

天气雷达资料的  
分析与应用

陈良栋 编著

气象出版社

·  
▽  
,  
\*

☆  
☆  
△  
△  
\*  
☆  
△  
↔  
≡  
≡  
D  
L  
S  
V  
+

⊕ ( ⊗ ⊥ ⊃ ⊄ ⊅ ⊆ ⊇ ⊈ ⊉ ⊊ ⊋ ⊌ ⊍ ⊎ ⊏ ⊐ ⊑ ⊒ ⊓ ⊔ ⊕ ⊖ ⊗ ⊘ ⊙ ⊚ ⊛ ⊜ ⊝ ⊞ ⊟ ⊠ ⊡ ⊢ ⊣ ⊤ ⊥ ⊦ ⊧ ⊨ ⊩ ⊪ ⊫ ⊬ ⊭ ⊮ ⊯ ⊰ ⊱ ⊲ ⊳ ⊴ ⊵ ⊶ ⊷ ⊸ ⊹ ⊺ ⊻ ⊼ ⊽ ⊾ ⊿ ⊿

# 天气雷达资料的分析与应用

陈良栋 编著

气象出版社

## 内 容 简 介

本书介绍天气雷达资料在气象预报中的应用。全书共分七章。第一、二章叙述天气雷达的基本工作原理、雷达探测大气的实施和雷达气象学的基本理论；第三至六章为本书的重点，介绍天气雷达资料在研究和预报云、降水、中尺度强对流天气、台风和定量测量降水等方面的应用；第七章简要介绍雷达探测新技术。

本书可作为大专院校大气科学类教材，也可供气象、航空和军事等部门从事天气预报、大气探测和天气研究的业务和科研人员阅读参考。

## 天气雷达资料的分析与应用

陈良栋 编著  
责任编辑 陶国庆

\*

高等教育出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

\*

开本：850×1168 1/32 印张：12.375 字数：322千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷

印数：1-5000 定价：4.05元

ISBN 7-5029-0665-7/P·0357 (课)

## 前 言

雷达发明于第二次世界大战的前夕，当时主要用来测定军事目标的位置。在探测过程中，发现云、雨等气象目标也会产生回波。因此，从40年代开始，人们就把雷达逐渐应用到气象探测中来，并研制了专门用于气象探测的雷达。

由于雷达能迅速、准确、细致地提供在测站周围半径几百公里范围内降水的位置、大小、强度和内部结构，以及它们随时间演变的情报，因而是气象探测和研究的新的有效的工具，也是进行短时天气预报和气象保障的重要手段。目前，世界上许多国家都建立了完整的天气雷达网，用于日常对雷暴、飑线、台风等灾害性天气的警戒和临近预报。

60年代以来在雷达气象上最突出的事件是气象多普勒雷达的发展。多普勒雷达不仅能测定降水的位置和强度，还能测定降水区内部气流的速度，从而为气象部门提供了新的更有用的探测工具。现在已经实现了单多普勒雷达和双多普勒雷达资料的实时处理和实时显示。在国外的气象探测和研究中已越来越普遍地使用多普勒雷达。此外，探测研究冰雹的双波长雷达和圆极化雷达，以及探测研究晴空大气回波的高功率、高灵敏度、高分辨率雷达和调频连续波雷达等也都有了发展。

我国在50年代已经开始应用军用雷达进行天气探测的试验，1958年从国外引进了第一部天气雷达。到70年代，我国已能自行生产3 cm波长的711型、712型、715型雷达和5 cm波长的713型雷达，并迅速在各省市和部队中建立起天气雷达站。目前，我国主要的机场、油田、盐场等都已建立天气雷达站，甚至个别的县也有天气雷达站。

由于气象雷达的发展和广泛应用，形成了一门新的气象科学分支——雷达气象学。雷达气象学包括雷达的构造原理、探测方案、资料的处理和传输、电磁波的散射、衰减和折射理论，以及雷达在研究云和降水物理、探测各种尺度的天气系统、探测晴空大气回波、进行降水定量测量和警戒灾害性天气等方面的应用等等。

