



普通高等教育“十二五”规划教材

◎ 电子信息科学与工程专业 规划教材

无线电定位 原理与应用

◎ 姜义成 主编

◎ 张 云 王 勇 参编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程专业规划教材

无线电定位原理与应用

姜义成 主编

张 云 王 勇 参编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容为雷达工作原理及应用,此外还包括无线电定位中的全球卫星定位系统(GPS)、无源定位技术及原理两部分内容。雷达工作原理及应用部分主要包括雷达距离方程;雷达发射机和雷达接收机的组成及工作原理;雷达测距原理,包括脉冲法测距、调频法测距和相位法测距;雷达测角原理,包括振幅法测角、相位法测角和自动测角系统;雷达测速原理;高分辨成像雷达技术与应用,包括高分辨雷达一维距离成像原理、方位高分辨和合成孔径技术、高分辨雷达二维成像原理与方法。在GPS部分,主要包括GPS伪随机码及其特性、伪随机码测距原理、GPS导航接收机工作原理等;无源定位技术及原理部分,主要包括单星测向定位法、双星时差频差定位法、多星时差定位法等。

本书在介绍无线电定位原理的同时,给出了一些应用实例以及作者多年的科研成果,同时每章都配备了一定数量的思考题。

本书可作为电子信息工程等相关专业的本科生教材,也可作为信息与通信工程学科研究生和相关工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线电定位原理与应用 / 姜义成主编. —北京:电子工业出版社, 2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材. 电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-13335-0

I. ①无… II. ①姜… III. ①无线电定位—高等学校—教材 IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第068253号

策划编辑:竺南直

责任编辑:周宏敏

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:397千字

印 次:2011年5月第1次印刷

印 数:4000册 定价:35.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着无线电定位技术的发展,一些新技术和科研成果不断涌现。本书力求将理论与实际相结合,除了介绍基本原理外,加入了作者多年的科研成果,包含了其中的一些应用实例,让学生和相关人员充分了解和掌握无线电定位的基本原理、新技术及应用,使得本书具有实际应用参考价值。

本书主要内容为无线电定位的重要手段——雷达的工作原理和应用,内容共 10 章。第 1 章为无线定位原理总论,包括现代雷达及 GPS 的发展现状及应用,其组成及工作条件,工作频段的划分,雷达的分类,雷达主要战术、技术参数;第 2 章为雷达距离方程,包括基本雷达方程的推导、脉冲积累对作用距离的改善等;第 3 章介绍雷达发射机的组成和主要技术指标;第 4 章为雷达接收机的组成和主要技术指标;第 5 章为雷达测距原理,包括脉冲法测距、调频法测距和相位法测距;第 6 章为雷达测角原理,包括振幅法测角、相位法测角和单脉冲自动测角系统;第 7 章为雷达测速原理,包括多普勒测速原理和动目标检测技术;第 8 章为高分辨雷达成像技术,包括高分辨雷达一维距离成像原理、方位高分辨和合成孔径技术、高分辨雷达二维成像基本原理;第 9 章为 GPS 信号与伪随机码测距原理,包括 GPS 信号基本结构、组成、特点, GPS 伪随机码及其特性,伪随机码测距原理, GPS 导航接收机工作原理,电文解调和 GPS 伪距测量绝对定位;第 10 章为无源定位技术及原理,包括单星测向定位法、双星时差频差定位法、多星时差定位法等。

本教材由哈尔滨工业大学姜义成教授担任主编,张云、王勇两位老师参编。王冉、张坤、张伯炜、张荣跃、张涛、曾光、孙思博、范振、吴桂华等参加了本书的大部分绘图和文字校正的工作,在此表示诚挚的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,殷切希望读者批评指正。

编 者

2011 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 雷达基本组成及工作原理	(1)
1.2.1 雷达基本组成	(1)
1.2.2 雷达工作原理简介	(2)
1.2.3 雷达工作频率	(3)
1.2.4 雷达的分类	(4)
1.2.5 雷达的战术和技术参数	(4)
1.3 雷达具体应用	(5)
1.3.1 军事应用	(5)
1.3.2 民用	(8)
1.4 GPS 原理及应用	(9)
1.4.1 GPS 基本组成	(10)
1.4.2 GPS 工作原理简介	(11)
1.4.3 GPS 的应用	(12)
第 2 章 雷达距离方程	(13)
2.1 雷达基本方程的推导	(13)
2.2 信噪比和最小可检测信号	(15)
2.2.1 最小可检测信噪比	(15)
2.2.2 门限检测	(16)
2.2.3 检测性能和信噪比	(17)
2.3 雷达截面积及其起伏特性	(20)
2.3.1 点目标特性与波长的关系	(20)
2.3.2 目标特性与极化的关系	(21)
2.3.3 简单形状目标的雷达截面积	(21)
2.3.4 复杂目标的雷达截面积	(22)
2.3.5 目标起伏特性	(23)
2.4 脉冲积累对作用距离的改善	(26)
2.4.1 视频积累的效果	(28)
2.4.2 积累改善因子与积累脉冲数的关系	(28)
2.4.3 修改后的雷达方程	(29)
2.4.4 脉冲积累数的确定	(29)
2.5 系统损耗	(29)
2.5.1 天线波束形状损耗	(29)
2.5.2 折叠损耗	(30)

