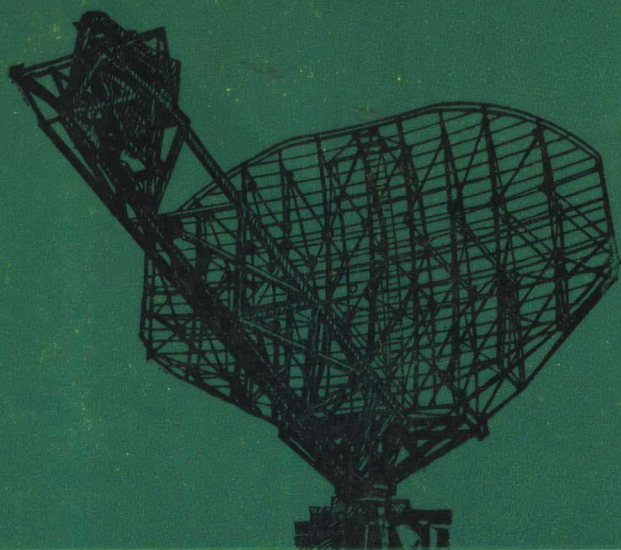
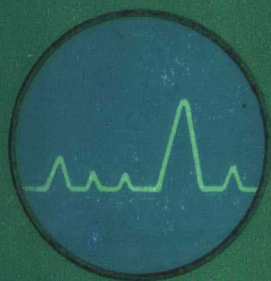


〔美〕伊利·布鲁克纳 主编

薛 锋 李鹏飞 施德骥 韦家甫 李盛沐 胡桂兰 译
张直中 黄松浦 方能航 毛仁麟 董士嘉 倪树新 等校



雷达技术



国防工业出版社

雷 达 技 术

〔美〕 伊利·布鲁克纳 主编

薛 锋 李鹏飞 施德骥 韦家甫 李盛沐 胡桂兰 译
张直中 黄松浦 方能航 毛仁麟 董士嘉 倪树新 等校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系根据〔美〕伊利·布鲁克纳主编的《雷达技术》一书译出的。共有二十七章，分成六篇。第一篇雷达系统基础；第二篇信号波形的设计与处理；第三篇传播效应；第四篇合成孔径雷达技术；第五篇雷达系统和部件；第六篇专题论述；附录：不通过实际实验求探测性能的方法。

本书内容比较广泛、新颖，在美国深受广大读者欢迎。

本书可供我国从事雷达研制的工程师和广大工程技术人员、管理人员、使用维护人员以及大专院校有关专业的师生参考。

RADAR TECHNOLOGY
ELI H. BROOKNER
ARTECH HOUSE 1977

雷 达 技 术

〔美〕伊利·布鲁克纳 主编

薛 峰 李鹏飞 施德强 韦家甫 李盛沐 胡桂兰 译
张直中 黄松浦 方能航 毛仁麟 董士嘉 倪树新 等校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 35³/₈ 833千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—2,540册

统一书号：15034·2684 定价：4.35元

译者的话

雷达自问世以来,已经四十多年了。由于雷达在国防、民用事业和科学研究方面的应用日益广泛,地位和作用越来越突出。因此,世界各国对雷达的研制、生产和使用都相当重视,不惜投入大量的人力、物力来发展雷达技术。至今业已建造了数万部雷达,在国际上已出现了很大的雷达市场。随着雷达新技术的发展,特别是数字技术和计算机在雷达中的广泛应用,引起雷达技术发生了重大的变化。因此,高度重视现代雷达技术的研制和发展,迅速把我国的雷达搞上去,是摆在我们面前的一项严重的任务。

为了适应现代雷达技术迅速发展的形势,我们翻译了由〔美〕伊利·布鲁克纳主编的《雷达技术》一书,以供广大读者了解现代雷达技术。

原书是在四本一套的雷达讲座丛书(《现代雷达理论》、《现代雷达技术》、《现代雷达技术、元件和系统》和《雷达系统和元件》)的基础上经过编者广泛修订、补充、综合编写而成的。全书共有二十七章,分成六篇。第一篇雷达系统基础,包括雷达发展简史、雷达设计基础、检测和测量、累积发现概率、雷达设计的基本观点、雷达设计中应考虑的一些问题、雷达系统研制中容易忽视的问题、雷达系统的现状与发展趋势;第二篇信号波形的设计与处理,包括波形的选择与处理、大时宽-带宽的雷达信号、快速傅里叶变换、线性调频信号的处理、雷达的匹配滤波、雷达系统用的声表面波器件、1千兆赫2,000,000:1脉冲压缩雷达的设计思想、信号波形设计与处理技术和方法的现状与发展趋势;第三篇传播效应,包括电离层对脉冲畸变和法拉第旋转的限制、激光雷达的大气效应、传播效应的研究现状与发展趋势;第四篇合成孔径雷达技术,包括合成孔径的基本原理、合成孔径雷达注光测绘仪、合成孔径雷达系统和技术的现状与发展趋势;第五篇雷达系统和元件,包括微波管发展简史、L波段固态相控阵雷达技术、机载固态雷达技术、相控阵天线、线性注管、正交场微波管的类型及其应用、雷达系统和元件的现状与发展趋势;第六篇专题论述,包括激光雷达理论与技术、跟踪和平滑、卡尔曼滤波器、脉冲雷达发射机的频谱控制、专题的现状与发展趋势;以及附录:不通过实际试验求探测性能的方法。

