

L. J. 巴坦 著

# 雷达气象学

科学出版社

# 雷 达 气 象 学

L. J. 巴 坦 著

庄 荫 模 译

周 晓 平 校  
吕 达 仁

科 学 出 版 社

1 9 6 5

L. J. Battan  
RADAR METEOROLOGY  
The University of Chicago Press  
Chicago  
1959

## 内 容 简 介

本书简要地阐述了雷达气象学的基本理论和探讨了雷达在气象、大气物理等方面的各种应用问题。

全书共分为十五章，第一至六章阐述了雷达工作原理和雷达气象学的一些理论基础；第七至十三章探讨了雷达在定量测量降水、云物理、天气、水文以及航空等方面的应用；在最后两章中，介绍了不是由云雨现象，而是由其它大气物理过程所引起的一些回波现象和一些特殊技术。

本书可供气象、大气物理工作者以及高等院校有关专业师生参考，对于雷达工作者也有一定参考价值。

## 雷 达 气 象 学

L. J. 巴坦 著  
庄荫模 译

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证书出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1965年9月第一版 开本：850×1168 1/32  
1965年9月第一次印刷 印张：5 5/16  
印数：0001—1,800 字数：136,000

统一书号：13031·2167

本社书号：3301·13—15

定价：[科六] 0.85 元

## 序 言

雷达气象学的研究开始于第二次世界大战。从那时以来，已经完成了大量富有成效的研究工作。虽然大多数研究结果已经分发表在各种地球物理学的杂志中，但是很多工作仍然没有得到多数气象学家的注意，其中那些不属于物理气象方面的工作就更是如此。

本书的目的是要以不大的篇幅，简要地叙述一下雷达气象学诞生以来的进展情况。在写书的过程中，我特别寄望于非雷达气象的气象学家们，希望通过他们对过去已完成工作的较好的了解，能够推动未来雷达天气的研究。许多重要问题，象大尺度气象雷达观测的应用等都需要充分地进行研究。在这方面，也许知道一些雷达气象的天气气象学家能够比对天气学知道得很少的雷达气象学家能够取得更多的进展。

在不长的十几年中，雷达气象学发展很快。其中大多数成果是由不多的几个研究单位完成的。在雷达气象的研究中，下的一些单位贡献特别显著：D. 阿特拉斯 (Atlas) 领导下的空军剑桥研究中心的地球物理研究董事会雷达天气组；A. 拜密斯 (Bemis) 和 P. 奥斯廷 (Austin) 领导下的麻省理工学院天气雷达研究所；J. S. 马歇尔 (Marshall) 领导下的麦克吉尔大学“风暴天气”研究组。此外，在本书中引用到其它一些团体的文章，也有理由以他们的成就而自豪。

在领导和发展雷达气象学的工作中，象芝加哥大学的 H. R. 拜尔斯 (Byers) 教授和麻省理工学院的 H. G. 胡登 (Houghton) 教授等著名气象学家的工作是特别值得称赞的。

本书的主要工作是在作者为芝加哥大学气象系成员的时候完

成的。作者对芝加哥大学气象系主任 H. R. 拜尔斯的鼓励和意见表示深切的感谢。

L. J. 巴坦 (Battan)

# 符 号 表

物 理 量	符 号	常 用 单 位
发射功率	$P_e$	千瓦
接收功率	$P_r$	瓦
脉冲长度(距离单位的)	$h$	米
脉冲长度(时间单位的)	$\tau$	微秒
脉冲重复频率	$F$	秒 <sup>-1</sup>
辐射波长	$\lambda$	厘米
天线有效面积	$A_e$	米 <sup>2</sup>
水平射束宽度或铅笔型射束各个方向的宽度	$\theta$	度
垂直射束宽度	$\phi$	度
高度角	$\alpha$	度
距 离	$r$	公里
降雨率	$R$	毫米/小时
含水量	$M$	克/米 <sup>3</sup>
单位立方米中的水滴数	$N$	米 <sup>-3</sup>
水滴直径	$D$	毫米
ND <sup>6</sup>	$Z$	(毫米) <sup>6</sup> /米 <sup>3</sup>
质 量	$m$	克
折射指数	$n, \sqrt{\epsilon}$	
返回散射截面	$\sigma$	(厘米) <sup>2</sup>
单位体积的反射率	$\eta$	(厘米) <sup>-1</sup>
衰减系数	$k$	
充塞系数	$\Psi$	
时 间	$t$	
温 度	$T$	
照耀体积	$V$	
速 度	$v$	

