

机载雷达原理与系统

严利华 姬宪法 梅金国 编 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书包括雷达原理、雷达测量方法及雷达系统三大部分。雷达原理部分包括发射机、接收机、微波馈电与天线、显示和天线伺服驱动等内容；雷达测量方法部分包括雷达的测距、测角及测速的基本原理和各种实现方法；雷达系统部分包括脉冲多普勒雷达、相控阵雷达、合成孔径雷达及其他体制雷达系统的原理。并且详细讨论了雷达作用距离方程，并增加了雷达抗干扰原理内容。

本教材内容删除了以往雷达原理教材中一些陈旧的内容，较好地体现了20世纪80年代以来雷达技术的新发展。

本书可作为雷达专业的原理与系统课程教材，也可作为雷达工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机载雷达原理与系统/严利华, 姬宪法, 梅金国编

著. --北京: 航空工业出版社, 2010. 5 (2018. 7 重印)

ISBN 978 - 7 - 80243 - 546 - 9

I. ①机… II. ①严… ②姬… ③梅… III. ①机载雷
达—教材 IV. ①TN959. 73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第093399号

机载雷达原理与系统

Jizai Leida Yuanli Yu Xitong

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2010年5月第1版

2018年7月第3次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 26.75

字数: 667千字

印数: 2701—3500

定价: 58.00元

前 言

机载雷达是作战飞机探测目标参数的重要传感器，战争的需要推动了雷达理论和技术的快速发展。世界上第一部雷达是一种米波雷达，能探测空中飞机；世界上第一部机载预警雷达是一部200MHz的雷达，用来监视入侵飞机；1940年英国人又首先制造出了能产生3000MHz、1kW功率的磁控管，雷达进入了微波时代。早期的机载雷达一般采用脉冲体制，没有下视能力，也限制了飞机作战效能的发挥。

20世纪50~60年代雷达理论有了重大发展，提出了单脉冲、相控阵、脉冲压缩、合成孔径、脉冲多普勒概念，建立了匹配滤波器理论、统计检测理论。美国发明了栅控行波管，多种型号PD火控雷达开始研制。70~80年代美国成功研制和装备了多种机载脉冲多普勒火控雷达。机载雷达由单脉冲雷达发展到脉冲多普勒体制雷达是一种质的飞跃，在这些雷达中广泛采用了数字总线技术及高效平板缝隙阵列天线、大功率低噪声行波管放大器、高精度频率综合器、DBS波束锐化、卡尔曼滤波、恒虚警处理等现代雷达技术，大大提高了机载雷达的探测性能。相控阵体制雷达具有同时多目标、大功率口径积、反应时间快和高可靠性等优点，是机载雷达的发展方向。

本书包括雷达原理、雷达测量方法及雷达系统三大部分。全书共分15章。第1章介绍了机载雷达的基本原理和基本概念，第2~6章介绍了机载雷达的发射机、接收机、微波馈电与天线、显示系统等雷达原理部分的内容；第7~10章介绍了雷达的测距、测角、测速等雷达测量方法；第11~14章介绍了脉冲多普勒雷达、相控阵雷达、合成孔径雷达、连续波雷达、调频雷达、脉冲压缩雷达等新体制雷达，最后介绍了雷达抗干扰的有关原理。为了方便读者学习，本教材对雷达工作原理涉及到的微波技术、天线和微波电子线路的基础知识也进行了简要介绍，此部分内容可根据实际课时需要选用。

本书是一本适合初、中级技术人员阅读的雷达原理教材或技术指导手册，是作者多年来从事机载雷达教学科研工作的总结，旨在从最基本的概念上对机载雷达原理加以阐述，着重物理概念的分析，为读者提供一种浅显易懂的机载雷达原理入门手段。其特点是：内容系统化、综合化，知识覆盖全面，表述通俗易懂。本书既可作为雷达专业的原理与系统课程教材，也可作为雷达工程技术人员的参考书。由于编者水平有限，不足之处在所难免，希望读者批评指正。

目 录

第 1 章 雷达概述	(1)
1.1 雷达探测目标的基本原理	(1)
1.1.1 雷达目标回波携带的目标信息	(1)
1.1.2 目标位置参数的测量原理	(2)
1.2 脉冲雷达的基本组成及工作原理	(3)
1.2.1 雷达的基本组成	(3)
1.2.2 雷达的基本工作原理	(6)
1.3 雷达的工作频率	(9)
1.4 雷达的应用及发展	(10)
1.4.1 雷达的应用类型及特点	(10)
1.4.2 现代雷达的特点及发展	(12)
第 2 章 雷达发射机	(15)
2.1 概述	(15)
2.1.1 脉冲雷达发射机的类型	(15)
2.1.2 脉冲雷达发射机的主要技术性能	(17)
2.2 磁控管振荡器	(19)
2.2.1 磁控管的结构	(19)
2.2.2 磁控管的工作原理	(20)
2.2.3 磁控管电路	(27)
2.2.4 磁控管振荡器使用注意问题	(28)
2.3 行波管放大器	(29)
2.3.1 行波管的基本结构	(30)
2.3.2 行波管放大器的工作原理	(32)
2.3.3 行波管放大器的主要性能	(36)
2.3.4 行波管放大器使用注意事项	(37)
2.4 大功率脉冲调制器	(38)
2.4.1 概述	(38)
2.4.2 线性调制器	(40)
2.5 固态发射机	(49)
2.5.1 固态高功率放大器模块	(49)
2.5.2 微波单片集成(MMIC)收发模块	(50)
2.5.3 固态发射机的应用	(51)
第 3 章 微波馈电与天线	(55)
3.1 微波馈电器件	(56)
3.1.1 微波连接装置	(56)

3.1.2	收发开关(双工器)	(60)
3.1.3	其他微波馈电器件	(65)
3.2	雷达天线	(67)
3.2.1	电磁波的辐射和接收	(67)
3.2.2	天线的方向性	(71)
3.2.3	机载雷达常用天线及特点	(72)
第4章	雷达接收机	(77)
4.1	概述	(77)
4.1.1	雷达接收机的组成和性能指标	(77)
4.1.2	雷达接收机的噪声及噪声系数和噪声温度	(80)
4.1.3	雷达接收机的灵敏度和通频带	(86)
4.2	混频器	(88)
4.2.1	微波混频晶体二极管	(89)
4.2.2	单端式晶体混频器	(90)
4.2.3	平衡式晶体混频器	(94)
4.3	高放、中放及增益控制	(99)
4.3.1	高放(高增益、低噪声射频放大器)	(99)
4.3.2	中频放大器	(100)
4.3.3	接收机的动态范围和增益控制	(101)
4.4	信号检波及视频放大器	(104)
4.4.1	包络检波器(峰值包络检波器)	(104)
4.4.2	相位检波器(同步检波器)	(105)
4.4.3	视频放大器	(107)
4.5	本振及自动频率调整电路(AFC)	(107)
4.5.1	本振	(107)
4.5.2	自动频率调整电路(AFC)	(114)
第5章	雷达目标的显示	(122)
5.1	概述	(122)
5.1.1	雷达目标显示器的主要类型	(122)
5.1.2	对雷达目标显示器的主要要求	(124)
5.2	示波管显示器原理	(125)
5.2.1	电偏式示波管	(125)
5.2.2	距离显示器(A显)	(128)
5.2.3	极坐标平面位置显示器(P显)	(132)
5.2.4	方位—距离显示器(B显)	(134)
5.3	电视光栅型显示器	(135)
5.3.1	电视光栅扫描原理	(135)
5.3.2	电视光栅型显示器	(138)
5.3.3	雷达目标显示电视图像信号形成原理	(140)