2.5.3	信号处理损耗	(30)
2.5.4	射频传输损耗	(31)
2.5.5	其他损耗	(31)
2.6	干扰条件下的雷达距离方程	(32)
2.6.1	大气传播对雷达方程的影响	(32)
2.6.2	地面或水面反射对雷达方程的影响	(34)
	思考题	(36)
第3章	雷达发射机	(37)
3.1	发射机概述	(37)
3.2	雷达发射机的功能	(39)
3.3	雷达发射机的主要技术参数	(39)
3.3.1	工作频率	(39)
3.3.2	输出功率	(40)
3.3.3	总效率	(40)
3.3.4	脉冲波形	(40)
3.3.5	发射信号的稳定性和频谱纯度	(41)
3.3.6	发射机效率	(41)
3.4	常用的雷达发射机	(41)
3.4.1	地面雷达发射机	(42)
3.4.2	机载雷达发射机	(43)
3.4.3	星载雷达发射机	(43)
3.4.4	舰载雷达发射机	(44)
3.5	真空管雷达发射机	(44)
3.5.1	概述	(44)
3.5.2	真空微波管的选择	(44)
3.5.3	常用真空微波管	(45)
3.5.4	栅控微波管发射机	(49)
3.5.5	正交场管发射机	(50)
3.5.6	多注速调管发射机	(50)
3.5.7	微波功率模块	(50)
3.6	固态雷达发射机技术	(51)
3.6.1	概述	(51)
3.6.2	双极型微波功率晶体管	(52)
3.6.3	金属氧化物半导体场效应微波功率晶体管	(52)
3.6.4	砷化镓场效应微波功率晶体管	(53)
3.6.5	雪崩二极管	(54)
3.6.6	全固态雷达发射机	(54)
3.7	脉冲调制器	(55)
3.7.1	概述	(55)

3.7.2	脉冲调制器的基本电路形式及其特点	(56)
	思考题	(58)
第4章	雷达接收机	(59)
4.1	接收机概述	(59)
4.1.1	接收机在雷达系统中的作用	(59)
4.1.2	雷达接收机的发展简况	(60)
4.2	雷达接收机的原理	(61)
4.2.1	基本工作原理	(61)
4.2.2	I/Q 正交鉴相	(64)
4.2.3	滤波与接收机带宽	(65)
4.2.4	匹配滤波	(67)
4.3	雷达接收机的基本组成	(70)
4.3.1	接收前端	(70)
4.3.2	中频接收机	(71)
4.3.3	频率源	(71)
4.4	雷达接收机的主要技术参数	(73)
4.4.1	灵敏度和噪声系数	(73)
4.4.2	选择性和信号带宽	(74)
4.4.3	动态范围和增益	(75)
4.4.4	工作稳定性	(75)
4.4.5	频率源的频率稳定性和频谱纯度	(75)
4.4.6	正交鉴相器的正交度	(75)
4.4.7	A/D 转换器的主要要求	(76)
4.4.8	抗干扰能力	(76)
4.4.9	波形质量和发射激励性能	(76)
4.5	现代雷达接收机	(76)
4.5.1	现代雷达接收机的要求	(76)
4.5.2	多通道接收机	(77)
4.5.3	单脉冲接收机	(77)
4.5.4	相控阵雷达接收机	(77)
4.5.5	机载雷达接收机	(77)
4.5.6	气象雷达接收机	(78)
4.5.7	数字接收机	(78)
4.5.8	中频对消技术	(85)
4.6	新体制雷达介绍	(90)
	思考题	(98)
第5章	雷达测距原理	(99)
5.1	脉冲法测距	(99)
5.1.1	脉冲法测距原理	(99)