当前我国的雷达气象研究工作，重点是探测雷暴、冰雹、暴雨、台风等灾害性天气，总结回波的特征和发生、发展和演变的规律，以便寻找出适合本地区短时天气预报使用的回波指标或征兆。其中在冰雹云的回波特征，以及台风的雷达定位和强度判断方面，取得了较大的进展。

在对中小尺度天气系统的分析研究中，现在已普遍地应用稠密的雷达网的加密观测资料来发现和追踪它们的发生、发展和演变，再结合其它气象资料进行分析，研究它们的发生发展与地形和环境场的关系，以及在天气尺度系统内部的中小尺度结构。

在降水定量测量方面，由于3 cm波长电磁波衰减严重，近几年来主要是对一些基础性的工作进行研究，如雨滴谱的测定，Z-R关系的选取和分析，雷达参数的标定和稳定性的探讨等。

在雷达气象的基础理论研究方面，也取得了一些成就。如测雨效率方程的探讨、球形雨滴和冰雹散射函数的计算、降雨对5.6 cm电磁波的后向散射和衰减的理论计算等。有些单位还开始了多普勒雷达信息及其处理方法的科研工作，为将来应用多普勒雷达作准备。

在组网观测方面，国家气象局从1980年开始在华东地区进行试验，1983年正式投入业务使用，以后其它地区也相继组织。在联防和组网观测期间，各雷达站按照统一的规定开机探测，然后把探测结果汇总到中心站，构制成回波综合图，再通过传真系统发布出来，这对于扩大单部天气雷达的探测范围，充分发挥天气雷达监测中小尺度灾害性天气的能力，为广大气象台站提供及时

时可靠的雷达探测资料等都起了重要的作用。

为了适应气象院校的教学需要，同时也为了适应我国雷达气象事业蓬勃发展和广大从事天气预报和研究人员学习雷达气象学的需要，特把这些年来，尤其是近十年来，本人从事雷达气象学的教学和科学研究的经验体会进行归纳，并吸取国、内外最新科研成果，编著出此书。全书共分七章。第一章简要叙述天气雷达的基本工作原理和探测的实施；第二章叙述雷达气象的基础理论，这是正确使用天气雷达探测资料的基础；第三至六章是本书的重点，详细介绍天气雷达回波的识别和分析，以及雷达探测研究各种尺度天气系统和定量测量降水等方面的应用；第七章简要介绍雷达探测新技术及其应用。

本书可作为气象院校师生的教材，也可供从事天气预报和研究的技术人员学习参考。

本书的编写过程中，曾得到大气物理研究所、高原大气物理研究所、气象科学研究所、南京大学、北京大学、南京气象学院以及许多雷达站在资料和技术上的大力支持；黄炎参加了第五章第一节的编写工作；张丙辰教授对本书的编写作了热情指导；陆佑中、邢茂银提出宝贵的修改意见；石宗祥绘制了全书插图，特在此深表谢意。由于本人水平有限，时间仓促，错误在所难免，恳请读者指正。

编著者

1985年底

# 目 录

## 前言

<b>第一章 天气雷达的基本工作原理和组成</b> .....	( 1 )
第一节 天气雷达的基本工作原理.....	( 1 )
第二节 天气雷达的组成和主要技术参数.....	( 2 )
第三节 天气雷达探测的组织和实施.....	(18)
<b>第二章 天气雷达探测的基本理论知识</b> .....	(35)
第一节 气象目标对电磁波的散射.....	(35)
第二节 电磁波在大气中的衰减.....	(49)
第三节 雷达气象方程.....	(61)
第四节 电磁波在大气中的折射.....	(79)
第五节 天气雷达的探测能力和探测精度.....	(88)
<b>第三章 雷达回波的识别和分析</b> .....	(101)
第一节 非降水回波.....	(101)
第二节 降水回波.....	(104)
<b>第四章 雷达对中小尺度对流性天气的探测研究</b> .....	(137)
第一节 天气雷达对雹暴的探测研究.....	(137)
第二节 飚线和下击暴流的雷达回波特征.....	(244)
第三节 暴雨的雷达探测和研究.....	(286)
<b>第五章 雷达对大尺度天气系统的探测</b> .....	(305)
第一节 雷达探测台风.....	(305)
第二节 气旋和锋面降水系统的雷达探测.....	(325)
<b>第六章 雷达测量降水</b> .....	(337)
第一节 利用Z-R关系测量降水.....	(337)
第二节 雷达测量降水的其他方法.....	(346)

