

# 雷达探测 大气和海洋

周文英 柯明杰 编著



海洋出版社

# 雷达探测大气和海洋

葛文忠

编著

蒋培杰

江苏工业学院图书馆  
藏书章

海洋出版社

1986年·北京

## 内 容 简 介

本书以气象雷达和雷达气象并茂的方法,首先介绍了常规的和特殊的气象雷达的基本原理,然后再介绍这些雷达在大气探测、海洋探测和洪水探测与预报中的应用。在本书中,吸收了许多国外的先进技术和应用成果,对我国气象雷达和雷达气象的发展,有着重要的参考价值。

本书可供从事大气物理、海洋研究、雷达气象和气象雷达工作者参考,也可以作为大专院校师生和雷达台站工作人员的参考书。

责任编辑:刘莉蕾

责任校对:刘兴昌

## 雷达探测大气和海洋

葛文忠 编著  
蒋培杰

---

海 洋 出 版 社 出 版(北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 四季青印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 12<sup>7</sup>/<sub>8</sub> 字数: 250千字

1987年7月第一版 ● 1987年7月第一次印刷

印数: 900

---

统一书号: 13193·0253 定价: 3.30元

版权所有·不得翻印

## 前 言

雷达在气象、水文和海洋研究中的应用已经有很长的历史了。三十多年来的实践证明,天气雷达对于发布台风和强风暴警报是有效的。它能够提供出关于引起洪水的暴雨方面的有价值资料。具有测量多普勒频移能力的雷达还可以提供风暴中气流的运动速度。计算机应用于雷达系统后能够实时提供降雨强度、降雨总量和降水回波的分布,追踪风暴的运动,因此,雷达对于暴洪的警戒和预报、水库的蓄放和城市水资源的管理是非常有用的遥感工具。高频雷达系统为遥感海面状况、海流和海面风等提供了丰富的资料。七十年代中期出现的晴空大气的多普勒雷达技术,已经越来越受到重视,它可以探测1~100千米高度范围内的大气波动、风、湍流运动和大气稳定层。此外,多波长和多极化雷达的出现,扩大了雷达观测的能力,并可为研究冰雹云的成长,区分水滴的相态(冰晶或水滴)和水滴的形状提供重要的资料。自1973年美国巴坦(Battan)教授的《雷达探测大气》一书(Radar observation of the atmosphere)出版以来,雷达技术在气象和水文上的应用又有了新的进展,而且有的即将投入业务使用。

编著此书的目的是通过介绍国内外的雷达工作及有关的研究成果,从雷达原理和分析应用两个方面介绍现代雷达技术在气象、水文和海洋探测中的作用,为我国从事雷达遥感工作,以及气象、水文和海洋方面有关工作的人员提供一本参考书。

本书共分九章。第一章简要地介绍了电磁波传播及其性

质、电磁波的极化、以及在传播过程中降水、云粒子和大气中折射指数的不规则起伏引起的散射；降水和云对电磁波衰减的影响。第二章天气雷达原理介绍了常规天气雷达的原理，机器组成和高频元件，气象雷达整机参数及其选择的原则。第三章介绍了气象回波信号振幅涨落的随机性质，傅里叶级数和快速傅里叶变换等信号处理问题。第四章介绍了天气雷达动态范围，雷达测量降雨的原理和方法，雷达测量降雨的精度，数字天气雷达的特征和数字雷达资料的质量控制。第五章介绍了天气多普勒雷达的探测原理及其结构，测量风暴中气流的结构、水平风场和垂直气流，水滴大小的分布和湍流运动，单部和多部多普勒雷达的应用。第六章介绍了多普勒雷达技术在晴空大气探测中的应用，详细叙述了调频连续波雷达的探测原理及其结构，低层(或边界层)大气探测，晴空湍流和在中、小尺度观测上的应用，并简要介绍调频连续波多普勒雷达的探测能力。本章还介绍甚高频和超高频多普勒雷达的探测原理和结构，在1~100千米垂直范围内探测晴空大气的风场(水平风速，垂直风速)，大气湍流和大气稳定层以及晴空回波的机制。第七章介绍了特种雷达及其应用，其中包括圆极化波雷达的原理及结构，圆极化雷达的应用(测量水滴的形状)，高分辨率、高功率、高灵敏度雷达的应用和合成孔径雷达的结构，及其在海洋探测上的应用。第八章介绍了中频和高频雷达探测海洋，并分别叙述了分米波雷达的探测原理和结构，海面回波的多普勒谱及高频雷达探测海面状况、海流和海面的风速、风向。第九章介绍了天气雷达的校正有关问题。