本书内容比较广泛、新颖,在美国深受广大读者欢迎。

本书第一篇(第一章至第六章)由薛锋译、黄松浦校;第二篇(第七章至第十三章)由李鹏飞译、张直中、郑美鸳、董士嘉、杨乃恒校;第三篇(第十四章和第十五章)由施德骥译、丁燮华、倪树新校;第四篇(第十六章至第十八章)由韦家甫译、方能航校;第五篇(第十九章至第二十三章)由李盛沐译、毛仁麟校;第六篇(第二十四章至第二十七章)分别由胡桂兰、施德骥、韦家甫、李盛沐译,由倪树新、苗兴国、曾俭恭校,附录由施德骥译、方能航校。在译审中对原书中所发现的错误和不妥之处作了更正或说明,个别地方还作了适当的删除。在审稿过程中曾得到了丁燮华等同志的大力支持,在此谨表示衷心感谢。

由于水平所限,加之时间仓卒,书中的缺点和错误之处在所难免,希望读者批评指正。

译者

目 录

绪 言	1
第一篇 雷达系统基础	6
第一章 雷达设计基础	布鲁克纳 7
第二章 检测和测量	巴顿 94
第三章 累积发现概率	布鲁克纳 113
第四章 雷达设计的基本观点	巴顿 134
第五章 雷达设计中应考虑的一些问题	施雷德 147
第六章 雷达系统研制中容易忽视的问题	福勒 152
雷达系统的现状与发展趋势	161
第二篇 信号波形的设计与处理	163
第七章 波形的选择与处理	辛斯基 164
第八章 大时宽带宽雷达信号	库克 199
第九章 快速傅里叶变换	希茨 209
第十章 线性调频信号的处理	珀迪 221
第十一章 雷达的匹配滤波	佩里 马丁森 232
第十二章 雷达系统用的声表面波器件	沃利 245
第十三章 1 千兆赫 2,000,000:1 脉冲压缩雷达的设计思想	
..... 哈格蒂 米汉 奥利里	251
信号波形设计与处理技术和方法的现状与发展趋势	260
第三篇 传播效应	286
第十四章 电离层对脉冲畸变和法拉第旋转的限制	布鲁克纳 287
第十五章 激光雷达的大气效应	布鲁克纳 303
传播效应的研究现状与发展趋势	324
第四篇 合成孔径雷达技术	325
第十六章 合成孔径的基本原理	柯蒂斯 326
第十七章 高分辨力雷达的基本原理 (合成孔径与脉冲压缩)	科瓦利 336
第十八章 合成孔径雷达注光测绘仪	布鲁克纳 351
合成孔径雷达系统和技术的现状与今后发展趋势	365
第五篇 雷达系统和部件	371
第十九章 L 波段固态相控阵雷达概述	多德森 373
第二十章 机载固态雷达技术	哈韦尔 387
第二十一章 相控阵天线概论	尼特尔 405
第二十二章 线性注管	斯塔普兰斯 423
第二十三章 正交场微波管的类型及其应用	史密斯 440
雷达系统和部件的现状与发展趋势	451
第六篇 专题论述	467
第二十四章 激光雷达理论与技术	杰拉林 468
第二十五章 跟踪和平滑	莫里森 502
第二十六章 卡尔曼滤波器	希茨 517
第二十七章 脉冲雷达发射机的频谱控制	韦尔 528
专题的现状与发展趋势	535
附录 不通过实际试验求探测性能的方法	537

绪 言

本书系为满足不同经历的工程师们的需要而编写的。对象包括：从事雷达技术研究工作不久的工程师；从事雷达某一方面专题研究（如发射机或接收机方面）而又希望通晓雷达其他方面技术的工程师；希望了解数字逻辑电路、数字存储器（只读存储器、可编程序只读存储器、可改写只读存储器、电抹除只读存储器、电子束寻址存储器、磁泡存储器和约瑟夫逊结存储器）、声表面波器件（用作脉冲压缩的延迟线、谐振器滤波器、振荡器、傅里叶变换系统、延迟线、带通滤波器、缓冲器、脉冲串波形处理器和多普勒滤波器组）、声电器件、电荷转移器件、电荷耦合器件、屏斗式电荷耦合器件（这三者都可用作脉冲压缩装置、带通滤波器、缓冲器、傅里叶变换装置和脉冲多普勒滤波器）、微处理器、微型计算机、圆顶半球扫描相控阵天线、固态技术、电子管技术和光纤技术等方面最近发展情况的有经验的系统工程师；希望更详细地了解诸如激光理论与技术等其他雷达方面知识的有经验的系统工程师；希望更多地学到有关雷达方面技术的专家（如希望更多地学到用于线性调频脉冲压缩的阶跃变换算法的信号处理工程师）；希望得到一组方便和广范围的设计曲线（见第一章）或详细而简单的探测计算曲线及方法（见第二章、第三章和附录）的设计工程师；希望了解目前使用中的许多种雷达技术参数（这些雷达参数在第一章表中列出，大多数雷达都有照片并注有说明）的工程师和管理人员。本书内容通俗易懂。

