



DRFM

技术研究

A STUDY ABOUT DRFM TECHNOLOGY

曲尔光 编著

 中国科学技术出版社



DRFM 技术研究

曲尔光 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

DRFM 技术研究 / 曲尔光编著. — 北京: 中国科学技术出版社, 2003. 1

ISBN 7-5046-3426-3

I. D... II. 曲... III. 数字信号—射频—存储器
IV. TN911. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 099052 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 9.5 字数: 255 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

定价: 20.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书系统介绍数字射频存储技术 (DRFM) 的基本理论、基础知识和实现方法, 并引入了作者近年来的部分研究成果。全书分为 5 章。第 1 章介绍数字射频存储技术的相关知识; 第 2 章介绍信号分析与信号处理的基本理论和基础知识; 第 3 章介绍射频信号存储器的基本理论和数字射频存储器的实现方法及主要技术指标; 第 4 章介绍 3 比特相位量化数字射频存储技术; 第 5 章介绍多比特相位量化数字射频存储技术及寄生信号性能分析方法和影响寄生电平的有关因素。

本书可作为从事数字射频存储技术研究的科研与工程技术人员的参考书, 也可作为电子工程及其相关专业方向的研究生教材。

责任编辑：张楠

封面设计：谢成

责任校对：刘红岩

责任印刷：安利平

前 言

数字射频存储器(DRFM, Digital Radio Frequency Memory)是一种近年来出现的高速数字信号处理部件,用于对射频信号的存储和重构。目前,DRFM已广泛用于新一代电子对抗系统。随着微电子技术的不断发展和电子计算机应用技术的不断渗入,数字射频存储技术正越来越多地引起人们的关注。

考虑到目前我国有关数字射频存储器方面的论著较少,为满足从事数字射频存储器研究的科研设计人员及高等院校相关专业的教学等方面的需要,作者编著了本书。书中详细介绍了有关数字射频存储器方面的基本理论和相关知识,并结合作者近几年的研究成果,对数字射频存储器技术进行了完善和补充。

全书分为5章。第1章介绍数字射频存储器的相关知识;第2章介绍信号的基础知识和数字信号的基本理论与处理方法;第3章介绍射频存储器的基本理论和数字射频存储器的实现方法及其主要技术指标;第4章介绍3比特相位量化数字射频存储器技术;第5章介绍多比特的相位量化数字射频存储技术及其寄生电平的影响因素。

本书在编写过程中,得到作者导师——西安电子科技大学电子对抗研究所杨绍全教授的大力支持和帮助,杨绍全教授对本书进行详细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。另外,本书在出版过程中,也得到了运城学院外语系秦建华教授和许多同仁的大力支持与帮助,作者在此表示衷心的感谢。

由于数字射频存储器(DRFM)涉及的内容非常丰富和广泛,鉴于作者学识水平有限,因此书中难免有不足和不妥之处,敬请读者不吝指正。作者借此机会向各位读者表示衷心感谢!

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 雷达技术与电子对抗	(3)
§ 1-1 雷达技术及其发展	(3)
§ 1-2 雷达对抗与电子战	(10)
第 2 章 信号分析与信号处理基础	(16)
§ 2-1 信号分析基础	(16)
§ 2-2 时域离散信号和时域离散系统	(33)
§ 2-3 时域离散信号和系统的频域分析	(54)
第 3 章 数字射频存储器综述	(88)
§ 3-1 射频信号存储器(RFM)	(88)
§ 3-2 DRFM 的实现方法	(94)
§ 3-3 DRFM 的主要指标	(98)
第 4 章 3 比特相位量化 DRFM 技术	(103)
§ 4-1 3 比特相位量化 DRFM 的工作原理与实现方法	(103)
§ 4-2 3 比特相位量化 DRFM 的相干性	(107)
§ 4-3 3 比特相位量化 DRFM 的寄生电平	(108)
§ 4-4 DRFM 的滤波器带宽和镜像抑制	(117)
第 5 章 多比特相位量化 DRFM	(121)
§ 5-1 多比特相位量化 DRFM 的工作原理与实现方法	(121)
§ 5-2 DRFM 寄生信号性能分析	(127)
§ 5-3 影响多比特相位量化 DRFM 系统寄生电平的主要因素	(137)

