

The logo for the Institution of Engineering and Technology (IET), consisting of the letters 'IET' in a bold, stylized, black font.

雷达基础知识

——雷达设计与性能分析手册

Radar Essentials

A Concise Handbook for Radar Design
and Performance Analysis

[美] G. Richard Curry 著
杨勇 肖顺平 张文明 李永祯 译
王雪松 审校



科学出版社

雷达基础知识

——雷达设计与性能分析手册

Radar Essentials

A Concise Handbook for Radar Design
and Performance Analysis

[美] G. Richard Curry 著

杨 勇 肖顺平 张文明 李永颖 译

王雪松 审校



科学出版社

北京

图字:01-2017-7674号

内 容 简 介

原著是美国资深雷达专家、具有35年教学经验的Curry教授的匠心之作,是雷达领域入门教材。本书共6章,主要阐述雷达基本概念、雷达基本原理、雷达组成、雷达性能、雷达工作环境和雷达相关技术。本书内容涵盖面广,阐述精炼,可读性强。

本书可作为高等院校电子工程专业高年级本科生和研究生教材,也可作为雷达、航空专业领域工程技术人员的参考书。

Radar Essentials: A Concise Handbook for Radar Design and Performance Analysis
Original English Language Edition Published by SciTech Publishing, Copyright
2012, All Rights Reserved.

图书在版编目(CIP)数据

雷达基础知识:雷达设计与性能分析手册 / (美)理查德·库里(G. Richard Curry)著;杨勇等译. —北京:科学出版社,2018.1

书名原文:Radar Essentials: A Concise Handbook for Radar Design and Performance Analysis

ISBN 978-7-03-055363-8

I. ①雷… II. ①理…②杨… III. ①雷达技术-技术手册 IV. ①TN95-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第281642号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第一版 开本:720×1000 B5

2018年1月第一次印刷 印张:7 1/4

字数:134 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 者 序

雷达起源于第一次世界大战,它利用目标对电磁波的反射来对目标进行探测。雷达可架设在地面、汽车、舰船、飞机、导弹和卫星等平台上,能够全天候、全天时地对目标进行监测、测距、测速、测角和成像。随着雷达技术的发展,雷达功能逐渐扩展,雷达抗干扰能力也逐渐增强。目前,雷达已在军事和民用方面得到了广泛应用。

本书是一部雷达入门级书籍,与现有的《雷达原理》、《雷达系统》、《雷达手册》、《雷达系统导论》等书籍不同,它偏重于雷达知识要点的归纳总结,包含雷达性能分析与设计相关的一些关键知识点、公式、表格和图。本书内容面广、层次清晰、结构性强、阐述精炼,便于读者快速了解雷达知识架构和知识点,同时也便于工程师快速查阅相关信息。

本书的翻译得到了电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室的大力支持。感谢国防科技大学电子科学学院罗鹏飞教授、冯德军副研究员、谢晓霞副教授对本书翻译工作提出的宝贵意见。感谢国家自然科学基金重大项目(61490690, 61490692)和国家自然科学基金青年科学基金项目(61501475)对本书的资助。

在翻译本书的过程中,译者们根据自己的理解尽可能准确地表达原作者的思想,限于译者水平,书中难免存在翻译不当之处,敬请读者批评指正。

原 书 序

本书主要为读者提供雷达设计和性能分析相关的雷达基础知识,包括雷达课本和雷达手册中的一些基础知识、关键数据表格、公式和图。本书内容简单易懂,可提供全面的雷达知识参考;同时,本书便于查阅和携带。本书适于雷达、航空领域的工程师和系统分析人员、电子信息专业学生以及非雷达专业人士使用。

本书是《袖珍雷达手册》(*Pocket Radar Guide*)^[1]的演化版,书中不涉及雷达相关知识的详细介绍、推导、示例和设计细节,具体内容读者可参考《现代雷达原理》(*Principles of Modern Radar*)^[2]、《雷达手册》(*Radar Handbook*)^[3]、《机载雷达》(*Introduction to Airborne Radar*)^[4]。对于一些有用的雷达性能分析方法,读者可参考《雷达系统性能建模》(第二版)(*Radar System Performance Modeling, 2nd ed.*)^[5]和《雷达系统分析和建模》(*Radar System Analysis and Modeling*)^[6]。对于雷达术语,读者可参考《IEEE 雷达定义标准》(*IEEE Standard Radar Definitions, IEEE Std 686-2008*)^[7]。对于某些特定方面的知识,读者可参考本书中相关的参考文献。

