制,雷达输出信号不受人工干涉,绕过操作员直接驱动一个控制系统。

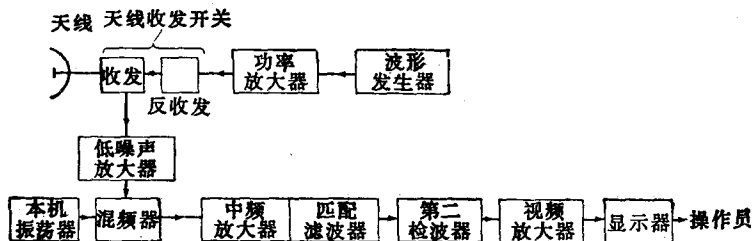


图 1-1 采用功率放大发射机和超外差接收机的雷达方框图

雷达发射的电磁信号形式取决于所需要的有关目标的信息。比如,用于飞机监视的脉冲雷达可产生重复的窄脉冲列,每一脉冲的宽度为几微秒,重复频率为几百赫。如果要求精确测距,那么,发射信号就应占一个宽频谱例如为一个窄脉冲。脉冲宽度越小,则频谱越宽。为了精确地测出动目标反射信号的多卜勒频移,信号波形必须是长持续期的,连续波多卜勒雷达就是一例。除了广泛应用的脉冲列外,还有包括调频连续波、调频或调相脉

冲及脉冲串在内的多种其它可能的波形。雷达理论为测量精度、模糊度、分辨力和杂波鉴别的特定要求规定了最佳波形。

一般地说,发射波形对探测并不重要,不过它必须包含有足够的能量以探测在最大距离上的最小目标,并且必须在实际上可供构成一个良好的接近理想的匹配滤波接收机。常用雷达方程(见1.2节)表明,雷达的作用距离与发射机功率的四次方根成正比。因此,用增大发射机功率的方法来增加作用距离将是昂贵的。

如何高效率地产生高功率很重要。发射机管子的寿命是有限的,在经几百至几万小时的使用期后必须置换。高功率雷达的部分操作费用耗费在运转发射机的电源功率上。图1-1所示的发射机结构是先产生低功率波形然后放大。功率放大器可以采用速调管、行波管、栅极控制管或正交场放大管。另一方面,许多雷达通过调制一只诸如磁控管这样的功率振荡器直接产生高功率信号。当要求雷达简单和机动性大时,可采用功率振荡器;而当要求高功率和(或)波形稳定(如用于动目标显示、脉冲多卜勒或精密测量)时,则可采用功率放大器。

一般地说,决定雷达性能的是平均功率而不是峰值功率(更正确地说是可投射到目标上的总能量)。雷达的发射平均功率,可以从象警察用测速计那样比一瓦小得多,直到象某些超远程雷达那样高达一兆瓦左右。探测飞机的地面监视雷达的平均功率一般约为几千瓦。一部典型的高功率雷达的峰值功率可能达到一兆瓦量级,并常因传输线及其它射频元件的击穿而受到限制。

发射机功率由天线集中为一个窄波束射入空间。雷达天线所特有的定向窄波束不仅使更多的能量集中到目标上,并且可根据能量在空间的位置来测定目标的方向。产生笔形波束来跟踪目标的天线具有的典型波束宽度为 1° 。对空监视雷达通常采用一种机械转动的反射面天线,其扇形波束水平方向窄,垂直方向宽。天线波束的扫描也可不用机械转动,而用相控阵以电的方法实现,从而避免机械运动的惯性。

天线的大小,部分地取决于使用的频率、运载工具和工作环境。频率越低,就越容易制造体积大的天线。在超高频波段上,一个大型天线的直径可达100呎或更大;而在较高的微波频率(X波段)上,直径超过10或20呎的天线就可以算是大的了。由于脉冲雷达的发射和接收不同时进行,因此单个天线可兼收发两种作用。天线收发开关是一种快速转换装置,用来保护接收机免受高功率发射信号的损害,并将接收到的微弱回波信号导入接收机而不是导入发射机。天线收发开关可以是气体放电器件或是固态器件。

