

QIXIANG LEIDA ZILIAO  
FENXI YU YINGYONG

# 气象雷达资料 分析与应用

胡明宝 编著

内容简介

# 气象雷达资料分析与应用

胡明宝 编著

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

本书以多普勒天气雷达为主,以双线偏振多普勒天气雷达、风廓线雷达、毫米波测云雷达等目前已进入业务应用的气象雷达为辅,在简要叙述雷达探测原理和发展状况的基础上,重点介绍雷达回波的分类与识别、多普勒速度图的分析、强对流天气的探测、资料的处理与产品应用等内容。本书尽可能地采用了我国气象雷达探测的彩色回波图。

本书适用于大气科学学科各类本科班的教学,也可用于任职岗位培训,大专班可节选使用,对研究生也有参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

气象雷达资料分析与应用 / 胡明宝编著. — 北京:  
气象出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5029-6357-6

I. ①气… II. ①胡… III. ①气象雷达—研究 IV.  
①TN959. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 123353 号

QIXIANG LEIDA ZILIAO FENXI YU YINGYONG

气象雷达资料分析与应用

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

责任编辑: 杨泽彬

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京京科印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 14.5

字 数: 330 千字

彩 插: 16

版 次: 2016 年 7 月第 1 版

印 次: 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

# 前 言

目前,多普勒天气雷达、双偏振多普勒天气雷达、风廓线雷达、毫米波测云雷达已经成为气象业务应用中最重要、最常用的雷达设备,因此加强资料分析应用工作十分必要。我们在原教材《天气雷达探测与应用》(气象出版社,2007)的基础上,通过简化天气雷达探测的基础理论,强化雷达回波的识别、资料的分析 and 产品的应用,同时尽可能地采用我国雷达探测的彩色回波图例,并适当增加风廓线雷达、毫米波测云雷达资料的分析应用内容,编写了本书。

在编写过程中,主要参考了张培昌、汤达章、俞小鼎、李柏、杨引明等主编的教材、讲稿和多媒体课件,并得到了江苏省气象局夏文梅、徐芬等提供南京 CINRAD-SA 雷达资料的帮助。在此一并表示感谢!

对于书中所采用的雷达回波图,我们尽可能地标出来源或雷达观测站,但由于取材广泛、时间所限,难以全部追根溯源,如有不合适之处,请读者予以谅解。

本书的出版得到了解放军理工大学气象海洋学院领导和机关的支持与帮助,特此致谢。

本书适用于大气科学学科各类本科班的教学,也可用于任职岗位培训,大专班可节选使用,对研究生也有参考价值。

由于素材所限,不足之处难免,请读者见谅。

胡明宝

2016年3月

# 目 录

## 前 言

|       |                        |         |
|-------|------------------------|---------|
| 第 1 章 | 多普勒天气雷达探测的基本理论 .....   | ( 1 )   |
| 1.1   | 天气雷达的基本工作原理 .....      | ( 1 )   |
| 1.2   | 回波强度探测原理 .....         | ( 7 )   |
| 1.3   | 多普勒速度探测原理 .....        | ( 15 )  |
| 1.4   | 影响天气雷达探测的因素 .....      | ( 19 )  |
| 第 2 章 | 多普勒天气雷达回波的分类与识别 .....  | ( 25 )  |
| 2.1   | 非气象回波 .....            | ( 25 )  |
| 2.2   | 非降水气象回波 .....          | ( 27 )  |
| 2.3   | 降水回波 .....             | ( 32 )  |
| 第 3 章 | 多普勒天气雷达速度图的识别与分析 ..... | ( 38 )  |
| 3.1   | 速度模糊区的识别 .....         | ( 38 )  |
| 3.2   | 风向的识别 .....            | ( 40 )  |
| 3.3   | 风向风速随高度变化的识别 .....     | ( 41 )  |
| 第 4 章 | 多普勒天气雷达探测强对流风暴 .....   | ( 56 )  |
| 4.1   | 对流风暴的分类 .....          | ( 56 )  |
| 4.2   | 冰雹探测 .....             | ( 63 )  |
| 4.3   | 中尺度气旋探测 .....          | ( 81 )  |
| 4.4   | 下击暴流探测 .....           | ( 91 )  |
| 4.5   | 飚线探测 .....             | ( 106 ) |
| 第 5 章 | 多普勒天气雷达探测大尺度天气 .....   | ( 114 ) |
| 5.1   | 锋面探测 .....             | ( 114 ) |
| 5.2   | 台风探测 .....             | ( 126 ) |