5.1.2	距离分辨率与测距范围	(100)
5.1.3	解模糊原理	(101)
5.1.4	数字式脉冲测距	(103)
5.1.5	脉冲测距法实例	(104)
5.2	调频法测距	(105)
5.2.1	三角波调频	(105)
5.2.2	正弦波调频	(109)
5.3	相位法测距	(109)
5.3.1	相位法测距原理	(110)
5.3.2	相位法测距解模糊方法	(110)
5.4	自动距离跟踪	(112)
5.4.1	模拟式自动距离跟踪系统	(112)
5.4.2	数字式自动距离跟踪系统	(114)
	思考题	(115)
第 6 章	雷达测角原理	(117)
6.1	测角基本原理及概念	(117)
6.1.1	雷达测角的物理基础	(117)
6.1.2	天线波束的基本概念	(118)
6.2	振幅法测角	(119)
6.2.1	最大信号法	(120)
6.2.2	最小信号法	(121)
6.2.3	等信号法	(121)
6.3	相位法测角	(122)
6.3.1	基本原理	(122)
6.3.2	测角误差与测角模糊问题	(123)
6.4	自动测角系统	(124)
6.4.1	单脉冲自动测角系统	(125)
6.4.2	圆锥扫描自动测角系统	(126)
6.4.3	圆锥扫描系统与单脉冲系统的比较	(127)
6.5	单脉冲多普勒雷达实例	(128)
6.5.1	角度鉴别器	(128)
6.5.2	针对实际数据的测角精度改善仿真结果	(131)
	思考题	(132)
第 7 章	雷达测速原理	(133)
7.1	多普勒测速原理	(133)
7.2	多普勒信息提取	(137)
7.2.1	连续波工作状态	(137)
7.2.2	脉冲工作状态	(140)
7.3	盲速、频闪和盲相	(141)

7.3.1	盲速	(142)
7.3.2	频闪	(144)
7.3.3	盲相	(145)
7.4	动目标显示原理及实现	(147)
7.5	MTI 性能指标	(150)
7.6	动目标检测	(152)
7.6.1	MTD 原理及组成	(152)
7.6.2	多普勒滤波器组的实现	(153)
	思考题	(155)
第 8 章	成像雷达	(157)
8.1	概述	(157)
8.2	预备知识	(158)
8.2.1	分辨率的概念	(158)
8.2.2	综合孔径的概念	(159)
8.2.3	线性调频信号的脉冲压缩	(160)
8.3	一维距离像	(164)
8.4	合成孔径雷达	(164)
8.4.1	合成孔径雷达基本原理	(164)
8.4.2	合成孔径雷达方程	(169)
8.4.3	合成孔径雷达数学模型	(170)
8.4.4	距离徙动	(173)
8.4.5	SAR 成像算法	(175)
8.5	逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像	(182)
8.5.1	ISAR 成像的基本原理	(182)
8.5.2	ISAR 运动补偿	(183)
8.5.3	ISAR 成像算法	(184)
	思考题	(186)
第 9 章	GPS 信号与伪随机码测距原理	(187)
9.1	GPS 概述	(187)
9.1.1	GPS 基本概况	(187)
9.1.2	GPS 系统的组成	(188)
9.1.3	GPS 系统的技术特点	(189)
9.1.4	GPS 系统的定位原理	(190)
9.2	GPS 卫星位置和速度的计算	(191)
9.2.1	三种近点角	(191)
9.2.2	轨道六根数	(191)
9.2.3	卫星的运行速度	(194)
9.3	GPS 信号的基本结构	(194)
9.3.1	GPS 信号的基本组成	(194)

9.3.2	GPS 信号的特点	(195)
9.4	伪随机噪声码及其主要特性	(196)
9.4.1	伪噪声码的运算规则	(196)
9.4.2	最长线性移位寄存器序列——m 序列	(197)
9.4.3	序列的统计特性和相关特性	(199)
9.5	GPS 伪随机码及其特性	(200)
9.5.1	截短码和复合码	(200)
9.5.2	GPS 的精码——P 码	(201)
9.5.3	GPS 的 C/A 码	(202)
9.6	GPS 卫星的导航电文	(202)
9.7	伪随机码测距原理与信号接收机	(204)
9.7.1	伪随机码测距原理	(204)
9.7.2	伪随机测距的抗干扰特性	(204)
9.7.3	GPS 导航接收机工作原理	(204)
9.8	其他卫星导航定位系统	(205)
9.8.1	GLONASS 卫星导航定位系统	(206)
9.8.2	地球同步卫星导航定位系统	(206)
9.8.3	Galileo 卫星导航定位系统	(206)
	思考题	(207)
第 10 章	无源定位技术及原理	(208)
10.1	无源定位技术概述	(208)
10.2	单星测向定位	(209)
10.2.1	比幅法测向	(209)
10.2.2	比相法测向	(210)
10.2.3	比幅比相法测向	(212)
10.2.4	单星定位模型和算法	(212)
10.3	双星时差频差定位	(215)
10.3.1	定位原理	(215)
10.3.2	双星定位算法	(215)
10.3.3	到达时间差/到达频率差联合估计方法	(216)
10.4	多星时差定位	(220)
10.4.1	定位原理	(220)
10.4.2	定位算法	(222)
10.4.3	到达时差估计算法	(224)
10.5	无源定位系统定位性能分析	(226)
10.5.1	定位误差分析	(226)
10.5.2	各因素对定位误差的影响分析	(233)
10.6	小结	(234)
	思考题	(235)
参考文献		(236)