绪 论

随着微电子技术的发展,数字信号处理技术得到广泛应用,使用范围不断扩大,处理速度不断提高,已从音频发展到视频、中频直至射频。数字射频存储器(DRFM, Digital Radio Frequency Memory)就是新发展起来的一种新型数字信号处理部件,它可用于雷达、通信和电子战等许多领域,因而正在引起人们的重视。

在现代电子对抗系统中,常常需要将接受的射频脉冲信号存储,经某种变换后在适当时刻转发,以产生欺骗干扰或假目标,这种技术称为储频。早期的储频技术采用延迟线-放大器正反馈和测频-调谐振荡器的方法。这些方法的主要缺点是复制信号的相干性不佳,或难以对脉内调制信号存储。半导体技术的进步,在 20 世纪 70 年代中期出现了数字射频存储(DRFM)技术。数字射频存储技术(DRFM)是利用数字方法存储射频信号的一种新型技术,它能够将接受到的射频信号进行必要的数字化处理,然后再经过适当的控制,用于重构输入信号波形或产生干扰信号。

数字射频存储器的基本应用有两种:一是用于分析信号的细微特征,如射频脉冲的脉内调制、脉冲的边缘及顶部特征的分析;二是用于产生相干的干扰信号干扰脉冲多普勒等相干雷达。由于数字射频存储器用数字方法存储信号,因此能存储和重构各种信号波形,且具有极好的相干性。所以,在新一代的电子对抗系统,数字射频存储器被用于对射频信号的存储和重构或用于对相干/不相干雷达的干扰和产生相干假目标。

数字射频储频分幅度量化和相位量化两种体制。幅度量化 DRFM 保存了信号的幅、相信息,使重构信号有高的保真度。但由于模/数转换器(ADC)结构复杂,难以单片集成 DRFM 系统,数/模转换器(DAC)的低速率限制了宽带 DRFM 的实现。相位量化 DRFM 虽然仅保存信号的相位(频率)信息,但不影响对脉冲雷达信号的存储和重构及其对脉冲雷达的干扰,而且相位量化 DRFM 的关键器件模/数转换器(称相位量化器)和数/模转换器(称加权相加网络)易于集成,因此相位量化 DRFM 得到广泛应用。

但目前应用的相位量化 DRFM 的比特数较低,目前的相位量化 DRFM 普遍使用 3 比特相位量化技术,虽然结构简单便于集成,但寄生电平高(-16.9dBc)。许多文献指出,高的寄生电平会招致反辐射导弹对 DRFM 装载平台的攻击,也会使雷达发现它正在受到干扰,采用 FFT 处理机的脉冲多普勒雷达能发现低于主信号电平约 30dB 的虚假信号。因此研究多比特相位量化 DRFM 具有重要意义,半导体技术的进展,也支持多比特相位量化 DRFM 的单片集成。半导体集成技术的发展使多比特单片集成 DRFM 的实现成为可能。

本书从研究数字信号处理的方法入手,引入信号的基础知识、时域离散信号的表示方法和典型信号、线性时不变系统的因果性和稳定性;系统的输入输出描述法;线性常系数差分方程的解法、模拟信号数字处理方法、序列的傅里叶变换和 Z 变换;以及利用 Z 变换分析系统和信号频域特性。详细介绍了射频信号处理器的基本原理和实现方法、数字射频存储器(DRFM)的主要技术指标、1 比特幅度量化和 3 比特相位量化 DRFM 的工作原理与实现方法、3 比特相位量化 DRFM 的相干性、3 比特相位量化 DRFM 的寄生电平、DRFM 的滤波器带宽和镜像抑制。

最后以 4 比特相位量化射频存储器为例着重讨论了多比特相位量化 DRFM 的原理和实现方法、数字射频存储器寄生信号性能分析,并从半导体集成角度出发着重讨论了相位量化器的拓扑结构,研究了量化比特数对寄生电平的影响,给出了寄生电平的理论计算公式,也研究输入正交信号幅相不平衡对寄生电平的影响,预测实际的相位量化 DRFM 的寄生电平。本书力图从多种角度来介绍数字射频存储器(DRFM)这一新型的数字处理部件,以方便读者对这一新型数字处理部件的了解和做进一步的深入研究。

