

# 航空电子设备

王世锦 编

下 册



南京航空航天大学

V243/1028-B



李斌

V243  
1028-B1

下册 航空无线电部分

第七章 无线电基础知识.....212

第一节 无线电波.....212

第二节 调幅发射设备基础.....226

第三节 调幅接收原理.....228

第四节 传输线的基础知识.....236

第八章 通信系统.....245

第一节 通信系统的用途与分类.....245

第二节 甚高频通信系统.....246

第三节 高频通信系统.....250

第四节 选呼系统.....253

第五节 内话系统.....257

第六节 客舱广播系统.....260

第七节 话音记录器.....264

第八节 应急电台.....266

第九节 飞行数据记录器.....266

第九章 无线电导航的理论基础.....271

第十章 自动定向机.....283

第一节 组成与功用.....283

第二节 定向原理.....289

第三节 系统的干扰和误差.....295

第十一章 甚高频全向信标系统.....301

第一节 VOR 系统工作原理.....301

第二节 VOR 地面台发射信号.....305

第三节 VOR 机载设备.....312

第十二章 测距机.....318

第一节 测距机系统.....318

5/8

2110

10:00 -

12:00



第二节 基本工作原理.....	331
第十三章 无线电高度表.....	343
第一节 概述.....	343
第二节 测高原理.....	352
第十四章 雷达的一般原理.....	357
第一节 雷达的类型.....	357
第二节 雷达探测目标的原理.....	358
第三节 雷达的基本组成.....	359
第四节 雷达显示器.....	361
第五节 雷达在飞机上的应用.....	364
第十五章 气象雷达.....	366
第一节 气象雷达的基本功用及工作原理.....	366
第二节 雷达的基本组成.....	371
第三节 雷达检测目标的物理基础.....	374
第四节 气象雷达的基本工作原理.....	382
第五节 雷达信号及其基本参数.....	384
第六节 气象雷达的工作方式.....	387
第七节 雷达的天线运动.....	389
第八节 湍流与风切变检测雷达.....	395
第十六章 多普勒雷达.....	404
第十七章 空管二次雷达.....	413
第一节 A、C 模式二次雷达.....	413
第二节 S 模式二次雷达.....	431
第十八章 空中交通警戒与防撞系统.....	436
第十九章 近地告警系统.....	442
第一节 系统组成及功能.....	442
第二节 系统工作原理.....	444
第三节 系统报警方式及使用测试.....	446
第二十章 仪表着陆系统.....	456

第一节 概述.....	456
第二节 航向信标系统.....	462
第三节 下滑信标系统.....	467
第四节 指点信标系统.....	469
第五节 ILS 进近着陆时的使用.....	472
第二十一章 微波着陆系统.....	474
第二十二章 飞行管理系统.....	493

机载设备主要包括机械、电气、电子三部分，其中电子设备又分为无线电与仪表。飞机无线电系统是现代飞机的重要组成部分。现代民用飞机都装备有多种先进的无线电通信、导航和雷达系统。有时也将飞机无线电系统分为通讯系统和导航系统两大类。

通讯系统主要是用以实现与地面之间、飞机与飞机之间的相互通讯，也用以进行机内通话、广播、记录驾驶舱内的语言以及向旅客提供视听娱乐信号。无线电导航系统的基本功能是引导飞机按选定航路安全、经济地完成规定的飞行任务。仪表设备也可以提供相应的导航参量，但两者之间的工作原理不同。如仪表设备中的大气数据仪表，是通过测量飞机与大气之间的作用力及飞机所在位置的大气参数，再根据大气参数与飞机飞行参数的特定关系进行换算，才能在相应的仪表上指示出所需的飞行参量。而无线电导航则是利用无线电波的发射与接收，将电参量转换为相应的导航参量，所以无线电系统的最大特点是依赖于无线电波的传播进行工作的。无线电波的传播特性很大程度上影响无线电系统的工作质量，因而在学习飞机通信导航设备之前有必要了解无线电波的传播规律，影响其传播的主要因素以及不同波段无线电波的传播特点。