第1章 绪 论

1.1 引言

1901年12月12日，马可尼在位于加拿大东南角的纽芬兰(Newfoundland)讯号山(Signal Hill)，用气球和风筝架设的接收天线接收到了从英国西南角的宝窠(Poldhu)发送的国际莫尔斯电码“S”字符。从此，无线电作为一种实用的通信媒介为人们的生活带来了巨大的便利。一百多年来，随着人们不断提出新的需求，不断地对无线电技术进行深入的研究与探索，无线电技术有了长足的发展，无线电的应用领域也越来越广泛。甚至可以这样说，无线电技术已经和人们的生活融为一体、密切相关。最常见的比如听广播、打移动电话、用微波炉加热食品等，这些都应用到了无线电技术。在无线电的应用领域中，雷达(Radio Detection and Ranging)和全球卫星定位(Global Positioning System)是无线电技术的两个最为重要的应用，二者无论在军用还是民用领域都有着举足轻重的地位。

雷达是通过发射电磁波和接收目标后向散射的回波来对目标进行探测与定位的。GPS则是利用接收到的卫星发送来的数据进行计算，从而得出接收机自己当前的位置。二者既有区别又有联系，同时又各有优、缺点。举个例子来说明，在船舶近海定位、引导船舶进/出港，窄航道航行以及在避碰中所应用的传统船用雷达，可以在显示器上非常直白地显示出周围物体相对于本船的距离和方位信息。但是，由于受到雷达电波传播的视距所限，探测目标的距离通常只有几十千米，不能用于远洋定位。GPS导航仪则不然，它同时跟踪3颗或4颗卫星信号，首先测定到达卫星的伪距，然后通过导航仪内部计算机的解算，就可以进行实时、连续、全球、高精度的定位。GPS导航仪成功克服了雷达不能实现远洋定位及定位不连续、定位操作工作量大等缺点。本章分别简单介绍一下雷达和GPS的原理与应用，详细的内容将在后面各章节中展开。

1.2 雷达基本组成及工作原理

1.2.1 雷达基本组成

由于雷达种类繁多，不同雷达的组成也不尽相同，但总体上都包括天线、发射机、接收机、天线的收发开关、终端设备、天线控制设备及定时器等功能部件，只是每个功能部件的具体实现方式不同。这里仅以普通脉冲雷达为例进行介绍。脉冲雷达主要由天线、发射机、接收机、天线的收发开关、终端设备、天线控制设备及定时器等组成(见图1.1)。其中TR为收发转换开关，ATR为反收发开关。

调制器产生低功率的雷达信号，然后送入发射机。发射机产生辐射电磁波所需强度的能量并采用波导或其他形式的传输线传输到天线。天线负责将能量定向地辐射于空中。如果在波束照射范围内有目标存在，则会产生散射现象。目标会将辐射到的电磁能向各个方向进行散射，当然也包括雷达接收机的方向。雷达接收天线接收到这部分能量后，就会经传输线和

收发转换开关馈给接收机。接收机将这部分信号进行混频、放大、检波等一系列处理并将结果送至终端设备。

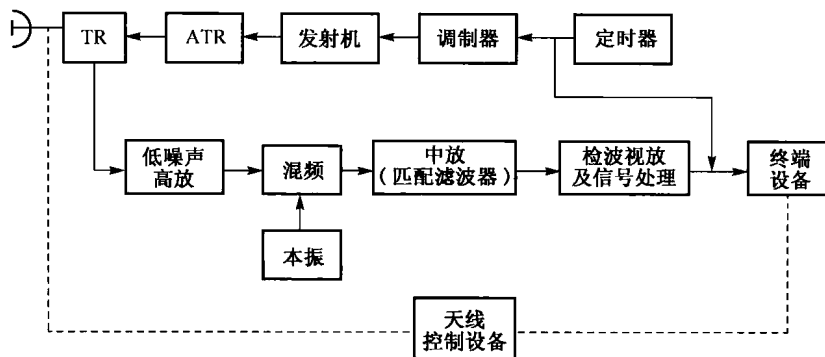


图 1.1 脉冲雷达组成框图

发射机可以是功率振荡器，如磁控管。磁控管振荡器已广泛应用于中等能力水平的脉冲雷达，它在脉冲调制器控制下产生高频脉冲功率直接输送到天线。也可以是功率放大器，它由高频率稳定度的频率综合器作为频率基准，对低功率的雷达信号进行放大，并驱动末级功放以获得足够的脉冲功率从而使天线进行发射。功率放大式发射机的优势在于频率稳定度高和每次辐射的信号是相参的。当需要高的平均功率或较复杂的脉冲波形时，最好采用功率放大器。