第6章 雷达天线伺服驱动系统	(143)
6.1 概述	(143)
6.1.1 雷达天线伺服驱动系统的任务	(143)
6.1.2 组成及基本关系	(143)
6.1.3 性能要求	(145)
6.2 伺服驱动系统的主要器件	(145)
6.2.1 雷达伺服驱动器件的分类	(145)
6.2.2 雷达伺服驱动主要器件	(145)
6.3 伺服驱动系统的工作原理	(156)
6.3.1 机电伺服驱动系统	(156)
6.3.2 电液伺服驱动系统	(159)
第7章 雷达的性能及信号检测	(161)
7.1 雷达的最大探测距离	(161)
7.1.1 雷达方程	(161)
7.1.2 雷达方程的讨论	(163)
7.2 雷达回波信号检测的统计性质	(166)
7.2.1 门限检测	(166)
7.2.2 虚警概率和发现概率	(167)
7.2.3 脉冲积累对检测性能的改善	(171)
7.2.4 雷达信号检测的恒虚警处理(CFAR)	(172)
7.3 脉冲雷达的主要性能参数	(176)
7.3.1 雷达的主要战术(应用)性能参数	(176)
7.3.2 雷达的主要技术性能参数	(177)
第8章 雷达目标的距离测量方法	(179)
8.1 脉冲延时测距	(179)
8.1.1 基本原理	(179)
8.1.2 距离分辨力和测距范围	(180)
8.1.3 测距模糊及其解决办法	(181)
8.2 调频法测距	(184)
8.2.1 调频连续波测距	(185)
8.2.2 脉冲调频测距	(187)
8.3 距离跟踪(自动测距)原理	(189)
8.3.1 模拟式自动测距系统基本原理	(190)
8.3.2 计算机数据处理控制的测距系统基本原理	(195)
8.3.3 数字式自动测距系统基本原理	(196)
第9章 雷达目标的角度测量方法	(205)
9.1 雷达目标的角度测量基本方法	(205)
9.1.1 相位法测角	(205)
9.1.2 振幅法测角	(209)

9.2 角度跟踪原理	(211)
9.2.1 圆锥扫描角度跟踪系统	(211)
9.2.2 单脉冲角度跟踪系统	(214)
第10章 雷达目标相对速度的测量方法	(222)
10.1 多普勒效应及目标回波的频谱	(222)
10.1.1 多普勒效应	(222)
10.1.2 目标回波的频谱	(223)
10.2 多普勒频率的检测方法	(230)
10.2.1 窄带滤波器组	(230)
10.2.2 数字窄带多普勒滤波器组	(231)
10.2.3 速度模糊和盲速及其解决方法	(235)
10.3 速度跟踪原理	(237)
10.3.1 连续波测速雷达速度跟踪原理	(237)
10.3.2 脉冲雷达速度跟踪原理	(238)
第11章 脉冲多普勒雷达原理	(240)
11.1 概述	(240)
11.1.1 PD 雷达的基本原理	(241)
11.1.2 PD 雷达技术的主要特点	(245)
11.2 PD 雷达地面杂波的多普勒频谱	(247)
11.2.1 地面杂波的多普勒频谱	(247)
11.2.2 地面杂波频谱与运动目标频谱的关系	(251)
11.2.3 地面杂波的射频信号频谱	(253)
11.2.4 距离模糊和多普勒模糊对地面杂波的影响	(254)
11.3 PD 雷达的三种 PRF 工作模式	(257)
11.3.1 PD 雷达脉冲重复频率的分类及特点	(257)
11.3.2 低 PRF 工作模式	(261)
11.3.3 中 PRF 工作模式	(266)
11.3.4 高 PRF 工作模式	(274)
11.4 PD 雷达的信号与数据处理	(281)
11.4.1 概述	(281)
11.4.2 PD 雷达信号的数字处理	(284)
11.4.3 跟踪技术	(289)
11.4.4 PD 雷达信号与数据处理方法及过程举例	(295)
11.5 PD 雷达的距离性能	(307)
11.5.1 PD 雷达的工作特点	(307)
11.5.2 PD 雷达的距离方程	(310)
11.5.3 PD 雷达的平均距离性能	(311)
11.5.4 PD 雷达与常规脉冲雷达距离性能比较	(313)
11.5.5 中 PRF PD 雷达的距离性能	(314)

第 12 章 相控阵雷达原理	(316)
12.1 概述	(316)
12.1.1 相位控制的基本概念	(316)
12.1.2 相控阵雷达的组成和特点	(318)
12.2 相位扫描系统的基本原理	(322)
12.2.1 天线阵	(322)
12.2.2 移相器	(329)
12.2.3 波束指向控制器	(332)
12.2.4 波束形成网络	(335)
12.3 有源相控阵雷达	(338)
12.3.1 T/R 组件的基本组成及特点	(338)
12.3.2 T/R 组件的发展过程	(340)
第 13 章 合成孔径(SAR)雷达原理	(343)
13.1 合成孔径(SAR)的基本原理	(343)
13.1.1 角分辨力	(344)
13.1.2 合成孔径基本原理	(345)
13.1.3 合成孔径回波信号的特点	(348)
13.1.4 SAR 的地图测绘方式(工作模式)	(351)
13.1.5 SAR 的关键技术	(354)
13.2 SAR 技术信号数字处理成像的基本原理	(355)
13.2.1 非聚焦型合成孔径信号数字处理成像方法	(356)
13.2.2 聚焦型 SAR 信号处理成像方法	(358)
13.2.3 合成孔径信号的多普勒处理成像方法	(360)
13.3 多普勒波束锐化(DBS)和聚束式(SLM)地图测绘原理	(364)
13.3.1 DBS 和 SLM 的基本原理	(364)
13.3.2 DBS 的实现方法	(369)
第 14 章 其他体制雷达原理简介	(371)
14.1 连续波(CW)雷达和调频(FM)雷达	(371)
14.1.1 连续波(CW)雷达	(371)
14.1.2 调频(FM)连续波雷达	(372)
14.1.3 相位调制连续波雷达	(372)
14.1.4 连续波雷达的应用举例	(374)
14.2 脉冲压缩雷达	(375)
14.2.1 线性调频脉冲压缩	(376)
14.2.2 相位编码脉冲压缩原理	(385)
14.3 跟踪雷达	(388)
14.3.1 概述	(388)
14.3.2 单目标跟踪	(389)
14.3.3 边扫描边跟踪	(390)