在此,特别感谢 Scitech 出版有限公司总裁 Dudley Kay 提供的非常有益的建议以及对本书出版的支持,感谢 John Milan 和其他审阅者提出的宝贵意见。

目 录

译者序

原书序

第 1 章	雷达基础	1
1.1	雷达的概念与工作原理	1
1.2	雷达功能	2
1.3	雷达类型	3
1.4	频段	5
1.5	军事术语	7
1.6	雷达基本组成	9
第 2 章	雷达子系统	11
2.1	天线	11
2.2	发射机	17
2.3	接收机	19
2.4	发射/接收组件	22
2.5	信号处理与数据处理	23
第 3 章	雷达性能	26
3.1	雷达截面积	26
3.2	信噪比	30
3.3	检测	34
3.4	搜索	42
3.5	测量	46
3.6	跟踪	51
第 4 章	雷达环境	54
4.1	大气损耗	54
4.2	雨损耗	57
4.3	大气折射	58
4.4	地形遮蔽与多径	59
4.5	雷达杂波	61
4.6	电离层效应	65
4.7	电子对抗	69

第 5 章 雷达技术	74
5.1 波形	74
5.2 动目标显示和相位中心偏置天线	78
5.3 脉冲多普勒和空时自适应处理	80
5.4 合成孔径雷达	82
5.5 分类、鉴别与目标识别	85
第 6 章 辅助计算	89
6.1 单位转换	89
6.2 常量	90
6.3 分贝	91
参考文献	93
附录 A 符号表	95
附录 B 词汇表	101
索引	104

第 1 章 雷达基础

1.1 雷达的概念与工作原理

RADAR 是无线电探测和测距 (radio detection and ranging) 的缩写。

雷达向目标发射电磁波, 然后利用目标对电磁波的反射来发现目标并测定目标位置。电磁波在大气和自由空间中直线传播, 传播速度为 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (详见 6.2 节), 但在以下情况下电磁波不是直线传播或传播速度不是 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$:

(1) 电磁波在金属物体和那些介电常数不同于自由空间的介质中传播。

(2) 折射。折射是指由于电磁波在介质中传播速度的变化造成的传播路径弯曲的现象。雷达电磁波在大气层和电离层中传播通常存在折射现象 (详见 4.3 节和 4.6 节)。

(3) 绕射。绕射是指电磁波绕过物体边缘继续向前传播。在雷达工作频段, 绕射现象不明显。

根据雷达工作基本原理 (图 1.1), 雷达发射机产生电磁波, 电磁波通过发射天线向目标方向辐射。一部分辐射电磁波经目标反射后由雷达接收天线接收, 雷达接收机对接收电磁波进行处理后可以获得目标相关信息。这些目标相关信息包括以下几方面:

(1) 目标是否存在。当目标回波信号强度超过一定值时即判断目标存在。

(2) 目标距离。目标距离可根据电磁波往返于雷达目标间的时间 t 计算。对于单站雷达 (详见 1.3 节), 目标距离 R 可表示为

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1.1)$$

(3) 雷达径向速度 V_R 是目标速度 V 在雷达目标连线方向的分量 (详见 1.3 节), 其可表示为

$$V_R = V \cos \alpha \quad (1.2)$$

式中, α 为目标速度矢量与雷达视线 (line of sight, LOS) 之间的夹角。雷达径向速度可根据雷达接收信号的多普勒频移计算得到, 具体可表示为

$$V_R = \frac{f_{DC}}{2f} = \frac{f_D \lambda}{2} \quad (1.3)$$

式中, f 为雷达工作中心频率; λ 为波长。

(4) 目标方向。目标方向可根据最大目标回波信号强度对应的天线波束指向

得到。

(5) 目标特性。目标特性可根据目标回波信号的幅度和其他特征得到,如起伏特性、持续时间和目标频谱特性等。

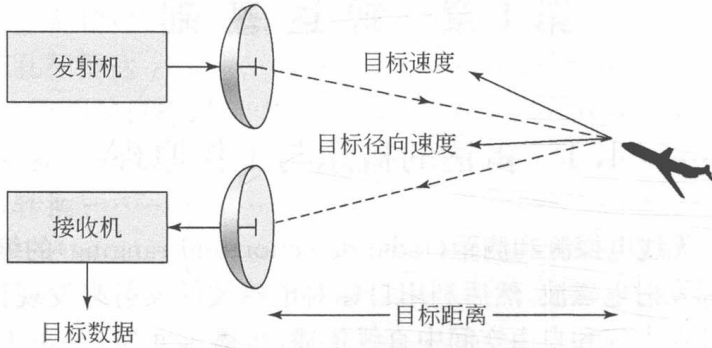


图 1.1 雷达工作基本原理

1.2 雷达功能

雷达通常具有以下一个或多个功能:

- (1) 搜索(也称为监视)。对空中某片区域进行监测以发现潜在目标(详见 3.4 节)。
- (2) 检测。判断目标是否存在(详见 3.3 节)。
- (3) 目标距离、角度、速度测量(详见 3.5 节)。
- (4) 跟踪。对连续测量结果进行处理以估计目标航迹(详见 3.6 节)。
- (5) 成像。采用合成孔径处理对目标或某片区域生成二维或三维图像(详见 5.4 节)。
- (6) 分类、鉴别与识别。确定目标的特征、类型和真实身份(详见 5.5 节)。

许多雷达在常规工作模式下可实现以上两个或多个功能。具有以上多个功能的雷达称为多功能雷达。多功能雷达可以同时处理多个目标信号,其通常具有以下特点:

- (1) 相控阵天线。相控阵天线能够快速将波束指向目标(详见 2.1 节)。
- (2) 多种波形。多种波形用于实现多种功能(详见 5.1 节)。
- (3) 能够进行数字信号处理。数字信号处理用于处理各种波形并对多个目标回波做相应处理以实现多种功能(详见 2.5 节)。
- (4) 采用计算机进行控制。多功能雷达可根据所需的信息和目标结构控制信号的发射和接收(详见 2.5 节)。

1.3 雷达类型

1. 单站雷达

单站雷达的发射天线和接收天线在同一地点。与雷达目标之间的距离相比,单站雷达发射天线与接收天线之间的距离很小。这样,两个天线观测的区域相同。在许多情况下,雷达采用同一天线通过切换来分别进行信号发射和接收。这样,雷达在一个地点就可对信号的发射和接收进行协调。单站雷达根据信号往返时间差来测量目标距离[式(1.1)],根据目标信号多普勒频移来测量目标径向速度[式(1.3)]。

2. 双基地雷达

双基地雷达的发射天线和接收天线相隔较远,这样可以避免发射机和接收机之间的相互干扰。双基地雷达可以采用单天线发射、多天线接收。目标双基地雷达截面积(radar cross section, RCS)可能大于目标单站雷达截面积(详见 3.1 节)。信号传播路径包括发射天线与目标之间的距离以及目标与接收天线之间的距离。目标到发射天线与接收天线之间距离的和为一常数时,目标的位置点迹为一个以发射天线与接收天线为焦距的椭圆(图 1.2)。目标到发射天线与接收天线之间距离的和可根据发射信号与接收信号之间的时间差计算得到:

$$R_T + R_R = ct \quad (1.4)$$

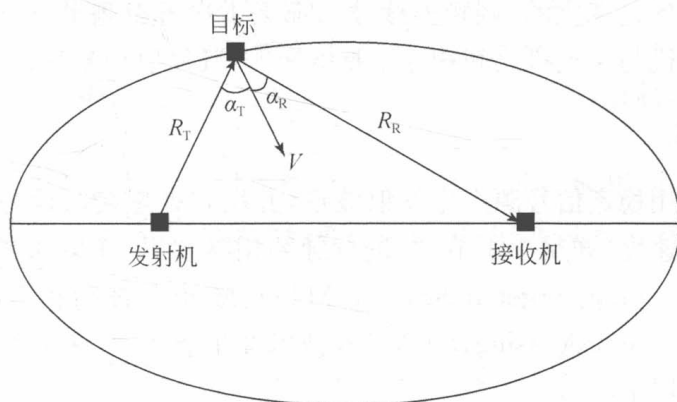


图 1.2 双基地雷达与目标的几何关系图

目标多普勒频移可计算为

$$f_D = \frac{V(\cos\alpha_T + \cos\alpha_R)}{\lambda} \quad (1.5)$$

式中, α_T 为目标速度矢量与发射天线视线之间的夹角; α_R 为目标速度矢量与接收

天线视线之间的夹角(图 1.2)。

3. 脉冲雷达

脉冲雷达发射一个脉冲,然后接收目标反射的脉冲回波。这样,可以使用单个天线来完成信号发射和接收,同时可以避免发射机与接收机之间的相互干扰。对于单站雷达,在测得发射脉冲与接收脉冲之间的时间差后即可计算得到目标距离。单站雷达在脉冲发射后才能开始接收信号,因此雷达能够测量的目标最小距离 R_M 为