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| 5.3 暴雨探测 .....                     | (135)        |
| <b>第6章 多普勒天气雷达产品与应用 .....</b>      | <b>(145)</b> |
| 6.1 基本数据产品 .....                   | (145)        |
| 6.2 物理量产品 .....                    | (150)        |
| 6.3 降雨量有关的产品 .....                 | (158)        |
| 6.4 强天气识别产品 .....                  | (161)        |
| 6.5 风场产品 .....                     | (167)        |
| <b>第7章 双偏振多普勒天气雷达资料分析与应用 .....</b> | <b>(170)</b> |
| 7.1 双线偏振雷达探测原理 .....               | (170)        |
| 7.2 双线偏振雷达测量的物理量 .....             | (171)        |
| 7.3 双线偏振雷达资料的应用 .....              | (175)        |
| <b>第8章 风廓线雷达资料的分析与应用 .....</b>     | <b>(185)</b> |
| 8.1 风廓线雷达简介 .....                  | (185)        |
| 8.2 风廓线雷达探测原理 .....                | (186)        |
| 8.3 风廓线雷达资料应用 .....                | (192)        |
| <b>第9章 毫米波测云雷达资料的分析与应用 .....</b>   | <b>(212)</b> |
| 9.1 毫米波测云雷达的特点及其发展 .....           | (212)        |
| 9.2 毫米波测云雷达的应用 .....               | (214)        |
| 9.3 8 mm 测云雷达探测个例 .....            | (215)        |
| 9.4 3 mm 测云雷达探测个例 .....            | (217)        |
| <b>参考文献 .....</b>                  | <b>(223)</b> |

# 第1章 多普勒天气雷达探测的基本理论

掌握天气雷达探测的最基本理论,对于正确开展雷达资料的分析应用工作是非常必要的,以下的介绍力图简明扼要。

## 1.1 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,通过向空中发射电磁波,然后接收被气象目标散射回来的电磁波,根据接收回波的返回时间、来向、强度、相位、偏振等信息,确定气象目标的空间位置和性质。

### 1.1.1 雷达波的发射

雷达发射分系统产生高频振荡电磁波,并通过天线发射出去。发射波的波长一般采用 $\lambda$ 表示,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。第二次世界大战时为了保密起见曾用不同的英文字母表示,这种表示法一直沿用至今。表1.1给出了几个电磁波波段代码及其相应的波长和频率范围。目前天气雷达一般采用X、C和S波段,K波段主要用来探测非降水的云,而L、UHF、VHF波段一般用于气象测风雷达。

表 1.1 波段代码与电磁波波长、频率对照表

| 波段  | 波长           | 频率(MHz)     |
|-----|--------------|-------------|
| VHF | 10~1 m       | 30~300      |
| UHF | 1~0.3 m      | 300~1000    |
| L   | 0.3~0.15 m   | 1000~2000   |
| S   | 15~7.5 cm    | 2000~4000   |
| C   | 7.5~3.75 cm  | 4000~8000   |
| X   | 3.75~2.4 cm  | 8000~12500  |
| Ku  | 2.4~1.66 cm  | 12500~18000 |
| K   | 1.66~1.12 cm | 18000~26500 |
| Ka  | 1.12~0.75 cm | 26500~40000 |

目前,天气雷达一般采用收发共用天线,雷达对电磁波的发射和接收是分时工作的,因此发射分系统是间歇性发射的,即在短暂的时间中产生电磁波并发射出去,然后休息直到进入下一个周期。图 1.1 为发射分系统工作波形图。这种间歇性工作方式类似人的脉搏跳动,所以,这种发射的雷达也常称为脉冲波雷达。

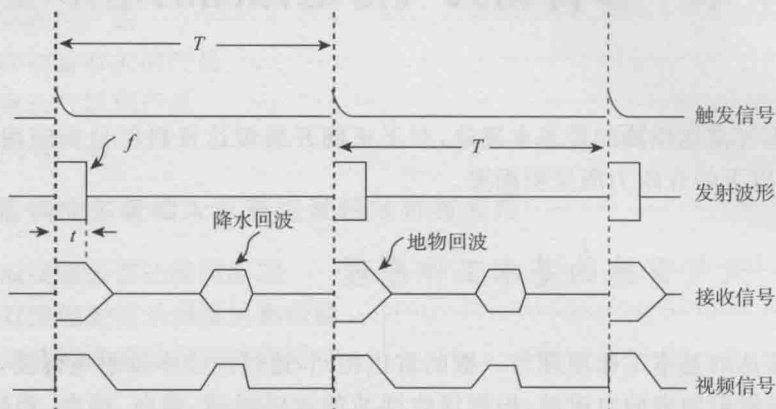


图 1.1 天气雷达波形图

相邻两次发射脉冲之间的时间间隔,称为脉冲重复周期,用  $T$  表示。而每秒钟发射的脉冲数目,称为脉冲重复频率,用  $F$  表示。显然  $F$  与  $T$  之间是互为倒数关系。脉冲重复周期决定了雷达的最大探测距离,因为雷达周期性发射出去的脉冲波一般都是一样的,所以在发射机休息期间,雷达接收机接收到回波时,被默认为是刚刚发射出去的脉冲被云雨目标散射造成的,即位于最大探测距离上的目标的回波信号必须在下一个探测脉冲发射之前回到雷达天线。故雷达最大探测距离  $R_{\max}$  为  $CT/2$  ( $C$  为电磁波传播速度)。如多普勒天气雷达探测时脉冲重复频率选为  $300\text{ Hz}$ ,则最大探测距离为  $500\text{ km}$ 。