全书分成六篇。第一篇雷达系统基础；第二篇信号波形的设计与处理；第三篇传播效应；第四篇合成孔径雷达技术；第五篇雷达系统和元件；第六篇专题论述，例如激光雷达、跟踪和平滑、卡尔曼滤波器、脉冲雷达发射机频谱控制和光纤技术。下面分别详细介绍本书各篇、各章的内容。

第一篇 雷达系统基础

导言

介绍雷达发展简史

第一章 雷达设计基础

讨论基本雷达系统设计的综合考虑，例如：频率选择、扫描类型选择（机械扫描、电子扫描或机电混合扫描、二坐标或三坐标扫描器、V型波束或叠层波束扫描）、波形、极化、信号处理（动目标显示或脉冲多普勒）和发射机（采用电子管或固态器件）。列表概括了分别由美国、苏联、法国、荷兰和英国制造的96部雷达的参数，这些雷达包括：二坐标监视和搜索雷达、三坐标雷达（叠层波束和V型波束）、测高雷达、机电扫描雷达、全电子相控阵雷达、频率扫描雷达、混合扫描雷达和跟踪雷达。这些雷达几乎所有都有照片。本章还叙述了低噪声接收机和功率型俘获二极管、崩越二极管和场效应晶体管的技术发展水平，并且给出了广范围的方便的环境设计曲线（海面杂波、地面杂波、雨杂波、大气层衰减和大气温度）。

第二章 检测和测量

本章简明扼要地介绍了检测和测量的最主要因素。有关检测方面的内容包括理想的检测器、视频积累损耗、目标起伏损耗、重叠损耗、分集增益、确定分集取样数目的方程、波束形状的损耗和虚警关系。目标估算方面的内容包括理想的估算、单脉冲跟踪、搜索、圆锥扫描和偏轴的估算；角噪声误差和距离噪声误差；回波起伏、目标闪烁和多径误差。

第三章 累积发现概率

本章指出了在利用累积发现概率准则时，按单个脉冲检测准则会对雷达功率和远距离干扰机功率分别造成 14 分贝和 8 分贝过高估计的误差，并以清楚的物理概念对这两种检测类型间的差别作了详细的说明。为了便于计算累积发现概率，本章还给出了简单的曲线和方程式（包括累积发现概率的距离方程）。同时，也指出和解释了实际上采用不同步而假设同步条件时，可能对要求的单个脉冲检测信噪比低估 4 分贝。

第四章 雷达设计的基本观点

本章作者巴顿第一次阐述了当今世界的雷达设计现状，这对每一个雷达设计师来说都是绝对需要的。本章给出了在杂波和主瓣或旁瓣有一定干扰的条件下，跟踪与搜索雷达的基本方程。同时也给出了在离散点、面扩展和体扩展杂乱回波条件下，有一定杂乱回波的雷达基本方程。

第五章 雷达设计中应考虑的一些问题

本章提出了雷达设计制造者必须避免的容易忽视的问题（如集体设计，从失败中吸取教训以及不了解用户的需要等），并举例说明了负分贝噪声图谱的实际情况。

第六章 雷达系统研制中容易忽视的问题

本章论及了用户必须避免的容易忽视的问题。以实际例证介绍了影响国防部系统采购的福勒六法则。例如福勒第五法则——书本解释不了的任何战争进行方式、系统分析或研究的法则，恰恰是有价值的法则，或许它是有威胁性的（因为计算机的缘故）。