脉冲雷达天线一般方向性较强，这样可以集中辐射能量以获得最大的观测距离。常用的微波雷达天线是抛物面反射体。发射时，抛物面反射体能将能量集中在一个窄波束中，这和汽车探照灯非常相似。天线波束的扫描通常是通过机械转动天线来实现的。近年来应用日益广泛的相控阵天线更加先进，它是许多小的辐射单元的集合。这些小的辐射单元的信号在空中合成一个辐射平面波，每个辐射单元都有移相器，这使得天线波束方向可以迅速地改变而不需要进行机械转动。

由于脉冲雷达的天线是收发共用的，所以是以分时的方式进行发射与接收的。这就需要有一个快速的收发转换开关，否则，发射机会严重干扰接收机，在发射时如果发射机的能量进入接收机，会烧毁接收机的高放混频部分。

接收机的任务就是把微弱的回波信号放大到足够进行信号处理的电平水平。接收机几乎都是超外差式的，超外差接收机就是利用本地产生的振荡波与输入信号混频，将输入信号频率变换为某个预先确定的频率的方法。超外差式接收机可进行细分的增益控制，接收动态范围大，具有最宽的通道带宽，适合做宽带接收机，具有高选择性、低的噪声特性。超外差式接收机受 I/Q 信号不平衡度影响小，不需要复杂的直流消除电路。这种接收机具有很高的邻道选择性和接收灵敏度，需要有预选滤波器和中频滤波器，可以抑制很强的干扰。

定时器是雷达系统的同步标准。它提供统一的时钟，使雷达各个部分保持同步工作。它还产生各个频率的振荡，这些振荡相互之间保持严格的相位关系，这样可以保证整个雷达全相参工作。

1.2.2 雷达工作原理简介

总的说来，雷达就是利用电磁波遇到物体会进行反射这一现象来实现其功能的。雷达接收到的回波不仅表明目标的存在，而且通过对接收回波和发射信号进行比较分析就可以确定目标位置、速度及其他信息。导弹、汽车、轮船、飞机、山川、云雨等都可能成为雷达探测的目

标, 这要视雷达的用途而定。而要进行定位, 首先就要确定坐标系, 通常人们最常用的是笛卡尔坐标系(也称为直角坐标系), 但是在雷达应用中采用的是极坐标系统, 如图 1.2 所示。图中雷达到目标的直线距离 OP 称为目标的斜距, 常用大写字母 R 表示。目标斜距 R 与它在水平面上投影 OB 在铅垂面上的夹角称为仰角, 常用希腊字母 β 表示。目标斜距 R 在水平面上的投影 OB 与某初始方向(比如正北方向)在水平面上的夹角称为方位角, 常用希腊字母 α 表示。

确定了坐标系后, 下面介绍一下雷达基本的测距、测速原理。此处仅以脉冲雷达为例进行简单介绍, 深入分析将在后面各章节中展开。

1. 斜距的测量

如图 1.3 所示, 假设雷达发射一个脉冲串, 它碰到目标并返回到接收天线所用时间为 t_R , 而且我们知道电磁波的能量是以光速 c 进行传播的, 则 $t_R \times c$ 为往返距离, 容易得出单程距离即目标斜距 $R = t_R \times c/2$ 。测距精度与脉冲宽度有关, 脉冲宽度越窄, 分辨力越高。

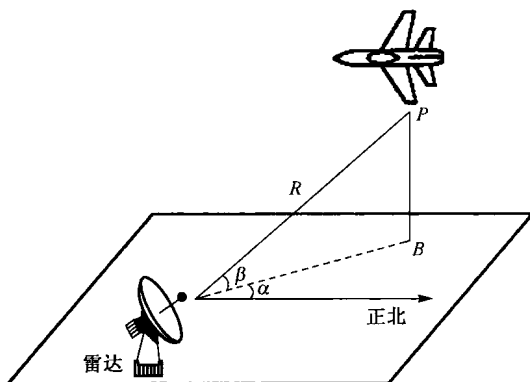


图 1.2 雷达应用中的极坐标系

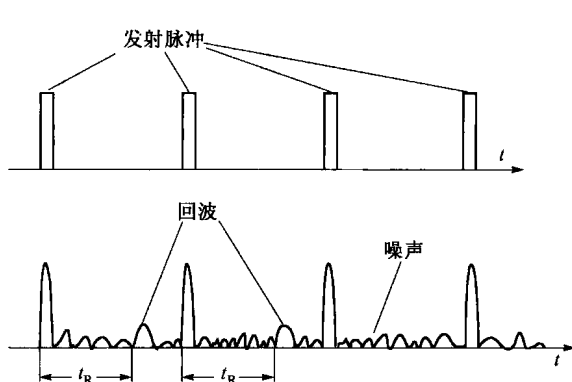


图 1.3 雷达测距原理

2. 角度测量

在雷达技术中, 关于目标的方位角和仰角的测量都是利用天线的方向性来实现的。如图 1.4 所示, 雷达天线以窄波束的形式发送电磁波, 当波束中轴对准目标时, 目标的反射回波能量最大。当波束中轴偏离目标时(图中虚线位置), 回波信号减弱。这样根据天线波束的指向和回波信号的强弱就可确定所测定目标的角度。显然, 波束越窄, 角度分辨力越高。