雷达发射一个探测脉冲的持续时间,称为脉冲宽度  $\tau$ 。由于探测脉冲具有一定的持续时间,当探测脉冲通过点目标时(如飞机),它所产生的回波信号也具有同样的持续时间  $\tau$ ,使雷达终端上显示的回波尺寸为  $\tau C/2$ ,此即为雷达探测的最高空间分辨率。因此,为精确地测定降水区分布的内部结构,天气雷达需要采用较窄的脉冲宽度,脉冲宽度一般为  $1\text{ }\mu\text{s}$  或  $2\text{ }\mu\text{s}$ 。有的天气雷达在探测近目标时采用较窄的脉冲宽度;在探测远目标时,采用较宽的脉冲宽度,以提高雷达的发射能量,增大回波信号的强度。

一般用发射功率来表示发射分系统产生的电磁波的强度。为了增大天气雷达的探测能力,其发射功率常常很大,一般达到几十千瓦至几百千瓦。由于天气雷达采用脉冲式发射,因此雷达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,所以雷达的平均功率一般只在数十瓦至数百瓦之间。

### 1.1.2 目标的搜索

天气雷达是通过采用定向天线作旋转扫描来搜索降雨区目标的。如果天线发射出去的电磁波能量在空间各个方向均匀分布,则称该天线为全向天线。如果天线发射出去的电磁波能量在空间各个方向分布不均匀,并在某个方向能量最强,则称该天线为定向天线,并称最强发射能量方向为天线指向。

描述天线发射电磁波能量在空间的分布图,称为天线方向图。天线方向图是一个以天线位置为原点的立体图,为便于理解,一般采用过原点的纵切剖面(垂直面)和横切剖面(水平面)来表示。图 1.2 为纵切剖面示意图,以天线的指向为  $0^\circ$ ,天线的背面为  $180^\circ$ 。曲线上某点与坐标原点的连线长度,代表该点所在方向发射能量的大小。图中在最大发射方向上的称为主瓣,侧面的称为旁瓣或副瓣,相反方向的称为尾瓣。当旁瓣较多时,从最接近主瓣的开始依次称为第一旁瓣、第二旁瓣等。

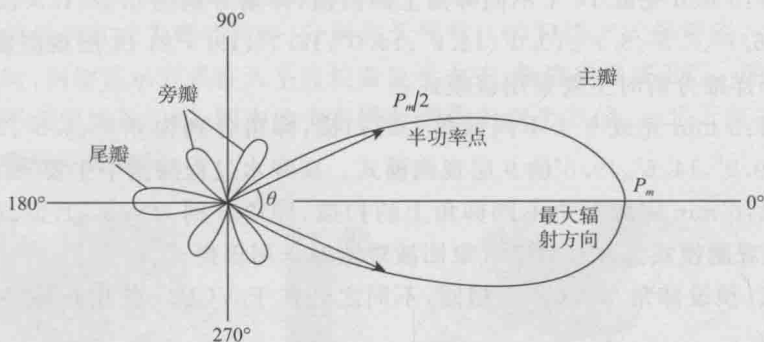


图 1.2 天线方向图

在天线方向图上,两个半功率点方向之间的夹角,称为波束宽度。在水平面上的波束宽度,用  $\theta$  表示;在垂直面上的波束宽度,用  $\varphi$  表示。波束宽度越小,角度分辨率越高,天线的定向性越好,探测精度也越高。天气雷达天线的波束宽度,通常为  $1^\circ$  左右。

天气雷达一般常用圆抛物面天线,即天线的口面为圆形,过天线反射面中心点的切面为抛物线。圆抛物面天线的水平和垂直波束宽度相同,一般为

$$\theta = 70 \frac{\lambda}{d} \quad (1.1)$$

这里  $\theta$  为波束宽度,以度( $^\circ$ )为单位; $\lambda$  为波长,以 cm 为单位; $d$  是反射体的口面直径,以 cm 为单位。可见,波长越短、天线直径越大,波束宽度越小。