天线接收到的信号功率与其有效收集面积成正比。天线增益越大,天线的收集面积也越大。接收机一般都是超外差式:它必须将所需的回波从始终存在的噪声和任何干扰信号中分离出来。接收机输入级通常要设计得使引入的噪声尽可能小,此级可以是参量放大器或量子放大器;然而,通常由于设计良好的隧道二极管、三极管和晶体管的噪声已足够低,因此它们的应用就比噪声系数更低但价格更昂贵的器件引人注目。在高噪声环境中,使用一个低噪声的接收机前端并不总是恰当的。在简单雷达中最广泛使用的输入级也许是混频器而省去射频级。接收机的中频要选择得便于构成匹配滤波器,并使中频级对整个噪声电平的影响减至最小。

匹配滤波器是接收机中专门被设计来得到最大输出信噪比的那一部分。雷达接收机并

不总设计有“理想”的匹配滤波器，但性能良好的雷达，其滤波器特性所产生的输出信噪比与匹配滤波器所能产生的没有显著差别。接收机的第二检波器用于消除中频载波而让调制包络通过。视频放大器将信号电平提高到便于提取包含在信号中的信息的程度。操作员可通过观察诸如平面位置显示器（PPI）或A型显示器那样的阴极射线管显示器来提取这些信息。平面位置显示器显示出有距离和方位两个座标的地图似的图像。它在监视雷达中得到普遍应用。雷达的定时信号用来产生脉冲列和测定回波时间，以达到测量距离的目的。利用其它基准信号测定天线指向可以决定角位置。在需要检测动目标的多卜勒频移的系统中，必须能在接收机上获得发射频率的数据。

图1-1方框图中的匹配滤波器有时被称为信号处理器。动目标显示雷达的延迟线对消器是信号处理器的又一实例。信号处理器可以在第二检波器之前或其后。数据处理器通常是一个数字装置。以往的信号处理器一般都是模拟的，但随着数字技术的发展，这一特点正在消失。

真实目标很少是孤立存在的，雷达还接收到来自周围不需要的散射体（如地面、海洋或雨点）的回波。这些不需要的回波称为杂波，它们严重地干扰对所需目标的检测。如果要检测的是一个动目标（如近地飞行的飞机）而杂波不移动，那末就能利用动目标所产生的多卜勒频移，除去不产生频移的不需要的固定回波。这就是动目标显示、脉冲多卜勒和连续波雷达的基础。

雷达信号的设计理论必须考虑噪声、杂波或其它干扰。以假设实验和以数学统计学来推导估算参数为基础的理论概念已应用于雷达，从而以提供对发射波形的最佳设计方法来达到各种预期目的。

1.2 雷 达 方 程

雷达方程可能是最有用的能简单地描述影响雷达性能诸因素的唯一方式，它根据雷达特性给出雷达的作用距离。一种给出接收信号功率 P_r 的雷达方程的形式是：

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_r \quad (1)$$

为了更好地表达所发生的物理过程，上式右侧写成三个因子的乘积。第一个因子是隔辐射功率为 P_t 瓦、天线增益为 G_t 的雷达距离 R 米处的功率密度。第二个因子的分子是以米表示的目标截面积，分母表示电磁辐射回波返回途径的散度，就如第一因子的分母表示向外辐射途径的散度一样。前两项的乘积表示返回雷达的每平方米的功率。天线的有效孔径面积 A_r 截获上述功率中的一部分，截获量由三个因子的积给出。如果雷达最大作用距离 $R_{\max}$ 定义为当接收到的功率 P_r 等于接收机最小可检测信号 $S_{\min}$ 时的作用距离，则雷达方程可以写为：

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \quad (2)$$

当同一天线兼作发射和接收用时，发射增益 G_t 和有效接收孔径 A_r 的关系式为 $G_t = 4\pi A_r / \lambda^2$ ，式中 λ 表示雷达电磁能量的波长。代入方程（2）则得出雷达方程的另外两种形式：

$$R_{\max}^4 = \frac{P_r G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \quad (3a)$$

$$R_{\max}^4 = \frac{P_r A_r^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} \quad (3b)$$

