

雷达系统

中航雷达与电子设备研究院

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

雷 达 系 统

中航雷达与电子设备研究院

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统 / 中航雷达与电子设备研究院编. —北京:
国防工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-118-03705-2

I. 雷... II. 中... III. 雷达 - 基本知识
IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 118615 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 $\frac{5}{8}$ 303 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

现代战争对雷达的作战功能和技术要求不断提高,因而对从事雷达研究和设计的人员亦提出了更高的要求。为了给广大业内从业人员提供方便,我们针对以往出版的《雷达系统》著作中涉及雷达发展新技术内容较少,而有些内容又过于繁琐的情况,在原《雷达系统》的基础上,结合我所多年从事雷达系统和雷达四抗研究设计的经验,加以精选和增补,重新编辑出版了《雷达系统》,使其更适合不同层次人员学习的需要。

新编《雷达系统》共分 10 章,即雷达系统概述、目标参数测量、雷达信号、目标特性、雷达距离方程、新体制雷达和技术、雷达抗干扰、雷达反隐身、雷达抗摧毁和反侦察等。

本书内容深入浅出,适合从事各类电子工程的人员阅读,还可作为大专院校电子工程、信息工程专业的教科书和技术培训教材。

本书编撰人员:张昆辉、承德保、沈继善、朱元清、张尉、何明浩、程柏林、尹自生等。

全书由沈继善研究员审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此深表谢意。

内 容 简 介

本书除保留原有雷达系统的内容外,还增加了雷达系统四抗方面的内容。本书共分 10 章,内容包括雷达系统概述,目标参数的测量,目标特性与环境,雷达距离方程,现代雷达与技术,以及雷达抗干扰、反隐身、抗摧毁和反侦察等。

本书可以供从事雷达和雷达对抗专业的工程技术人员使用,也可以作为雷达和电子工程专业的教材和教学参考书。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 雷达发展史的回顾及现状	1
一、探索阶段	1
二、大发展阶段	2
三、成熟阶段	3
四、雷达现状	3
1.2 雷达工作的基本条件	4
1.3 现代脉冲雷达的基本组成、功用和工作过程	4
1.4 雷达工作频段的划分	8
1.5 雷达的分类	10
一、按雷达功用分类	10
二、按雷达工作体制分类	10
三、按雷达工作波长分类	11
四、按雷达测量目标坐标参数分类	11
1.6 雷达主要战术、技术参数	11
一、雷达主要战术参数和定义	11
二、雷达主要技术参数和定义	13
1.7 现代雷达的发展趋势	15
一、国外雷达的特点	15
二、国外机载火控雷达发展动向	18
第 2 章 目标参数的测量	21
2.1 目标距离参数的测量	21
一、脉冲雷达测距原理	21
二、操纵员目视测距	21

三、目标距离参数的自动测量	23
四、测距模糊问题	27
2.2 目标角度的测量	29
一、测角原理	31
二、目标角度参数的自动录取	33
2.3 目标高度的测量	36
2.4 目标速度的测量	38
一、脉冲多普勒雷达测速原理	38
二、测速模糊问题	39
第3章 雷达信号	41
3.1 雷达信号表示法	41
一、实信号表示法	41
二、复信号表示法	41
三、雷达信号的频谱	42
四、雷达信号的能量	43
五、雷达信号的特点	43
3.2 模糊函数	43
一、雷达距离分辨问题与距离模糊函数	44
二、距离和速度(二维)模糊函数	45
三、模糊函数的性质	47
3.3 典型雷达信号的模糊函数及特点	48
一、固定载频矩形脉冲信号	49
二、线性调频矩形脉冲压缩信号	51
三、相参脉冲串信号	55
四、伪随机相位编码信号	58
3.4 模糊函数的应用	60
一、用于研究雷达的距离和速度分辨力	60
二、用于研究测距、测速模糊问题和波形设计	61
三、用于研究雷达测量精度	61
四、用于研究雷达的抗干扰性能	62

