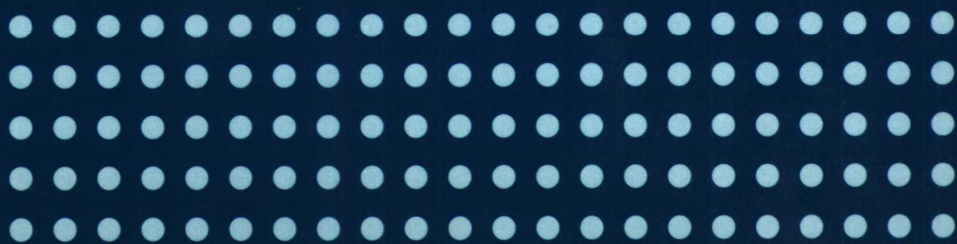


QIXIANG LEIDA YUANLI

气象雷达原理

焦中生 沈超玲 张云 编著



气象出版社

China Meteorological Press

气象雷达原理

焦中生 沈超玲 张 云 编著



气象出版社

内 容 简 介

本书的主要内容包括气象雷达发射机、接收机、显示器、天线控制器等硬件设备的组成结构、工作原理及主要性能;气象雷达测距、测角、测速的基本原理和各种实现方法;气象目标的强度、速度、极化信息处理的原理和方法;最后简要介绍了目前业务应用中新型气象雷达的功用、组成、基本工作过程和性能特点。本书内容全面,资料丰富,理论严谨,并注重理论联系实际。

本书可作为高等院校大气探测工程、气象电子信息工程等专业的教材或教学参考书,也可供从事气象雷达和大气探测等专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气象雷达原理/焦中生,沈超玲,张云编著. —北京:气象出版社,2005.10
ISBN 7-5029-4039-1

I. 气… II. ①焦…②沈…③张… III. 气象雷达 IV. TN959.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 116531 号

Qixiang Leida Yuanli

气象雷达原理

焦中生 沈超玲 张 云 编著

责任编辑:丁问微 陶国庆 终 审:朱文琴

封面设计:陈 璐

版式设计:谷 清 责任校对:王丽梅

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

出版社电话:68407112

出版社网址:<http://cmp.cma.gov.cn/>

电子邮箱:qxcbs@263.net

邮政编码:100081

传真号码:62176428

印 刷:北京昌平环球印刷厂
开 本:787mm×960mm 1/16
印 张:24.00
字 数:483 千字
定 价:36.00 元

版 次:2005 年 10 月第 1 版
印 次:2005 年 10 月第 1 次印刷
印 数:0001~5000

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

《气象雷达原理》是气象雷达工程、大气探测工程等专业本科生的主干课程。学生在掌握《电子线路》、《微波技术与天线》等专业基础知识后,通过该课程的学习系统掌握气象雷达的基本概念、系统组成、工作机理。

本教材的参考教学时数为 60~80 学时(不含实验)。教材共分十章,主要内容包括气象雷达分机、气象雷达测量方法、气象雷达信息处理与系统组成。雷达分机部分包括雷达发射机、雷达接收机、雷达终端显示和天线控制设备的组成、基本工作原理及主要性能指标;雷达测量方法部分包括雷达测距、测角、测速的基本原理和各种实现方法,相应地介绍了连续波、相控阵、圆锥扫描、单脉冲等雷达体制;雷达信息处理与系统组成部分包括雷达气象方程,气象目标强度、速度、极化信息处理的原理和方法,各种气象雷达的功用、组成、基本工作过程和主要性能。本教材各章之间有相对独立性,使用时可根据情况取舍内容。

本书由解放军理工大学焦中生教授主编。其中第一章至第三章、第六章至第八章由焦中生编写,第四章和第五章由沈超玲编写,第九章和第十章由张云编写。焦中生负责全书的统稿工作。

在本教材编写中,顾松山、丁荣安教授对教材的结构和内容提出了宝贵的修改意见和建议,彭洪森教授、戴成松研究员、贺宏兵副教授给予了很多帮助,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2005 年 4 月