上面给出的雷达方程的例子可用于测距性能的粗略计算,但由于是简化式,故不能给出真实的数值。预计的作用距离往往太大。简化的雷达方程之所以不能精确预计实际雷达的作用距离,至少有两个主要原因:首先,方程不包括雷达中产生的各种损耗;其次,由于噪声决定了最小可探测信号,故后者具有统计性。因此,作用距离必须用统计值来说明。从简化的作用距离方程中得出有意义的预计距离的问题将在第二章中叙述。虽然在方程(3)中作用距离出现为四次幂,但在特定情况下也可以是三次幂、二次幂或一次幂,本节的面和其它章节中还要叙述这种情况。

雷达方程除可用于预计作用距离外,还可提供在雷达的各种性能参数中找到可能的折衷方案,而为初始的系统设计打下良好基础。

雷达方程中以 $S_{\min}$ 表示的最小可检测信号是一个统计量,必须用发现概率和虚警概率来描述。这在第二章中还要详细叙述。在这里只需指出,为了可靠地检测信号,必须在接收机进行检测判定的那点上使信号大于噪声(一般为 10~20 分贝)。最小可检测信号可表示为可靠检测所需的信噪比 (S/N) 乘以接收机噪声。接收机噪声是以相对于理想接收机所产生的热噪声来表示的。热噪声等于 kTB , 其中 k 为波耳兹曼常数, T 为温度, B 为接收机带宽。接收机噪声为热噪声乘以因子 F_n , F_n 为接收机噪声系数。接收机噪声系数在基准温度 $T_0 = 290^\circ\text{K}$ (接近室温) 时测量,因子 kT_0 之值为 4×10^{-21} 瓦/赫。雷达方程中 最小可检测信号可表示为:

$$S_{\min} = kT_0 B F_n \frac{S}{N} \quad (4)$$

因子 $T_0 F_n$ 有时可用系统噪声温度 T_s 代替。

上面以信号功率为基础讨论了雷达方程。虽然功率是由矩形脉冲组成的普通雷达波形的一种熟知特性,但对更复杂的波形来说,总信号能量常常是波形检测能力的一种更方便的量度。从理论上来看更是如此。在以统计判决理论为基础的理论分析中,信号能量与噪声能量之比(记作 E/N_0) 是一个比信噪比(功率)更基本的参数。不管接收波形的形状怎样,只要接收机设计为一个匹配滤波器,那末匹配滤波器输出端上的信噪比(功率)峰值就等于 $2E/N_0$ 。

对于宽度为 τ 的矩形脉冲,信号功率为 E/τ , 噪声功率为 $N_0 B$, 其中 E = 信号能量, N_0 = 噪声能量或单位带宽的噪声功率(假定噪声与频率无关,即所谓白噪声), B = 接收机带宽。将这些代入后, $S_{\min}$ 变为 $kT_0 F_n (E/N_0)/\tau$ 。代入方程(2)得:

$$R_{\max}^4 = \frac{E_r G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 kT_0 F_n (E/N_0)} \quad (5)$$

式中 $E_r = P_r \tau$ 为发射波形包含的能量。虽然方程(5)假设的是矩形脉冲的情况,但只要 E_r 解释为发射波形中包含的能量,以及噪声系数为 F_n 的接收机设计为一个匹配滤波器,那么此方程可适用于任何波形。在某些已发表的雷达检测理论的结论中,发现概率和虚警概率用 S/N 而不用 E/N_0 表示。当这些结论假定为在最佳(匹配滤波器)处理条件下取得时,

雷达方程中所需的 E/N_0 值可从已发表的 S/N 结论或可见度系数中获得, 如第二章所述。

雷达方程可根据具体应用化为各种形式, 下面列举数例。

1.2.1 跟踪 在这种情况下, 假定雷达在时间 t_0 期间连续跟踪或“探照”目标。方程 (5) 作此用时, 跟踪或“探照”雷达方程为:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{av}} t_0 G_r A_r \sigma}{4\pi k T_0 F_n (E/N_0)} \quad (6)$$

式中 $P_{\text{av}} t_0 = E_{t_0}$ 。因此, 当跟踪雷达必须“看”远的距离时, 它必须具有高的平均功率, 照射目标的时间要长, 并且其天线必须具有大的电尺寸 (G_r) 和物理尺寸 (A_r)。频率没有以显函数引入。由于小型天线的机械运动较大型天线容易, 因此跟踪雷达通常采用较高的频率, 在这样的频率上, 小孔径可获得高增益和足够大的 $G_r A_r$ 乘积。