本书在本书编写的过程中得到了南京大学物理系，华东工程

学院四系和南京大学数学系的许多同志的帮助。华东工程学院四系系主任朱逸农教授审阅了全部书稿，提出了许多重要的修改意见，借此一并致谢。另外，南京大学气象系李宁同志，协助整理了第四章的初稿，气象系石宗祥同志担任了制图工作，物理系工程师杨永顺同志担任了全书的缮写工作，在此顺致谢意。

由于我们水平有限，书中的缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

葛文忠

蒋培杰

1983年4月

# 符 号 说 明

|                 |                  |       |            |
|-----------------|------------------|-------|------------|
| $A_r$           | 双程距离衰减           | $f$   | 频率         |
| $a$             | 粒子半径             | $G$   | 天线增益 接收机增益 |
| $a_n$           | 散射系数(磁极子)        |       |            |
| $B$             | 磁感应强度            | $H$   | 磁场强度       |
| $b_n$           | 散射系数(电极子)        | $H_r$ | 水球内部磁场     |
| $B$             | 接收机带宽            | $H_s$ | 散射波磁矢量     |
| $c$             | 光速               | $h$   | 脉冲长度       |
| $c_n$           | 折射指数结构常数         | $I$   | 电流强度       |
| $C_2$           | 衰减因子             | $I_i$ | 入射波强度      |
| $D$             | 电位移矢量            | $I_s$ | 散射波强度      |
| $D$             | 水滴直径 天线直径        | $K$   | 吸收系数       |
| $D_n(r_1, r_2)$ | 折射指数空间<br>结构函数   | $K$   | 空间波矢量      |
| dB              | 分贝               | $k$   | 衰减系数       |
| $E$             | 电场强度             | $l$   | 偶极矩        |
| $E_0$           | 电场振幅             | $M$   | 折合折射指数     |
| $e$             | 水汽压              | $m$   | 复折射指数      |
| $E_r$           | 水球内部电场强度         | $N$   | 无线电折射指数    |
| $E_s$           | 散射电场强度           | $n$   | 折射指数       |
| $E_i$           | 入射波电场矢量          | $P$   | 功率 气压      |
| $F_n(k)$        | 一维空间功率谱<br>密度    | $p_r$ | 回波功率       |
| $F$             | 脉冲重复频率; 充塞<br>系数 | $p_i$ | 发射功率       |
|                 |                  | $p_m$ | 平均功率       |
|                 |                  | $Q_a$ | 吸收截面       |
|                 |                  | $Q_s$ | 散射截面       |

$Q_i$  衰减截面

$R$  距离

$R_e$  地球半径

$\text{Re}$  复数的实部

$r$  空间位置矢量

$\Delta r_{\min}$  距离分辨力

$r_{\min}$  盲区半径

$R_i$  查理孙数

$s$  水平距离

$T$  周期 绝对温度

$t$  时间 温度

$v$  电波在解质中的传播  
速度

$W$  概率密度

# 目 录

## 第一章 高频电磁波的传播

- 第一节 电磁波的性质.....( 1 )
- 第二节 电磁波的传播.....( 8 )
- 第三节 降水、云粒子、大气不均匀结构对电磁波的散射.....( 17 )
- 第四节 电磁波的衰减.....( 33 )

## 第二章 天气雷达的原理

- 第一节 天气雷达的工作原理.....( 40 )
- 第二节 脉冲雷达的组成.....( 48 )
- 第三节 高频元件.....( 57 )
- 第四节 微波电子管.....( 71 )
- 第五节 雷达参数的选择.....( 79 )

## 第三章 信号处理

- 第一节 降水回波的起伏及其随机性质.....( 89 )
- 第二节 回波信号的平均.....( 97 )
- 第三节 傅里叶级数与傅里叶变换.....( 107 )
- 第四节 快速傅里叶变换(FFT) .....( 113 )