## 第一节 无线电波

各种无线电系统都是利用无线电信号来传送信息，或者利用无线电信号来获取一定的信息的。而在无线电系统中所说的信号，是指代表一定信息的电信号。

下面来了解信号的各个方面。

### 一、信号的形式

#### 1. 规则信号与不规则信号

如果信号随时间按照一定规律变化，能够用一个确定的时间函数来表示，则这类信号属于规则信号。反之，若信号不随时间作有规律的变化，而是杂乱的、具有随机的性质，因而不能用一个确定的时间函数来表示，则属于不规则信号。

各类导航信号，雷达信号等都是规则信号；语音信号、电报信号等是不规则信号。

#### 2. 周期信号与非周期信号

周期信号是按一定时间间隔，作不断重复变化的规则信号；非周期信号则不随时间作重复有规律的变化。

#### 3. 模拟信号与数字信号

按常见信号的形式，通常把信号分为模拟信号与数字信号两类。

所谓模拟信号,是指模拟物理量(例如语音信号)的电压或电流的电参量在一定范围内是平滑地、连续地变化的,可以取这一范围内的任意值。

所谓数字信号,是指信号是离散的、不连续的,信号只能按有限多个阶梯或增量变化取值。例如,用不同电平表示的二进制信息,只能有高电平(代表信息“1”)和低电平(代表信息“0”)两个量化状态;具体的信息内容是用这两个状态的一定形式的编码来表示的。

对于模拟信号,我们所关心的是信号的波形和具体取值,在信号变换过程中所注意的是信号参数(幅度、频率、相位)的具体变化情况。对于数字信号则不同,我们一般只关心信息的有无(是状态1还是状态0),只注意信息编码组合的变换情况,而不注意信息1,0的具体波形和取值。

这两种信号形式是可以互相转化的。同一信息,既可以表现为模拟的形式,也可以转化为数字形式。

传统的无线电系统所处理的一般是模拟形式的电量;现代机载电子系统则越来越多地以数字形式来处理信息,以获得更为优越的性能。

#### 4. 脉冲信号

脉冲信号是指在短暂时间间隔内作用于电路的信号,这个时间间隔是可以与电路的过流过程相比拟的。就广义来说,凡按非正弦规律变化的信号都可以称之为脉冲信号。图7—1是几种常见的周期性脉冲波形。

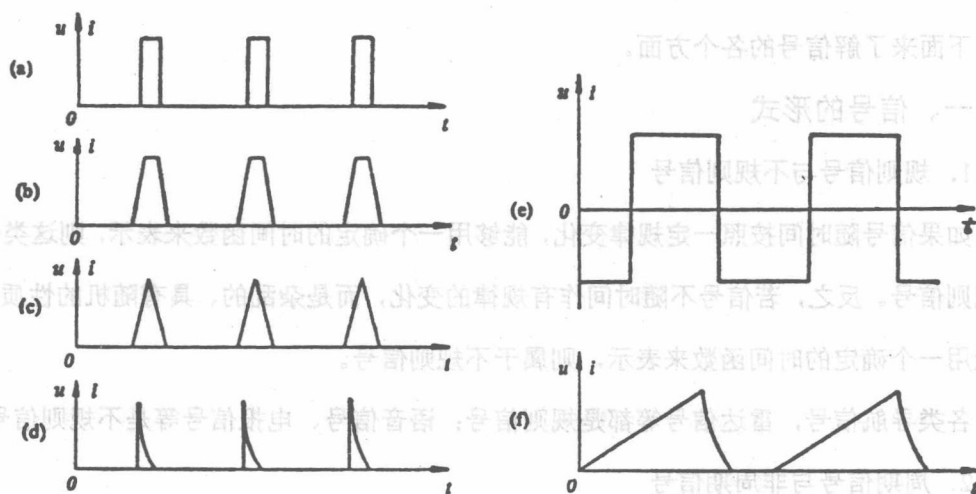


图7—1 几种常见的脉冲波形

(a) 矩形脉冲 (b) 梯形脉冲 (c) 三角形脉冲 (d) 尖脉冲 (e) 方波 (f) 锯齿波

虽然数字信号只有高电平和低电平(有电流和无电流)两个状态,也是工作于脉冲状态的,但我们对于脉冲信号,往往是按模拟信号来对待的。这是因为,对于脉冲信号来说,我们除了注意脉冲的有无外,更多地还是注意脉冲的波形。如何利用各种脉冲电路来产生、放