第 15 章 雷达抗干扰(ECCM)原理	(398)
15.1 电子战和 ECCM 的定义	(398)
15.1.1 电子支援措施(ESM)	(398)
15.1.2 电子干扰措施(ECM)	(399)
15.1.3 ECCM 技术的目标及分类法	(400)
15.2 雷达抗干扰(ECCM)技术	(401)
15.2.1 与天线有关的 ECCM 技术	(401)
15.2.2 与发射机有关的 ECCM 技术	(405)
15.2.3 与接收机有关的 ECCM 技术	(407)
15.2.4 与信号处理有关的 ECCM 技术	(411)
15.2.5 操作及部署技术	(412)
15.3 ECCM 技术的应用	(413)
15.3.1 ECCM 技术在警戒雷达中的应用	(413)
15.3.2 ECCM 技术在跟踪雷达中的应用	(414)
参考文献	(417)

第1章 雷达概述

雷达是英文 Radar 的译音，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其在空间的位置，因此雷达又称为“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，而且还包括测量目标的径向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，都可能作为雷达的探测目标，这要根据雷达用途而定。

1.1 雷达探测目标的基本原理

1.1.1 雷达目标回波携带的目标信息

雷达利用无线电波探测目标是利用目标对电磁波的反射回波来确定目标位置的，这是雷达探测目标的物理依据。

各种目标对光都有反射作用，这是大家都知道的道理。光也是一种电磁波，只不过它的频率比无线电波的频率高很多，所以无线电波和光波一样都是电磁能流，而且都具有定向、直线传播特性，且传播速度等于光速 c 。

当雷达天线辐射的电磁能流直线向前传播照射到目标时，会引起电磁能流的反射（目标对电磁波的二次散射特性），如图 1-1 所示，一部分能量沿入射方向反射回去，被雷达接收后称为目标回波。由于目标回波的存在，雷达即探测到目标（发现了目标）。

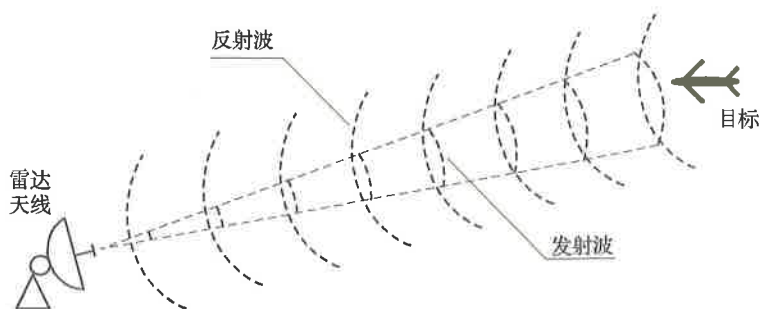


图 1-1 雷达探测目标

雷达接收的目标回波，携带着目标的位置及特征信息。目标的位置信息是指目标相对雷达的距离、方向角（方位、俯仰角）及径向速度；目标的特征信息是指目标的尺寸、形状以及目标的振动、飞机螺旋桨的转动或喷气发动机的转动（使回波产生特殊的

调制)等。

目标的距离信息反映在回波脉冲相对于发射脉冲的延迟时间上;目标的方向角反映在接收到目标回波时,雷达天线的指向角上;目标的径向速度信息反映在回波信号的射频频率的变化量(多普勒频率)上,以及回波脉冲的距离变化率上。

目标的尺寸、形状信息反映在雷达接收回波信号在纵向(距离)及横向(方位)的宽度上;另外,目标的振动、飞机螺旋桨的转动或喷气发动机的转动会使回波产生特殊的调制(可通过对雷达回波信号的频谱分析来检测)。

1.1.2 目标位置参数的测量原理

(1) 距离的测量

目标的距离可以通过测量电磁波到达目标和从目标返回的时间来确定,因为电磁波的能量基本上是以不变的速度(光速 c)传播的。设目标相对雷达的距离为 R ,则电磁波传播的距离等于光速乘以时间间隔,即:

$$2R = c \cdot t_r$$

或
$$R = c \cdot \frac{t_r}{2}$$

式中: R 为目标相对雷达的单程距离, m;

t_r 为电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔;

c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s。

由于电磁波的传播速度很快,因此在雷达技术中常用的时间单位为微秒(μs),即

$$1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$$

显然,如果时间间隔为 $1 \mu\text{s}$,则目标距离为150m。

对脉冲雷达来说,测量电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔的方法是观察或测量发射脉冲与接收的该目标回波脉冲之间的时间延迟,如图1-2所示。

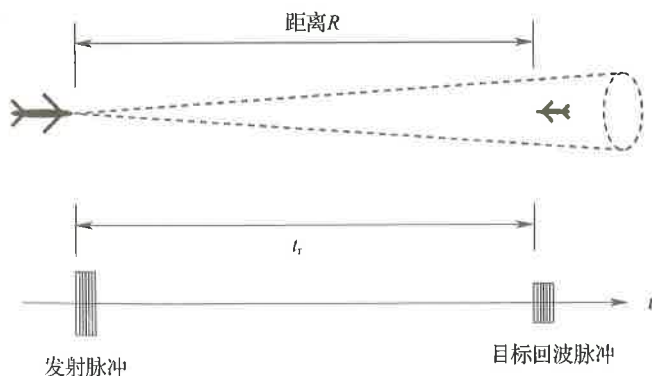


图1-2 发射脉冲与回波脉冲之间的时间延迟

脉冲雷达工作时,雷达天线向空间辐射的是一个一个的高频脉冲,即作用时间极短的高频无线电波。高频脉冲之间有一定的时间间隔,称之为重复周期。这样的电波照射到目标时,引起的目标反射回波也是脉冲形式。通过测量发射脉冲与回波脉冲之间的时间延迟,即可确定目标的距离。

测量这种时间延迟的方法有多种,我们将在后续内容中介绍。

(2) 方向角度的测量

目标相对雷达的方向角度是指目标相对雷达的方位角度和俯仰角度。在雷达技术中,测量这两个角度基本上都是利用雷达天线的方向性来实现的。

由于雷达通过天线辐射的电磁波能量是汇集在很窄的波束内(通常波束角度为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$),因此根据接收到目标回波时天线所处的方向角度,即可确定目标的方向角度。