## 第四章 雷达的降雨测量

- 第一节 天气雷达回波的动力范围.....( 122 )
- 第二节 雷达测量降雨.....( 134 )
- 第三节 雷达降雨测量的精度.....( 144 )
- 第四节 数字天气雷达网.....( 157 )

## 第五章 天气多普勒雷达及其应用

- 第一节 天气多普勒雷达……………( 167 )
- 第二节 多普勒谱……………( 175 )
- 第三节 多普勒雷达的信号处理……………( 185 )
- 第四节 多普勒雷达在云物理研究中的应用……………( 194 )
- 第五节 风暴中气流的测定和湍流探测……………( 201 )
- 第六节 单部多普勒雷达对强风暴的探测和多部  
多普勒雷达的应用……………( 212 )

## 第六章 多普勒雷达技术在晴空大气探测中的应用

- 第一节 调频连续波雷达原理……………( 224 )
- 第二节 低层大气结构和边界层风的探测……………( 233 )
- 第三节 甚高频-超高频多普勒雷达 ……………( 249 )
- 第四节 甚高频-超高频(VHF-UHF)多普勒雷达  
探测对流层、平流层和中层大气……………( 257 )
- 第五节 对流层、平流层和中层晴空回波的散射  
和反射机制……………( 281 )

## 第七章 特种雷达及其应用

- 第一节 圆极化波雷达……………( 296 )
- 第二节 高功率雷达和晴空回波的研究……………( 303 )
- 第三节 合成孔径雷达的原理……………( 313 )

## 第八章 中频和高频雷达探测海洋

- 第一节 高频雷达系统……………( 320 )
- 第二节 海面的性质和海面回波的多普勒谱……………( 324 )
- 第三节 中频/高频电磁波的海面散射及其应  
用……………( 333 )

## **第九章 天气雷达的校准**

- 第一节 发射机输出功率和工作频率的测量……( 353 )**
- 第二节 接收机灵敏度的测量……………( 361 )**
- 第三节 利用校正球体法和功率传递法测量天线增益……………( 374 )**
- 第四节 利用太阳源方法测量天线的有效增益……………( 386 )**

# 第一章 高频电磁波的传播

## 第一节 电磁波的性质

雷达的工作过程是通过发射出去的电磁能量，在大气中传播，遇到目标物产生反射，反射的电磁能量到达接收机后为雷达接收。在考虑上述过程之前，先简要地叙述电磁波在自由空间的性质。

### 1. 电场和电场强度

任何带电体的周围都存在着电场。当带电体上的电荷静止不动时，电场也静止不变，这时的电场叫做静电场。当电荷运动时，电场也就发生变化。在电场中任一点，单位正电荷所受到电场力的大小和方向叫做该点的电场强度  $E$ 。电场强度是一个矢量，它是一个有数值大小和方向性的量。

电场内，各点电场强度的大小和方向可以用电力线描述，线上任何一点处的切线方向代表这一点的电场强度的方向。每根电力线都从正电荷出发到负电荷终止（见图 1.1.1）。电场中任一点处的电场强度在数值上等于该点处的电力线密度，即穿过垂直于电力线方向单位横截面的电力线数。

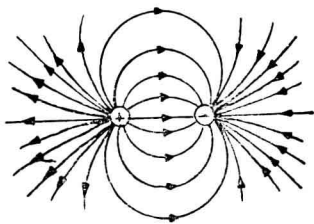


图 1.1.1 两个正负电荷的电场

电场强度与电荷所在的介质的介电常数  $\epsilon$  有关。如果引入一个新的向量  $D$  来描述电介质内部的电场,这个向量叫做电位移向量。 $D$  的力线在电介质内是连续的,而且能够连续地通过电介质的介面。它和电介质内部电场强度的关系有  $D = \epsilon E$ 。电位移量和  $E$  的方向一致,它的大小等于  $\epsilon$  乘  $E$ 。

电场强度的大小等于电位梯度,它的方向指向电位降落的方向。

## 2. 磁场和磁场强度

和电场类似,任何磁体的周围都存在着磁场。单位磁北极在磁场中受到的磁场力叫做磁场强度  $H$ 。 $H$  也是一个矢量。同样我们可以用磁力线表示磁场中磁场强度的分布情况。但是电的现象和磁的现象并不是孤立的,一个运动的电荷(或电流)在其周围存在着磁场。一个通有电流的直导线,其磁力线的分布是以导线为中心的同心圆。磁力线的方向可以用小磁针北极指出的方向来检验。如果沿电流前进的方向看去,电流周围的磁力线都沿着顺时针方向(见图 1.1.2)排列。