第 1 章 雷达技术与电子对抗

正如我们在绪论所述的那样,数字射频存储器的基本应用有两种:一是用于分析信号的细微特征,如射频脉冲的脉内调制、脉冲的边缘及顶部特征的分析;二是用于产生相干的干扰信号干扰脉冲多普勒等相干雷达。由于数字射频存储器用数字方法存储信号,因此能存储和重构各种信号波形,且具有极好的相干性。所以,在新一代的电子对抗系统中,数字射频存储器被广泛用于对射频信号的存储和重构或用于对相干/不相干雷达的干扰和产生相干假目标。因此,在本章中我们首先介绍雷达技术与电子对抗的有关知识。

§ 1-1 雷达技术及其发展

雷达是英文 Radar 的音译,它源于 Radio Detection and Ranging 的缩写,原意是“无线电探测和测距”,即用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置。因此雷达也称为“无线电定位”。随着雷达技术的发展,雷达的任务不仅是测量目标的距离、方位和仰角,而且还包含测量目标的速度,以及从目标回波中获取更多有关目标的信息。

雷达是利用目标对电磁波的反射(或称为二次散射)现象来发现目标并测定其位置的。飞机、导弹、人造卫星、各种舰艇、车辆、兵器、炮弹以及建筑物、山川、云雨等等都可能作为雷达的探测目标,这要根据雷达的用途而定。

一、雷达的回波及回波中的可用信息

当雷达探测到目标后,就要从目标回波中提取有关信息,首先是根据回波对目标的距离和空间角度定位,目标位置的变化率可在其距离和角度随时间变化的规律中得到并据此建立跟踪;二是雷达的测量如果能在-维或多维上有足够的分辨力时,根据回波则可得到目标尺寸和形状的信息;三是采用不同的极化可测量目标形状的对称性;四是从原理上说,雷达还可测定目标的表面粗糙度及介电特性等信息。

1. 目标斜距的测量

雷达工作时,发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲。如果在电磁波传播的途径上有目标存在,那么雷达就可以接收到由目标反射回来的回波。由于回波信号往返于雷达与目标之间,它将滞后于发射脉冲一个时间 T_r ,如图 1-1-1 所示。我们知道,电磁波的能量是以光速传播的,设目标的距离为 R ,则传播的距离等于光速乘以时间间隔,即:

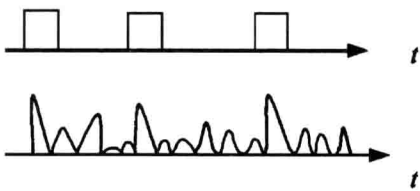


图 1-1-1 雷达测距

$$2R = CT_r \text{ 或 } R = \frac{CT_r}{2} \tag{1-1-1}$$

式中

R ——目标到雷达站的单程距离,单位为 m ;

T_r ——电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔,单位为 s ;

C ——光速,为 $3 \times 10^8 m/s$ 。

由于电磁波传播的速度很快,雷达技术常用的时间单位为 μs ,回波脉冲滞后于发射脉冲一个微秒时所对应的目标斜距 R 为:

$$R = \frac{CT_r}{2} = 150m = 0.15km$$

能测量目标距离是雷达的一个突出优点,测距的精度和分辨力与发射信号带宽(处理器的脉冲宽度)有关,脉冲越窄,性能越好。

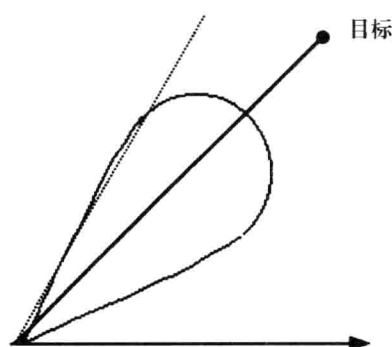


图 1-1-2 角坐标测量

2. 目标角位置的测量

目标角位置指方位角或仰角。在雷达技术中测量这两个角位置基本上都是利用天线的方向性来实现的。雷达天线将电磁能量汇集在窄波束内,当天线波束轴对准目标时,回波信号最强,如图 1-1-2 中实线所示。当目标偏离天线波束轴时回波信号减弱,如图中虚线所示,根据接收回波最强时的天线波束指向,就可以确定目标的方向。