雷达方程是以检测能力为基础的。跟踪雷达还必须设计成具有良好的角精度。如第四章所述, 要获得良好的角精度须具有窄的波束宽度 (大的 G_r 值) 和高的 E/N_0 (大的 A_r 值)。因此, 大的 $G_r A_r$ 乘积与良好的跟踪精度和良好的检测能力是一致的。

1.2.2 立体搜索 假设雷达必须在时间 t_s 内完成对立体角 Ω 的角体积的搜索。如果天线波束占有 Ω_0 的立体角, 则天线增益约为 $4\pi/\Omega_0$ 。如果天线波束在其对着的方向上停留的时间为 t_0 , 则总的扫描时间为 $t_s = t_0 \Omega / \Omega_0$ 。将这些表达式代入方程 (5), 并注意到 $E_t = P_{\text{av}} t_0$, 则得:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{av}} A_r \sigma}{4\pi k T_0 F_n (E/N_0)} \frac{t_s}{\Omega} \quad (7)$$

因此, 对于立体搜索雷达而言, 与获得最大作用距离有关的两个重要参数是发射机的平均功率和天线的孔径。立体扫描时间的任何减少, 或搜索空间的任何增加, 都必须相应增大 $P_{\text{av}} A_r$ 的乘积。注意, 频率没有以显函数引入。

1.2.3 干扰 当雷达信号的检测受到诸如人为噪声干扰机那样的外界噪声源, 而不是接收机噪声的限制时, 决定测距性能的重要参数同上述的情况略有区别。单位带宽的接收机噪声功率将由干扰机而不是由接收机噪声系数所决定。当雷达进行立体搜索而干扰功率从某特定方向通过旁瓣进入时, 最大作用距离可表示为:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{av}}}{g_s} \frac{t_s}{\Omega} \frac{\sigma}{E/N_0} \frac{R_j^2 B_j}{P_j G_j} \quad (8)$$

式中 g_s = 相对于主波束的旁瓣电平 (小于 1);

R_j = 干扰机距离;

B_j = 干扰机带宽;

P_j = 干扰机功率;

G_j = 干扰机天线增益。

而 E/N_0 则为可靠检测所需的信号能量与单位带宽噪声功率之比。平均功率是个重要参数, 天线旁瓣也很重要。这一方程是将进入雷达接收天线旁瓣的单位带宽干扰噪声功率代入方程 (7) 中的 $kT_0 F_n$ 导出的。它只能在正常接收机噪声与干扰噪声相比可略去不计时使用。

当雷达探照一个有干扰机的目标 (这种工作方式有时被称为烧穿) 时, 其作用距离为:

$$R_{\max}^2 = \frac{P_{av}^2 G_t}{4\pi} \frac{\sigma}{E/N_0} \frac{B_l}{P_l G_l} \quad (9)$$

平均功率、观察时间和发射天线的增益是重要的雷达参数。上式中最大作用距离为平方而不象在雷达方程的其它表达式中那样高至四次幂。注意,在上述两种干扰的例子中天线孔径面积都没有以显函数引入。大孔径能收集较多的信号,但它也收集较多的干扰噪声。由于假设干扰噪声比接收机噪声大得多,故没有引入接收机噪声系数。因此,在噪声环境中,设计有极高灵敏度的接收机不一定有好处。上述两例为简化的干扰雷达方程,还有其它可能的形式。

1.2.4 杂波 当雷达必须探测海面或地面上的一个小目标时,不希望有的干扰杂波会使检测目标的能力受到严重限制。当杂波功率超过接收机噪声功率时,距离方程简化为信号-杂波比的表达式。这一比率等于目标截面积与杂波截面积之比。如果杂波的分布基本上是均匀的,那末杂波将由雷达分辨单元的照射面积决定。地面或海面杂波可用杂波与雷达的照射面积之比表示。这种归一化的杂波系数记作 σ^0 。

考虑这种情况:脉冲雷达以低的入射余角(贴地角)观察目标与杂波反射体。如假定是单个脉冲检测,则信号-杂波比为

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma}{\sigma^0 R \theta_b c (\tau/2) \sec \phi} \quad (10)$$