第二篇 信号波形的设计与处理

第七章 波形的选择与处理

本章首次简述了经典的模糊度函数。有关这一函数的知识对设计大时宽-带宽波形是必不可少的，这里用物理概念而不用数学方式加以阐述。

第八章 大时宽-带宽的雷达信号

本章讨论了大时宽-带宽波形的优缺点。介绍了几种取样的大时宽-带宽积波形，并引进了匹配滤波器概念。

第九章 快速傅里叶变换

作者对快速傅里叶变换算法作了十分清楚的叙述，第一次对快速傅里叶变换的精巧流水线硬件做了简明的解释。

第十章 线性调频信号的处理

本章介绍最常用的大时宽-带宽积波形（线性调频波形）的几种模拟技术和数字技术的目前发展水平。

第十一章 雷达的匹配滤波

叙述一种处理大时宽-带宽积的线性调频波形的新颖而有效的技术。介绍了在条带测绘合成孔径处理方面的应用。

第十二章 雷达系统用的声表面波器件

本章评述了声表面波器件的目前发展水平。

第十三章 1 千兆赫 2,000,000:1 脉冲压缩雷达

本章叙述了压缩比为 2,000,000:1 的线性调频波形发生器和处理器, 以及校正目标速度-时间压缩的技术。

信号波形设计与处理技术及其方法的现状与今后发展趋势

本节阐述的内容包括有关新出现的威诺格雷特 (Winograd) 超快速傅里叶变换算法的最新成果; 诸如随机存取存储器 (RAM)、只读存储器 (ROM)、可编程只读存储器 (PROM)、可改写只读存储器 (EAROM)、电抹除只读存储器 (EEROM)、电可编程只读存储器、电荷耦合器件 (CCD)、电子束寻址存储器 (EBAM) 以及约瑟夫逊结存储器; 逻辑装置 (诸如单片电荷耦合器件蝶形运算、千兆赫级砷化镓金属半导体场效应晶体管和电子转移器件的逻辑装置); 高速模/数转换; 微处理机和微型计算机; 新型声表面波器件的应用, 如用于连续可变延迟线、动目标显示处理机 (相干和非相干)、延迟线晶体振荡器、带通滤波器、可变线性调频波形发生器和处理器、傅里叶变换分析器、循环存储滤波器、高Q谐振发生器和滤波器以及脉冲串波形处理器; 声电器件, 如卷积器、存储相关器、积分卷积器、脉冲串波形处理器 (这些器件具有处理 100 毫秒、100 兆赫任意形状的信号的能力), 以及电荷耦合器件/存储相关器高速缓冲器; 还介绍了模拟电荷转移器件、电荷耦合器件和庖斗式电荷耦合器件, 讨论了它们的技术和应用 (如用作匹配滤波器处理器、带通滤波器和脉冲多普勒处理器等)。

第三篇 传播效应

第十四章 电离层对脉冲畸变和法拉第旋转的限制

本章明确地论述了电离层对脉冲畸变的影响, 包括便于使用的曲线和方程, 给出了确定法拉第旋转的简单方程。

第十五章 激光雷达的大气效应

本章简单地阐述大气湍流效应对光学雷达信号传播的影响这个复杂的问题。所介绍的许多成果可应用于微波信号的传播研究。对光信号和微波信号穿过雾和雨的传播情况作了比较, 并讨论了信号在晴天和恶劣气候条件下传播时的脉冲畸变。

第四篇 合成孔径雷达技术

第十六章 合成孔径的基本原理

第十七章 高分辨力雷达的基本原理 (合成孔径与脉冲压缩)

第十八章 合成孔径雷达注光测绘仪

为了更好地了解一个问题, 人们应从不同的方面对它进行考察。因此由柯蒂斯、科瓦莱和布鲁克纳三位作者分别在第十六、第十七、第十八章中论述合成孔径雷达。第十六章从多普勒处理及长合成孔径的观点介绍条带合成孔径测绘方法; 第十七章讨论线性调频波形经脉冲压缩后所提高的距离分辨力与合成孔径测绘的关系; 第十八章从多普勒处理的观点讨论注光测绘问题, 并且叙述了注光测绘的结果与前两章聚焦式和非聚焦式条带测绘仪所得的结果以及与一般的天线原理之间的关系。本章还讨论了多普勒波束锐化技术与部分聚焦处理、简单的实时数字处理机、系统误差和 T-空间等问题。

合成孔径雷达系统和技术的现状与发展趋势

本节介绍了合成孔径雷达系统和技术的最近发展情况。包括用于地形测绘的合成干涉仪雷达；用于探测树林中金属目标的谐波合成孔径雷达；阿波罗月球探测雷达系统；用连续波测量冰层厚度的全息矩阵雷达；密执安州环境研究所的X、L波段双极化合成孔径雷达；海洋卫星的卫星合成孔径系统；金星合成孔径测绘系统。

第五篇 雷达系统和元件

导言

介绍了微波管（磁控管、增幅管、正交场放大器、行波管和速调管等）的发展简史。并举例说明在什么情况下应选用什么管子。

第十九章 L波段固态相控阵雷达概述

本章介绍L波段固态组件和雷达的最新发展情况。

第二十章 机载固态雷达技术

叙述 MERA（雷达应用的分子电子学）和 RASSR（可靠的先进固态雷达）X波段固态相控阵机载雷达系统，以及在这方面的最近发展情况。

第二十一章 相控阵天线概论

介绍天线阵列的基本原理、栅瓣、互耦、辐射单元的类型、盲点现象以及它们与端射栅瓣之间的相互关系、辐射单元的阻抗匹配、宽角阻抗匹配、辐射单元设计程序和波导模拟器。并举了许多阵列天线的例子。