# 目 录

序言	( iii )
符号表	(viii)
第一章 雷达原理	( 1 )
第二章 电磁波的一些性质	( 7 )
§ 1. 电 场	( 7 )
§ 2. 磁 场	( 8 )
§ 3. 雷达天线的能量辐射	( 9 )
§ 4. 电磁波的偏振	(12)
第三章 电磁波的传播	(14)
§ 1. 决定折射指数大小的气象因子	(16)
§ 2. 对流层低层的折射	(17)
§ 3. 相对于地球的射线曲率	(19)
§ 4. 非标准折射	(20)
§ 5. 产生非标准折射的气象条件	(21)
第四章 球形粒子的雷达探测	(25)
§ 1. 雷达方程	(25)
§ 2. 球形水滴或冰粒对无线电波的散射	(28)
§ 3. 复折射指数	(29)
§ 4. G. 米和雷莱后向散射的比较	(30)
§ 5. $\bar{P}_r$ 和球形粒子区后向散射的关系	(31)
§ 6. 总散射截面和总吸收截面	(32)
第五章 融化球形粒子的散射和非球形粒子的散射	(34)
§ 1. 融化中的冰球的散射	(34)
§ 2. 非球形水成物体的散射	(38)
§ 3. 非球形粒子散射能量的偏振	(42)
第六章 电磁波的衰减	(44)

§ 1. 大气气体的衰减·····	(45)
§ 2. 水成物的衰减·····	(46)
§ 3. 云的衰减·····	(48)
§ 4. 雨的衰减·····	(50)
§ 5. 雪的衰减·····	(52)
第七章 雷达定量测量降水·····	(53)
§ 1. 雷达常数的计算·····	(53)
§ 2. 降水强度和雨滴参数之间的关系·····	(56)
§ 3. 降水强度计算值和观测值的比较·····	(59)
§ 4. 衰减波段的雨强测量·····	(63)
§ 5. 云内含水量的测量·····	(66)
第八章 脉冲长度和波束宽度造成的回波畸变·····	(67)
§ 1. 脉冲长度的影响·····	(67)
§ 2. 波束宽度的影响·····	(68)
§ 3. 副瓣的影响·····	(71)
第九章 雷达在水文学上的应用·····	(73)
§ 1. 人工回波积分·····	(73)
§ 2. 照象回波积分·····	(74)
§ 3. 电子回波积分·····	(75)
第十章 云物理研究中雷达的应用·····	(78)
§ 1. 对流云降水·····	(78)
§ 2. 对流云的生长·····	(84)
§ 3. 对流回波的直径·····	(85)
§ 4. 对流回波的持续时间·····	(85)
§ 5. 对流云中的雹·····	(87)
§ 6. 连续性降水·····	(88)
§ 7. 亮带·····	(89)
§ 8. 降水发生层和雪层·····	(92)
§ 9. 云的催化·····	(95)
第十一章 中尺度气象的雷达应用·····	(98)
(雷暴、飏线和龙卷风的研究)	
§ 1. 雷暴·····	(98)