或

$$R_{\max} = \frac{\sigma}{(S/C)_{\min} \sigma^0 \theta_b c (\tau/2) \sec \phi}$$

式中 R = 至杂波反射体的距离;

θ_b = 方位波束宽度;

c = 传播速度;

τ = 脉冲宽度;

ϕ = 入射余角。

假定杂波反射体面积在方位上由天线波束宽度决定,在距离座标上由脉冲宽度决定。比值 S/C 所起的作用类似于热噪声情况时的比值 E/N_0 。为了可靠检测,比值 S/C 必须足够大。杂波的统计性质一般不同于热噪声的统计性质,但当无法得到其它数据时,作为初步假设,可把所需的 E/N_0 值当作所需的 S/C 值。上式与距离成线性关系而不是四次方关系这一点很重要。因此,为了能检测杂波中的目标,雷达波束应是窄的,脉冲宽度也应是窄的。如不存在上述假定,则检测杂波中目标所需的重要雷达参数可能是不同的。如果每次扫描接收到 n 个回波,而杂波是逐个脉冲相关的,则不会象以热噪声(而不是杂波)作为限制时那样使比值 S/C 有所增大。

当角度很大时(ϕ 接近 90°),杂波反射体完全由 Ω_b 立体角的雷达波束而不是由脉冲宽度所决定,这时的信号-杂波比成为:

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma}{\sigma^0 R^2 \Omega_b / \sin \phi} \quad (11)$$

或

$$R_{\max}^2 = \frac{\sigma G_t \sin \phi}{\sigma^0 4\pi (S/C)_{\min}}$$

如果杂波是雨点或其它在雷达分辨单元内均匀分布的气象粒子,并设 η 为单位照射体积的

杂波截面积, 则,

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma}{\eta R^2 \Omega_b c \tau / 2} \quad (12)$$

或

$$R_{\max}^2 = \frac{\sigma G_r}{\eta 4 \pi (c \tau / 2) (S/C)_{\min}}$$

又象前面所述, 想要尽量减小杂波, 天线就应具有高增益(窄波束), 而脉冲宽度应该小。

1.3 雷达回波中可取得的信息

虽然雷达 (radar) 这个名称来自无线电探测和测距 (radio detection and ranging), 但是它所能提供的有关目标的信息超过了它名称的含义。探测目标的含义就是发现目标的存在。探测虽然可与信息的提取过程分开考虑, 但只想知道目标是否存在而不对其空间位置和特性感兴趣, 这种情况是不常见的。因此, 提取有用的目标信息是雷达工作的重要组成部分。

能够把探测与提取信息分开考虑并不意味着这二者之间没有关系。提取信息通常要有匹配滤波器或其等效装置, 以使信息得到最佳处理。有关目标信息预先知道的越多, 则探测效率越高。例如, 如果目标的位置是已知的, 那末天线就可以指向恰当的方向, 而能量或时间就不会浪费在空间搜索上。又如, 如果相对速度是已知的, 那末接收机就可预调到正确的接收频率上, 而不必在可能出现多卜勒频移的整个频段上搜索。一般说来, 飞机速度产生的多卜勒频移与雷达波形的频谱宽度相比是很小的, 因此通常不必增大接收机带宽。然而, 诸如卫星一类的外空目标产生的多卜勒频移, 可能大到足以使接收到的信号位于接收机频段之外。用连续波雷达观察低速目标时, 多卜勒频移也是重要的。

当多卜勒频移很大且未知时, 接收机通带必须加宽以容纳可能有的多卜勒频移范围。增大带宽会使滤波器失配和灵敏度降低。为避免损失灵敏度, 可以使用与接收信号匹配并能调谐找出正确频率的可调滤波器。但这样做的缺点是需要更多的时间, 因此效率低, 除非信号连续存在, 并且搜索时间长短无关紧要。另一种更有效的检测未知其多卜勒频移的信号的方法是使用一组滤波器, 其中每个滤波器分别与不同数值的未知频率相匹配, 以此来覆盖整个不确定的频率范围。当多卜勒通带中某处出现信号时, 有一个滤波器的输出将比其余的大。这样不但进行了有效的检测, 并且得出了未知的多卜勒频移。只要为未知参数的各自独立值加添匹配滤波器, 上述方法就可以推广来求出其它未知参数(加速度、角度、极化)。(角度参数的一组匹配滤波器将由一个覆盖所需立体角的多波束天线和与每个独立波束连接的单独接收机构成。)增加匹配滤波器会使虚警概率增加, 但可通过稍微增大接收机门限电平的方法来加以弥补。