3. 相对速度的测量

有些雷达除确定目标的位置外,还需要测定运动目标的相对速度,例如测量飞机或导弹飞行时的速度。当目标与雷达站之间存在相对速度时,接收到回波信号的载频相对于发射信号的载频产生一个频移,这个频移在物理学上称为多普勒频移,它的数值为:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1-1-2)$$

式中 f_d ——多普勒频移,单位 Hz ;

v_r ——雷达与目标之间的径向速度,单位 m/s ;

λ ——载波波长,单位 m 。

当目标向着雷达站运动时, $v_r > 0$,回波载频提高;反之 $v_r < 0$,回波载频降低。雷达只要能够测量出回波信号的多普勒频移 f_d ,就可以确定目标与雷达之间的相对速度。

径向速度也可以用距离的变化率来求得,此精度不高,但不会产生模糊。无论是用距离变化率或多普勒频移来测量速度,都需要时间。观测时间越长则速度测量精度越高。

多普勒频移除用作测速外,更广泛的是用于动目标的显示(MTI)、脉冲多普勒(PD)等雷达中以区别运动目标回波和杂波。

4. 目标尺寸和形状

如果雷达测量具有足够高的分辨力,就可以提供目标尺寸的测量。因为许多目标的尺寸在数十米量级,则分辨能力应为数米或更小。目前雷达的分辨力在距离维已能达到,但在通常作用距离下切向距(RQ)的分辨力还远远达不到,增加天线的实际孔径来解决此问题是不现实的。然而当雷达和目标的各个部分有相对运动时,就可以利用多普勒频率域的分辨力获得切

向距维的分辨力。例如,装于飞机和宇宙飞船上的 SAR(综合孔径)雷达,与目标的相对运动是由雷达的运动产生的。高分辨力雷达就可以获得目标在距离和切向距方向的轮廓(雷达成像)。

二、雷达探测能力 —— 基本雷达方程

雷达究竟能在多远距离上发现(探测到)目标,这要由雷达方程来回答。雷达方程将雷达的作用距离和雷达发射、接收、天线和环境等因素联系起来。

下面根据雷达的基本工作原理来推导自由空间的雷达方程:

设雷达发射的功率为 P_t ,当用各向均匀辐射的天线发射时,距雷达 R 远处任一点的功率密度 S'_1 等于功率被假想的球面积 $4\pi R^2$ 所除,即:

$$S'_1 = \frac{P_t}{4\pi R^2} \tag{1-1-3}$$

实际雷达总是使用定向天线将发射机的功率集中辐射于某些方向上。天线增益 G 用来表示相对于各向同性天线,实际天线在辐射方向上功率增加的倍数。因此,当发射天线增益为 G 时,距雷达 R 处目标所照射到的功率密度为:

$$S_1 = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \tag{1-1-4}$$

目标截获了一部分照射功率并将它们重新辐射于不同的方向。用雷达截面积 σ 来表示被目标截获入射功率后再次辐射回雷达处功率的大小,或用下式表示在雷达处的回波信号功率密度:

$$S_2 = S_1 \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

截面积 σ 的量纲是面积。 σ 的大小随具体目标而异,它可以表示目标被雷达“看见”的尺寸。雷达接收天线只收集了回波功率的一部分,设天线的有效接收面积为 A_e ,则雷达接收到的回波功率 P_r 为:

$$P_r = A_e S_2 = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \tag{1-1-5}$$

当接受到的回波功率 P_r 等于最小可检测信号 $S_{\min}$ 时,雷达达到其最大作用距离 $R_{\max}$,超过这个距离后,就不能有效地检测到目标。

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \right]^{1/4} \tag{1-1-6}$$

上述基本雷达方程可以正确地反映雷达各个参数对其检测能力影响的程度,但并不能充分反映实际雷达的性能。因为许多影响作用距离的环境和实际等因素在方程中没有包括。关于雷达作用距离的深入讨论,在此不作展开。

三、雷达的工作频率

从雷达的工作原理来说,不论发射波的频率如何,只要是通过辐射电磁波能量和利用从目标发射回来的回波,以便对目标探测和定位,都属于雷达系统工作的范畴。常用的雷达工作范围为 220~35000MHz(220MHz~35GHz),实际上各类雷达工作的频率在两头都超出了上述范围。例如,天波超视距(OTH)雷达的工作频率为 4MHz 或 5MHz,,而地波超视距的工作频率则