§ 2. 雷暴高度·····	(100)
§ 3. 雷暴的倾斜·····	(101)
§ 4. 雷暴的移动·····	(102)
§ 5. 预报雷暴的到达·····	(104)
§ 6. 雷暴线——飚线·····	(104)
§ 7. 闪电观测·····	(107)
§ 8. 龙 卷·····	(111)
<b>第十二章 飞行中飞机雷达的应用·····</b>	<b>(115)</b>
§ 1. 飞机雷达·····	(115)
§ 2. 强烈湍流的防避·····	(116)
§ 3. 冰雹的防避·····	(118)
§ 4. 结冰的防避·····	(119)
§ 5. 避免和地物碰撞·····	(121)
<b>第十三章 大尺度天气系统的雷达研究·····</b>	<b>(122)</b>
§ 1. 台 风·····	(122)
§ 2. 对流降水的降水变化·····	(125)
§ 3. 气旋的降水特征·····	(126)
<b>第十四章 没有水滴和冰粒时的雷达回波——神仙波·····</b>	<b>(130)</b>
§ 1. 神仙波的起源·····	(131)
§ 2. 白炽形回波·····	(132)
§ 3. 环状神仙波·····	(133)
§ 4. 海风回波·····	(134)
§ 5. 线状神仙波·····	(135)
<b>第十五章 特殊技术·····</b>	<b>(137)</b>
§ 1. 等回波线·····	(137)
§ 2. 不同回波强度的逐步灰暗显示·····	(138)
§ 3. 湍流测量技术·····	(139)
§ 4. 都卜勒雷达在天气研究中的应用·····	(142)
§ 5. 金属条测风·····	(142)
§ 6. 散射波偏振性质的应用·····	(145)
§ 7. PPI 回波的等高显示·····	(147)
<b>参考文献·····</b>	<b>(150)</b>

# 第一章

## 雷达原理

雷达是利用无线电回波来探测目标物存在的一种技术，它包括测定目标物的方向和距离，识别目标物的特性，以及雷达资料的分析<sup>[1]</sup>。在雷达气象中，“目标物”一词指的是大气或其边界中能向雷达接收机送回可分辨的回波能量的任何物体。因此，在雷达气象研究中，人们就必需考虑来自陆地、水面、雨滴、云滴、冰粒、雪花、以及各种大气凝结核和高折射指数梯度区域等的散射和反射能量。在以后的叙述中，不管散射能量源本身的性质如何，我们都叫它是“目标物”。

雷达是根据电磁能在空间以  $2.998 \times 10^8$  米/秒的光速传播这一原理工作的。在大气中光速的变化很小，如果知道了能量传播路径上介质折射指数的分布，传播速度的变化是可以事先确定的。在实际应用中，可以认为无线电能量是以光速直线传播的。这样，转动一个能产生象探照灯光柱一样的窄波束的天线，就可以搜索出天空中的目标物。根据接收机得到反射信号时天线所指的方向，可决定目标物在三度空间里的方向，通过测量无线电脉冲发射和接收之间的时间间隔，很容易算出目标物与雷达之间的距离。

对本书的读者来说，我们只谈雷达的下面几个主要部分：产生无线电能量的发射机，发射能量和接收散射能量的天线，检波放大并将接收信号转变成视频讯号的接收机，以及能显示返回信号的显示器。图1说明了上述雷达的工作情形。大多数天气雷达中，发射和接收都使用同一个天线。在发射机工作的瞬间，接收机自动关闭，以免遭受发射能量巨大的脉冲的破坏。

几乎所有雷达的工作频率都是固定的，其无线电波由磁控管

产生。为使雷达系统正常工作，雷达接收机必须调到磁控管的振荡频率上。

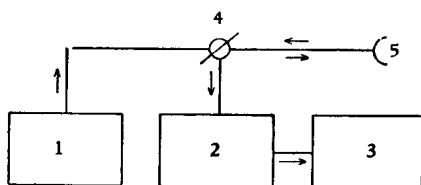


图1 雷达的框图

(1——发射机, 2——接收机, 3——显示器,  
4——自动开关, 5——天线)

在大多数雷达中，发射能量都采用持续时间极短（例如1微秒）的无线电脉冲，这种脉冲的发射频率叫“脉冲重复频率（PRF）”。典型的脉冲重复频率是每秒1000次。雷

达的最大探测距离，等于两个脉冲之间的时间间隔的二分之一乘上光速。但是，在这个距离内的目标物也只有当它们能散射回足够大的功率时，才能够被雷达探测到。

天气雷达使用的无线电频率( $f$ )的范围，是从每秒1500兆周到每秒30000兆周以上。人们把这种频率的能量叫做“微波能量”。通常人们用“波长”而很少用“频率”一词。由于波长和频率这两个参数有 $c = \lambda f$ 的关系，因此雷达的波长是很容易计算的。实际上，人们又进一步将微波划分为不同的波段，波段的具体划分见表1。