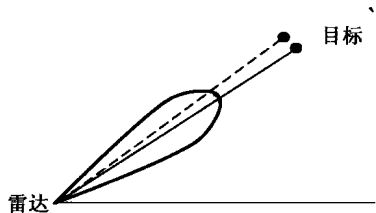


图 1.4 雷达测角原理

3. 目标速度测量

雷达测速所依据的物理机制是电磁波在空间的可压缩特性。测速原理是测量回波信号频率相对于发射频率的变化, 即测量回波信号的多普勒(Doppler)频率。多普勒频率基本公式为 $f_d = 2v_r/\lambda$, λ 为载波波长, v_r 为径向速度。注意 f_d 可正可负, 目标与雷达相向运动时, v_r 为正, f_d 也为正; 目标与雷达相背运动时, v_r 为负, f_d 也为负。

1.2.3 雷达工作频率

通常雷达的工作频率范围为 220 MHz~35 GHz。然而实际上, 很多雷达的工作频率已经远远超过了上述范围。如天波超视距雷达的工作频率为 4 MHz 或 5 MHz, 地波超视距雷达

的工作频率则低至 2 MHz，毫米波雷达的工作频率可高达 94 GHz (3 mm 波长)，激光的工作频率则更高。雷达的工作频率和整个电磁波的频谱示于图 1.5。

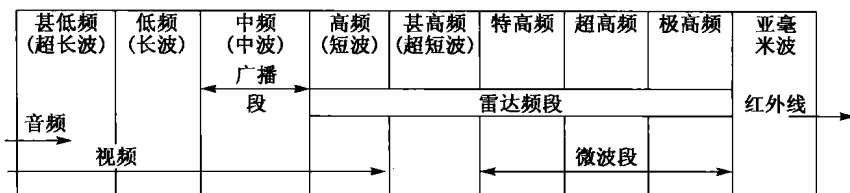


图 1.5 雷达工作频率及电磁波频谱

目前在雷达应用中常用 L、S、K 等字母来命名常用频段。这是由于第二次世界大战中一些国家出于保密的考虑而采用的，一直沿用至今。我国也常采用这种表述方法。表 1.1 列出了雷达波段和相应频率的对应关系。

表 1.1 雷达波段和相应频率的对应关系

雷达波段	频率
UHF	300~1000 MHz
L	1000~2000 MHz
S	2000~4000 MHz
C	4000~8000 MHz
X	8000~12500 MHz
Ku	12.5~18 GHz
K	18~26.5 GHz
Ka	26.5~40 GHz
mm	40~300 GHz

1.2.4 雷达的分类

雷达的种类繁多，分类的方法也非常复杂，可按多种方法进行分类。

(1) 按定位方法可分为：有源雷达、半有源雷达和无源雷达。

(2) 按装设地点可分为：地面雷达、舰载雷达、航空雷达、卫星雷达等。

(3) 按体制可分为：圆锥扫描雷达、单脉冲雷达、有源相控阵雷达、无源相控阵雷达、MTI 雷达、频率捷变雷达、频率分集雷达、合成孔径雷达、噪声雷达、冲击雷达、超视距雷达。

(4) 按工作波段可分：短波雷达、米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达、激光/红外雷达。

(5) 按功能可分为：警戒雷达、引导雷达、测高雷达、炮瞄雷达、导航着陆雷达、制导雷达、机载火控雷达、成像雷达、气象雷达等。

1.2.5 雷达的战术和技术参数

1. 雷达的基本战术参数

雷达包括如下一些基本战术参数。

(1) 威力范围：雷达可以对目标进行连续观测的范围叫做威力范围。它取决于雷达的最大、最小探测距离以及方位角范围和仰角范围。

(2) 分辨力：表示雷达区分点目标在位置上靠近的能力。通常分为距离分辨力和角度分辨力。距离分辨力示意图如图 1.6 所示，它表示同一方向上两目标间最小可区分的距离 $\Delta R = c/2B$ ，其中 c 是光速， B 是带宽。角度分辨力示意图如图 1.7 所示，它表示在相同距离上两个不同方向的点目标之间能区分的最小角度 $\Delta\theta$ 。