第二十二章 线性注管

本章介绍大功率谐振腔型线性注管（如速调管、行波管和行波速调管）的目前发展水平，每种管子的优缺点以及它们的调幅、调相和噪声特性。

第二十三章 正交场微波管的类型及其应用

本章包括正交场微波管的噪声特性，调谐技术（频率调谐和机械调谐），点火和锁定技术。

雷达系统和元件的现状与发展趋势

本节概述了超高频频段、L波段、S波段、X波段的固态器件、组件技术和可靠性的最新发展情况与今后发展趋势，还包括分布参数元件、集总参数元件以及单片技术。

叙述了新型圆顶半球扫描相控阵天线技术，利用串联铁氧体扫描技术的连续孔径扫描技术和自适应天线阵（全自适应、部分自适应、旁瓣对消系统）技术，并评述了它们的性能。

介绍的最新技术还包括极高频行波管、正交场放大器和速调管；长寿命的电子管和阴极（M型阴极和薄膜场发射阴极）；高增益（30分贝）阴极激励的正交场放大器；电子调谐的脉冲磁控管（采用电子二次倍增腔电极）；展宽交互振荡器；展宽交互放大器；毫米波回旋管（回旋加速器谐振脉泽）；相关电子注管。

第六篇 专题论述

第二十四章 激光雷达理论与技术

本章精辟地论述了应用于雷达的激光理论与技术基础。内容包括激光方程（及其与微波方程的相似点与不同点）、激光噪声项、激光雷达探测与估算、激光发射机和探测器以及

几种激光雷达的实例。

第二十五章 跟踪和平滑

本章用简单的术语介绍了跟踪和平滑这个复杂的问题,有趣而深入地了解自高斯开始这方面研究以来的发展。介绍了过程方程、观测关系式、转移矩阵和方程、状态变量概念、多项式平滑、最小二乘方平滑、最小方差平滑和卡尔曼滤波器。

第二十六章 卡尔曼滤波器

本章叙述卡尔曼滤波器与经典的维纳滤波器的关系。

第二十七章 脉冲雷达发射机的频谱控制

本章讨论了频谱控制这个甚为重要的题目,这是所有雷达制造过程中都要涉及的课题。专题的现状与发展趋势

介绍了利用激光作极其精密的距离测量(精度为 10^{-7}),概述了光纤通信技术的目前发展水平,给出了脉冲雷达带外辐射的一些最新成果。

附录 不通过实际试验求探测性能的方法

介绍了决定雷达系统探测性能的简单程序。这些程序是以简单的流程图和使用方便的图表的形式给出的,并用实例计算作广泛地说明。它们可以用于各种各样的目标模型,如马柯姆无起伏模型、各种斯怀林模型、威恩斯托克模型、里西模型、对数正态模型和 χ^2 模型等。还包括了波束形状因子损耗(一维扫描和二维扫描)、恒虚警率损耗、幅度量化损耗、射频/中频滤波器失配损耗、重叠损耗、目标起伏模型损耗以及视频积累损耗。

《雷达技术》一书是在四个雷达讲座的基础上编纂而成的。其中三个讲座是以波士顿电气电子工程师协会雷达夜校的形式举办的,即《现代雷达理论》(1972年秋/冬)、《现代雷达技术》(1973年秋/冬)和《现代雷达技术、元件和系统》(1976年秋/冬),本书的编者则是这三个讲座的组织者和主持人。这些夜校讲座很受欢迎,仅这三个讲座就有近千人报名参加。此外,第一个讲座的录象曾在许多地区和单位放映过。

还收到过国外(如印度和意大利)要求提供录象带的请求。第四个讲座《雷达系统和元件》曾在1974年10月举行的东北电子研究与工程会议上列为会议讨论内容之一,本书编者组织并主持四个会议中的一个会议。参加编写该丛书的人有各种不同经历的工程师——实习工程师、初任工程师、专家、经验丰富的工程师、机械工程师和可靠性工程师。

基于人们对这四本一套的讲义丛书和录象带一开始和后来继续表现出来的兴趣(这些夜校丛书,前两本版权为电气电子工程师协会所有,第三本版权为雷声公司所有),使编者感到如有一本可包括上述各丛书内容的书,对于世界各国类似不同经历的工程师也将是很有价值的。《雷达技术》就是为此目的编写而成的。

对1972年和1973年讲座的资料已做了广泛的修订和更新,使之包括了最新的技术发展情况。原讲座中没有包括的材料已补充列为本书每篇篇末的“现状与发展趋势”一节。这些新内容都是本书编者写的,包括重要的系统、技术和原来没有包括的技术,并介绍了1977年的技术发展水平与发展趋势。此外,在本书每篇的导言中还介绍了一些历史资料。

第一篇 雷达系统基础

现代雷达发展史上的一些重大事件如下:

1886~1888年 海因里奇·赫兹 (Heinrich Hertz) 验证了电磁波的产生、接收和散射。

1903~1904年 克里斯琴·赫尔斯迈耶 (Christian Hulsmeyer) 研制出原始的船用防撞雷达并获得专利权。

1922年 M·G·马可尼 (M·G·Marconi) 在接受无线电工程师学会 (IRE) 荣誉奖章的讲话中提出了一种船用防撞测角雷达的建议。

1925年 约翰斯·霍普金斯大学 (Johns Hopkins University) 的G·布赖特 (G·Breit) 和M·图夫 (M·Tuve), 通过阴极射线管观测到来自电离层的第一个短脉冲回波。