表1 天气雷达的工作频率

频率 (兆周/秒)	波长 (厘米)	波段	频率 (兆周/秒)	波长 (厘米)	波段
30000	1	K	3000	10	S
10000	3	X	1500	20	L
6000	5	C			

在下面的各章中将会看到，雷达的探测能力和波长有密切的关系。一般来说需要探测的粒子越小，所需的波长越短。例如“S段”雷达通常只能探测雨滴，而探测不出粒子比雨滴小的云滴；但是“K段”雷达就能探测到许多不含降水的云滴。

雷达接收机的一个重要特点是它的所谓“最小可测信号”，即在噪声水平之上能被探测出的最弱的信号。因为从云、雨等反射

回接收机的功率非常小，因而雷达接收机的最小可测信号就要设计得尽可能小。大多数雷达接收机最小可测信号的量级是 $10^{-12}$ — $10^{-13}$ 瓦。雷达发射机的发射功率一般都十分高，通常有100千瓦的量级。

雷达接收机的灵敏度由增益控制器所决定。对于任意一种增益控制器，在雷达显示器上能够分辨的信号范围，常常小于接收天气现象的信号范围。如果调节增益控制器使雷达可以发现微弱信号，则此时强信号可能使系统饱和而被消除。雷达信号的可分辨范围，叫雷达系统的“动态范围”。为了增加动态范围，人们提出了各种可以使弱信号比强信号放大更多的设计方案。

目标物的方位角和仰角测量的精确度，与天线波束的形状有很大关系。显然，波束愈窄，即角宽度愈小，分辨能力就愈高。但是，窄波束也有它的缺点，在任何一个时刻它只能考察目标物的一小部分。因此，波束形状的选择最终仍得取决于测量对象与目的。一般天气雷达使用宽度为几度的对称波束。但是，用来测量高度和垂直大小的雷达，常常具有较宽的水平波瓣，而强力的搜索雷达，则使用较宽的垂直波瓣。波束的形状取决于天线反射子的形状、大小和所使用的波长。图2是一般使用的各种形状的波束，和用以产生这些波束的天线反射子的形状。

根据要了解的情况，天气雷达可有各种不同形式的显示器<sup>[2]</sup>。一般的雷达显示器是由阴极射线管构成的。在阴极射线管中，当发射脉冲开始向外

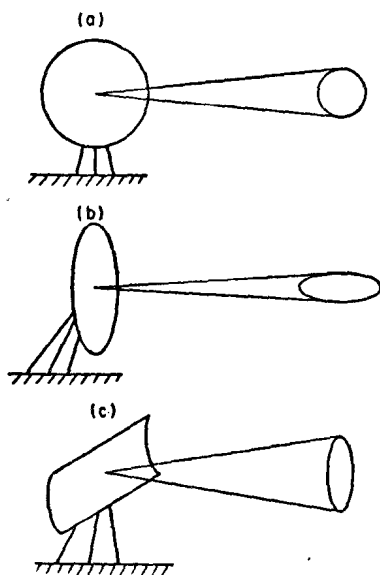


图2 各种类型的天线反射器及其波束

辐射时,电子束开始扫描,在接收机接收到信号时,阴极射线管产生出某种可以识别的标志。在显示器中,最基本的是A型显示器或R型显示器,这种显示器和物理或电子实验室里使用的示波器一样(见图3),电子束在管面以固定的速率作水平扫描,在收到信号时电子束产生垂直偏移。从扫描起点到电子束发生偏移点之间的扫描线长度,表示目标物离开雷达的距离。如在图3中看到的,发射脉冲也出现在扫描线上,这是从自动开关漏入的发射脉冲的能量造成的。显示器上电子束偏移的大小,表示接收信号的强弱。显然,A型显示器能够同时显示来自许多目标物的信号。在天气雷达中,A型显示器通常被用来识别散射源的性质,帮助雷达调谐和定量测量回波功率。