<b>第三节</b>	<b>雷达测量区域降水量</b> .....	(350)
<b>第七章</b>	<b>雷达探测新技术及其应用</b> .....	(354)
<b>第一节</b>	<b>气象多普勒雷达及其应用</b> .....	(354)
<b>第二节</b>	<b>双波长和圆极化雷达及其应用</b> .....	(375)
<b>参考文献</b>	.....	(382)



# 第一章 天气雷达的基本工作 原理和组成

目前，气象雷达按照其探测的对象和目的不同，种类很多。专门用来探测大气中降水区的位置、大小、强度及其变化的雷达称为天气雷达或测雨雷达。

## 第一节 天气雷达的基本工作原理

天气雷达的基本工作原理，与一般的雷达相同。它间歇性地向空中发射电磁波列（称为探测脉冲），然后接收被气象目标散射回来的电磁波列（称为回波信号），并在荧光屏上显示出来，从而确定气象目标的空间位置和特性。在雷达探测中，目标的空间位置是用离雷达站的直线距离 $r$ 、相对于雷达站的仰角 $\alpha$ 和方位角 $\beta$ 来表示的（见图1.1）。

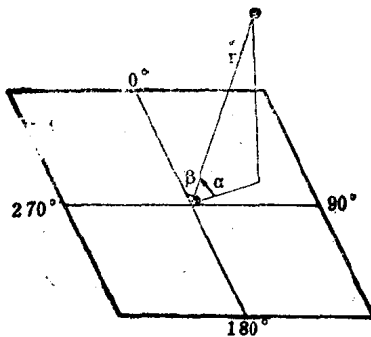


图1.1 目标位置的确定

## 一、目标距离的测定

目标离雷达的直线距离(简称距离) $r$ 是根据电磁波的传播速度和探测脉冲与回波信号之间的时间间隔 $\Delta t$ 来确定的。电磁波在大气中的传播速度与在真空中稍有不同,但对测距精度的影响很小,故仍可取 $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此

$$r = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1.1)$$

若时间间隔以 $\mu\text{s}$ 为单位,则上式可写成

$$r = 0.15 \Delta t \text{ (km)} \quad (1.2)$$

或 
$$r = 150 \Delta t \text{ (m)} \quad (1.3)$$

由于时间间隔 $\Delta t$ 极短,目标的距离是在显示器的荧光屏上用电子扫描的方法直接显示的。

## 二、目标方位角和仰角的测定

目标的方位角和仰角的测定是依靠天线的方向性来实现的。天气雷达的天线具有很强的方向性,它能将探测脉冲的能量集中地向某一方向发射。同样,它也只能接收沿同一方向来的回波信号。所以,只有当天线对准目标时,才能接收到目标的回波信号。根据这一原理,当发现目标时,天线所指的方位角和仰角就是目标相对于雷达的方位角和仰角。

## 第二节 天气雷达的组成和主要技术参数

### 一、天气雷达的组成

天气雷达由触发信号产生器、发射机、天线转换开关、天线、接收机、天线传动装置和显示器等七个主要部分所组成,如图1.2所示。

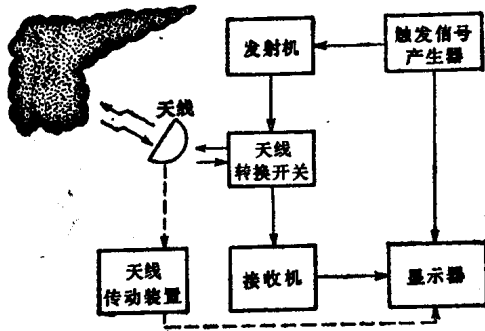


图1.2 天气雷达工作原理方块图

### (一) 触发信号产生器

它是整个雷达的指挥中心，能使各部分协调地工作。它的任务是周期性地产生一个触发脉冲（见图 1.3），输送到发射机和显示器，使发射机开始工作，产生强大的高频振荡；使显示器开始扫描。