1934年 海军研究实验室 (Naval Research Lab.) 的R·M·佩奇 (R·M·Page) 拍摄了第一张来自飞机的短脉冲回波照片。

1935年 由英国人和德国人第一次验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937年 由罗伯特·沃森·瓦特 (Robert Watson-Watt) 设计的第一部可使用的雷达“Chain Home”在英国建成。

1938年 陆军通信兵的 SCR-268 成为首次实用的防空火控雷达, 后来生产了3100部。该雷达探测距离大于 100 海里, 工作频率为 200 兆赫。

1938年 研制成第一部实用舰载雷达——XAF, 安装在美国海军纽约号 (New York) 战舰上, 对海面船只的探测距离为12海里, 对飞机的探测距离为85海里。

1941年12月 到了这时, 已生产了 100 部SCR-270/271 陆军通信兵预警雷达。其中的一部雷达架设在檀香山, 探测到了日本对珍珠港的入侵。但是, 反射信号被误认为是友军飞机。

三十年代, 法国、苏联和日本同时致力于雷达的研制。第二次世界大战期间, 在英国的帮助下, 美国在雷达方面的研制大大地超过了德国和日本, 并在保证同盟国的胜利方面发挥了重要作用。自此之后, 在雷达方面所取得的成就, 在本书第一章通过典型雷达来加以说明。并在这一章的表 1-1 中给出了96部雷达的参数。

第一章讨论基本雷达系统的综合考虑 (如频率选择、扫描器类型、极化、波形选择、信号处理类型以及发射机的类型等)。此外, 还给出了低噪声接收机, 以及崩越管、砷化镓场效应管和俘越管等固态功率器件的技术发展水平。

在第二章中, 巴顿 (Barton) 总结了近几年来确定雷达检测能力和测量精度的许多重要因素。第三章指出, 当使用累积发现概率准则时, 如果采用单个脉冲检测准则, 就会对雷达发射机功率错误地估算过高达14分贝, 对远距离干扰机功率错误地估算过高达8分贝。第四章, 作者巴顿第一次论述了当今世界雷达设计的一些观点。最后, 第五章和第六章, 作者施雷德 (Shrader) 和福勒 (Fowler) 分别从供货厂商和用户的角度介绍了在雷达设计中必须避免的其他若干易犯的错误。

第一章 雷达设计基础

布鲁克纳(Brookner)

本章的目的是提出并解释雷达设计中所包括的若干考虑。

首先, 必须考虑总的要求, 在这里, 对要解决的问题必须要明确, 然后才能考虑下列诸因素:

1. 频率选择;
2. 机械扫描、全电子扫描与混合扫描系统的比较;
3. 极化选择;
4. 欲采用的雷达波形;
5. 欲采用的处理类型——非相干、动目标显示或脉冲多普勒;
6. 电子管发射机与固态发射机的比较。

以下各节讨论与上述诸因素有关的综合考虑。希望通过下面的简要介绍, 使读者通过阅读以后各章及与本学科有关的教材和文献, 能够对该学科进行更加深入地研究。

1.1 雷达频率的选择

影响雷达频率选择的主要因素是雷达的功能, 即要求雷达仅用于搜索、仅用于跟踪或者两种功能均要。如果仅用于搜索, 则常优先选用低的频率, 例如超高频。之所以这样选择, 是因为雷达的灵敏度与功率孔径的积有关, 这可从下面的雷达方程看出:

$$R^4 = \frac{\sigma T_F}{4\pi\Omega SNR k T_s L_T} P_{av} A_E \quad (1-1)$$

式中 A_E = 有效接收孔径面积(米²);

k = 波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} 焦耳/K);

L_T = 总的系统损耗, 为功率比 ≥ 1 ;

P_{av} = 平均发射功率(瓦);

R = 雷达斜距(米);

SNR = 每个脉冲的信噪比, 为功率比;

T_F = 雷达帧时间(秒);

T_s = 系统温度(K);

Ω = 要搜索的角范围(球面度);

σ = 目标截面积(米²)。

上述雷达方程的搜索形式不包含频率。因此, 最大搜索距离显然不取决于雷达频率。然而, 大的孔径面积在低的频率上更可行。因此, 搜索距离就间接地与雷达频率有关。弹道导弹预警系统(BMEWS)的雷达是低频(超高频)搜索雷达(图1-1)的一个实例。(注——本章所介绍的大部分雷达参数及某些其他参数, 在表1-1中给出。)

如果雷达是用于跟踪的, 最好选择较高的频率。跟踪中主要关心的是同时达到每个探

测脉冲的足够信噪比和所要求的角精度。给出每个脉冲的信噪比的雷达方程式为

$$SNR = \frac{\sigma}{4\pi R^4 k T_s B} \frac{P_{PK} A_E^2}{\lambda^2} \quad (1-2)$$

式中 B = 信号带宽(赫);

P_{PK} = 峰值发射功率(瓦);

λ = 雷达波长(米)。

方程 (1-2) 表明, 对于给定的孔径尺寸, 每个脉冲的信噪比与 λ^2 成反比。因此, 波长 λ 越小(或者频率越高), 每个脉冲的信噪比就越大。但是, 更重要的是角精度与 λ^4 成正比。这种函数关系是由下式给出的基本角精度方程(参见第二章)得出的:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\theta_3^2}{2k_M^2 SNRN} \quad (1-3a)$$