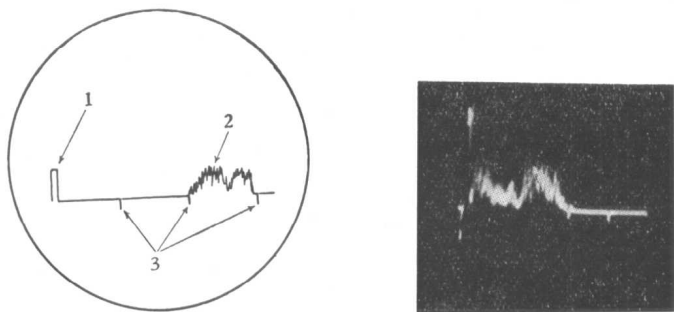


图3 A型或R型显示器

(1——发射脉冲,2——降水回波,3——距离标志)

天气雷达中应用得最广泛的显示器是平面位置显示器(见图4),通常简称为“PPI”。这种显示器将目标物平面分布显示在极坐标网格系统上。PPI应用在具有水平扫描天线的雷达中。在这种显示器里,电子束以固定的速率从示波器的中心向外扫描,然后迅速回到示波管的中心,再由中心向外扫描。同时电子束又作转动,和天线的转动同步。

由PPI的显示,人们可以立刻读出目标物离雷达站的距离以及相对于雷达的方位。此外,PPI采用了“亮度调制”。这就是显示器萤光屏上光点的亮度决定于回波信号的强度。显示器上的强

“回波”，代表着强的返回功率。有 PPI 的雷达，在观测强烈风暴时有很大用处，因此它被广泛地应用在气象台站中。

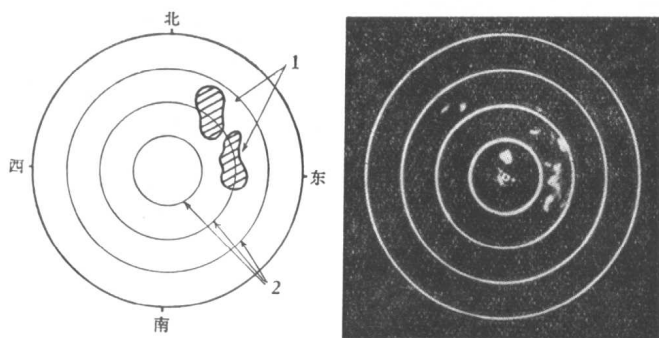


图 4 平面位置显示器 (PPI)  
(1—降水回波, 2—距离标志)

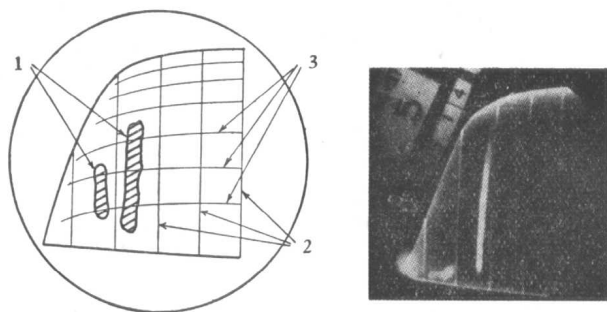


图 5 距离-高度显示器  
(1—降水回波, 2—距离标志, 3—高度标志)

另一种常用的雷达显示器是距离-高度显示器，通常用“RHI”来表示(见图 5)，这种型式的显示器用于具有垂直扫描天线的雷达中。在 RHI 里，电子束以一定的垂直角向外扫描，然后迅速地回到起点，再以不同的垂直角向外扫描。这里电子束的垂直角由天线的垂直角所控制。如图 5 所示，这种显示能够把回波位置表示在横坐标为斜距，纵坐标为高度的坐标系上。为了便于读出高度，垂直坐标单位长度所代表的距离比水平所代表的距离要好小