$$R_M = \frac{c\tau}{2} \quad (1.6)$$

式中, τ 为脉冲持续时间。脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI)是脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)的倒数。当雷达以固定的脉冲重复间隔发射脉冲时,若前一个发射脉冲的回波在下一个发射脉冲发射之后到达,则该回波可能被认为是下一个脉冲的回波,这样,就会得到错误的目标距离。当目标距离大于 nc (PRI/2) 时,就会发生上述现象。当 $n=1$ 时,这种现象称为二次往返;当 $n > 1$ 时,这种现象称为多次往返。

4. 连续波雷达

连续波(continuous wave, CW)雷达在发射连续信号的同时接收信号。对于单站雷达,目标径向速度可根据目标回波信号的多普勒频移计算得到。如果雷达发射连续波的频率是变化的(调频连续波),那么雷达可以测量目标距离。单站连续波雷达受发射机与接收机之间相互干扰的影响,其发射功率和灵敏度均有限。

5. 相参雷达

相参雷达利用稳定信号源产生发射波形,并用它处理接收信号。相参雷达能够测量目标径向速度(详见 1.1 节)并进行脉冲相参积累(详见 3.2 节),还可以通过动目标显示(moving target indication, MTI)、脉冲多普勒和空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)等技术抑制杂波(详见 5.2 和 5.3 节)。非相参雷达不具备以上能力。

6. 超视距雷达

超视距(over-the-horizon, OTH)雷达利用电离层反射可探测超过雷达视距范围的目标回波(详见 4.4 节)。综合考虑电离层条件和目标探测距离,超视距雷达的工作频段通常选在高频(HF)段(3~30MHz)(详见 1.4 节)。超视距雷达天线长、发射功率高、信号处理时间长,其距离、角度测量精度较低,其主要用来预警。

7. 二次监视雷达

二次监视雷达(secondary surveillance radar, SSR)利用旋转天线发射询问信号以对合作飞机进行探测。合作飞机在收到雷达信号后,使用应答器向地面雷达站回复不同频段的信号。应答信号是包含了目标高度和身份信息的编码脉冲信号。由于发射和应答都是单向传输,因此雷达和应答器能够以较低的发射功率达到较远传输距离的目的,而且上行(询问)和下行(应答)链路采用不同的工作频率可以避免雷达杂波。军用系统中,敌我识别(identification friend or foe, IFF)系统采用了这项技术(详见 5.5 节),只不过其采用的信号是编码加密信号。

8. 合成孔径雷达

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)在随搭载平台(飞机或卫星)移动时发射一连串脉冲信号,这些脉冲回波信号经过处理后可使雷达具有较高的方位分辨率,这等效于雷达具有大天线孔径和很窄的波束。若合成孔径雷达距离分辨率较高,则其可对地形和地面目标进行二维成像(详见 5.4 节)。

9. 雷达搭载平台

雷达的探测范围和探测能力受搭载平台影响。雷达搭载平台包括以下几种:

(1) 陆基。陆基雷达可以做得很大,发射功率可以很高,但由于地球曲率的限制,陆基雷达视距较小(详见 4.4 节)。

(2) 海基。海基雷达也可以做得较大,雷达位置可随舰船位置的改变而改变。

(3) 机载。相对陆基和海基雷达,机载雷达对低空飞机和地面目标的视距更大,机载雷达位置能够快速改变。但是,受飞机有效载荷的限制,雷达天线尺寸较小,发射机功率较低。

(4) 天基。天基雷达可以对地球上的任何区域进行观测,但其观测范围可能受卫星轨道的限制。天基雷达需进行远距离探测,但其探测距离受天线尺寸和发射机功率限制。

1.4 频段

电磁波的波长 λ 和其频率 f 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.7)$$

1. 雷达频段

雷达工作频率范围可分为多段,这些频段用字母表示(表 1.1)。在这些频段

中,国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)授权了雷达可使用的频率范围。雷达工作频率范围受 ITU 分配和雷达组件的双重限制,其通常在雷达工作中心频率附近的 10% 范围内。