目 录

前言

第一章 气象雷达概述	(1)
§ 1.1 雷达的作用原理	(1)
1.1.1 目标位置的测量	(1)
1.1.2 脉冲雷达的基本组成	(5)
1.1.3 基本雷达方程	(7)
§ 1.2 雷达电磁波波段	(8)
1.2.1 分米波雷达	(9)
1.2.2 厘米波雷达	(9)
1.2.3 毫米波雷达	(9)
§ 1.3 雷达的发展与应用	(10)
1.3.1 雷达发展的几个阶段	(10)
1.3.2 雷达的应用	(11)
1.3.3 雷达技术的发展趋势	(14)
§ 1.4 气象雷达的分类与特点	(16)
1.4.1 气象雷达的分类	(16)
1.4.2 气象雷达的特点	(19)
1.4.3 气象雷达的发展	(20)
§ 1.5 气象雷达的战术性能和技术性能	(21)
1.5.1 主要战术性能	(22)
1.5.2 主要技术性能	(23)
第二章 雷达发射机	(25)
§ 2.1 概述	(25)
2.1.1 作用和基本组成	(25)
2.1.2 主要技术指标	(26)
§ 2.2 单级振荡式发射机	(30)
2.2.1 电路结构与性能特点	(30)
2.2.2 磁控管功率振荡器	(31)

§ 2.3	主振放大式发射机·····	(44)
2.3.1	电路结构与性能特点·····	(44)
2.3.2	速调管功率放大器·····	(46)
§ 2.4	雷达脉冲调制器·····	(60)
2.4.1	脉冲调制器的组成和工作概况·····	(60)
2.4.2	软性开关调制器·····	(61)
2.4.3	刚性开关调制器·····	(74)
§ 2.5	固态发射机·····	(79)
2.5.1	固态发射机概述·····	(79)
2.5.2	固态微波功率合成·····	(82)
第三章	雷达接收机·····	(87)
§ 3.1	概述·····	(87)
3.1.1	雷达接收机的功能·····	(87)
3.1.2	雷达接收机的组成·····	(87)
3.1.3	技术指标·····	(90)
§ 3.2	接收机的噪声和灵敏度·····	(93)
3.2.1	接收机的噪声·····	(93)
3.2.2	噪声系数和噪声温度·····	(96)
3.2.3	级联电路的噪声系数·····	(99)
3.2.4	接收机的灵敏度·····	(100)
§ 3.3	接收机高频前端·····	(102)
3.3.1	收发转换开关和接收机保护器·····	(103)
3.3.2	高频放大器·····	(106)
3.3.3	混频器·····	(107)
3.3.4	本机振荡器·····	(122)
§ 3.4	中频和视频放大器·····	(124)
3.4.1	中频放大器·····	(124)
3.4.2	视频放大器·····	(127)
3.4.3	数字中频接收机·····	(128)
§ 3.5	接收机辅助电路·····	(129)
3.5.1	增益控制·····	(129)
3.5.2	对数放大器·····	(133)
3.5.3	自动频率控制电路·····	(142)

第四章 雷达显示器 (155)

- § 4.1 概述 (155)
 - 4.1.1 显示器的主要类型 (155)
 - 4.1.2 对显示器的主要要求 (157)
- § 4.2 距离显示器 (157)
 - 4.2.1 基本原理 (157)
 - 4.2.2 基本组成 (158)
- § 4.3 平面位置显示器 (160)
 - 4.3.1 显示画面 (160)
 - 4.3.2 基本原理 (160)
- § 4.4 距离-高度显示器 (164)
 - 4.4.1 目标高度显示原理 (164)
 - 4.4.2 高度扫描电路工作原理 (165)
- § 4.5 光栅扫描显示器 (166)
 - 4.5.1 光栅扫描雷达显示器的组成 (166)
 - 4.5.2 图像存储器的组成 (167)
- § 4.6 计算机终端显示器 (168)
 - 4.6.1 彩色显示原理 (168)
 - 4.6.2 扫描成像原理 (171)
 - 4.6.3 计算机终端显示原理 (174)

第五章 雷达天线控制系统 (177)

- § 5.1 概述 (177)
 - 5.1.1 天线控制系统的分类 (177)
 - 5.1.2 天线控制系统的组成 (178)
 - 5.1.3 主要元件 (179)
- § 5.2 比较元件 (180)
 - 5.2.1 角度传感器 (180)
 - 5.2.2 速度传感器 (184)
 - 5.2.3 轴角编码原理 (187)
 - 5.2.4 模块化轴角转换系统 (191)
- § 5.3 变换元件 (196)
 - 5.3.1 相敏检波器 (196)
 - 5.3.2 极性调制器 (199)