定向天线与全向天线相比,能将发射能量有效地集中于最大发射方向,一般用天线增益  $G$  来表示采用定向天线后在最大发射方向上能量增加的倍数。天线增益  $G$  与波束宽度  $\theta$ 、 $\varphi$  有下述关系

$$G = \frac{\pi^2}{\theta \varphi} \quad (1.2)$$

在实际探测中,采用定向天线的最大发射能量方向作为天线指向,开展降雨区扫描搜索。一般先采用固定仰角的圆周旋转扫描,来搜索雨区所在的方位、距离等空间分布和强度分布信息;然后再对雨区强中心所在方位进行上下俯仰扫描,以了解云雨目标的垂直发展情况。为了做到无人值守、连续运转,多普勒天气雷达还可以采用体积扫描,即在程序的控制下,天线自动从预先设定的最低仰角开始,完成  $360^\circ$  旋转扫描,然后抬升到上一个仰角作旋转扫描,直到预先设定的所有仰角均扫描完,称其为完成一次体积扫描,或简称体扫。天线完成一次体扫后,回到最低仰角,再开始另一次体积扫描。

中国气象局的 SA 多普勒天气雷达(波束宽度为  $0.95^\circ$ ) 设置有三种体积扫描方式:

VCP11:6 min 完成 14 个不同仰角上的扫描,仰角分别为  $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $5.3^\circ$ 、 $6.7^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $8.7^\circ$ 、 $10.0^\circ$ 、 $12.0^\circ$ 、 $14.0^\circ$ 、 $16.7^\circ$ 、 $19.5^\circ$  的 14 层观测模式。需对降水结构作详细分析时主要采用该模式。

VCP21:6 min 完成 9 个不同仰角上的扫描,仰角分别为  $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $9.9^\circ$ 、 $14.6^\circ$ 、 $19.5^\circ$  的 9 层观测模式。在降水过程探测中主要采用该模式。

VCP31:6 min 完成 5 个不同仰角上的扫描,仰角分别为  $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.5^\circ$ 、 $3.5^\circ$ 、 $4.5^\circ$  的 5 层观测模式。在对晴空气象回波观测时采用该模式。

VCP32:预设仰角与 VCP31 相同,不同之处在于 VCP31 使用长脉冲而 VCP32 使用短脉冲。

在天气雷达探测中,目标的空间位置是采用球坐标表示的。即用目标离雷达站的距离  $r$ 、相对于雷达站的仰角  $\alpha$  和方位角  $\theta$  来表示的,如图 1.3 所示。

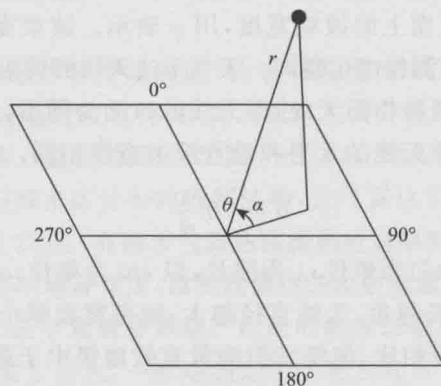


图 1.3 目标位置的确定

目标离雷达的距离  $r$  是根据电磁波的传播速度  $c$ , 以及雷达发射出探测脉冲与收到回波信号之间的时间间隔  $\Delta t$  来确定的。即

$$r = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1.3)$$

目标的方位角和仰角的测定是依靠天线指向来确定的。当雷达接收到回波时, 就认为雷达天线所指的方位角和仰角就是目标所在的方位角和仰角。

### 1.1.3 回波的接收与显示

雷达天线将收集到的回波经过波导等馈线分系统送入接收分系统, 接收机将回波信号放大后送往信号处理分系统进行处理。

雷达天线所收到的回波信号是非常微弱的, 雷达接收机必须具有检测微弱信号的能力, 这种能力常用最小可辨功率  $P_{\min}$  来表示。所谓最小可辨功率, 就是回波信号刚好能从噪声中分辨出来时的回波功率。

回波的显示方式主要有两种, 分别与天气雷达的扫描方式相对应。雷达作圆周旋转扫描时, 回波显示方式称为平面位置显示方式, 简称平显或 PPI。图 1.4 即为天气雷达的平面位置显示图, 图中的十字线分别指向四个方位, 上北下南左西右东, 图中的同心圆表示距离圈。