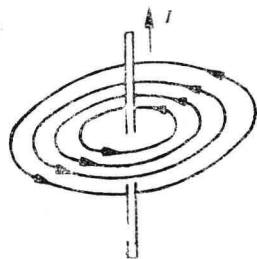


图 1.1.2 直线电流磁场的磁力线

带电流导体在磁场中要受到磁场的作用力。它与通过导体的电流强度  $I$  和磁感强度  $B$  之间的乘积成正比。 $B$  和产生磁场的电流的大小、位置有关,也和介质的性质有关。磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  之间的关系为  $B = \mu H$ 。 $B$  的方向和  $H$  的方向相同,  $\mu$  为介质的导磁系数。

### 3. 电磁波辐射

电场  $E$  和磁场  $H$  随时间而变化的定量关系可用麦克斯韦(Maxwell)方程组来表示。读者可参阅有关电磁学理论的书籍，这里我们只给出一些结论性的描述。运动的电荷产生磁场，任何电场的变化都要使它周围的空间产生变化的磁场，反过来任何磁场的改变也要在它周围的空间产生变化的电场。电场变化愈快，它所产生的磁场愈强，场内所包含的能量也愈多。

假设在均匀的介质中有一导体，导体中电流强度和电压随时间作周期性变化，它构成一振荡电偶极子，导体的周围就产生变化的磁场。而这个变化的磁场在它的周围又产生变化的电场；依次下去，这种变化的电场又产生另一个变化的磁场，电场和磁场不断地交替变化，使得周期性变化的振荡电流的影响越来越远地向周围空间传播。这种电或磁的扰动以一定的速度向外传播，对于所有的电磁辐射，都以相同的速度  $3 \times 10^8$  米/秒向自由空间传播。实际上这种传播是电磁能量向外传播，为了要在导体中维持振荡电流和使能量向外传播，必须有能量馈入振荡源。

电磁场在空间的传播形成了电磁波，在传播过程中电场强度和磁场强度的方向始终是相互垂直的，它们都垂直于电磁波的前进方向，因此电磁波是一种横

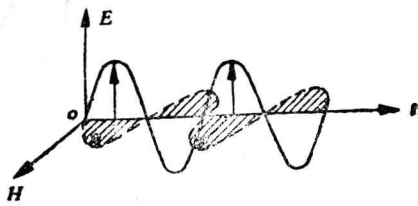


图 1.1.3 电磁波的传播示意图

波。图 1.1.3 为电磁波的传播示意图。

在电流或电压的一个振荡周期内，电磁波传播的距离叫做波长  $\lambda$ 。波长和电磁波的频率  $f$  的乘积等于电磁波的传播速度  $c$ ，即： $\lambda \cdot f = c$  或  $\lambda = \frac{c}{f}$ 。对于气象雷达来说，其工作波长主要在微波波段，即波长从一厘米到一米，对应的频率范围为 30,000—300 兆赫。常规气象雷达的波长为 3 厘米，5 厘米和 10 厘米。其相应的频率为每秒  $10^4$  兆赫， $6 \times 10^8$  兆赫和  $3 \times 10^8$  兆赫。

假设振荡源的振荡是正弦型的，那么在空间任何一个给定点上电场和磁场随时间的变化也是正弦型的，并且和振荡源有相同的频率。当电磁辐射在介质中传播时，电磁波的频率和振荡源的频率是一致的，但是它的传播速度和波长要比真空中的数值小。