对机载火控雷达来说,目标的方向角度的参照标准是飞机的机体坐标系,即飞机的纵轴线为方向角度的零点,其水平面为方位坐标,垂直面为俯仰坐标。

(3) 相对速度的测量

测量相对速度的方法有两种。一种是通过测量距离变化率求得相对速度值,即当目标与雷达之间有相对速度时,雷达测量得到的目标距离值是在不断变化的,将一段时间内目标距离的变化量除以这段时间值,即可求得目标的相对速度。

另一种方法是通过测量由多普勒效应引起的目标回波信号频率的变化量(多普勒频率)求得目标的相对速度。

多普勒效应不仅在声波传播中存在,同样也存在于电磁波传播中。对雷达而言,当雷达与目标之间存在相对运动时,多普勒效应体现在回波信号的频率与发射信号的频率不相等。雷达发射电磁波信号后遇到一个朝着雷达运动的目标时,由于多普勒效应,从这个目标散射回的电磁波信号的频率将高于雷达的发射频率。同样,此反射信号被雷达接收时由于多普勒效应频率也相应增高。

由于多普勒效应,当目标和雷达之间存在有相对径向运动时,目标回波信号频率比发射信号频率增加(或减少)的频移量,我们称为运动目标的多普勒频率(或频移)。其多普勒频率的大小与径向速度成正比,而与雷达波长成反比,即:

$$f_d = -\frac{2V_r}{\lambda}$$

式中: f_d 为目标的多普勒频率;

V_r 为目标与雷达之间的径向速度;

λ 为发射信号波长。

显然只要测定目标的多普勒频率,即测定了相对速度。

1.2 脉冲雷达的基本组成及工作原理

1.2.1 雷达的基本组成

1.2.1.1 普通脉冲雷达的基本组成

普通脉冲雷达系统的基本组成框图如图1-3所示。

(1) 定时器

定时器的作用相当于是脉冲雷达的时钟,它产生一系列时间间隔相等的触发脉冲,送到发射机和显示器使它们同步工作。

(2) 发射机

发射机在触发脉冲控制下产生大功率高频发射脉冲。各个发射脉冲的持续时间很短,彼此之间的间歇时间很长,这就是脉冲雷达的特点。

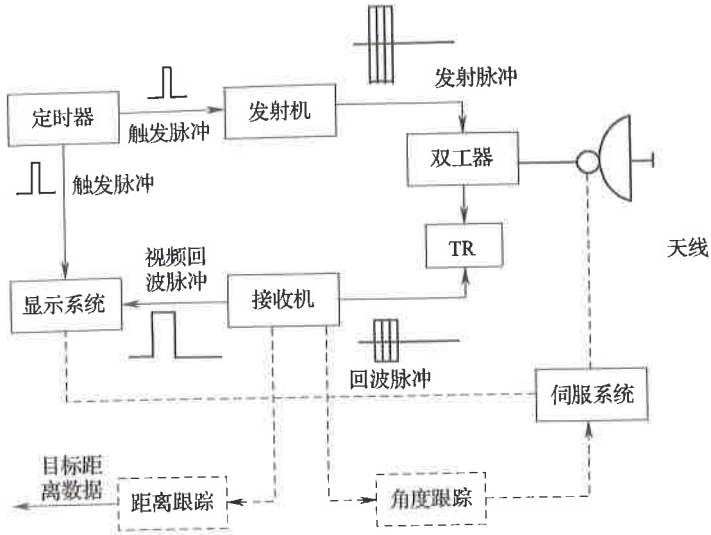


图 1-3 脉冲雷达系统的基本组成框图

(3) 高频传输系统

高频传输系统又称为微波馈电系统，框图中的双工器和接收机保护装置（TR）就是馈电系统的器件。高频传输系统的任务是：发射时将高频脉冲传送到天线；接收时将天线接收的回波信号传送到接收机。

脉冲雷达的天线是收、发共用的，因此高频传输系统中设置了收、发转换装置，即双工器。双工器又称为收发开关，它在发射期间将发射机与天线接通，断开接收机；其余时间则将天线与接收机接通，断开发射机。为了防止发射机的能量经双工器泄漏，同样防止特大反射能量进入接收机使接收机电路损坏，在双工器到接收机之间，还设置了接收机保护装置（TR）。

(4) 天线

天线担负着辐射和接收无线电波的双重任务。发射脉冲信号由天线定向地辐射出去，形成电磁波束。如果辐射方向没有目标，则无目标反射回波；有目标时，目标反射回波信号被天线接收。

(5) 接收机

天线接收下来的目标回波信号是很微弱的，接收机的任务就是将微弱的回波脉冲信号加以放大，并变换成为视频回波脉冲信号，而后将其送往显示系统。

视频信号是一种频带比较宽的脉冲信号，其频谱从几十赫到几兆赫，甚至几十兆赫。这种信号的频谱，也叫视频谱，这是因为电视图像信号也具有这样的频谱。凡是具有这样宽的频谱，有无限高频分量的信号，都被称为视频信号。

(6) 显示系统

显示系统是雷达设备与操纵者之间的人机界面，即雷达将测定的目标位置信息通过显示系统告知操纵者。

显示系统通常由显示器和控制电路组成，在显示器屏幕上显示目标位置信息。雷达显示器的类型较多，我们这里只以方位、距离显示器为例来说明显示目标位置信息的原理。

B型显示器是一种以直角坐标方式显示目标距离和方位角度的显示器，它的两个直角坐标分别代表方位角度和距离，其显示画面如图1-4所示。

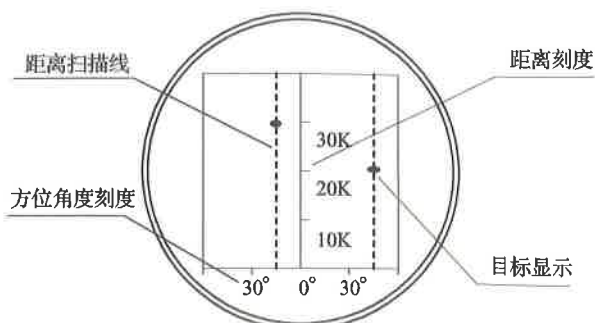


图1-4 B型显示器显示画面

雷达工作时，在触发脉冲的控制下显示器示波管的电子束从下到上作垂直（距离）扫描，形成距离扫描亮线；同时在天线输出的方位角度信号的控制下，距离扫描线又从左到右进行方位扫描（与天线的方位转动方向和角度对应），从而形成B型扫描光栅。视频回波脉冲信号控制电子束的强度，从而在扫描光栅上显示出目标亮点。