大、变换脉冲的波形，是在分析脉冲电路时所研究的主要问题

## 5. 低频信号与高频载波

包含各种信息的无线电信号，其频率往往较低，通常属于音频和低频的范围。低频信号是很难有效地通过天线辐射到空中去的。为了达到利用无线电波来传送信息的目的，必须将这类低频信号寄载在高频振荡上，以通过天线有效地转化为空间的无线电波。为此，需使高频振荡的某一个参数按照低频信号的规律变化，这一过程称为调制。

为了区别于低频信号，我们将用于寄载信号的高频振荡称为载波。载波是不包含具体的信息内容的；将已调制的载波信号称为高频信号，或射频信号。

在很多无线电系统中，为了放大、变换信号的需要，往往还会设置一个或两个低于射频频率的中间频率——中频。所谓高频、中频和低频的概念，是就一个系统中的信号变换过程相对而言的，很难划分绝对的数值界限。某个系统中的中频信号频率，是完全可能高于其它系统的高频频率的。

## 二、无线电波

在空间传播的交变电磁场，称为电磁波。通常频率在 300 000MHz 以下的电磁波称为无线电波，简称电波。本节说明电波的基本性质及传播规律。

### (一) 无线电波的传播

#### 1. 电磁波的形成与传播

当把射频信号施加到天线输入端时，天线便能有效地把射频信号所包含的电磁能量辐射到空中去，在天线附近的空间中形成电磁波。这就是说，射频电源（发射机）所产生的射频能量通过天线转化成了空间电磁波。

随后，天线附近空间中的电磁能量将会按照一定的规律扩散，不断地向远方传播。参见图 7—2。天线在空间 A 点所形成的交变电场 E，将会在 B 点产生交变磁场，而 A 点的交变磁场 H 将会在 B 点产生交变电场，这样，A 点的交变电磁场便推进到 B 点。到达 B 点的交变电场和交变磁场，又会在距天线略远的 C 点处产生交变磁场和交变电场。如此继续，电磁能量就不断地向前传播。

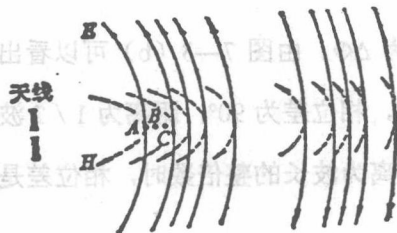


图 7—2 无线电波的传播

## 2. 电波的分布

空间的电磁波是由天线上的射频信号形成的，其变化规律决定于射频信号的变化规律，当天线射频电流按正弦规律变化时，空间各点的电场强度和磁场强度随之按正弦规律变化，并且在传播方向上也是按正弦规律分布的。图 7—3 (a) 为某一瞬间电磁场的分布情形。需要注意的是，空间任意点处的电场向量（实线箭头）与磁场向量（虚线箭头）始终是互相垂直的，并且二者又都与传播方向相垂直。