§ 5.4	放大元件	(201)
§ 5.5	执行元件	(203)
5.5.1	直流电动机	(203)
5.5.2	步进电机	(211)

第六章 目标距离的测量 (213)

§ 6.1	脉冲法测距	(213)
6.1.1	基本原理	(213)
6.1.2	影响测距误差的因素	(214)
6.1.3	距离分辨力和测距范围	(216)
6.1.4	判距离模糊的方法	(218)
§ 6.2	调频法测距	(219)
6.2.1	调频连续波测距	(219)
6.2.2	脉冲调频测距	(223)
§ 6.3	相位法测距	(225)
§ 6.4	距离跟踪原理	(227)
6.4.1	人工距离跟踪	(227)
6.4.2	自动距离跟踪	(229)
§ 6.5	数字式自动测距器	(235)
6.5.1	数字式测距器的基本原理	(235)
6.5.2	数字式距离自动跟踪	(236)
6.5.3	自动搜索和截获	(240)
6.5.4	提高跟踪精度的方法	(242)

第七章 目标角度的测量 (243)

§ 7.1	相位法测角	(243)
7.1.1	基本原理	(243)
7.1.2	测角误差与多值性问题	(246)
§ 7.2	振幅法测角	(247)
7.2.1	最大信号法	(247)
7.2.2	等信号法	(248)
§ 7.3	天线波束的扫描	(251)
7.3.1	波束形状和扫描方式	(251)
7.3.2	天线波束的扫描方法	(252)
7.3.3	相位扫描法	(254)

§ 7.4	目标高度的测量	(265)
§ 7.5	自动测角与角度跟踪	(266)
7.5.1	圆锥扫描自动测角系统	(266)
7.5.2	单脉冲自动测角系统	(269)
7.5.3	单脉冲接收系统的变型	(275)
7.5.4	圆锥扫描系统与单脉冲系统的比较	(277)
第八章	目标速度的测量	(279)
§ 8.1	测速与多普勒效应	(279)
8.1.1	多普勒效应	(279)
8.1.2	点目标多普勒信息的提取	(281)
§ 8.2	测速模糊及其消除方法	(285)
8.2.1	用双脉冲重复频率扩展多普勒雷达单值测速范围	(289)
8.2.2	软件退速度模糊	(290)
§ 8.3	弥散气象目标的运动参数	(291)
8.3.1	气象目标回波的多普勒频谱	(292)
8.3.2	降水回波信号的统计特征参数	(294)
第九章	气象雷达信息处理	(297)
§ 9.1	气象目标特性分析	(297)
9.1.1	微粒性	(297)
9.1.2	叠加性	(299)
9.1.3	随机性	(300)
§ 9.2	雷达气象方程	(302)
9.2.1	雷达气象方程	(303)
9.2.2	雷达设备参数对雷达探测的影响	(304)
9.2.3	气象因子在雷达探测中的作用	(305)
9.2.4	距离因子的影响	(306)
9.2.5	非瑞利散射粒子的等效反射因子 Z_e	(306)
§ 9.3	地杂波的抑制	(307)
9.3.1	地杂波的形成及其影响	(307)
9.3.2	地杂波的抑制方式	(307)
9.3.3	非相干 MTI 方式性能的改善	(309)
9.3.4	非相干 MTI 方式地物回波抑制装置	(310)

§ 9.4	气象目标强度信息处理	(312)
9.4.1	振幅信息的提取	(312)
9.4.2	回波信号的涨落理论	(314)
9.4.3	视频积分器	(315)
9.4.4	距离订正	(322)
§ 9.5	气象目标多普勒信息处理	(323)
9.5.1	快速傅里叶变换	(324)
9.5.2	脉冲对处理	(326)
§ 9.6	气象目标回波极化信息处理	(330)
9.6.1	电磁波的三种极化与降水目标特性	(330)
9.6.2	双偏振技术测量降水	(333)
第十章	气象雷达系统简介	(337)
§ 10.1	天气雷达	(337)
10.1.1	常规天气雷达	(337)
10.1.2	多普勒天气雷达	(338)
10.1.3	双偏振天气雷达	(341)
10.1.4	双(多)基地天气雷达	(346)
§ 10.2	高空气象探测雷达	(352)
10.2.1	二次测风雷达	(353)
10.2.2	一次测风雷达	(356)
10.2.3	风廓线雷达	(359)
§ 10.3	特种气象雷达	(362)
10.3.1	圆极化波雷达	(362)
10.3.1	激光雷达	(364)
10.3.3	声雷达	(366)
10.3.4	中频雷达	(368)
10.3.5	调频连续波雷达	(370)
参考文献		(374)