通过显示器上目标回波亮点对应的距离和方位角度刻度，即可知道目标的距离和方位角度。

(7) 伺服系统

伺服系统用来控制天线转动，使天线辐射的波束按一定的规律在空间移动，以搜索或跟踪目标，并且不断地把天线所指向的方位角和俯仰角数据送到显示器和其他系统，以便在测定目标距离的同时，测定目标的方位角和俯仰角。

以上是普通脉冲雷达的基本组成和概略原理，实际雷达要复杂得多，如目标距离的精确测定系统（距离跟踪）、目标角度位置跟踪系统（角度跟踪）等都是雷达的组成部分，这些内容我们将在后续章节中介绍。

1.2.1.2 多功能脉冲多普勒雷达的基本组成

由于集成电路和数字计算机技术的发展和运用，使得雷达技术的发展日臻完善，许多新技术、多功能、高性能等得到实现。下面以多功能脉冲多普勒雷达为例来说明现代雷达的基本组成。

现代先进的多功能脉冲多普勒雷达的基本组成原理图如图1-5所示。

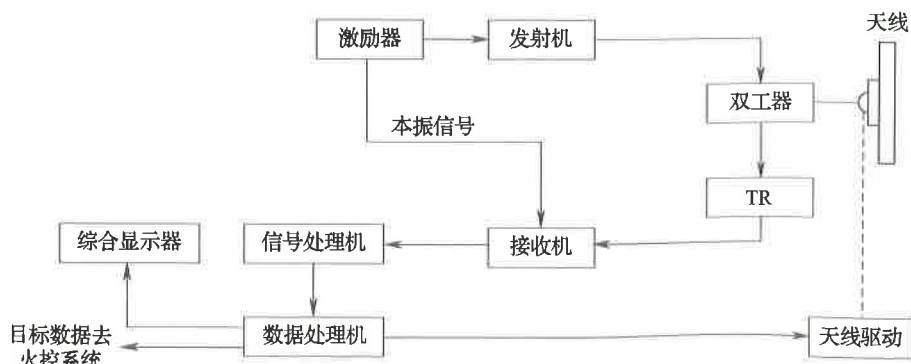


图1-5 多功能脉冲多普勒雷达的基本组成原理图

(1) 激励器

激励器产生一个具有高频率稳定度的微波频率低功率连续波信号送往发射机。同时,激励器还提供与发射信号频率相参的本振信号加到接收机,从而保证接收机不会丢失目标回波的多普勒频率信息。

(2) 发射机

发射机是采用为栅控行波管作为功率放大器,对激励器来的输入的低功率信号放大进行功率放大。调制脉冲加到行波管的控制栅极使管子“通”或“断”,从而使行波管输出射频脉冲。

由于发射脉冲基本上是由连续波切出来的,因此相邻射频脉冲之间是相干的,这样就能够使雷达测量目标回波中的多普勒频移。

(3) 天线

天线是一种平板阵列天线,它是在光滑表面上分布着许多辐射元的阵列,辐射元是开在形成天线表面的组合波导壁上的槽。

这种平板阵列天线具有高增益、低副瓣特性。这对运动目标回波信号的检测是很重要的。

(4) 接收机

接收机的任务同样是将微弱的回波脉冲信号加以放大,并变换成为视频回波脉冲信号;与普通雷达不同的是要将每个发射周期接收的回波信号按距离单元的先后顺序进行模/数(A/D)转换,将各个距离单元回波信号的幅度数字化,然后输到信号处理机。

(5) 数字信号处理机

数字信号处理机把从A/D变换器输入的各距离单元的回波数据进行分析处理,并通过多普勒频谱分析对各距离单元回波进行频域检测,当目标被检测出来时,即可确定目标的视在距离和多普勒频率。

检测出来的目标位置数据送到数据处理机,进行进一步的处理。

(6) 雷达数据处理机

雷达数据处理机主要用来对雷达进行控制和检测目标数据处理。

检测目标的数据处理包括两个方面,一是对信号处理机检测出来的目标位置数据进行解模糊处理,得到目标的真实距离和多普勒频率(相对速度);然后与该目标对应的角度数据组合在一起,构成该目标的全部位置数据,并变换成在综合显示器所需的格式加到综合显示器显示。二是在雷达处于跟踪工作状态时,完成相应的目标跟踪数据(距离、速度、天线角度)相关及滤波。

另外,雷达数据处理机还负责与外部系统之间的信息与数据交换、控制雷达的工作模式,以及雷达整机系统的性能监测及自检(BIT)。

1.2.2 雷达的基本工作原理

雷达有三种基本工作状态,即对目标的搜索状态和跟踪状态,以及对地面的地图测绘。

1.2.2.1 搜索状态工作原理

搜索状态是指雷达天线辐射的电磁波束在一定空域内不断扫探的工作状态。

雷达发射的电磁波同探照灯发出的光束一样是一个波束,只能照射一个很小的区域。

要想在一个大的空间范围内搜索探测目标,必须使波束在空间按照一定规律移动,这种波束的移动称为扫探(扫描)。波束扫探的轨迹称为搜索扫描图形,扫探覆盖的区域称为扫描空间。例如,机载火控雷达在搜索时常用的搜索扫描图形如图1-6所示。

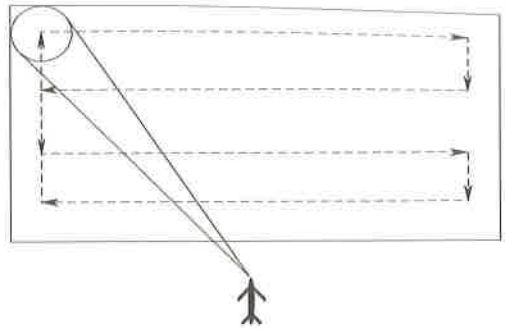


图1-6 波束扫探搜索扫描图形

在这种状态下,雷达伺服系统控制天线在方位、俯仰角度上按一定规律转动,当天线波束扫过目标时引起目标反射回波,目标反射回波被雷达接收后进入接收机进行放大变换成视频回波信号,然后经检测处理后在显示器上显示目标的空间位置数据。

搜索状态下,雷达信号处理系统通过目标回波脉冲信号测定目标的空间位置数据,并在显示器上显示搜索空域内的所有目标的位置信息。

搜索状态下由于雷达天线处于不断转动扫描状态,因此每一个目标的回波是断续的,即在一帧的扫描时间内每个目标只有一串回波脉冲;回波脉冲串的长度决定于天线波束照射目标的时间(由天线扫描速度及天线波束宽度决定),回波脉冲串中脉冲个数的多少决定于发射脉冲重复频率。

1.2.2.2 跟踪状态(单目标)工作原理

跟踪状态(单目标)是指雷达天线波束始终照射住一个目标的工作状态。

在这种状态下,由于天线波束始终照射目标,所以目标回波脉冲信号是连续的,因此雷达可以对此目标的位置进行连续的精确测定,并将测定的目标位置数据送到火控系统,以便对目标进行精确的攻击计算及对导弹的攻击位置进行装定。