每秒钟产生的触发脉冲的数目，称为脉冲重复频率，用  $F$  表示。两个相邻脉冲之间的间隔时间，称为脉冲重复周期，用  $T$  表

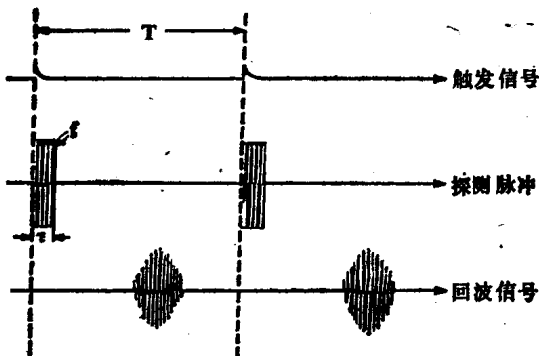


图1.3 天气雷达波形图

示，它等于脉冲重复频率的倒数。脉冲重复频率要根据雷达的最大探测距离来选定，以保证位于最大探测距离上的目标的回波信号能在下一个探测脉冲发生之前回到雷达天线。例如，711雷达的最大探测距离定为300km，脉冲重复频率定为400Hz；713雷达的最大探测距离为600km，脉冲重复频率为200Hz。

## (二) 发射机

在触发脉冲的作用下，发射机产生短促而强大的高频振荡，经过天线发射出去，这就是探测脉冲。发射机的主要技术参数有波长 $\lambda$ （或振荡频率 $f$ ），脉冲宽度 $\tau$ 和脉冲发射功率 $P_p$ 。

### 1. 波长 $\lambda$

它是决定气象雷达性能的一个最重要的参数。因为同一目标对不同波长的电磁波的散射和衰减特性有很大的差别（参看后面第二章）。所以，不同用途的气象雷达往往具有不同的波长。天气雷达通常使用的波长是厘米波，习惯上划分为不同的波段。如表1.1所示。K波段的雷达用来探测非降水的云，X、C和S波段的雷达用来探测降水。

表1.1 天气雷达的工作频率

频率 (MHz)	波长 (cm)	波段	频率 (MHz)	波长 (cm)	波段
30000	1	K	3000	10	S
10000	3	X	1500	20	L
6000	5	C			

### 2. 脉冲宽度 $\tau$

探测脉冲的振荡持续时间，称为脉冲宽度 $\tau$ 。由于探测脉冲具有一定的持续时间，因而它在空间也有一定的长度 $h$ ，

$$h = \tau c \quad (1.4)$$

若脉冲宽度以 $\mu s$ 为单位，则上式可以写成

$$h = 300\tau \text{ (m)} \quad (1.5)$$

当探测脉冲通过点目标时（如飞机），它所产生的回波信号具有同样的振荡持续时间  $\tau$ ，使得在荧光屏上显示的点目标的回波信号也具有相应的宽度。

为精确地测定降水区的大小和内部结构，天气雷达通常采用较窄的脉冲宽度。例如，711雷达的脉冲宽度为  $1\ \mu\text{s}$ ，713雷达为  $2\ \mu\text{s}$ 。有的天气雷达为了适应探测不同距离目标的需要，有几种脉冲宽度。在探测近目标时采用较窄的脉冲宽度；在探测远目标时，为了增大回波信号的强度（参见第二章），采用较宽的脉冲宽度。

### 3. 脉冲功率 $P$ ，

发射机发出的脉冲，其峰值功率称为脉冲发射功率。为了增大天气雷达的探测能力，其脉冲发射功率常常很大。例如711雷达为  $75\text{kW}$ ；713雷达为  $250\text{kW}$ 。不过发射机的平均发射功率并不大，因为在脉冲间歇期间并不发射能量。例如，711雷达的平均功率仅  $30\text{W}$ ；713雷达约  $100\text{W}$ 。

### （三）天线转换开关

脉冲雷达的发射和接收可以合用一个天线。天线转换开关是将天线、发射机和接收机连接起来的特殊装置。它的作用是在发射时接通天线和发射机，使强大的高频振荡脉冲顺利地到达天线，不进入接收机；而在脉冲间歇期间天线和接收机接通，使回波信号全部进入接收机。实际上，由于发射脉冲的功率极大，仍然会有一部分能量同时漏入接收机，这漏入的部分发射能量实际上还远强于回波信号，不过已不会损坏接收机了。这部分漏进来的能量，在距离显示器上形成主波，是测量距离的起始标志。