1.3.1 距离 通过测量雷达信号传播到目标并返回来的时间来测定目标的距离, 可能是普通雷达的突出的、最重要的特性。比较简单的地面雷达仅因视界的限制(一般约为200~300哩)很容易地以几分之一哩的精度测出飞机的距离, 雷达也已充分显示了它以几乎同样的精度测出行星距离的能力。在较适中的距离上, 雷达的测距精度可达几吋。

用来测距的常用雷达波形是窄脉冲。脉冲越窄, 则测距精度越高。要得到高能量的窄脉冲并不总是那么容易的, 因为这需要高的峰值功率。另一种方法是采用脉冲压缩波形,

它是将宽脉冲调制使其频谱宽度增大。在接收时,脉冲内的调制被解调,以便将其压缩到原来的窄脉冲宽度。通常是对频率或者相位进行调制。当发射机受峰值功率的限制时,采用脉冲压缩技术比采用窄脉冲能获得更大的发射能量。如果两者的带宽可相比拟,则脉冲压缩技术几乎可以完全保持窄脉冲所具有的分辨力。当不需考虑目标的距离分辨力时(如只有单个目标存在时),一个适当调频的或者具有适当边带的连续波波型能得到非常精确的距离测量。连续波测距法已广泛地用于飞机无线电高度计和测量仪器。

1.3.2 相对速度 对距离的连续测量可获得距离对时间的变化率,或相对速度。但动目标产生的多卜勒频移也能提供其相对速度。有可能采用多卜勒测量时,它通常比连续测距的测量法优先采用,因为它能够在较短的时间内得到更为精确的测量。任何对速度的测量都需要一定的时间。假定信噪比(更确切地说就是信号能量与单位带宽的噪声功率之比)保持不变,则测量时间越长,精度就越高。虽然多卜勒频移在某些应用中是用来测量相对速度(例如警察测速计和卫星探测雷达等用途),但它或许更广泛地作为从固定杂波中鉴别动目标的基础,例如动目标显示(MTI),机载动目标显示(AMTI),脉冲多卜勒和连续波雷达等方面。

1.3.3 角方向 目标的方向是通过测量回波的波前到达雷达的角度来确定的。一般使用一个方向性天线,即具有窄辐射方向图的天线来进行这种测量。当接收信号最大时,天线所指的方向就是目标所在的方向。这种或其它测量角方向的方法都假定大气不扰乱无线电波的直线传播。

入射波前的方向也可通过测量两个分离的天线所接收的相位差来决定,而相位差则取决于入射波前与两个天线连线的夹角。两个天线分开越远,则精度越高。然而如果天线分得太开,就会在两个天线的合成方向图中出现大小等于主波束的栅瓣,因而产生模糊的测量结果。比幅单脉冲雷达在每个平面上使用两个天线(或用两个馈源照射单个反射体)来进行角度测量,但其两个天线的距离小于一个波长,从而避免了栅瓣造成的模糊。比相单脉冲雷达的两个天线相距多个波长,但各个天线的方向性抑制了栅瓣。当两个天线相距足够远而栅瓣不受抑制时,这种结构称为干涉仪。在许多应用场合下,干涉仪的模糊是容许的,但解决这个问题的方法也是有的。

如果把雷达测量定义为发射信号和回波信号的比较,那么通常对入射角或目标方向的测量严格地说来就不能算作雷达测量,因为它只利用了单程。尽管如此,角度测量仍然是几乎所有雷达所进行工作的不可分割的一部分。

1.3.4 目标尺寸 目标回波的幅度同目标尺寸是有关的,但这种关系并不总是很简单的,也不能作为对目标尺寸的可靠的定量测量。幅度的测量一般并不费力,时常可用以获取目标的粗略定性尺寸。由于大多数雷达目标的回波随观察角的微小变化而快速起伏,故凭单个回波不能很好地估计目标尺寸,而必须求得一个足够长时间内的平均值。