跟踪状态下,雷达接收机输出的目标回波信号有和路信号及差路信号。雷达利用和路回波信号来测定目标的距离和相对速度,利用差路回波信号实现对雷达天线的控制,使其能够始终照射目标。

(1) 和路目标回波信号的处理

普通脉冲雷达对和路回波信号的处理是采用专门的测距系统电路(距离跟踪)来测定目标的距离和相对速度。其测定目标距离的方法通常为模拟电压式,即将目标回波相对发射脉冲的延迟时间以模拟电压的形式表示出来。

PD雷达对和路回波信号的处理,是通过和路回波信号的A/D转换数据进行数字处理来获得目标的距离和相对速度数据。

(2) 差路目标回波信号的处理

由于差路回波信号携带着目标的空间位置角度信息,因此可以利用差路信号来实现对雷达天线的控制,使天线波束始终照射目标。

a. 差路(方位、俯仰)回波信号与目标空间位置的关系

差路(方位、俯仰)回波信号与目标空间位置的关系如图1-7所示。

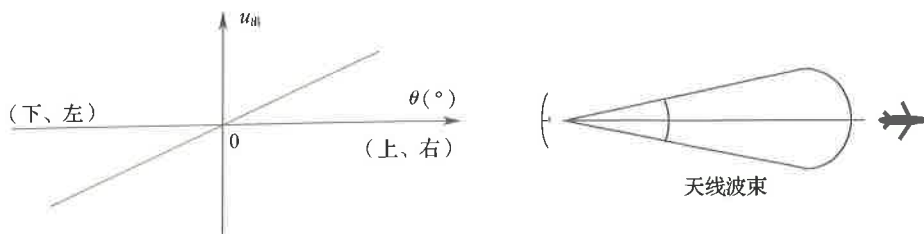


图 1-7 差路（方位、俯仰）回波信号与目标空间位置的关系

图中画出了俯仰差回波信号与目标空间位置的关系，即目标在俯仰上处于波束轴线上时，俯仰差信号为零；当目标偏离轴线上方时，俯仰差信号不为零，且其从接收机相位检波器的输出为正脉冲信号；当目标偏离轴线下方时，俯仰差信号也不为零，且其从接收机相位检波器的输出为负脉冲信号。

同样，当目标在方位上处于波束轴线上时，方位差信号为零；当目标偏离轴线右方时，方位差信号不为零，且其从接收机相位检波器的输出为正脉冲信号；当目标偏离轴线左方时，方位差信号也不为零，且其从接收机相位检波器的输出为负脉冲信号。

依据差路信号的上述特性，对差路信号进行处理可以实现对天线转动的控制，使天线波束始终照射目标。

b. 差路目标回波信号的处理方法（角度跟踪）

差路目标回波信号的处理过程也称为角度跟踪过程。

普通脉冲雷达实现角度跟踪的方法是：将方位差回波信号和俯仰差回波信号分别通过角度跟踪电路变换为直流信号，直流信号的极性和大小与差路回波脉冲信号的极性和大小相一致。方位差和俯仰差直流信号，分别加到天线的方位、俯仰转动控制电路，控制天线向着减小角误差的方向转动，直到天线波束轴线对准目标。

脉冲多普勒（PD）雷达对差路回波信号的处理方法与普通脉冲雷达基本相同，不同之处在于 PD 雷达是对方位和俯仰差路回波信号的 A/D 转换数据进行数字处理，然后由计算机控制天线向着减小角误差的方向转动，直到天线波束轴线对准目标。

1.2.2.3 地图测绘原理

利用机载雷达进行地图测绘是利用地面不同物体对雷达电磁波反射能力的不同来实现的，即通过显示天线波束扫过地面时所接收的回波信号强度的差异，在显示器上显示出一幅地面图形，即地面图。

雷达地图的分辨力远小于光学照片的分辨力，图 1-8 示出了同一地面的雷达地图显示图片和光学照片，虽然雷达地图的分辨力较差，但主要大型地貌特征已充分显示出来。

利用机载雷达进行地图测绘的工作方式通常有实波束、波束锐化（DBS）、合成孔径（SAR）等。不同的工作方式，采用不同的技术方法对地面回波信号进行处理，从而得到不同的地图显示精度。

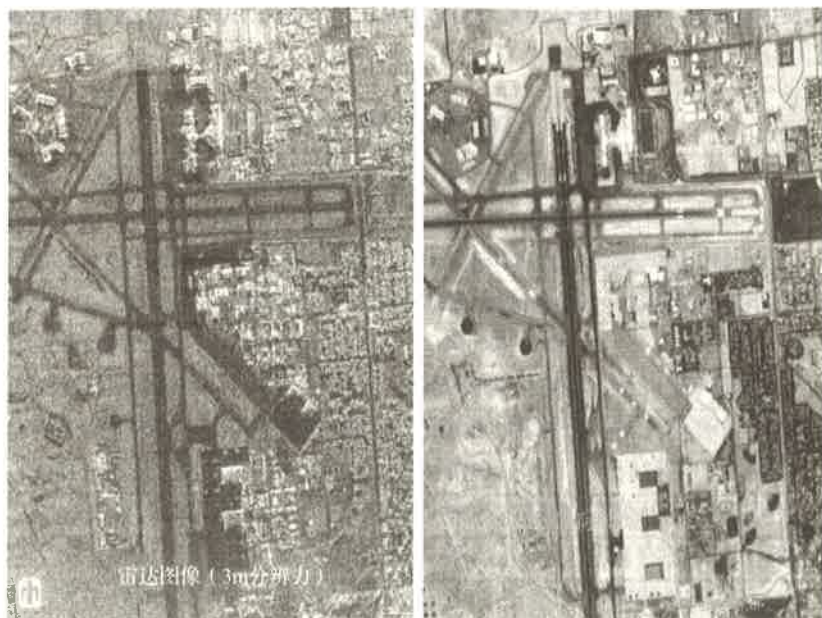


图 1-8 同一地面的雷达地图与光学照片

1.3 雷达的工作频率

从雷达的工作原理来讲，不论发射的频率为多少，只要是通过辐射电磁能量和利用从目标反射回来的回波，以便对目标进行探测和定位，都属于雷达系统的范畴。常用的雷达工作频率范围为 220 ~ 35000MHz 实际上各类雷达工作频率已超出上述范围。如超视距雷达的工作频率可以低到 2MHz，毫米波雷达的工作频率可以到 94GHz，激光雷达的工作频率更高。