五、用于研究雷达系统的 CAD 方法	62
第 4 章 目标特性与环境	64
4.1 二次辐射及目标分类	64
一、目标二次辐射分类	64
二、目标类型	66
4.2 目标特性	67
一、目标雷达截面积 σ 的定义	67
二、典型目标的雷达截面积	69
三、复杂外形目标的雷达截面积	69
四、复杂外形目标的起伏特性	70
4.3 杂波特性	72
一、面分布杂波强度	72
二、体分布杂波强度	75
三、杂波幅度起伏统计分布	77
第 5 章 雷达距离方程	79
5.1 标准雷达距离方程	79
一、雷达距离方程的推导	79
二、讨论	81
三、最小可检测信噪比 $(S/N_0)_1$ 的确定	81
四、脉冲积累雷达距离方程	83
五、系统损耗	85
六、距离方程应用举例	88
5.2 电波传播中诸因素对雷达距离方程的影响	89
一、考虑地球曲率影响时的雷达距离方程	89
二、考虑大气衰减影响时的雷达距离方程	90
三、考虑地面(水面)反射影响时的雷达距离方程	91
5.3 干扰条件下的雷达距离方程	94
一、干扰信号从雷达天线主瓣进入时的雷达距离 方程	94
二、干扰信号从雷达天线副瓣进入时的雷达距离	

方程	95
三、无源杂波背景下的雷达自卫距离方程	96
5.4 侦察雷达距离方程	98
第6章 现代雷达与技术	100
6.1 脉冲压缩雷达	100
一、脉冲压缩雷达系统组成方框图	100
二、脉冲压缩信号波形的产生	101
三、脉冲压缩原理	103
四、脉冲压缩实现方法	108
6.2 全相参雷达	109
一、全相参原理	109
二、固定杂波抑制技术	115
三、慢动杂波抑制技术	120
四、多普勒匹配滤波器	125
五、主杂波跟踪技术	129
6.3 相控阵雷达	134
一、相位控制基本概念	134
二、相位扫描原理	138
三、固态收/发模块	158
四、波束指向控制	167
五、相控阵雷达的组成和特点	172
6.4 合成孔径雷达	176
一、合成孔径雷达的基本原理	177
二、合成孔径雷达类型	188
三、合成孔径雷达关键技术	196
6.5 天波超视距雷达	199
一、天波超视距雷达基本原理	199
二、天波超视距雷达目标探测能力	201
三、天波超视距雷达的生存能力和可用度	205
四、天波超视距雷达的关键技术	209

6.6	双/多基地雷达	211
一、	双/多基地雷达基本原理	212
二、	双/多基地雷达性能分析	215
三、	双/多基地雷达的关键技术	217
6.7	三坐标雷达	220
(一、	垂直多波束堆积三坐标雷达原理框图及工作 过程	221
二、	多波束堆积比幅测高原理	222
三、	三坐标雷达的四抗性能	225
6.8	单脉冲雷达	226
一、	振幅和差单脉冲雷达基本原理	226
二、	相位和差单脉冲雷达基本原理	232
三、	单脉冲雷达通道合并技术	234
四、	单脉冲雷达相位平衡技术	238
第7章	雷达抗干扰技术	241
7.1	概述	241
一、	研究雷达抗干扰的基本思想	241
二、	雷达抗干扰性能的度量	245
7.2	抗干扰雷达信号设计	248
一、	选择抗干扰雷达信号的基本原则	248
二、	典型雷达信号的抗干扰性能	250
三、	低截获概率与雷达信号设计	251
7.3	空间对抗	254
一、	雷达受干扰空间	254
二、	副瓣干扰处理技术	259
7.4	频域对抗	270
一、	频率分集技术	271
二、	频率捷变技术	274
7.5	极化对抗	285
一、	双通道双差相移段变极化器	285

二、极化主瓣对消技术	293
三、自适应极化滤波	295
7.6 常用抗干扰电路	298
一、雷达接收机抗过载电路	298
二、宽-限-窄电路	308
三、脉宽鉴别器和抗异步脉冲干扰电路	310
四、恒虚警电路(CFAR)	312
五、抗距离波门拖引电路	319
7.7 电子对抗装备及战术运用方法	321
一、电子对抗装备	321
二、雷达反侦察战术方法	325
三、雷达反干扰战术方法	326
四、雷达反隐身和反摧毁战术方法	328
第8章 雷达反隐身技术	331
8.1 隐身目标散射特性分析	331
一、隐身目标散射特性的频域特征	331
二、隐身目标散射特性的空间特征	333
三、隐身目标散射特性的极化特征	334
8.2 雷达反隐身技术	334
一、频域反隐身	335
二、空间位置反隐身	337
三、极化反隐身	338
四、改善雷达的探测性能反隐身	339
五、探索中的雷达反隐身技术	339
六、采用综合探测手段反隐身	340
七、国外反隐身雷达现状	340
第9章 抗反辐射摧毁技术	342
9.1 反辐射武器弱点分析	342
一、反辐射武器工作原理的局限性	342
二、反辐射武器的空间运动特点	343