低到 2MHz。在频率的另一端,毫米波雷达可以工作到 94GHz,激光(Laser)雷达工作于更高的频率。工作频率不同的雷达在工程实现时差别很大。

雷达的工作频率和整个电磁波频谱如图 1-1-3 所示。实际上绝大多数雷达工作于 200~10000MHz(10GHz)频段。由于 20 世纪 70 年代中制成能产生毫米波的大功率管——回旋管,毫米波雷达已开始试制和应用。

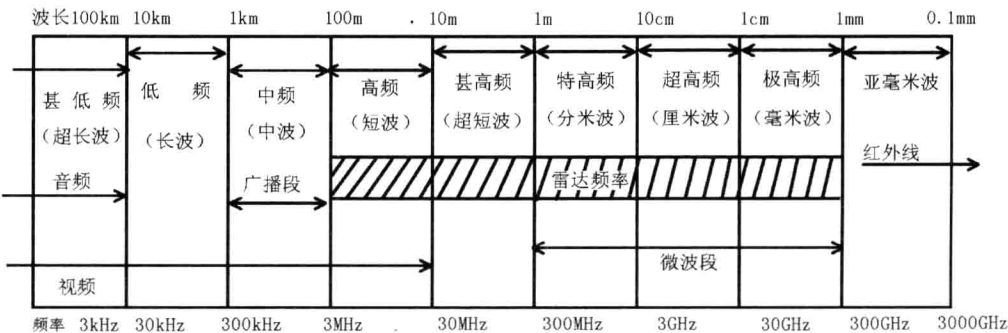


图 1-1-3 雷达频率和电磁波频谱

目前,在雷达技术领域里常用频段的名称,用 L、S、C、X 等英文字母来命名,我国也经常采用。表 1-1-1 列出了雷达频段和频率的对应关系。表 1-1-1 中的频段有时可以用波长来表示,如 L 波段代表以 22cm 为中心的 20~25cm, S 代表 10cm 为中心,相应的 C 代表 5cm, X 代表 3cm, Ku 代表 2.2cm, Ka 代表 8mm 等等,表中还列出国际电信联盟分配给雷达的具体波段,例如:L 波段包括的波段范围 1000~2000MHz,而 L 波段雷达的工作频率被约束在 1215~1400MHz 的范围。

表 1-1-1 雷达频段和对应的频率

频 段 名 称	频 率	国际电讯联盟分配的雷达频段
UHF 波段	300~1000MHz	420~450MHz 890~940MHz
L 波段	1000~2000MHz	1215~1400MHz
S 波段	2000~4000MHz	2300~2500MHz 2700~3700MHz
C 波段	4000~8000MHz	5250~5925MHz
X 波段	8000~12000MHz	8500~10680MHz
Ku 波段	12.0~18GHz	13.4~14GHz 15.7~17.7GHz
K 波段	18~27GHz	24.05~24.25GHz
Ka 波段	27~40GHz	33.4~36GHz
mm 波段	40~300GHz	

四、雷达的应用与发展

1. 雷达的应用与分类

雷达已应用于地面、空中、海上和太空。地面雷达主要用来对飞机和太空目标进行探测、定位和跟踪;船上雷达除用于探测空中和海面目标外,还可用作导航工具;机载雷达除要探测空中、地面或海面目标外,还可以用作大地测绘、地形回避及导航,在宇宙飞行中,雷达可用来控制宇宙飞船的飞行和降落等等。

第二次世界大战后,特别是近二十多年来,雷达技术有了飞速发展,雷达已在军事的各个方面获得应用。同时,这些技术也在民用雷达方面发挥着作用。

(1) 军用雷达按战术划分的类型

①预警雷达(也称超远程雷达):它的主要任务是发现洲际导弹,以便及早发出警报。它的特点是作用距离远达数千里,至于测定坐标的精度和分辨力是次要的。目前,应用预警雷达不但能发现导弹,而且可以发现洲际战略轰炸机。

②搜索和警戒雷达:它的任务是发现飞机,一般作用距离在 400km 以上,有的可达 600km。对于测定坐标的精确度、分辨力要求不高。保卫重点城市或建筑物的中程警戒雷达要求有方位 360° 的搜索空域。