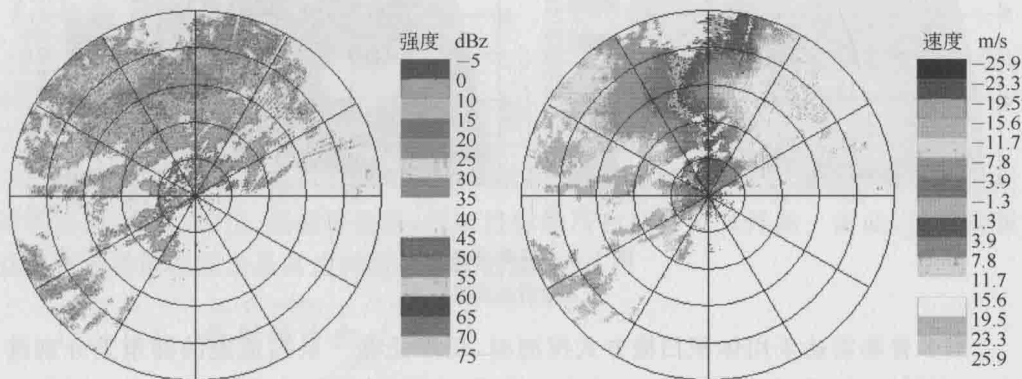


图 1.4 平面位置显示

(本室<sup>①</sup>雷达观测)

需要注意的是平面位置显示时, 显示的回波并不表示云雨目标在同一个水平面上。图 1.5 左图表示雷达采用设定仰角作 360° 旋转扫描面的示意图, 而右图为在计算机屏幕上显示的回波图, 在回波分析时必须牢记, 在 PPI 方式显示的回波图像上,

<sup>①</sup> 本室: 指解放军理工大学气象海洋学院气象雷达教研室, 下同。

不同距离反映的是不同高度上的天气情况。

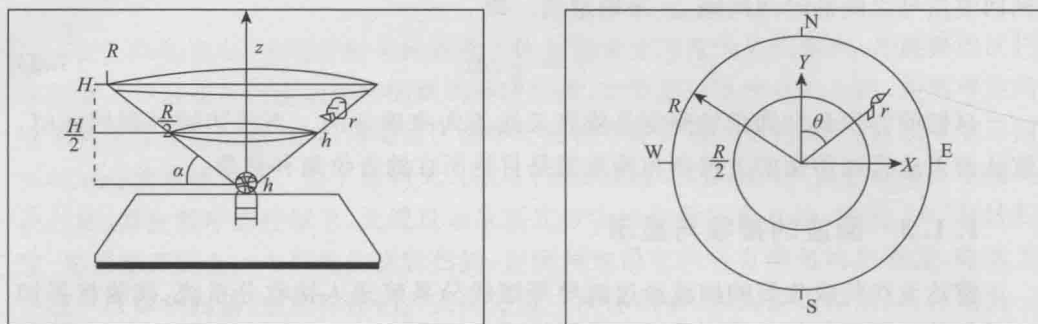


图 1.5 固定仰角的雷达观测空间和回波显示示意图

雷达天线作俯仰扫描时,回波显示方式称为距离高度显示方式,简称高显或 RHI。图 1.6 即为多普勒天气雷达的距离高度显示图,图中垂直的竖线为等距离线,水平横线为等高度线。

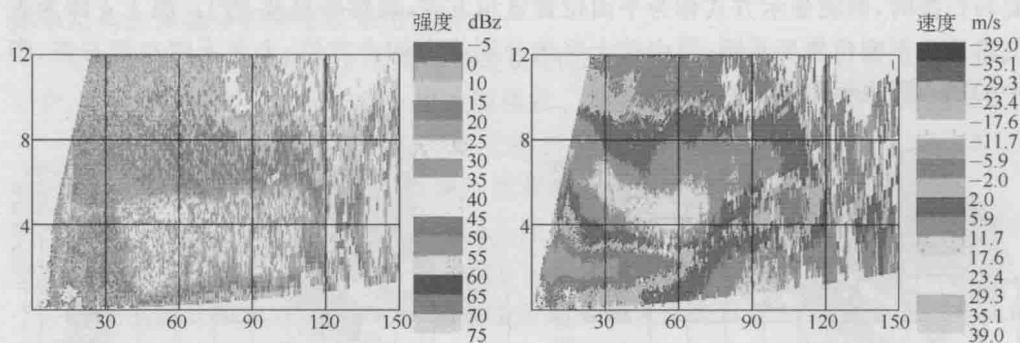


图 1.6 距离高度显示

(本室雷达观测)

当多普勒雷达采用体积扫描方式探测时,仍然是在一系列选定的仰角上分别进行  $360^\circ$  旋转扫描采样的。因此,体积扫描收集的资料,实际上是由一个个不同仰角的 PPI 资料组成的。目前有一些可视化处理软件,可以针对体扫资料,进行立体投影显示,效果如图 1.7 所示。