三、反辐射武器导引头的局限性	343
9.2 雷达抗反辐射摧毁技术	344
一、利用反辐射武器工作原理的局限性抗 反辐射摧毁技术	344
二、反辐射武器逼近告警技术	344
三、对抗导引头的抗反辐射攻击技术	345
9.3 诱饵诱偏抗反辐射武器的原理	346
一、导引头采用单脉冲比幅法测向技术时的 诱饵诱偏原理	347
二、导引头采用相位干涉仪测向技术时的 诱饵诱偏原理	349
第 10 章 雷达反侦察技术	352
10.1 电子侦察原理和分类	352
10.2 雷达辐射电磁波信号隐蔽技术	353
一、减少雷达开机发射时间	353
二、雷达辐射电磁波信号的隐蔽技术	353
10.3 无源雷达	355
10.4 空间反侦察	356
参考文献	358

第 1 章 概 述

1.1 雷达发展史的回顾及现状

从 1886 年至今,雷达的发展已经走过了 100 多年的历程,大致可分为探索、大发展和成熟 3 个阶段。重大事件记述如下。

一、探索阶段

最先,麦氏、法拉第和安培等电磁场概念用数学公式来描述,并预言位移电流电磁波的存在。

1886 年—1888 年,德国物理学家 Heinrich Hertz 验证了电磁波的产生、接收和目标散射这一雷达工作的最基本原理。参见图 1-1。

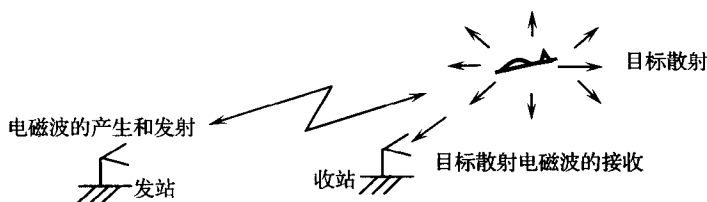


图 1-1 雷达原始实验示意图

1903 年—1904 年,德国科学家 Christian Hulsmeier 研制出原始的船用防撞雷达,并获得专利权。

1922 年,英国科学家 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,美国科学家 G. Breit 和 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,测量电离层高度。

1934年,美国科学家 R. M. Page 拍摄了一张短脉冲回波照片。

1935年,英国和美国科学家,第一次验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937年,英国科学家 R. W. Watt 研制成功第一部可使用的军用战斗机雷达“Chain Home”。

到此,人们才真正找到了赫兹基本原理的应用,赋予它极大的生命力——军事应用。

二、大发展阶段

第二次世界大战后,雷达技术得到突飞猛进的发展。据报道,欧洲战场上部署的上千部雷达在战争中发挥了很大的作用。著名影片《伦敦上空的鹰》真实地记载了当时雷达发展的盛况,在英国科学家的帮助下,美国利用大后方的有利条件,研制生产了大批量的雷达,对保证同盟军取得战争胜利发挥了重要作用。

这一时期,雷达之所以能够大发展,主要是出现了两个关键器件,即 T/R(收/发)开关和磁控管。由图 1-2 可见,这一发明不仅可以使接收和发射共用一副天线,简化了雷达系统,而且大功率磁控管发射机大大提高了雷达的探测性能。

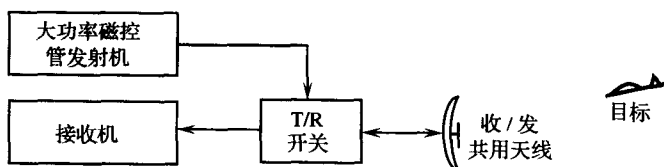


图 1-2 收/发共用天线雷达

这一时期的另一个重大事件,是在第二次世界大战结束后,美国集中了许多国家专门从事雷达研究的专家,编写了雷达技术丛书 28 本(指中译本),全面系统地总结了雷达的基本理论和技术,为今后雷达技术的发展打下了坚实的基础。

第二次世界大战结束后,人们认识到雷达在战争中所发挥的

作用,各国竞相研制和部署各种类型的雷达,以增强防空作战能力。同时在民用方面也得到大力发展。

这一时期雷达的特点是功能单一、性能较低,尚不能满足战争的需求。

三、成熟阶段

1960年至今,随着大规模、超大规模集成电路和微型计算机的问世和广泛应用,使雷达技术的发展日臻完善,许多新技术、多功能、自适应、高性能得到了实现。基本上可以说,人们心想的军事意图均可以得到兑现,雷达功能多达数十种,性能更加先进。

从技术上讲,包括脉冲压缩、频率分集/频率捷变、有源/无源相控阵、杂波抑制、多普勒测速、恒虚警、目标参数自动录取、航迹处理、目标识别、目标成像、多目标跟踪、合成孔径、多站探测定位、自适应和机内自检测等技术都可以得到实现。