③引导指挥雷达:这种雷达用于对歼击机的引导和指挥作战,民用的机场调度雷达亦属于这一类。其特殊要求是:a. 对多批次目标能同时检测;b. 测定目标的三个坐标,要求测量目标的精确度和分辨力较高,特别是目标间的相对位置数据的精度要求较高。

近年来,由于低空和超低空袭击的威胁日益严重,为了及早发现这类目标采取相应对策,可由一部机载预警雷达来完成对地面搜索和引导指挥雷达的功能。由于地面雷达低空盲区以及视距的限制,它对低空飞行目标的探测距离很近,而装在预警飞机上的预警雷达可以登高而远望。20 世纪 70 年代中把具有脉冲多普勒体制的预警雷达装于预警飞机上,可以保证它在很强的杂波背景下仍能把目标信号检测出来。近十多年来由于雷达技术的发展,装置在预警飞机上的预警雷达同时兼有引导指挥雷达的功能,此时预警飞机的作用等于把地面区域防空指挥所搬到了飞机上,使它成为一个完整的空中预警和控制系统。目前,国外一些国家已正式使用,这是当前一种重要的雷达类型。

④火控雷达:其任务是控制火炮(或地空导弹)对空中目标进行瞄准攻击,因此要求它能够连续而准确地测定目标的坐标,并迅速将射击数据传递给火炮(或地空导弹)。这类雷达的作用距离较小,一般只有几十公里,但测量的精度要求很高。

⑤制导雷达:它和火控雷达同属精密跟踪雷达,不同的是制导雷达对付的是飞机和导弹,在测定它们的运动轨迹的同时,再控制导弹去攻击目标。制导雷达要求能跟踪多个目标,并对分辨力要求较高。这类雷达天线的扫描方式往往有其特点,并随制导体制而异。

⑥战场监视雷达:用于发现坦克、军用车、人和其他战场上的运动目标。

⑦机载雷达:除机载预警雷达外主要有下列数种类型。

a. 机载截击雷达:当歼击机按照地面指挥所命令,接近敌机并进入有利空域时,就利用装在飞机上的截击雷达,准确地测量敌机的位置,以便进行攻击。它要求测量目标的精确度和分辨力都很高。

b. 机载护尾雷达:用来发现和指示机尾后面一定距离内有无敌机,这种雷达结构比较简

单,不要求测定目标的准确位置,作用距离也不远。

c. 机载导航雷达:用来装在飞机或舰船上以显示地面或港湾图像,以便在黑夜和大雨、浓雾情况下飞机和舰船能正确航行,这种雷达要求分辨力较高。

d. 机载火控雷达:20世纪70年代后的战斗机上,火控雷达往往是多功能的,它能对空搜索和截获目标,如空对空制导导弹、空对空精密测距和控制机炮射击、空对地观察地形和引导轰炸、敌我识别和导航信标的识别,有的还兼有地形跟随和回避的作用,一部雷达,往往具有七八部雷达的功能。对于机载雷达共同的要求是体积小、重量轻、工作可靠性高。

⑧无线电测高仪:它装置在飞机上。这是一种连续波调频雷达,用来测量飞机离开地面的高度。

⑨雷达引信:这是装在炮弹或导弹头上的一种小型雷达,用来测量弹头附近有无目标,当距离缩小到弹片足以击伤目标的瞬间,使炮弹(或弹头)爆炸,提高了击中目标的命中率。上述军用雷达中的机载导航雷达,无线电测高仪等,也可作为民用。

(2)在民用雷达方面的一些类型和应用

①气象雷达:这是一种观察气象的雷达,可用来测量暴风雨和云层的位置及其移动路线。

②航行管制雷达(空中交通):在现代的航空飞行运输体系中,对于机场周围及航路上的飞机,都要实行严格的管制。航行管制雷达兼有雷达和引导雷达的作用,故有时也称为机场监视雷达,它和二次雷达配合起来使用。二次雷达地面设备发射询问信号,机上接到信号后,用编码的形式,发出一个回答信号,地面收到后在航行管制雷达显示器上显示。可以鉴定空中目标的高度、速度和属性,用以识别目标。