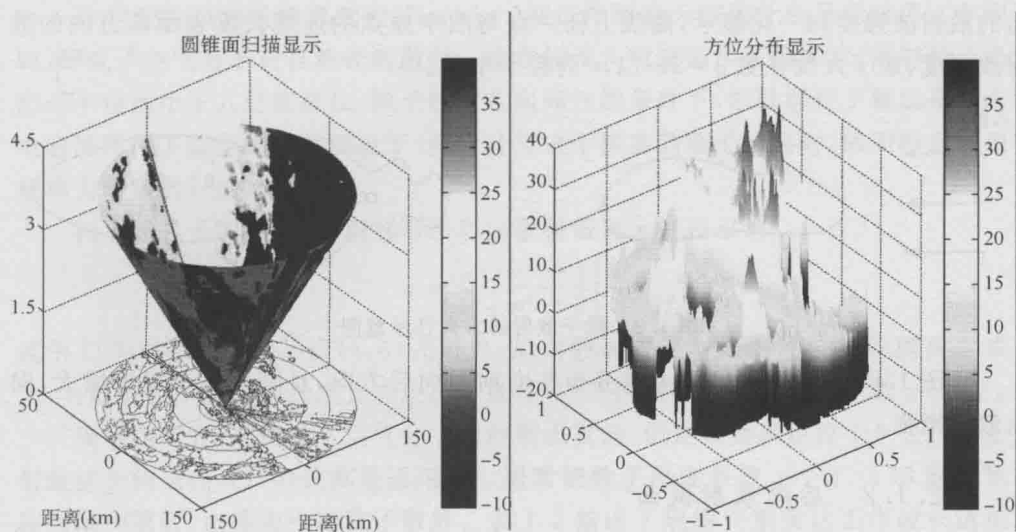


图 1.7 体积扫描面与立体投影显示效果示意图(见彩图)

(引自四创公司产品说明书)

## 1.2 回波强度探测原理

### 1.2.1 气象目标对雷达波的散射

雷达探测的前提,是目标物对雷达发射的电磁波的散射,雷达根据接收到的散射波的来向、强度、相位、偏振等信息,判断目标物所在位置及其性质。因此,目标对雷达电磁波的散射理论是雷达探测最基础的理论。

#### 1.2.1.1 散射的方向性

雷达电磁波通过大气、云和降水粒子时,会发生散射现象。按照电磁波理论,当雷达发射的高频振荡的电磁波入射到粒子上时,粒子被极化生成复杂的电荷和电流分布。这些复杂的电荷和电流分布随着入射波的振荡而振荡,它们会向外再次发射电磁波,这种二次发射电磁波,就是粒子产生的散射波。

研究表明,粒子散射电磁波的频率与入射电磁波的频率相同。粒子散射电磁波的能力,以及散射波在空间的分布状态,不但与入射电磁波的特性有关,还与粒子的大小、形状及其电学特性有关,通常将它们统称为雷达目标特性。

散射波在不同方向的强度分布并不相等,称为散射的方向性。图 1.8 为不同方

向的散射波强度归一化显示,曲线上任一点与图中原点的连线长度表示该方向的散射波强度,粒子尺度系数  $\alpha = 2\pi r/\lambda$ ,  $r$  为粒子半径。

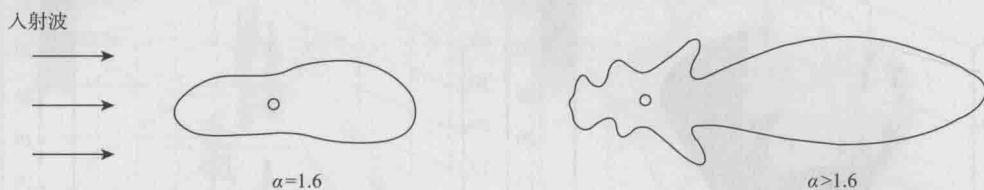


图 1.8 粒子散射的方向性示意图

从图 1.8 可见,散射能量主要分布在向前和向后方向,且随着粒子尺度增大,向前散射增强。

### 1.2.1.2 后向散射截面

天气雷达采用收发共用天线时,雷达接收到的只是被粒子散射后返回雷达天线的那一部分能量,称这部分能量为后向散射能量。粒子的后向散射能力,可以用后向散射截面来描述。

后向散射截面的定义是:设有一个截面积为  $\sigma$  的理想散射体,它能全部接收入射到其上的电磁波能量,然后再各向同性地全部散射出去,其散射回到雷达天线处的能流密度正好等于该实际粒子在天线处造成的后向散射能流密度,则称该实际粒子的后向散射截面为  $\sigma$ 。