式中 k_M = 天线角精度因子, 对于旁瓣为40分贝的泰勒加权圆孔径而言, k_M 等于2.1;

θ_3 = 天线3分贝波束宽度(弧度) = $k_0 \lambda / D$; (1-3b)

D = 天线孔径直径(米);

k_0 = 建立 λ/D 与 θ_3 关系式的加权参数, 对于泰勒加权圆孔径(在 $\bar{n} = 4$ 的情况下⁽¹⁾), 等于1.310;

N = 积累的脉冲数;

$\sigma_\theta = 1 - \sigma$ 角精度(弧度)。

将方程 (1-2) 代入方程 (1-3a), 并利用方程 (1-3b), 得出雷达方程的跟踪精度形式:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{k_0^2 \pi^2 R^4 k T_s B}{2k_M^2 N \sigma} \frac{\lambda^4}{P_{PK} A_E^2} \quad (1-4)$$

值得注意的是, 搜索距离与功率-孔径乘积 $P_{AV} A_E$ 成正比, 信噪比 SNR 与功率-孔径平方乘积 $P_{AV} A_E^2$ 成正比, 雷达角精度与功率-孔径立方乘积 $P_{AV} A_E^3$ 成反比。AN/FPS-16, M-33系统的目标跟踪雷达, 奈克-阿贾克斯系统(Nike-Ajax)的目标跟踪雷达, 霍克系统(Hawk)的AN/MPQ-39, 鞑靼系统(TARTAR)的AN/SPG-51, 小猎犬(Terrier)AN/SPG-55, 北约组织海雀(Sea Sparrow)系统的指挥仪/照射器, 和奈克-赫克里士(Nike-Hercules)系统的高功率目标跟踪雷达等均是采用高的频率(S波段或更高的波段)的跟踪雷达的实例(图1-2~图1-9)。

并非所有的跟踪雷达都工作于高的频率。美国弹道导弹预警系统的AN/FPS-49跟踪雷达就工作在425兆赫的频率上(图1-10)。在这种情况下, 远距离要求自然地导致选择大的孔径和长的波长。大孔径是为满足远距离的灵敏度要求所需要的, 因为能够经济提

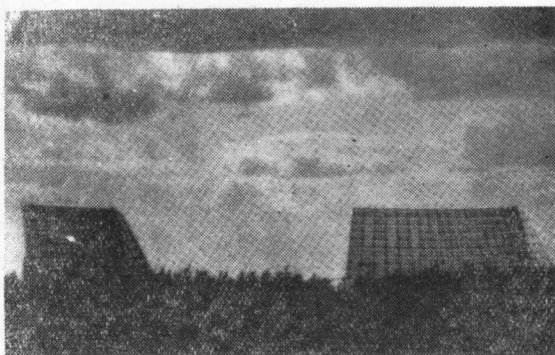


图1-1 超高频弹道导弹预警系统(BMEWS), 用来探测地平线以上的洲际弹道导弹, 参见表1-1a。

(照片由通用电气公司提供)

供的发射机功率常常受到限制。对于AN/FPS-49来说,发射机功率管的技术发展水平是当时选择超高频而不是L波段的一个主要原因,该雷达是1958年左右建造的,当时还不可能得到L波段大功率管。大孔径同样也要求长的波长;大孔径补偿了因采用长的波长而带来的角精度的损失。

表1-1 a 两坐标监视和搜索雷达

名 称	AASR-804 ⁽⁴⁸⁾	AN/FPS-8(-88为改进型)[i]	AN/FPS-14	AN/FPS-18
类 型	两坐标机场监视雷达	两坐标监视雷达;用于商业航空港和军事基地	两坐标“赛其”防空雷达;远程预警线补盲雷达	两坐标“赛其”防空雷达;远程预警线补盲雷达
制造厂商	加拿大雷声(加)	通用电气(美)	本迪克斯(美)	本迪克斯(美)
配置地点	地面(固定式)	地面,固定式(MPS-11为移动式)	地面,固定式	地面,固定式
波段	L	L	S	S
频率(兆赫)	1250~1350	1280~1330	2700~2900	2700~2900
峰值功率(兆瓦)	0.5	1	0.45	1
平均功率(千瓦)		1.1	0.54	1.2
天线尺寸(米)或类型	12.8×6.7[b]			
天线增益(分贝)	36(下波束); 34.5(上波束)			
波束形状	余割平方(CSC ²)	余割平方		
扫描器类型	机械	机械		
波束数	1	1		
垂直波束宽度(度)	4(余割平方到>40°)	30		
水平波束宽度(度)	1.25	2.5		
仰角覆盖范围	17°≥仰角≥1.5°时, ≥21000米(对10米 ² 目标)[n]		0~6000余米(2.5米 ²)	0~6000余米(2.5米 ²)
方位角覆盖范围(度)	360	360		
扫描速度	仰 角			
	方 位	6 转/分	0~10转/分	
脉冲重复频率	360个脉冲/秒(平均)	360个脉冲/秒	1200	1200
脉冲重复频率参差	4 个			