(3) 数据率：雷达对整个威力范围内完成一次搜索（即对整个威力范围内所有目标提供一次信息）所需时间的倒数。

(4) 跟踪速度：跟踪雷达连续跟踪运动目标的最大速度。

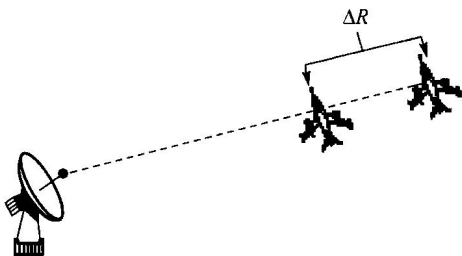


图 1.6 距离分辨力示意图

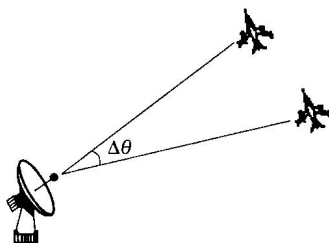


图 1.7 角度分辨力示意图

- (5) 抗干扰能力：人为干扰、自然干扰。
- (6) 测定目标的数目和精确度。
- (7) 抗核爆和轰炸能力。
- (8) 体积和重量、可靠性、使用条件等。

2. 雷达的基本技术参数

雷达包括如下一些基本技术参数。

(1) 工作频率及范围：根据目标特性、电波传播条件、天线尺寸、器件性能及测量精确度等考虑工作频率；频率范围主要取决于抗干扰的要求。

(2) 发射功率和调制波形：发射功率影响作用距离；早期用简单脉冲波，现代用多种复杂波形。

(3) 脉冲宽度：指脉冲雷达发射信号所占的时间。脉冲宽度影响作用距离和距离分辨力。

(4) 重复频率：发射机每秒发射脉冲的个数。重复频率决定了雷达单值测距的范围，也影响了不模糊测速区域的大小。为满足二者要求，常用多重重复频率或参差重复频率。

(5) 天线波束形状：用水平面和竖直面波束宽度表示。

(6) 天线的扫描方式：天线主瓣按一定规律在空间所做的反复运动，如圆周、圆锥、扇形扫描、锯齿、螺旋等运动。

(7) 接收机的灵敏度：表征接收机接收微弱信号的能力，用接收机输入端的最小可检测信号来表示。

(8) 显示器的形式和数量：显示器是向操纵人员提供雷达信号的一种终端设备，是人机联系的一个环节。它包括极坐标形式的 PPI、直角坐标形式的距离—方位显示器和距离—高度显示器等。

1.3 雷达具体应用

1.3.1 军事应用

1. 预警雷达

预警雷达是远距离搜索雷达的一种。主要用来发现远、中、近程弹道导弹，以便尽早发出警报，为最高军事机关提供导弹预警情报，如图1.8所示。

由预警雷达的功能可以看出其最大特点是作用距离远(几千千米)，而目标的位置坐标精确度和分辨力相对次要。因此，一般都采用 12 MW 以上的超高发射功率、高几十米且宽几

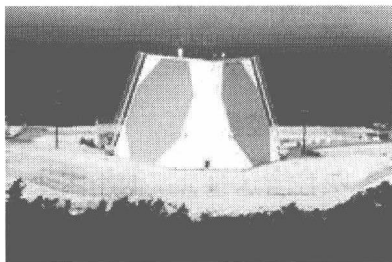


图 1.8 预警雷达

百米以上的电动扫描天线阵列,工作频率在大气吸收损耗较低的超高频(UHF)和甚高频(VHF)波段。再配上相应的高性能计算机数据处理系统,能在搜索的同时跟踪 100~200 个目标。目前应用预警雷达不仅可以发现导弹,而且可以发现洲际战略轰炸机。

2. 搜索雷达

搜索雷达通常用于对海面或空中目标的搜索与定位,其作用是在一个大范围区域内确定目标位置,图 1.9 示出了海基防空导弹搜索雷达。现代搜索雷达通常是三坐标雷达,天线进行 360° 方位旋转,扫描采用机械扫描方式,同时用多波束或笔形波束扫描覆盖仰角,提供三维覆盖。其作用距离一般都在 400 千米以上,有的可达 600 千米,对于测定目标坐标的精确度、分辨力则要求不高。因此,搜索雷达必须满足两个要求:很远的探测距离和很大的覆盖空域。由于要求探测距离远,搜索雷达一般采用较低的频段,通常是 L 和 S 频段,有时是 UHF,特殊情况下是 VHF,甚至 HF 频段。在这些频段上,大气衰减不太大,杂波反射率低。

3. 远程警戒雷达

远程警戒雷达通常分为对空警戒雷达和对海警戒雷达,用于发现和监视海面、空中目标,如图 1.10 所示。可以与敌我识别系统相配合判定目标的敌我属性,给导弹制导雷达和炮瞄雷达提供目标指示。并且当配有测高雷达时,还能完成引导任务,为空中交通管制提供目标数据。该雷达探测距离远,有比较高的可靠性并且维修方便,是防空雷达网中不可或缺的一部分。