因此,  $\sigma$  相当于粒子的一个等效面积,雷达波入射能流密度  $S_i$  与  $\sigma$  的乘积相当于这个等效面积截获的入射能量,然后全部均匀地散射开来,则散射回波的能流密度为

$$S_s(\pi) = \frac{S_i \sigma}{4\pi R^2} \quad (1.4)$$

显然  $\sigma$  越大,截获的入射能量越大,即  $S_i \sigma$  越大,那么,造成的后向散射能流密度就愈大。所以,我们可以用粒子的后向散射截面  $\sigma$  的大小来描述粒子的后向散射特性。

### 1.2.1.3 瑞利散射理论

散射理论就是要建立粒子的后向散射截面的表达式。大气中能够散射雷达电磁波的主要物质是大气介质、云和降水粒子,云和降水是天气雷达的主要探测对象。由于自然界状况千变万化,云和降水粒子的大小、相态、几何形状等因时因地而不同,对雷达波的散射也就不同,因此散射理论是很复杂的,目前主要只对圆球形、圆柱形、椭球形等少数几种几何形状比较简单的粒子的散射能力求出了精确的解析解。

19 世纪末英国科学家瑞利(Rayleigh)在试图解释天空为什么呈现蓝色这个问题时,研究了空气分子对自然光的散射。他在假设入射波是水平偏振波、散射粒子是球形且半径远小于入射波波长、粒子性质各向同性的条件下,把散射粒子看成是在入射电磁波作用下感生的振荡偶极子,然后计算这个振荡偶极子的辐射,从而得出了现在被称为瑞利散射的基本结论。

在小球粒子的条件下,瑞利得出后向散射截面  $\sigma$  可表示为

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D^6 \quad (1.5)$$

式中  $D$  为粒子的直径。由(1.5)式可见,后向散射截面与入射波波长的四次方成反比,与散射粒子直径的六次方成正比。此外,还与散射粒子的复折射指数  $m$  有关。

瑞利的研究,虽然是从空气分子的散射出发的,但是只要满足粒子半径远小于入射波波长的条件,(1.5)式都是适用的。通常把粒子尺度系数  $\alpha$  小于 0.13 时的散射称为瑞利散射,也称为小球粒子散射。表 1.2 给出了现用气象雷达工作波长适用瑞利公式的粒子最大直径。

表 1.2 适用瑞利公式时的粒子最大直径

|                      |     |     |     |      |
|----------------------|-----|-----|-----|------|
| $\lambda(\text{cm})$ | 10  | 5.5 | 3.2 | 0.86 |
| $D(\text{mm})$       | 4.0 | 2.2 | 1.2 | 0.34 |

通常云滴直径只有  $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ,最大也不超过  $100 \mu\text{m}(0.1 \text{ mm})$ ,而雨滴的直径一般都在  $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ ,其中以  $0.7 \sim 0.9 \text{ mm}$  的最多,因此厘米波天气雷达探测云滴时,瑞利公式是完全适用的。当采用  $5.6 \text{ cm}$  和  $10 \text{ cm}$  波长雷达时,瑞利公式对绝大多数的雨滴也适用。

下面对(1.5)式作初步讨论。

(1)小球形粒子的后向散射截面  $\sigma$  与波长的四次方成反比。这说明,对同一小球形粒子来说,雷达的波长越短,后向散射截面越大。如表 1.3 所示,对同一小球形粒子,以  $10 \text{ cm}$  波长为准,当波长改为  $5.66 \text{ cm}$ 、 $3.2 \text{ cm}$  时,小球形粒子的后向散射截面将分别增大 9.7 倍和 95 倍。也就是说,如果其他条件相同,波长越短的雷达能接收到较多的散射能量,越容易发现弱的云雨目标。

表 1.3 雷达波长与后向散射截面的关系

|                                |       |      |     |      |    |
|--------------------------------|-------|------|-----|------|----|
| 波长 $\lambda(\text{cm})$        | 0.9   | 1.25 | 3.2 | 5.66 | 10 |
| $\sigma_\lambda / \sigma_{10}$ | 15200 | 4560 | 95  | 9.7  | 1  |

(2)小球形粒子的后向散射截面与粒子直径的六次方成正比。即,同样波长的雷达探测小球形粒子时,粒子的直径越大,后向散射截面越大。如果其他条件相同,直

径为  $10^3 \mu\text{m}$  的小雨滴比直径为  $10^2 \mu\text{m}$  的大云滴的后向散射截面要大  $10^6$  倍。所以,雷达发现降水的云层要比发现无降水的云层容易得多。降水强度越大时,雨滴一般也越大,所以回波更强。

(3) 小球形粒子的后向散射截面与复折射指数  $m$  有关。以  $K$  表示  $(m^2 - 1)/(m^2 + 2)$ , 对于天气雷达常用的波段,在自然状态下水粒子的  $|K|^2$  值约为 0.93, 冰粒子的  $|K|^2$  等于 0.197。因此,根据瑞利散射公式,小水球的后向散射截面大约是同样大小的冰球的 5 倍,正是这个原因,天气雷达探测不到中高云和一般的低云,也不大容易探测到降雨云的顶部。