③宇宙航行中用雷达:这种雷达用以控制飞船的交会和对接,以及在星球上的着陆。某些地面雷达用来探测和跟踪人造卫星。

④遥感:安放在卫星或飞机上的一种雷达,可以作为微波遥感设备,它主要感受地球物理方面的信息,由于具有二维高分辨力而可对地形地貌成像。雷达遥感也参与地球资源的勘探,其中包括对海洋情况、水资源、冰覆盖层、农业森林、地质结构及环境污染等进行测量和地图描绘。也可利用雷达来探测月亮和行星(雷达天文学)。

此外,在飞机导航、航海探测(用以保证航行安全)、公路上车速测量等方面,雷达也在发挥其积极作用。

(3)雷达按其信号形式划分的类型

①脉冲雷达:它发射的波形是矩形脉冲,按一定的或交错的重复周期工作,这是目前使用最广泛的一种雷达。

②连续波雷达:它发射连续的正弦波,主要用来测量目标的速度。如需同时测量目标的距离,则往往需对发射信号进行调制,例如对连续的正弦波信号进行周期性的调制。

③脉冲压缩雷达:它发射宽的脉冲波,在接收机中对接收到的回波信号加以处理,以便得到窄脉冲。目前实现脉冲压缩的方法主要有两种:一是线性调频脉冲压缩处理;二是相位编码脉冲压缩处理。脉冲压缩处理能解决距离分辨力和距离之间的矛盾。

此外,还有脉冲多普勒雷达、噪声雷达、频率捷变雷达等。

2. 雷达的发展

在第二次世界大战期间,由于军事上的迫切需要,雷达获得广泛的应用和发展,而且随着

技术的进步,其性能日臻完善。

从 20 世纪 50 年代以来,由于航空与航天技术的飞速发展,飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等用雷达作为探测和控制的手段,尤其是在 20 世纪 60 年代中研制的洲际导弹系统,对雷达提出了高精度、远距离、高分辨力及多目标测量等要求。由于解决了一些关键性的问题,雷达进入蓬勃发展的新阶段。如脉冲压缩技术的采用;单脉冲雷达和相控阵雷达的研制成功;在微波高功率放大管试制成功后,研制成了主控振荡器—功率放大器型的高功率、高稳定度的雷达发射机,并用于可控脉冲形状及相参雷达体系;脉冲多普勒雷达体制的研制成功,使雷达能测量目标的位置和相对运动速度,并具有良好的抑制地物干扰等的能力;另外,微波接收机高频系统中许多低噪声器件,如低噪声行波管、量子放大器、参量放大器、隧道二极管放大器等的运用,使雷达接收机灵敏度大为提高,增大了雷达作用距离;由于雷达中数字电路的广泛应用和计算机与雷达的配合使用和逐步合成一体,使雷达的结构组成和设计将发生根本性的变化。雷达采用这些重大技术后,工作性能大为提高,测量角度从 1 密位(雷达中惯用角坐标单位,1 密位=0.060)以上提高到 0.05 密位以下,提高了一个数量级以上。雷达的作用距离提高到数千里,测距误差在 5m 左右,单脉冲雷达跟踪带有信标机的飞行器,作用距离可达数十万公里以上。雷达的工作波长,从短波扩展到毫米波、红外线领域。在这个时期,微波全息雷达、毫米波雷达、激光雷达和超视距雷达相继出现。

近 20 年来,雷达的性能日益提高,而且应用范围也持续拓宽,具体表现如下。

①由于 VHLSI 和 VLSI 的迅猛发展,数字技术和计算机的应用更为广泛深入,使动目标检测(MID)和脉冲多普勒(PD)等雷达的信息处理机更为精致、灵活,性能明显提高;并且自动检测和跟踪系统得到完善,提高了工作的自动化程度。

②综合孔径雷达(SAR)由于具有很高的距离和多普勒分辨能力而可以对实况成像;逆综合孔径(ISAR)雷达则可用于对目标成像。成像处理中已用数字处理代替光学处理。

③更多地采用复杂的大时宽带宽脉压信号以满足距离分辨力和电子反对抗的需要。

④高可靠性的固态功率源更为成熟,可以组成普通固态发射机或分布于相控阵雷达的阵元上组成有源阵。

⑤许多场合用平面阵列天线代替抛物面天线,其显著优点为:

- a. 在三坐标雷达中实现一维相扫。
- b. 获得超级副瓣,用于机载雷达或抗干扰。
- c. 组成自适应旁瓣相消系统抗干扰。
- d. 相控阵雷达连续出现,不仅用于战略而且也用于战术雷达,如制导、战场炮位侦察等。