表 1.1 雷达频段^[8]

频段名称	频率范围	分配给雷达的频率范围	常用雷达频率	常用雷达波长
HF	3~30MHz	—	—	—
VHF	30~300MHz	138~144MHz	220MHz	1.36m
		216~225MHz		
UHF	300~1000MHz	420~450MHz	425MHz	0.71m
		890~942MHz		
L	1~2GHz	1.215~1.4GHz	1.3GHz	23cm
S	2~4GHz	2.3~2.5GHz	3.3GHz	9.1cm
		2.7~3.7GHz		
C	4~8GHz	4.2~4.4GHz	5.5GHz	5.5cm
		5.25~5.925GHz		
X	8~12GHz	8.5~10.68GHz	9.5GHz	3.2cm
Ku	12~18GHz	13.4~14GHz	16GHz	1.9cm
		15.7~17.7GHz		
K	18~27GHz	24.05~24.25GHz	24.2GHz	1.2cm
		24.65~24.75GHz		
Ka	27~40GHz	33.4~36GHz	35GHz	0.86cm
V	40~75 GHz	59~64GHz	—	—
W	75~110GHz	76~81GHz	—	—
		92~100GHz		
毫米波	110~300GHz	126~142GHz	—	—
		144~149GHz	—	—
		231~235GHz	—	—
		238~248GHz	—	—

搜索雷达通常工作在甚高频(very high frequency, VHF)、特高频(ultra high frequency, UHF)和 L 频段,因为在这些频段实现大尺寸天线和高功率发射相对容易(详见 3.4 节);跟踪雷达通常工作在 X、Ku 和 K 频段,因为在这些频段实现窄波束宽度和高测量精度相对容易(详见 3.5 节);多功能地基雷达通常工作在 S 和 C 频段;战斗机机载多功能雷达通常工作在 X 频段。

大气吸收和雨引起的信号衰减随着信号频率的增加而增加(详见 4.1 和 4.2 节),因此信号衰减会限制雷达在 Ku、K 和 Ka 频段下的性能。超视距雷达利用电

高层反射来探测目标(详见 1.3 节),但电离层会导致 VHF 和 UHF 频段的信号失真(详见 4.6 节)。

2. ITU 频段

ITU 命名的频段名称如表 1.2 所示。

表 1.2 ITU 命名的频段^[8]

频率范围	频段名称	米制名称
3~30MHz	HF	十米波
30~300MHz	VHF	米波
0.3~3GHz	UHF	分米波
3~30GHz	SHF	厘米波
30~300GHz	EHF	毫米波

注:SHF-超高频;EHF-极高频。

3. 电子战频段

电子战协会命名的频段名称如表 1.3 所示。

表 1.3 电子战频段^[9]

电子战频段	频率范围
A	30~250MHz
B	250~500MHz
C	500~1000MHz
D	1~2GHz
E	2~3GHz
F	3~4GHz
G	4~6GHz
H	6~8GHz
I	8~10GHz
J	10~20GHz
K	20~40GHz
L	40~60GHz
M	60~100GHz

1.5 军事术语

美国军用电子系统根据联合电子类型命名系统(正式名称为陆军海军联合命

名系统,简称 AN 系统)命名,格式如下:

AN/ABC-#DVT

式中,

- (1) AN 表示军用;
- (2) 斜线之后第一个字母(A)表示装载位置;
- (3) 斜线之后第二个字母(B)表示设备类型;
- (4) 斜线之后第三个字母(C)表示设备用途;
- (5) 连字符之后的符号(#)表示设备型号;
- (6) 连字符之后的第一个字母(D)表示设备改进型号;
- (7) 连字符之后的第二个字母(V)表示设备版本号;
- (8) 连字符之后的第三个字母(T)表示训练系统。

与雷达系统相关的字母编码如表 1.4 所示。

表 1.4 联合电子类型命名系统字母代码

字母	代码	含义
装载位置(斜线后第一个字母)	A	机载
	D	无人驾驶运载器(无人驾驶飞机,无人机)
	F	固定式
	G	地面用
	M	地面移动式
	P	便携式
	S	水面舰艇
	T	地面可运输式
设备类型(斜线后第二个字母)	V	地面车载
	L	电子对抗
	M	气象
设备用途(斜线后第三个字母)	P	雷达
	S	专用型
	G	火控
	N	导航
	Q	专用或联用
	R	接收或无源探测
	S	探测、测距与测向
X	鉴别或识别	
Y	监管	