### （四）天线

天气雷达的天线，由辐射体和反射体两部分所组成（图1.4）。反射体通常采用抛物面型，辐射体是用波导管扩展而成的喇叭口，位于抛物面反射体的焦点上。从发射机来的电磁波能量，由喇叭口辐射出来，经过抛物面反射体的反射，聚集成一束狭窄的强电磁波向空间定向地辐射出去，类似于探照灯的光束。

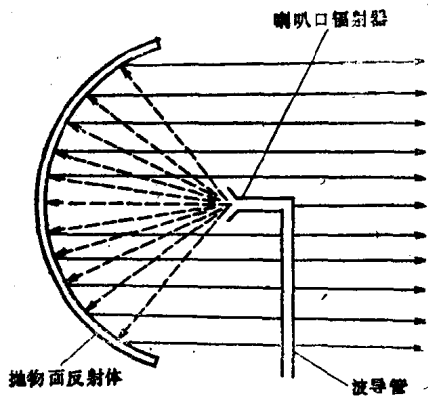


图1.4 天线辐射示意图

下面介绍天线的几个主要参数。

1. 天线方向图及波束宽度

雷达波束虽然肉眼看不见，但可用仪器测出其电磁场强度及能流密度的空间分布。通常，在极坐标上绘出通过天线的水平和垂直面上的辐射能流密度的相对分布曲线图，称为天线方向图，如图 1.5 所示。曲线上各点与坐标原点的连线长度，代表该方向相对辐射能流密度的大小。图中在最大发射方向上的称为主波瓣，侧面的称为旁瓣，相反方向的称为尾瓣。

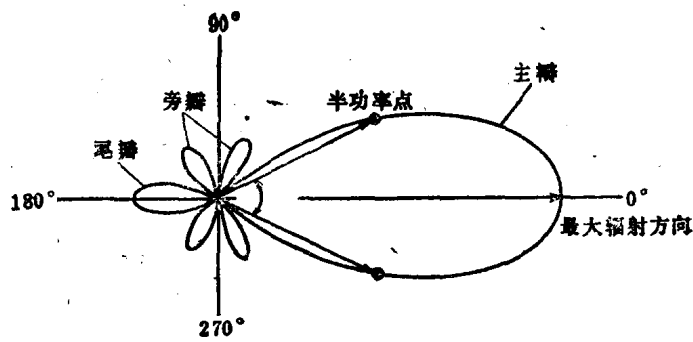


图1.5 天线方向图

在天线方向图上，两个半功率点方向的夹角，称为波束宽度，用来衡量波瓣的宽度。通常所说的波束宽度，指的是天线主瓣的宽度，它是天线的一个重要技术参数。在垂直面上的波束宽度，用 $\theta$ 表示；在水平面上的波束宽度，用 $\varphi$ 表示。波束宽度越小，角度的分辨率越高，探测精确也越高。气象雷达天线的波束宽度，通常不超过 $1-2^\circ$ 。例如，711雷达天线直径为 $1.5\text{m}$ ，波束宽度约 $1.5^\circ$ ；713雷达天线直径为 $3.7\text{m}$ ，波束宽度为 $1.2^\circ$ 。

天线波束宽度的大小，取决于天线反射体截面的几何尺寸和波长。一般说来，有

$$\theta = 70 \frac{\lambda}{d} \quad (1.6)$$

这里 $\theta$ 为波束宽度，以度( $^\circ$ )为单位； $\lambda$ 为波长，以 $\text{cm}$ 为单位； $d$ 是反射体的直径，以 $\text{cm}$ 为单位。可见，波长越短，天线直径越大，波束越窄。