相控阵雷达是一种多功能高性能的新型雷达,其天线由许多天线单元排成的阵列组成。通常,天线阵元少的有几百,多则可达几千,甚至有的上万。由于利用电子计算机按一定程序来控制天线阵的移相器,从而改变阵面上的相位分布,促使波速在空间按一定规则扫描,因此称为相控阵雷达。它是在雷达信号理论、信号处理技术、元器件以及计算机技术结合后发展到高阶的产物,是随着电子计算机和微波移相技术的发展而诞生的。相控阵雷达具有多功能、多目标、远距离、高数据率、高可靠性和高适应能力等优点,因而是一种很重要的雷达,而且也可较好地用于对付高动态性能多目标的战略防空雷达。

综上所述,不难看出,雷达是在不断发展变化的:一方面综合应用各种新技术,新器件来完

善和提高自身性能;另一方面为适应不断出现的各种新技术的应用,也促使雷达不断地改善。雷达的功能可以满足重要的社会和军事需要,而且在诸多领域还没有替代者。

§ 1-2 雷达对抗与电子战

雷达是用无线电方法对目标进行定位。雷达可用于远距离发现目标,引导歼击机到指定地点拦截目标,引导导弹和火炮跟踪目标、摧毁目标。雷达也可用于地形测绘、气象报告等方面。

一、雷达对抗

雷达面临的主要问题是四抗,即抗干扰、抗反辐射导弹、反隐身和反侦察。

1. 抗干扰

雷达工作时常受到有意干扰(如海湾战争中作战前用干扰机对雷达干扰)和无意干扰(如地、海面反射的杂波等)。

目前雷达对无意干扰已有许多抗干扰措施,如利用杂波的频谱与运动目标的回波频谱不同,采用动目标显示(MTI)技术将接收机内部噪声的分布归一化,设计合适的门限,当信号超过门限时判为有信号否则认为无信号。这称为恒虚警处理。

困难的是抗人为干扰。目前干扰方式有噪声式干扰和欺骗式干扰。噪声式干扰产生像接收机内部噪声一样的噪声,但功率大,足以掩盖回波。使雷达不能发现目标。欺骗式干扰产生假目标,并强迫雷达跟踪到假目标上,使雷达引导的武器不能命中目标,甚至造成雷达工作的不稳定。抗干扰技术现有上百种,包括雷达波形设计、频率捷变、频率分集、旁瓣对消、旁瓣匿影、接收机抗干扰、信号处理抗干扰等。

2. 抗反辐射导弹

反辐射导弹能跟踪雷达波束方向并沿着该方向飞向雷达,摧毁雷达。目前抗反辐射导弹也有多种措施,如诱饵诱偏,即在雷达附近布置多个诱饵,它们发射信号与雷达相同。这使得雷达、诱饵同时进入雷达,使雷达跟踪在两者之间的质心上,也可使雷达指向雷达外的地方。另一种抗反辐射的方法是双/多基地雷达或用民用的电视台、调频广播电台作发射信号的无源相干定位。双/多基地雷达将雷达发射机和接收机远距离分离配置。反辐射导弹只能攻击发射机而不能攻击接收机。如果发射机配置在远离作战前沿,或者用多部分散配置的发射机,这时反辐射导弹只能攻击一部发射机,而雷达仍正常工作。无源相干定位是一种新雷达体制,它利用电视台、调频广播电台或移动通信站作发射机,接收机接收来自电视台等来的直达波和目标反射的电视信号。经过适当处理,发现目标。由于发射站是民用设备,反辐射导弹难以选择攻击对象。

3. 反隐身

雷达检测目标是利用从目标反射回来的回波。回波的强弱决定于目标反射特性。一般目标越大,回波越强。隐身方法是在目标上涂覆吸收材料,像U-2飞机上涂覆的黑色涂料,使目标的反射能力大大下降。另一种方法是对目标外型特殊设计,如B-1轰炸机。轰炸机的典型雷达反射面积为 100m^2 ,隐身设计后,反射面积只有 0.3m^2 ,这使雷达发现目标的距离大大缩短。

雷达反隐身技术是利用不同工作频率的隐身效果不同。一般采用工作波长的雷达具有较