如果雷达能够分辨的尺寸远小于目标的尺寸,那末就能够测定目标的尺寸。由于很多目标的尺寸是几十呎,因此,如果采用这种技术来测量目标尺寸,雷达的分辨力就必须达到几呎或更小。在距离坐标上,这一数量级的距离分辨力是能够获得的,虽然有时(特别是当距离很远时)要做到这点并不容易。当采用普通天线,在一般的雷达作用距离下,角分辨力就要比这差得多。在适当的场合,合成孔径天线(见第三十章)可用以提高角分辨

力, 这一点特别适用于飞机对地面测绘。

另外一种推断目标大小的方法是将目标回波的幅度作为频率的函数来测量。对于固定的观察角来说, 随频率变化的起伏速率同目标尺寸有关。另外, 在频率固定的情况下, 随观察角变化的起伏速率也能够给出目标尺寸的量度。

1.3.5 形状 如果目标由平面波照射, 并且测得了各个方向上的散射场, 那末就可求出在目标上激励的电流分布, 也就得到了目标的形状。实际上, 完全测定散射场是很难做到的。对一定区域的散射场进行测量可获得一些有关目标形状的信息。测量的面积越大, 结果就越准确。为了得到完整的信息, 散射场的振幅和相位都应该测出。

合成孔径雷达一般都提供形状信息。这种雷达要求目标固定或以固定速度运动, 而雷达则相对于目标运动。当目标相对于雷达旋转时, 可以得到等效的角分辨力。目标的旋转运动使目标的各部分产生不同的多卜勒频移, 因为各点的运动速度是不同的。如果有足够的多卜勒分辨力, 则可能分清目标的各个部分。这种方法与良好的距离分辨力相结合就能得到目标的二维图象。为得到比例正确的确切图象, 物体的旋转速率必须是已知的; 如果是未知的, 那末就不可能确定一个适当的角座标比例系数, 也就不可能用正确的纵横比来构成图象。

将各种极化的散射场进行比较, 就得到了目标非对称性的量度。用正交极化测量使我们可以根据不同的纵横比 (比如是杆状物还是球状物; 是飞机还是雨点) 来区分目标。

表面粗糙度是目标形状的一种性质。当回波来自地面或海洋时, 这一点更使人感兴趣。粗糙的目标对入射的电磁能量产生漫射, 而光滑的目标则像镜子似地散射。通过观察后向散射信号之特性及其与入射角的函数关系, 就可判别目标表面是否光滑。表面粗糙度是个相对量度, 它随照射信号的波长而不同。在某一波长时显得粗糙的表面, 当照射它的辐射波波长增大时, 就可能不再显得粗糙。因此, 判定表面粗糙度的另一种方法是改变照射的频率, 并观察反射和漫射间的转变过程。

1.3.6 目标的其他信息 目标的振动或飞机螺旋桨的旋转使雷达回波产生调制, 并可通过对回波信号的频谱分析将其检测出来。在特殊情况下, 仔细地测量回波信号, 可以测得散射表面的反射系数, 由此可推断散射表面的介质特性。电离或等离子区的散射 (例如发生于电离层、太阳或再入大气层的宇宙飞船) 能提供有关电离目标特殊性质的信息。

1.4 雷 达 频 率

从本质上说, 雷达频率没有根本的限制。任何装置, 不论其频率如何, 只要是通过辐射电磁能量和利用从目标散射回来的回波来进行对目标的探测和定位, 都属雷达工作的范畴。雷达已采用的工作波长是从大于 100 米 (短波) 至小于 10^{-7} 米 (紫外线)。任何频率的雷达的基本原理都是相同的, 但具体的实现方法却大不相同。实际上, 大多数雷达都工作在微波频率范围, 但也有许多值得注意的例外。

常用的雷达波段有一套字母代号, 其具体情况可参看表 1-1。有些原始的编码代号 (P 、 L 、 S 、 X 和 K) 是二次世界大战期间为了保密而采用的。后来虽不再需要保密, 但这些代号仍继续沿用。随着新波段的开辟又增加了另一些代号 (C 、 K_u 和 K_a), 而有一些代号则很少使用 (P 和 K)。曾经企图用字母代号来划分整个微波频率的频谱, 并将字母代