当散射粒子直径与雷达波长相当(如冰雹),甚至大于雷达波长时,散射粒子中感生的电荷和电流分布更为复杂,已经不能把散射过程简单地看成是一个电偶极子的振荡过程,而是电多极子和磁多极子的振荡过程,空间某一点上的散射电场是各极子振荡在该点的综合效应。在这种情况下,瑞利给出的后向散射截面公式已不适用,需要采用米散射理论计算。

## 1.2.2 气象雷达方程

气象雷达方程是描述气象雷达接收到的回波功率与哪些因子有关的表达式。气象雷达作为雷达家族中的一种,它也服从雷达探测的基本规律,为此,我们将从普遍的雷达方程说起,再进一步讨论气象雷达方程。

### 1.2.2.1 单个目标的雷达方程

设雷达的发射功率为  $P_t$ , 又假设雷达天线是各向同性地向外发射能量的,那么,在距离  $R$  处雷达波的能流密度为

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (1.6)$$

实际上,一般雷达都采用定向天线,它使大部分能量集中在一个很窄的波束范围内朝一定的方向发射出去。根据天线增益  $G$  的定义,则在定向天线最大辐射方向上距离  $R$  处的能流密度为

$$S_{\max} = G \cdot S = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (1.7)$$

若  $R$  处目标的后向散射截面为  $\sigma$ , 则将(1.7)式代入(1.4)式,得到目标散射到天线处的后向散射能流密度为

$$S_s(\pi) = \frac{P_t}{(4\pi R^2)^2} G \cdot \sigma \quad (1.8)$$

若天线的有效截面积为  $A_e$ , 则天线接收到来自目标的散射回波功率  $P_r$  应为

$$P_r = S_i(\pi)A_e = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi R^2)^2} \quad (1.9)$$

从天线理论可知,圆抛物面天线的有效截面积与天线增益的关系为

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

其中  $\lambda$  是雷达的波长。将(1.10)式代入(1.9)式即得

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.11)$$

这是一个普遍的雷达方程,适用于飞机、舰船、单个雨滴等任何一种单个目标。由(1.11)式可见,雷达回波功率的大小取决于雷达参数(发射功率  $P_t$ 、天线增益  $G$ 、波长  $\lambda$ )、目标的雷达截面  $\sigma$ 、目标离雷达的距离  $R$ 。

### 1.2.2.2 有效照射体积

天气雷达探测云和降水等气象目标时,回波功率是云和降水粒子群散射的总和。那么,究竟是由多少个粒子散射的总和呢?为此,需要先引入有效照射深度和有效照射体积的概念。

雷达发出的探测脉冲具有一定的持续时间,即脉冲宽度  $\tau$ ,在空间就占有一定的长度,定义为脉冲长度  $h(=\tau c, c$  为电磁波的传播速度),如图 1.9 所示。图中具有脉冲长度  $\tau c$  的波被划分为更多的小段,每一小段都要依次经过各降雨粒子并产生散射回波。若最前沿的波被  $B$  粒子散射回到天线时的时间恰好等于最后沿的波被  $A$  粒子散射回到天线处,则  $A$ 、 $B$  两点之间所有粒子产生的散射波都能同时回到雷达天线。

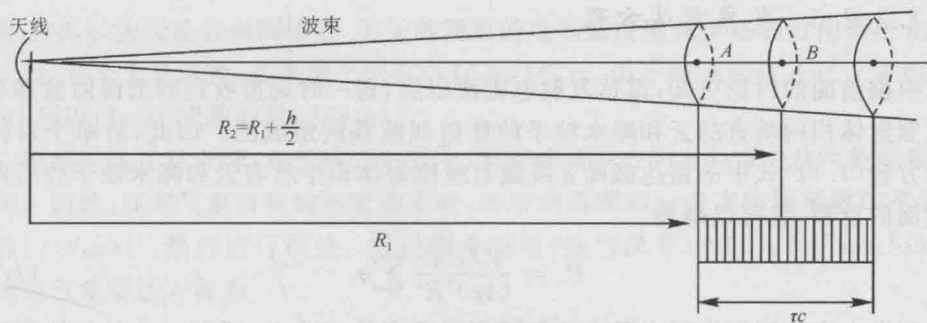


图 1.9 雷达脉冲长度示意图

取天线开始发射脉冲的时间为计时起点,那么天线收到脉冲波前沿在  $A$  粒子产生的回波时间为  $t_1 = 2R_1/c$ ;天线收到脉冲波前沿在  $B$  粒子产生的回波时间为  $t_2 =$