(续)

名 称		AASR-804 ⁽⁴⁸⁾	AN/FPS-8(-88为改进型)[i]	AN/FPS-14	AN/FPS-18
类 型		两坐标机场监视雷达	两坐标监视雷达; 用于商业航空港和军事基地	两坐标“赛其”防空雷达; 远程预警线补盲雷达	两坐标“赛其”防空雷达; 远程预警线补盲雷达
脉冲宽度	发射(微秒)	2.0	3	1	1
	压缩后(微秒)	未提供		未提供	未提供
脉冲压缩比		未提供		未提供	未提供
管 型				固定调谐式磁控管	速调管
噪声系数(分贝)		4	9		
作用距离		278~370公里[a], 278公里(10米 ² , 80%, 0°仰角)		89公里	89公里
动目标显示		改善因子 = 33~36 分贝[i]		杂波中可见度 23分贝[i]	杂波中可见度30分贝
极化方式				垂直/圆极化	垂直/圆极化
频率捷变				无	无
电子反干扰措施特点					
其他说明		盲速 = 2220公里; 复用频率; 数字动目标显示			
图 号		见47	37	34	34

名 称		AN/FPS-20	AN/FPS-24	AN/FPS-50	AN/FPS-66
类 型		两坐标远程对空监视雷达	两坐标监视雷达	弹道导弹预警系统搜索雷达	空中交通管制两坐标监视雷达
制造厂商		本迪克斯(美)	通用电气(美)	通用电气(美)	本迪克斯(美)
配置地点		地面, 固定式	地面, 固定式	地面, 固定式	地面, 固定式
波 段		L	甚高频	超高频	L
频率(兆赫)		1250~1350	214~236	425	1250~1350
峰值功率(兆瓦)		2.5	5(每个频道)	5	2
平均功率(千瓦)		5	25	300	4.32

(续)

名 称		AN/FPS-20	AN/FPS-24	AN/FPS-50	AN/FPS-66
类 型		两坐标远程对空 监视雷达	两坐标监视雷达	弹道导弹预警系统 搜索雷达	空中交通管制两坐 标监视雷达
天线尺寸(米)或类型				122×50	
天线增益(分贝)		35		44	35
波束形状			余割平方	笔形	
扫描器类型				机械(风琴管)	机械
波束数				2	1
垂直波束宽度(度)			30	1.0[c]	
水平波束宽度(度)			2.9	0.4[c]	1.3
仰角覆盖范围		0~30000余米 (2.5米 ²)		—	0.2°~45°
方位角覆盖范围(度)			—	—	360
扫描速度	仰 角		—	—	—
	方 位	3.3, 5, 6.6或 10转/分	0.25转/分(顺时针或 逆时针); 5转/分 (顺时针)		5转/分
脉冲重复频率		360	278		360个脉冲/秒 (平均)
脉冲重复频率参差					
脉冲宽度	发 射 (微秒)	6	6, 18	1000	
	压缩后 (微秒)	—	使用18微秒脉冲	未提供	
脉冲压缩比		未提供		未提供	
管 型		速调管			
噪声系数(分贝)		9	4.5		8
作用距离		408公里			371公里
动目标显示		杂波中可见度 = 30分贝			杂波中可见度 = 25分贝
极化方式		水平极化			水平、垂直、圆 极化[i]
频率捷变					

(续)

名 称	AN/FPS-20	AN/FPS-24	AN/FPS-50	AN/FPS-66
类 型	两坐标远程对空 监视雷达	两坐标监视雷达	弹道导弹预警系统 搜索雷达	空中交通管制两坐标 监视雷达
电子反干扰措施特点	装有反干扰电路	非常完善		
其他说明	双频道制			盲速 = 148公里, 极化转换
图 号	35	41	1	

名 称	AN/FPS-88 (-8的改进型)	AN/FPS-107	AN/MPS-11	AN/SPS-10
类 型	两坐标监视雷达	两坐标监视雷达	两坐标监视雷达; AN/ FPS-8的移动式型号	两坐标海面搜索和 导航雷达(30)
制造厂商	通用电气(美)	西屋(美)	通用电气(美)	塞尔凡尼亚(美)
配置地点	地面, 固定式	地面, 固定式	地面, 移动式	舰载
波 段	L	L	L	C(30)
频率(兆赫)	1280~1380	1250~1350	1280~1380	
峰值功率(兆瓦)	1	10	1	0.3(30)
平均功率(千瓦)	1.1	15	1.1	0.05(30)
天线尺寸(米)或类型				宽3米
天线增益(分贝)				
波束形状	余割平方		余割平方	
扫描器类型	机械	机械	机械	机械
波 束 数	1	1	1	1
垂直波束宽度(度)	58		30	
水平波束宽度(度)	1.3		2.5	1.5
仰角覆盖范围		30000余米, 40°		
方位角覆盖范围(度)	360	360	360	