几倍。和 PPI 一样, RHI 也用强度调制显示, 这样, 在有些测量中如果信号尚未强到使接收系统饱和时, 就可能用回波的亮度来判断回波的强弱。距离-高度显示雷达 (有时叫做高度探测雷达), 在研究云和降水生长时特别有用, 因此它已被广泛地应用在云物理的研究中。

## 第二章

### 电磁波的一些性质

由于雷达涉及电磁波的发射、传播、散射和接收，因而需要简要地了解一下电磁波的一些性质。

以下叙述的只是无线电波的一些基本特点，需要详细了解这方面内容的读者可以参阅文献[1]。

描述无线电波的基本方程是麦克斯威尔(Maxwell)方程。这个方程确定了电场和磁场之间的函数关系，电场和磁场按一定规律的组合就构成了电磁波。

在下面几节中，我们将分别讨论电场和磁场，并将说明在电磁辐射中，它们是如何组合在一起的。

#### § 1. 电 场

如果置于空间某处的电荷受到电力的作用，则该处存在着电场。因为当把电荷拿到另外的电荷或任意其它带电体附近时，电荷会受到力的作用，这说明电荷或任意带电体是产生电场的源泉。

电场强度  $\vec{E}$  是一个向量，既有大小也有方向。根据定义，电场中某点电场强度的大小，与在该点上单位正电荷所受力的大小成正比。电场强度的方向，就是该点单位正电荷所受力的方向。

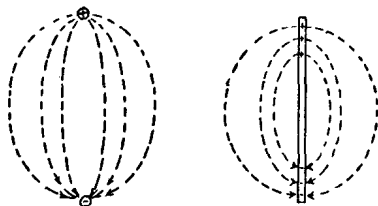


图 6 电场的例子

在带电体附近描画出电力线或通量线来表示电场是比较方便



的(图6)。这些线通常用“电位移”向量  $\vec{D}$  来表示,正确的画出电力线有助于了解电场性质。电场中任意点的电力线平行于作用在该点的单位正电荷上力的方向,亦即平行于电场强度  $\vec{E}$  的方向。电力线开始于正荷电体,而止于负荷电体。

电力线或通量线之间的距离,与电场的大小成反比。根据定义,通过垂直于电力线的单位面积上的电力线数目,就等于  $\vec{D}$  的大小,而与  $\vec{E}$  成正比。反过来说,电场强度与穿过垂直面上单位面积中电力线的数目成正比,即  $\vec{D} = \epsilon_1 \vec{E}$ , 这里  $\epsilon_1$  是比例常数,叫做介质的“介电常数”。

$\vec{E}$  的大小等于沿着通量线的电压梯度。这样,把沿通量线上相邻两点的线长,除相应的两点间的电位差,就能得到电场的大小。由此,在规格的 mks 制中,电场强度的单位为伏/米。

## § 2. 磁 场

当运动的电荷受不同于静电力的力作用时,就产生了磁场。磁场起源于电荷在导体中的运动。普通磁铁产生的磁场是由磁性物质原子内电子的自转和公转产生的。这些电子的运动可以看成是电流。

作用在电流元  $\vec{I}$  上的磁场力,是一个和  $\vec{I}-\vec{B}$  平面正交的向量,即  $\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}$ , 这里  $\vec{F}$  是向量力,向量  $\vec{B}$  表示“磁感”或“磁通”。为了方便起见,可以用磁感应 ( $\vec{B}$ ) 线来表示磁场。实验证明,磁感应线总是和磁场中指南针的指向平行。磁通量线的一个重要特点是,它总是围绕着产生它的电流成为一些闭合线(见图7)。

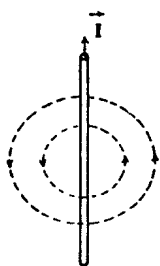


图7 磁场的例子

磁感应线处处平行于磁场强度(通常用符号  $\vec{H}$  表示)。  $\vec{H}$  的大小与穿过垂直于感应线的单位截面上通量线的数目成正比,即

$$\vec{B} = \mu_1 \vec{H},$$

这里  $\mu_1$  是比例常数,叫做介质的

导磁系数。