4. 监视雷达

监视雷达主要指地面对空监视雷达。监视雷达是应用最早、使用最广泛的雷达,几乎各主要的独立国家,都有自己的国家防空系统,监视雷达是防空系统中的主要装备。图 1.11 示出了远程空中监视雷达。

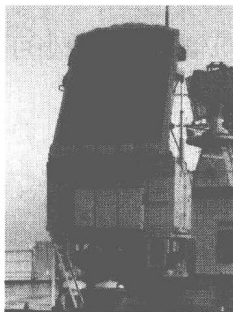


图 1.9 海基防空导弹搜索雷达

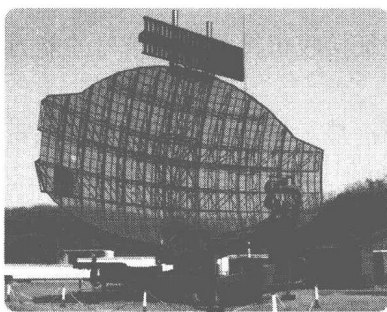


图 1.10 远程警戒雷达

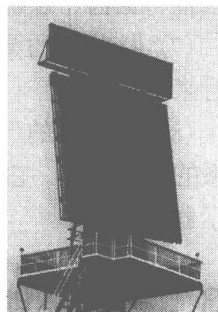


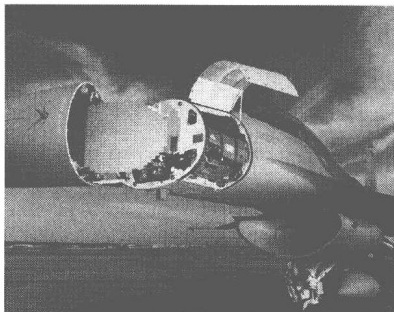
图 1.11 远程空中监视雷达

5. 火控雷达

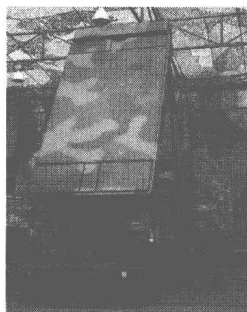
火控雷达包含了两个系统:雷达扫描系统和火力控制系统。它与火炮、导弹等武器系统连接,用于为火炮和导弹提供目标数据,指引和控制火炮和导弹,使火炮或导弹根据这些数据调整自身状态,直到命中目标。要实现以上功能,它必须能连续而又准确地测定目标的位置信息,并迅速地将信息传递给火炮或导弹。这类雷达作用距离较小,一般只有几十千米,但测量精度要求很高,如图 1.12(a)所示。

6. 制导雷达

制导雷达是武器系统的重要组成设备,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,在完成对来袭目标的探测、跟踪和识别的同时,对拦截导弹实施全过程控制,直至摧毁来袭目标。制导雷达要求能同时跟踪多个目标,并对分辨力要求较高,如图1.12(b)所示。



(a) 火控雷达



(b) 制导雷达

图 1.12 火控雷达和制导雷达

7. 战场监视雷达

战场监视雷达被视为不可缺少的战场侦察设备。其基本任务是提供战场情报,即提供敌方部队部署和调动的战术情报,为机动作战中各指挥级提供实时战场态势。它能迅速而准确地探测到扫描区域内的运动目标,测定目标的位置和速度,识别目标的特性和数量,是一种全面、实时、准确和全天候的现代化侦察手段。

8. 机载雷达

机载雷达是装在飞机上的各种雷达的总称。它主要用于控制和制导武器,实施空中警戒、侦察,保障准确航行和飞行安全,如图1.13所示。按用途可分为如下几类。

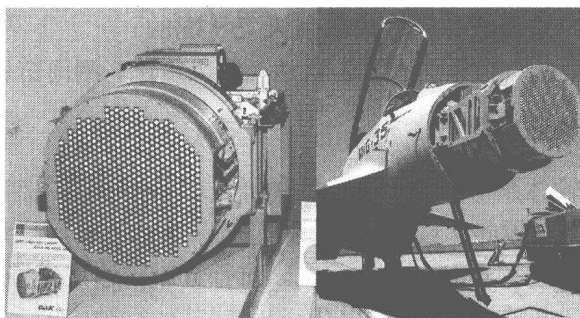


图 1.13 典型机载雷达

(1) 机载截击雷达

用于为空空导弹、火箭和航炮等提供目标数据。它与火控计算机、飞行数据测量和显示设备等组成歼击机火控系统。当歼击机接近敌机并进入有利空域时,利用装在机上的截击雷达准确地测量敌机位置坐标信息进而发动攻击。它对目标的测量精确度和分辨力有较高要求。

(2) 机载轰炸雷达

主要用来为瞄准轰炸、制导空地导弹和领航提供目标信息。它可单独工作,也可与光学