第一章 气象雷达概述

随着现代科技的不断发展,雷达技术普遍地应用于气象领域。利用各种形式的雷达对大气进行探测和研究,已成为气象科技现代化的一个重要方向。气象雷达已成为天气预报和大气科学研究不可缺少的工具。人们利用气象雷达探测大气中风、温度、气压、湿度等要素的时空分布,发现积雨云、雷雨等降水系统,测定其空间分布、垂直结构、移动方向、移动速度、降水强度和降水量,判断其发展演变趋势。有些雷达还可以测出晴空湍流、气象微粒的相态、形状、空间取向、尺寸分布。气象雷达为人们提供了大量而丰富的大气信息,是气象科技发展的重要标志。

雷达是利用物体对电磁波的散射来发现目标、鉴别目标属性、测定目标参数的设备。雷达是英文 Radar(Radio Detection and Ranging 的缩写)的音译,原意是“无线电检测和测距”。现代雷达探测已远远超出了原定的含意,利用雷达不仅可以确定目标位置,还可以获得目标的速度、形态以及更为广泛的信息。

随着科学技术的发展,雷达的应用将越来越广泛。就其工作平台而言,有地面雷达、车载雷达、机载雷达、船载雷达、星载雷达等等;就其用途而论,有警戒雷达、制导雷达、导航雷达、瞄准雷达、气象雷达、遥感雷达、天文雷达等等。

自 20 世纪 60 年代以来,由于半导体集成电路和计算机技术的飞速发展,加快了雷达领域数字化、自动化的进程。不同类型的计算机成功地用于雷达设备,成为雷达设备自动控制、信号与数据处理和终端显示的核心,越来越显示出其快速实时处理的优越性。正因如此,人们对雷达的理解已远远地超出了最初的概念,现代科学技术已把雷达技术与计算机技术、显示技术融会到一起,使雷达成为高度现代化、智能化的系统。气象雷达也和其他各种形式的雷达一样,已经发展成为一种具有现代科技特点的高技术系统。

§ 1.1 雷达的作用原理

1.1.1 目标位置的测量

目标在空间的位置可以用多种坐标系表示。最常见的是直角坐标系,空间任一点目标 P 的位置可用 x, y, z 三个坐标值来确定。在雷达应用中,测定目标坐标常采用极(球)坐标系统,如图 1.1 所示。图中空间任一目标 P 所在位置可用下列三个坐标确定:

目标的斜距 R 为雷达到目标的直线距离 OP ; 方位角 α 为目标的斜距 R 在水平面上的投影 OB 与某一起始方向(一般是正北方向)在水平面上的夹角; 仰角 β 为斜距 R 与它在水平面上的投影 OB 在铅垂面上的夹角, 有时也称为倾角或高低角。

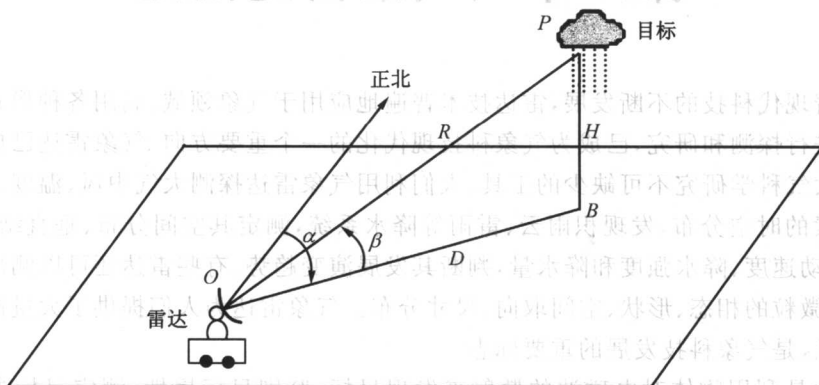


图 1.1 用极(球)坐标系表示的目标位置

如果需要知道目标的高度和水平距离, 那么利用圆柱坐标系就比较方便。在这种坐标系中, 目标的位置由三个坐标来确定: 水平距离 D ; 方位角 α ; 高度 H 。

球坐标系与圆柱坐标系之间的关系如下:

$$D = R \cos \beta$$

$$H = R \sin \beta$$

$$\alpha = \alpha$$

上述这些关系仅在目标的距离不太远时是正确的; 当距离较远时, 由于地面的弯曲, 必须作适当的修正。

现以典型的脉冲雷达为例来说明雷达测量的基本工作原理。图 1.2 是脉冲雷达的简化示意图, 它由发射机、发射天线、接收机和接收天线组成。发射电磁波中一部分能量照射到雷达目标上, 在各个方向上产生二次散射。雷达接收天线收集散射回来的能量, 并送至接收机对回波信号进行处理, 从而发现目标, 提取目标位置、速度等信息。实际脉冲雷达的发射和接收通常共用一个天线, 以简化结构, 减小体积和重量。

脉冲雷达采用的发射波形通常是高频脉冲串, 它是由窄脉冲调制正弦载波产生的, 调制脉冲的形状

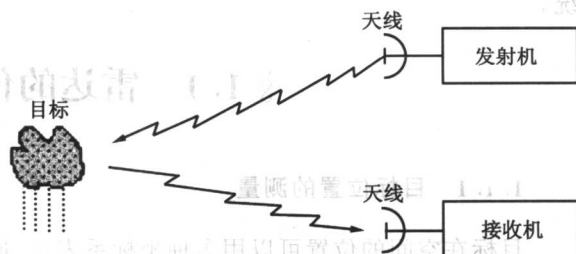


图 1.2 雷达基本组成示意

一般为矩形,也可采用其他形状。目标与雷达的斜距由电磁波往返于目标与雷达之间的时间来确定;目标的角位置由二次散射波前的方向来确定;当目标与雷达有相对运动时,雷达所接收到的二次散射波的载波频率会发生偏移,测量载频偏移就可以求出目标的相对速度,并且可以从固定目标中区别出运动目标来。

上面是对雷达测距、测角、测速基本原理的简要讨论,下面分别予以说明。

1.1.1.1 目标斜距的测量

电磁波在传播过程中遇到物体产生二次散射,是雷达发现目标的物理基础。电磁波在均匀介质中匀速直线传播,是雷达测定目标距离的物理基础。

雷达工作时,发射机经天线向空间发射重复周期一定的高频脉冲串,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,这样接收到的回波信号将滞后于发射脉冲一个时间 t_r ,如图 1.3 所示。

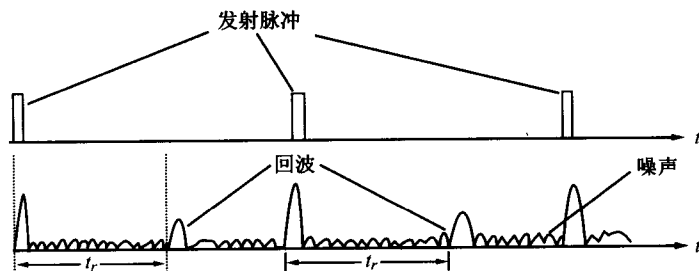


图 1.3 目标回波滞后于发射脉冲示意图

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上往返时间,即

$$2R = ct_r$$

或

$$R = c \frac{t_r}{2}$$

式中 R 为目标到雷达站的单程距离,以 m(米)为单位; t_r 为电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔,以 s(秒)为单位; c 为光速,其值为 3×10^8 m/s。

距离的单位在国内常用“km(千米)”或“m”表示,国外有采用“mile(英里)”、“ft(英尺)”、“nmile(海里)”或“yd(码)”来表示的,它们之间的换算关系如下:

$$100 \text{ yd} = 3000 \text{ ft} = 0.914 \text{ km} \approx 0.6 \text{ mile}$$

$$1 \text{ nmile} = 1.853 \text{ km}$$

由于电磁波传播的速度很快,雷达技术常用的时间单位为“ μ s(微秒)”,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

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{c}{2} t_r = 150 \text{ m} = 0.15 \text{ km} \\
 &= 0.081 \text{ nmile} \\
 &= 0.093 \text{ mile} \\
 &= 164 \text{ yd} \\
 &= 492 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