雷达的工作频率和整个电磁波频谱如图 1-9 所示。

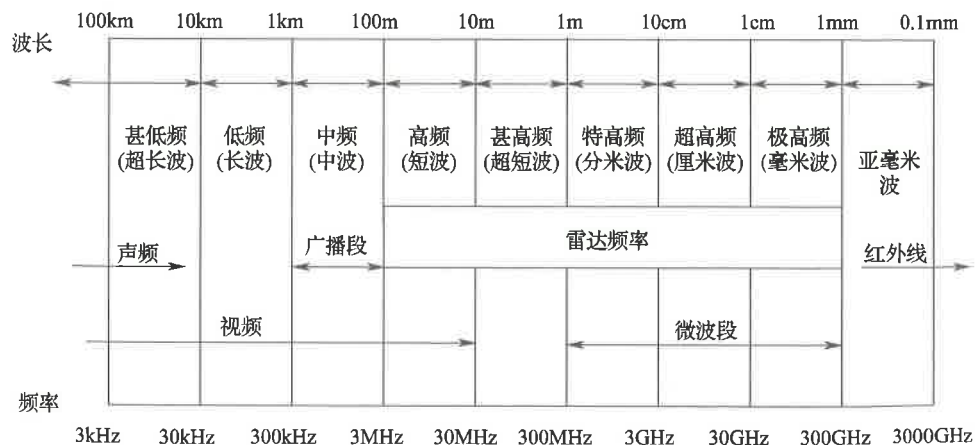


图 1-9 雷达频率和电磁波频谱

目前在雷达技术中，常对雷达工作频率用频段的名称，雷达频段和频率的对应关系如表 1-1 所示。

表 1-1 雷达频段和频率的对应关系

频段名称	频率	国际电信联盟分配的雷达频段
UHF	300 ~ 1000MHz	420 ~ 450MHz, 890 ~ 940MHz
L	1000 ~ 2000MHz	1215 ~ 1400MHz
S	2000 ~ 4000MHz	2300 ~ 2500MHz, 2700 ~ 3700MHz
C	4000 ~ 8000MHz	5250 ~ 5925MHz
X	8000 ~ 12500MHz	8500 ~ 10680MHz
Ku	12.5 ~ 18GHz	13.4 ~ 14GHz, 15.7 ~ 17.7GHz
K	18 ~ 26.5GHz	24.05 ~ 24.25GHz
Ka	26.5 ~ 40GHz	33.4 ~ 36GHz
mm	40 ~ 300GHz	

在雷达技术中，工作频率有时也用波长 (λ) 来表示。波长表示电磁波在其一个周期的时间内所传输的距离。波长与电磁波的频率（即雷达的工作频率）之间有固定的关系，即：

$$\lambda = c/f$$

如 S 波段代表波长以 10cm 为中心波长的频率、C 波段代表波长以 5cm 为中心波长的频率、X 波段代表波长以 3cm 为中心波长的频率、Ku 波段代表波长以 2.2cm 为中心波长的频率、Ka 波段代表波长以 8mm 为中心波长的频率。

1.4 雷达的应用及发展

1.4.1 雷达的应用类型及特点

雷达已应用于地面、海上、空中和太空。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、地面和海面目标外，还可用作大地测绘、地形回避及导航之用。

雷达的分类方法有多种：按雷达架设位置可分为地面雷达、舰艇雷达、机载雷达、气球载雷达、弹载雷达、航天雷达等；按工作波段可分为米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达等；按接收目标信号能源的性质可分为一次雷达、二次雷达和无源雷达；按技术体制特点可分为脉冲雷达、连续波雷达、圆锥扫描雷达、单脉冲雷达、动目标显示雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、频率捷变雷达、三坐标雷达、相控阵雷达、合成孔径雷达、超视距雷达和多基地雷达等。

按照承担的战术任务不同，又可分为以下几种。

(1) 用于警戒和引导的雷达

①对空情报雷达：用于搜索、监视与识别空中目标。包括警戒雷达，目标指示雷达和引导雷达。②对海警戒雷达：用于探测水面舰艇和低空、超低空飞行的目标。一般安装在

各种类型的水面舰艇上或架设在海岸、岛屿上。③机载预警雷达：装在预警飞机上，用于探测空中各种高度（尤其是低空、超低空）的飞行目标，同时还兼有指挥引导的功能。④弹道导弹预警雷达：用于探测洲际、中程与潜地弹道导弹，并能测定其瞬时位置、速度、发射点、弹着点等弹道参数。这种雷达多采用相控阵体制，对导弹的探测距离可达数千千米，并能同时跟踪数百个目标。⑤超视距雷达：工作在短波波段，用于探测地平线以下区域内的目标，有天波和地波两种超视距雷达。天波超视距雷达利用电磁波在电离层和地面之间跳跃传播，超视距探测在大气层中飞行的战略轰炸机和巡航导弹等目标。地波超视距雷达一般部署在沿海地区，辐射的电磁波沿海面绕射传播，超视距探测海面 and 空中目标。

(2) 用于武器控制的雷达

①炮瞄雷达：用来捕获与跟踪敌机，连续地测定目标坐标的实时数据，并通过射击指挥仪控制火炮瞄准射击。②导弹制导雷达：用来引导和控制战术导弹的飞行，有地面型和舰载型。③机载火控雷达：装在歼击机（战斗机）上，用来对敌机精确定位，控制航炮或导弹瞄准射击。④机载轰炸雷达：装在轰炸机上，用来搜索和识别地面或海面目标。它配有专用计算机，能根据载机的飞行参数和气象条件等，计算出投弹的准确位置。⑤导弹末制导雷达：装在导弹弹头内，在导弹飞行的末段，自动控制导弹飞向目标。⑥弹道导弹跟踪雷达：能连续测定弹道导弹的坐标和速度，并精确预测其未来位置。有相控阵与单脉冲两种体制。用于搜索和精密跟踪来袭的导弹目标，识别真弹头，测定其轨道，制导反弹道导弹。也用于弹道导弹试验的靶场测量。⑦鱼雷攻击雷达：装在鱼雷艇和潜艇上，用来搜索、跟踪海面目标，为鱼雷射击指挥仪提供目标的坐标和运动参数，保证鱼雷攻击。

(3) 用于侦察的雷达

①战场侦察雷达：供陆军部队用于侦察和监视战场上敌方运动中的车辆和人员。②炮位侦察校射雷达：地面炮兵用来测定敌方炮弹的飞行轨迹，确定其发射阵地并观测己方弹着点的坐标以校正火炮射击。③活动目标侦察校射雷达：用来探测地面或海面运动目标，并测定弹着点或水柱对目标的偏差，以校正地炮或岸炮射击。④侦察与地形测绘雷达：是一种机载合成孔径雷达，用来侦察和测绘地面或海面固定目标，有的也能探测活动目标。它具有很高的分辨力，可获得清晰度很高的图像。