1.6 雷达基本组成

采用相参处理的单基地脉冲雷达的基本组成如图 1.3 所示。雷达天线通过发射/接收(T/R)转换设备实现发射与接收功能切换。图 1.3 中的雷达基本部件也广泛应用于其他类型的雷达。

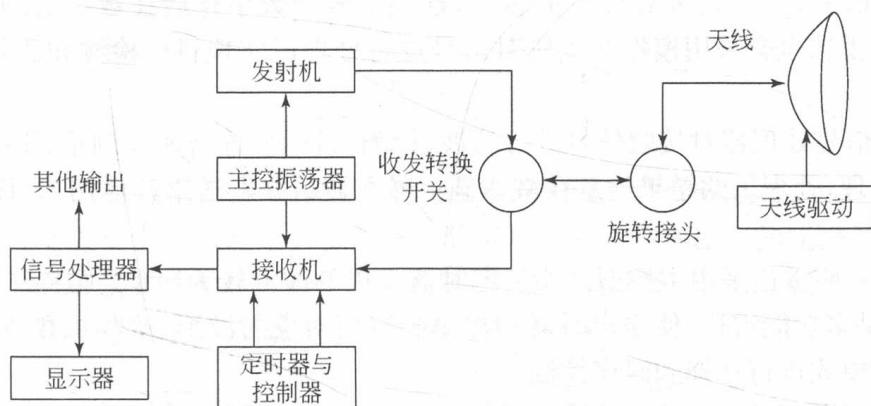


图 1.3 雷达基本组成

下面对各个基本部件及其功能进行介绍：

(1) 主控振荡器包括稳定本机振荡器(stable local oscillator, STALO)和波形发生器。主控振荡器的输出信号传送到发射机进行放大后发射,同时也传送到接收机作为参考信号用于相参处理。非相参雷达可能不用主控振荡器,其发射波形通过发射机中的振荡器生成(详见 2.2 节)。

(2) 发射机对主控振荡器的输出信号进行放大以获得大的信号发射功率。发射机可能包含一个调制器,调制器在脉冲发射时打开发射机(详见 2.2 节)。

(3) 发射机输出端与天线之间用一种高功率射频传输介质连接。在微波频段,传输介质通常是波导;在 UHF、VHF 频段,传输介质通常为同轴电缆或其他设备。天线与接收机之间采用类似的传输介质进行连接,只是这种传输介质主要工作在低功率情况下。

(4) 天线发射射频信号并接收目标反射信号。天线通常具有定向的发射与接收方向图,可使雷达对某一感兴趣的方向进行集中观测并对目标角度进行测量(详见 2.1 节)。

(5) 当天线进行机械式扫描观测时,雷达通常采用一个或多个波导旋转接头将天线与发射机、接收机进行连接。当天线机械扫描角度受限时,则采用柔性电缆将天线与发射机、接收机进行连接。天线驱动电机和相关的控制装置一起控制着天线扫描。

(6) 当雷达发射、接收信号共用同一天线时,发射/接收开关(称为天线收发转换开关)在脉冲发射期间将天线与发射机连接,在脉冲接收期间将天线与接收机连接。这通常用微波循环器来实现。当雷达发射、接收采用不同的天线时,通常会采用一个保护装置来防止发射功率过高损坏接收机。当雷达收发共用同一天线时,这种保护装置也通常与循环器一起使用以保护接收机。

(7) 接收机将接收信号放大,并将信号转换为中频(intermediate frequency, IF)或视频信号。在大多数现代雷达中,这些信号被数字化后在数字处理器中处理。有时雷达也会采用模拟接收机对信号进行处理以实现目标检测和测量(详见 2.3 节)。

(8) 信号处理器对接收信号进行滤波、检测、目标位置与速度测量、跟踪、特征提取等处理,处理后的结果信息在雷达显示屏上显示并发送给其他用户(详见 2.5 节)。

(9) 一些雷达采用主控振荡器和定时器生成的波形较为简单。复杂一点的雷达,特别是多功能雷达,使用定时器和控制装置可对发射波形、接收机接收时间和信号处理模式进行选择 and 时序控制。

(10) 电源为各雷达部件提供稳定电压。