1.1.1.2 目标角位置的测量

雷达定向发射和接收电磁波,是雷达测定目标角位置的物理基础。目标角位置是指方位角和仰角,雷达测量这两个角度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 1.4 中的实线所示。当天线波束轴偏离目标时回波信号减弱,如图中虚线所示。根据接收回波最强时的天线波束指向,就可确定目标的方向,这就是角坐标测量的基本原理。天线波束指向实际上也是辐射波前的方向。

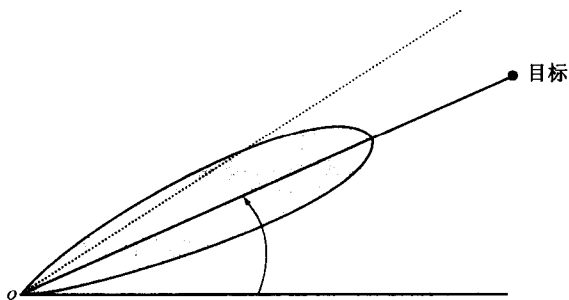


图 1.4 角坐标测量

角坐标的单位通常用弧度(rad)、度(°)或密位(mil)来表示。将圆周分为 6000 等份,每一等份对应的角度称为 1mil,因此圆周 2π 弧度等于 6000mil。各角度单位之间的换算关系为

$$\begin{aligned}
 1 \text{ rad} &= 57.3^\circ \\
 1^\circ &= 16.7 \text{ mil} \\
 1 \text{ mil} &= 0.06^\circ
 \end{aligned}$$

1.1.1.3 相对速度的测量

目标回波的多普勒效应是雷达测定目标速度的物理基础。有些雷达除确定目标的位置外,还需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。当目标与雷达之间存在相对速度时,接收到回波信号的载频相对于原来的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:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

式中 f_d 为多普勒频移(单位为 Hz); v_r 为雷达与目标之间的相对径向速度(单位为 m/s); λ 为载波波长(单位为 m)。

当目标向着雷达站运动时, $v_r > 0$, 回波载频升高; 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 , 就可确定目标与雷达站之间的相对径向速度。

1.1.2 脉冲雷达的基本组成

现以普通单基地脉冲雷达为例来说明雷达的基本组成及其作用。如图 1.5 所示, 脉冲雷达主要由天线和天线收发开关、发射机、接收机、信号处理器、终端设备、天线控制设备及定时器等组成。

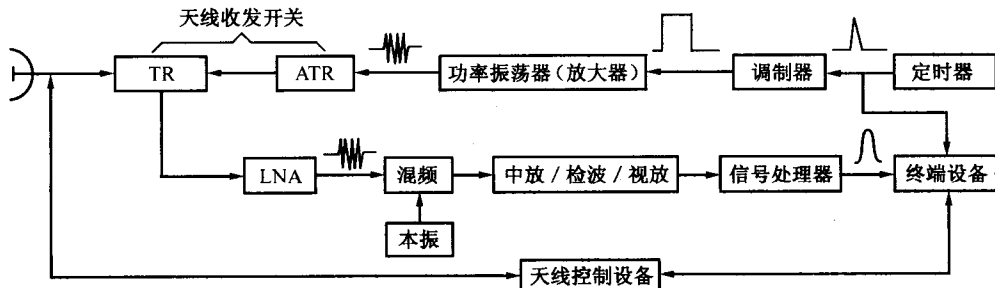


图 1.5 脉冲雷达组成框图

雷达工作时, 定时器控制发射机产生高频大功率的脉冲串, 经过定向天线向空间辐射电磁波。在天线控制设备的作用下, 天线波束按照指定的方式在空间扫描。当电磁波照射到目标时, 二次散射电磁波的一部分到达雷达天线, 再经由接收机进行放大、混频等处理以后, 送到信号处理和雷达终端设备, 以便对回波进行处理得到所需的观测波形和数据。

发射机一般有两种类型:

一种是以功率振荡器作为发射机的末级(例如磁控管振荡器或大功率三、四极管振荡器等), 调制器在定时器送来的触发脉冲控制下, 形成宽度为 τ 、重复频率为 F_r 的大功率调制脉冲。在调制脉冲的作用下, 功率振荡器产生高频大功率脉冲信号。这种发射机称为功率振荡式(也称单级振荡式)发射机。