在点辐射源的情况下，场分布如图 1.1.4(a) 表示射线

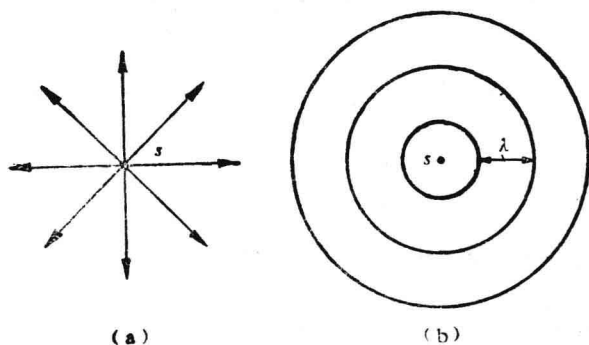


图 1.1.4 从点源发出的球面波

(a) 射线图 (b) 球面波

图，图上箭头表示射线，即能量传播的方向。图 1.1.4(b) 表示波前，它是一个球面，面上各点波的位相是相同的。每一个球面波前都有一个固定的位相值。图中两个波前之间相隔一个波长的距离。因此，等相位面为球面的波，称为球面波。随着波的向外传播，从点源辐射出来的能量就向越来越大的球面上的扩展。

和球面波的定义方法相似，可定义平面波，即等相位面为平面的波称为平面波。图 1.1.5 表示平面波的波前，射线和波前垂直而且互相平行。可以看出：对于球面波，单位面积上的功率随着传播距离的增加而减小；而对于平面波，则单位面积上的功率并不随传播距离的变化而变化。对于一个球面波来说，只有当它离开源的距离很远很远时，才可以在球面波上的很小一部分面积上近似地看作为平面波，因为这时波前的曲率是很小的。

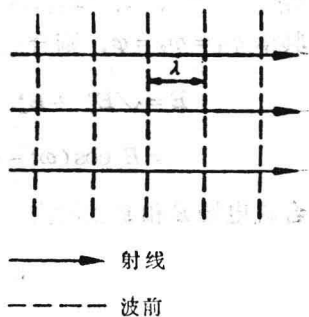


图 1.1.5 平面波

#### 4. 电磁波的极化

在气象探测中，有时需要了解电磁波在空间的取向。电磁波是横波，因此在任意一点上电场和磁场的矢量位于和传播方向相垂直的平面上。一般磁矢量是垂直于电矢量的，只要考虑电矢量的方向就足以说明波的取向。

在雷达天线端接收到的电场强度  $E$  可以表示为：

$$E = E_0 \cos(\omega t - \varphi) = \text{Re} E_0 e^{-j(\omega t - \varphi)} \quad (1.1.1)$$

式中  $E_0$  为振幅,  $\omega t - \varphi$  为  $t$  时刻的位相,  $\omega$  为雷达波的角频率,  $\varphi$  为波的初位相。Re 表示取复数的实数部分。电矢量  $E$  一般可以分解为  $E_y$  和  $E_z$  的分量, 而它们的位相和振幅不一定相同(见图 1.1.6)。

(1) 线极化波 在和传播方向垂直的平面上可以有无数方向, 假如波的电场矢量只限于一个方向, 这个波叫做平面极化波。波的极化取决于电场的方向, 由电场矢量和传播方向组成的平面叫做极化面。

假设电场  $E$  的水平分量  $E_y$  和垂直分量  $E_z$  的位相相同(或相差  $\pi$ ),  $E_y = E_{y0} \cos(\omega t - \varphi_1)$ ;  $E_z = E_{z0} \cos(\omega t - \varphi_2)$ 。其中  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ , 则合成电场为

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{E_{y0}^2 + E_{z0}^2} \cos(\omega t - \varphi) \\ &= E_0 \cos(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

合成电场  $E$  和  $y$  轴的夹角为  $\beta$ , 则有:

$$\tan \beta = \frac{E_z}{E_y} = \frac{E_{z0}}{E_{y0}} \quad (1.1.3)$$

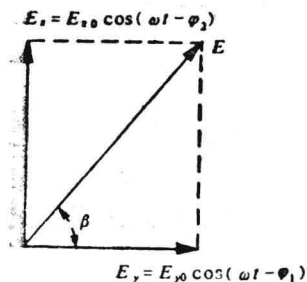


图 1.1.6 电场的水平和垂直分量

合成电场的大小随时间变化, 但是合成电场的方向不变。

图 1.1.7 (a) 是垂直极化波  $E_z$  沿传播方向在某一瞬间不同位置的电场强度矢量, 曲线为各点电矢量端点的包络。图 1.1.7 (b) 是水平极化波  $E_y$ 。在雷达工程中常把电场  $E$  垂直于地面的波叫做垂直极化波, 电场  $E$  平行于地面