(4) 用于航行保障的雷达

①航行雷达：装在飞机上，用来观测飞机前方气象情况、空中目标和地形地物、保证飞机飞行安全。②航海雷达：装在舰艇上，用来观测岛岸目标，以确定舰位，并根据所显示的航路情况，引导和监督舰艇安全航行。③着陆（舰）雷达：在复杂气象条件下，用来引导飞机安全着陆或着舰。④地形跟随雷达和地物回避雷达：地形跟随雷达和计算机、飞行控制系统配合，能使飞机和地面保持一定的高度，跟随地形起伏飞行；地物回避雷达在遇到障碍物时，能提供回避信号，使飞机绕过障碍物飞行。主要用来保障飞机低空、超低空飞行安全。

(5) 用于气象观测的雷达

主要有测风雷达、测云雷达和测雨雷达等。用来探测空中云、雨的状态，定云层高度和厚度，测定不同大气层里的风向、风速及各种气象要素，为保障航空、航海、火炮射击、导弹和航天器发射、核试验及其他军事行动提供气象情报。

有些雷达和大型兵器上还装有雷达敌我识别系统，用于配合雷达识别目标的敌我属

性，它是一种二次雷达，由询问机和应答机组成。询问机与雷达配置在一起，而应答机则安装在飞机或舰艇上，当雷达发现目标时，采用密码询问和应答的方式，对目标进行识别。

1.4.2 现代雷达的特点及发展

从1886年德国物理学家H. 赫兹（Heinrich Hertz）验证了电磁波的产生、接收和散射至今，雷达的发展已经走过100多年的历程。

从20世纪50年代末以来，由于航天技术的飞速发展，飞机、导弹、人造卫星以及宇宙飞船等均采用雷达作为探测和控制手段。尤其是20世纪60年代中研制的反洲际弹道导弹系统提出了高精度、远距离、高分辨力和多目标测量的要求，使雷达技术进入蓬勃发展的时期。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，研制出主控振荡器—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、隧道二极管放大器等的的应用，使雷达接收机灵敏度大为提高，增大了雷达的作用距离；由于雷达中数字电路的广泛应用以及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。雷达的工作波长，从短波扩展至毫米波、红外线和紫外线以及激光领域。在这个时期，微波全息雷达、毫米波雷达、激光雷达相继出现。

20世纪70年代以来，雷达的性能日益提高而应用范围也持续拓宽，举例如下。

①由于VHLSI和VLSI的迅猛发展，数字技术和计算机在雷达中的应用更为广泛深入，从而使得动目标检测（MTD）和脉冲多普勒（PD）等雷达的信号处理机更为精致、灵活，性能明显提高，而且使雷达系统的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合成孔径雷达（SAR）由于具有很高的距离和角度（切向距）分辨能力而可以对实况成像；逆合成孔径雷达（ISAR）则可用于目标成像。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、频宽脉压信号，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技术更为成熟，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许多场合可用平面阵列天线代替抛物面天线，阵列天线的基本优点是可以快速和灵活地实现波束扫描和波束形状变化，因而有很好的应用前景，例如，可以获得超低副瓣，用于机载雷达或抗干扰；可以组成自适应旁瓣相消系统以抗干扰。

⑥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，其天线阵由许多天线单元排成的阵列组成。通常，天线阵元少的有几个，多则为几千，甚至有的达到数十万。由于此类雷达利用波束控制计算机按一定的程序来控制天线阵的移相器，从而改变阵面上雷达辐射电磁波的相位分布，使电磁波束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、新型器件（功率微波器件、VHSIC、MMIC等）以及与计算机技术结

合后发展到高级阶段的产物，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、高可靠性和高自适应能力等优点，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。

而且，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。

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。

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。当前雷达面临着所谓“四大”威胁，即快速应变的电子侦察及强烈的电子干扰；具有掠地、掠海能力的低空、超低空飞机和巡航导弹；使雷达散射面积成百上千倍减小的隐身飞行器；快速反应自主式高速反辐射导弹。因此，对雷达的要求越来越高。首先它应减少雷达信号被电子环境监测器（ESM）、反辐射导弹（ARM）截获的概率，使雷达信号更难于被这些装置发现和跟踪。同时，雷达应保证实时、可靠地从极强的自然干扰（杂波）和人为干扰中检测大量目标。由于目标的雷达截面积从很低值（“隐身”目标）到相当高值（大舰只、大飞机或强杂波）的范围内变化，所以还要求雷达有很大的工作动态范围和很高的虚警鉴别力，即使在多目标（如群目标袭击）环境中亦如此。此外，还应当采用目标分类和威胁估计，并将被处理的数据有效地传送给电子计算机和终端录取及显示装置。

为了对付这些挑战，已经并在继续开发一些行之有效的雷达新技术。例如，频率、波束、波形、功率、重复频率等雷达基本参数的捷变或自适应捷变技术，功率合成、匹配滤波、相参积累、恒虚警处理（CFAR）、大动态线性检测器、多普勒滤波等技术，低截获概率（LPI）技术，极化信息处理技术，扩谱技术，超低旁瓣天线技术，多种发射波形设计技术，数字波束形成技术等。对抗“四大”威胁必然是上述一系列先进技术的综合运用，并非某一单项技术手段所能奏效的。在采用上述新技术的基础上，已经或正在研制各种新体制雷达，诸如无源雷达、双（多）基地雷达、相控阵雷达、机（或星）载预警雷达、稀布阵雷达、多载频雷达、噪声雷达、谐波雷达、微波成像雷达、毫米波雷达、激光雷达以及冲击雷达等，并且与红外技术、电视技术等构成一个以雷达、光电和其他无源探测设备为中心的极为复杂的综合空地一体化探测网，充分利用联合监视网在频率分集、空间分集和能量分集上的特点，在实现坐标和时间的归一化处理基础上，达到互相补充和信息资源共享。由于提取的是来自若干传感器的信息，而不是其中一个传感器单独给出的数据，所以大大提高了系统的目标测量和识别、反隐身、抗干扰和反摧毁的能力，从而使“四大”威胁同样会面临极度的困境。这就是事物发展的规律，雷达技术和反雷达技术必将在相互斗争中前进和发展。

当前对于雷达的另一个要求是多功能与多用途。在现代雷达应用中，由于作战空间和时间的限制，加之快速反应能力的要求和系统综合性的要求，雷达必须具备多功能和综合应用的能力。例如，要求一部雷达能同时对多目标实施搜索、截获、跟踪、识别及武器制

导或火力控制等功能；要求雷达与通信、指挥控制、电子战等功能构成综合体等。

从上面的介绍不难看出，雷达技术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的性能；另一方面不断出现的各种新技术的应用，也使雷达得到不断的改善。

雷达的功能可以满足重要的社会和军事需要，而且在诸多应用领域还没有替代者，因此雷达的发展具有生命力而会持续向前。