另一种是以功率放大器作为发射机末级, 预先产生高稳定度的高频脉冲串信号, 在发射机中将高频脉冲串逐步地进行功率放大, 直到最末一级的高功率放大器形成大功率高频脉冲波。这种发射机称为功率放大式(也称主振放大式)发射机。

发射机产生的高频脉冲通过传输线送到天线,并经天线定向地辐射到空中。

脉冲雷达的天线是收发共用的,这需要一种收发开关装置(收发转换开关 TR),使发射时天线与发射机接通,并与接收机断开,以防强大的发射功率进入接收机把接收机前端烧毁;接收时天线与接收机接通,并与发射机断开(反收发开关 ATR 使天线与发射机断开),以免微弱的接收功率因发射机旁路而减弱。天线收发开关属于高频馈线中的一部分,通常由高频传输线和放电管组成,或用环行器及隔离器等实现。

接收机多为超外差式,由高频放大(有些雷达接收机不用高频放大)、混频、中频放大、检波和视频放大等电路组成。接收机的首要任务是把微弱的回波信号放大到足以进行信号处理的电平。

同时,接收机内部的噪声应尽量小,以保证接收机的高灵敏度,因此接收机的第一级常采用低噪声高频放大器。一般在接收机中也进行一部分信号处理,例如中频放大器的频率特性应设计为发射信号的匹配滤波器,这样就能在中放输出端获得最大的信号噪声功率比。需要进行较复杂信号处理的雷达,例如多普勒天气雷达,则设置专门的信号处理器。

通常接收机中放输出后经检波器取出脉冲调制波形,由视频放大器放大后送到终端设备。最简单的终端是显示器。例如在平面位置显示器(PPI)上可根据回波的位置和亮度,测读目标的距离、方位、强度等参数。显示器除了可以直接显示由雷达接收机输出的原始视频信号外,还可以显示经过处理的二次信息。

定时器是整个雷达的时钟,它使雷达各个分机保持同步工作。在主振放大式脉冲雷达中,定时器往往由频率综合器兼任。频率综合器所产生的各种频率振荡波之间保持严格的相位关系。

脉冲雷达天线一般具有很强的方向性,以便集中辐射能量,获得较大的探测距离。同时,天线的方向性越强,天线波瓣宽度越窄,雷达测角的精度和分辨力越高。微波雷达常用的是抛物面天线,馈源放置在焦点上,天线反射体将高频能量聚成窄波束。天线波束在空间的扫描常采用机械转动天线而实现,由天线控制设备来控制天线在空间扫描,天控设备同时将天线的角度信号送到终端设备以取得天线指向的角度数据。因此,天线控制设备的性能直接影响雷达波束扫描的灵活性和测角精度。

天线机械扫描常采用机电传动或液压传动。当雷达使用相控阵天线时,天线波束的空间扫描可以采用电子技术来实现,例如控制天线孔径面上移相器的相移量获得波束扫描。

图 1.5 是简化后的基本方框图,它省略了许多部分:例如接收机的抗干扰电路和重要的附属电路(自动频率微调、自动增益控制等);天线旋转时传输系统的转动环节等等。如果是跟踪型雷达,还应包括角度误差信号鉴别以及自动跟踪目标的系统等部分。这些问题将在以后有关章节中分别讨论。

1.1.3 基本雷达方程

雷达究竟能在多远距离上发现(检测到)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。因此它不仅可以用来决定雷达检测某类目标的最大作用距离,还可用来了解雷达各分系统之间的关系。下面根据雷达的工作原理来推导基本雷达方程。

设雷达发射机功率为 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 P_t 除以假想的球面积 $4\pi R^2$, 即

$$S_1' = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

实际雷达总是使用定向天线将发射功率集中辐射于某方向上。天线增益 G 表示比起各向同性天线来,实际天线在辐射方向功率增加的倍数。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

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

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 来表示被目标截获的入射功率再次散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

$$\begin{aligned} S_2 &\approx S_1 \frac{\sigma}{4\pi R^2} \\ &= \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \end{aligned}$$

式中截面积 σ 的量纲是面积,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 , 则雷达收到的回波功率 P_r 为

$$\begin{aligned} P_r &= A_e \cdot S_2 \\ &= \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

当接收到的回波功率 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。

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1.1.2)$$

上述基本雷达方程可以正确地反映雷达各参数对其作用距离的影响程度,但并不充分反映实际雷达的性能。因为还有许多影响作用距离的因素在方程中没有考虑。