从结构工艺上讲,包括微组装工艺、系列化、标准化和模块化设计,使雷达设计更加灵活,结构更加合理。

总之,当今雷达的战术技术性能、工艺结构均达到相当成熟的阶段,在现代战争中的作用也越来越重要了。

四、雷达现状

雷达在现代战争中的作用和地位越来越高,研究对付雷达的手段也越来越充分。随着电子技术的发展,雷达对抗战越演越烈。当前,雷达遇到的问题归纳起来就是我们所说的雷达四抗,即侦察—反侦察、干扰—抗干扰、摧毁—抗摧毁、隐身—反隐身,使雷达的生存受到极大的威胁。而且,对付雷达的手段总是超前雷达四抗技术的发展,可以说,当前雷达的发展正处在低谷,出现了困境。

今后,雷达将如何发展,是人们所关注的。期待着雷达更先进的技术、新的雷达理论和新的雷达体制出现,这也是我们雷达工作者将面临的重大任务和责任!

1.2 雷达工作的基本条件

雷达一词是英文 Radar(Radio detection and range)缩写的音译,其含义是无线电探测和测距。

我们知道,利用声波可探测前方障碍物的距离,根据闪电和雷声(声波)可以测出雷区的距离,蝙蝠利用超声波可以探测目标等等。而雷达是利用电磁波进行工作的,其基本条件是:

- (1) 确知电磁波传播速度 $v \approx c$;
- (2) 电磁波的直线传播特性;
- (3) 目标(金属目标)对电磁波的二次散射特性;
- (4) 电磁波的定向传播特性;
- (5) 运动目标对电磁波会产生多普勒频移。

利用这些条件,同利用声波电磁波测距一样,雷达测量目标距离是根据目标回波延时和电磁波传播速度进行的,即

$$R = \frac{1}{2} ct_d \quad (1-1)$$

式中, R 为目标距离, c 为光速(电磁波传播速度), t_d 为目标回波延时(电磁波传播时间)。测量目标速度是根据运动目标对电磁波产生的多普勒频移进行的,即

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (1-2)$$

式中, f_d 为运动目标对电磁波产生的多普勒频移, v 为目标运动速度矢量, θ 为目标运动方向和雷达视线之间的夹角, λ 为电磁波波长。

1.3 现代脉冲雷达的基本组成、功用和工作过程

现代脉冲雷达的基本组成示于图 1-3。各部分的功用介绍如下。

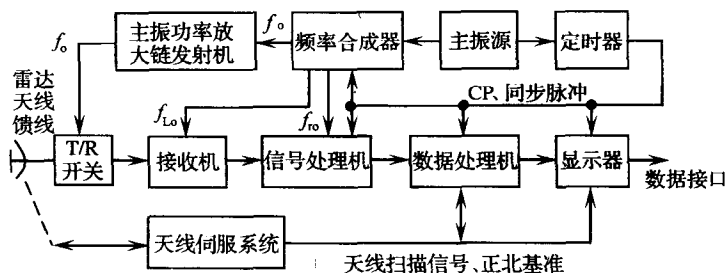


图 1-3 现代雷达原理方框图

(1) 主振信号源 产生高频稳定度、高频谱纯度的全机基准频率信号 f_m 。它是雷达的“心脏”，以它为基准产生的雷达全机的各种同步触发和时钟信号将直接影响雷达的正常工作和性能。通常，要求主振源的频率稳定度约为 10^{-12} ，距主谱线 1kHz 处，相位噪声低于 -140dB ，如图 1-4 所示。

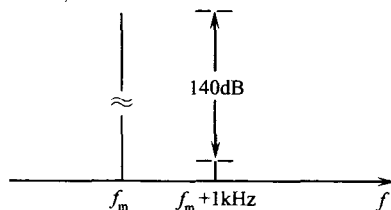


图 1-4 主振源谱线

(2) 定时器 根据主振源提供的基准信号，利用各种频率变换手段，产生各种同步脉冲和各种时钟信号。

(3) 频率合成器 根据主振源提供的基准信号，利用各种频率变换手段，产生发射激励信号 f_o 、接收机本振信号 f_{Lo} 和相参基准信号 f_{ro} ，且满足

$$f_o - f_{Lo} = f_{IF} = f_{ro} \quad (1-3)$$

(4) 主振功率放大链发射机 将来自频率合成器的发射激励信号，逐级放大到足够大的功率 (P_e, f_o)，经馈线传输给收/发开关。

(5) 收/发开关 当发射机送来的大功率脉冲信号到达时，关