图 1.6 所示的是天气雷达常用的几种反射体的形状和它们的

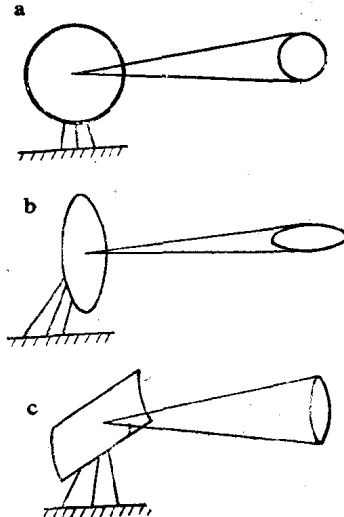


图1.6 各种类型的天线反射体及其波束

主瓣示意图。图中a所示的是圆抛物面型反射体；它在水平和垂直方向上波束的宽度相同，为天气雷达所常用。图中b所示的是垂直方向尺寸较大的反射体，其垂直方向的波束宽度较窄，而水平方向的波束宽度较宽。例如，712雷达的垂直波束宽度为 $0.45^\circ$ ，水平波束宽度为 $2.0^\circ$ ，因此在探测目标的高度和垂直结构时性能较好，但在水平方向上的角分辨率较差。图中c所示的是水平方向尺寸较大的反射体，它的波束的水平宽度较窄而垂直宽度较大，适合于进行水平探测。例如，在一些远洋船上只配备有平面位置显示器的简单的天气雷达，常采用这种天线。

## 2. 天线增益

辐射总功率相同时，定向天线在最大辐射方向的能流密度与各向均匀辐射的天线的能流密度之比，称为天线增益，用  $G$  表示。增益  $G$  与波束宽度  $\theta$ 、 $\varphi$  有下述关系

$$G = \frac{\pi^2}{\theta\varphi} \quad (1.7)$$

在超高频技术中，很多天线的增益达几千到几万。711和713雷达的天线增益约为 $10^4$ （或40dB）。

## 3. 天线有效面积 $A_e$

天线的有效面积，指天线反射体能有效地接收回波信号的口径面积。回波的能流密度  $S_r$  乘上天线的有效面积  $A_e$ ，即为天线所收到的总的回波功率  $P_r$ ，即

$$P_r = S_r \cdot A_e \quad (1.8)$$

天线的有效面积最大只能等于天线的几何截面，通常小于几何截面。圆抛物面天线的有效面积  $A_e$  和几何截面  $A_g$  之间有如下关系：

$$A_e = \frac{2}{3} A_g \quad (1.9)$$

天线有效面积和天线增益之间有如下关系：

$$A_e = \frac{G}{4\pi} \lambda^2 \quad (1.10)$$



或

$$G = \frac{8\pi}{3\lambda^2} A, \quad (1.11)$$

可见，天线的尺寸越大，波长越短，天线增益就越高。大的天线增益对于提高雷达探测能力和精度都是很有利的。所以，天气雷达通常具有较大的天线。为了增强天线的抗风性能和减轻重量，天线反射体有时做成栅状，或外加防风罩。

#### 4. 雷达波的极化

一般雷达发射的电磁波是平面极化波或线极化波，即在垂直于电磁波传播方向的平面内电矢量的振动只限于某一个固定的方向。电矢量所在的平面称为电磁波的极化平面。711 雷达发射的电磁波的电矢量在水平面上振动，所以是水平极化波。

#### (五) 接收机

雷达接收机的主要任务是放大来自目标的回波信号，然后送往显示器进行显示。

雷达天线所收到的回波信号是非常微弱的。所以，雷达接收机必须具有接收微弱信号的能力。这种能力常称为灵敏度，它用接收机的最小可辨功率 $P_{\min}$ 来表示。所谓最小可辨功率，就是回波信号刚刚能从噪声信号中分辨出来时的回波功率。711 雷达的最小可辨功率为 $0.25\text{pW}$  ( $0.25 \times 10^{-12}\text{W}$ )。

接收机必须具有足够的放大倍数，以便使微弱的回波信号能够在荧光屏上显示出来。接收机的放大倍数用增益 (dB) 表示。天气雷达的接收机中，装有中频 (或高频) 衰减器，它用来控制接收机的增益，从而可以对回波信号进行人为的衰减，使得回波信号中较强的部分才能在荧光屏上显示出来。因此，逐档进行衰减，可以测定气象目标回波内部的强度分布和中心最大强度。711 雷达的中频衰减器由电阻组成，共有 8 级，分别用开关来控制。各级衰减器的衰减量分别为 1 dB, 2 dB, 3 dB, 5 dB, 10dB, 20dB, 20dB, 20dB。713 雷达采用 Pin 调制器，在高频