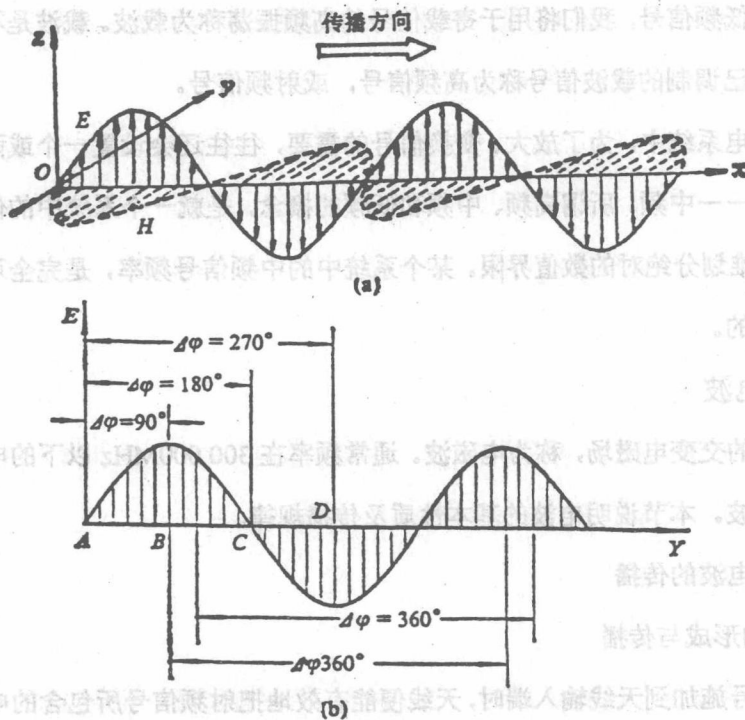


图 7—3 空中电磁场的瞬间分布与电波的相位

(a) 无线电波的电场强度和磁场强度在某一瞬间的分布情况 (b) 无线电波的相位

## 3. 电波的相位

在电波传播的途径上，一个波长的范围内同一时刻的电场强度是不相同的。某点场强的强弱、方向和变化趋势的瞬时状态，叫电波的相位。习惯上用角度来表示电波的相位，称为电波的相角（相位角），常用字母  $\Phi$  表示，如图 7—3 (b) 所示。图中 A 点的场强为零，相位是  $0^\circ$ ；B 点的场强为正的最大值，相位是  $90^\circ$ ；C 点的场强又回到零，相位是  $180^\circ$ ；D 点的场强为负的最大值，相位是  $270^\circ$ 。

两点间的相位之差，叫相位差，记为  $\Delta\Phi$ 。由图 7—3 (b) 可以看出，在同一电波传播途径上，两点之间的距离为  $1/4$  波长时，相位差为  $90^\circ$ ；距离为  $1/2$  波长时，相位之差为  $180^\circ$ ；距离为  $3/4$  波长时为  $270^\circ$ ；当距离为波长的整倍数时，相位差是  $360^\circ$  的整数倍，即

$$\Delta\phi = \frac{d}{\lambda} \cdot 360^\circ$$



式中  $d$  为传播途径上两点间的距离差,  $\lambda$  为波长。显然, 只要两点间的距离不变, 任意时刻该两点间的相位差是不变的。

#### 4. 电波的传播方向

由上可知, 空间电磁波的电场向量  $E$ 、磁场向量  $H$  和电波传播方向是互相垂直的, 这种电波称为横电磁波。横电磁波的传播方向可以形象地用右手螺旋定则来确定: 伸开右手四指与电场向量方向一致, 再使四指弯向磁场向量方向 (沿  $90^\circ$  度角), 则姆指方向就是电波传播的方向, 如图 7—4 所示。可见, 当电场和磁场向量中的一个改变方向时, 传播方向就反向; 而当电场和磁场同时反向时, 电波传播的方向并不改变。

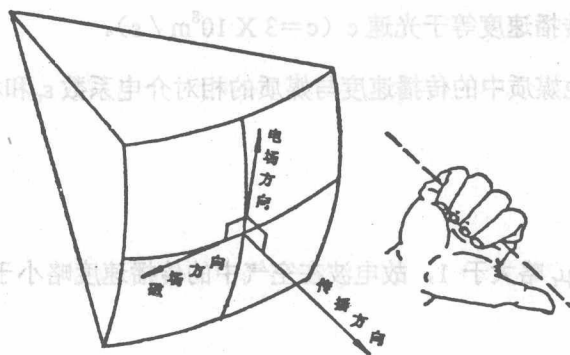


图 7—4 右手螺旋定则

#### 5. 球面波与平面波

电波中相位相同的各点组成的面, 称为波阵面。波阵面实际上是距波源 (天线) 距离相同的各点所组成的面。显然, 当可以把天线看成是一个点波源时, 电波的波阵面是一个球面, 这样的电波就称为球面波, 如图 7—5 所示。我们可以把它看成是一个在  $O$  点处的无方向性天线所产生的球面波。

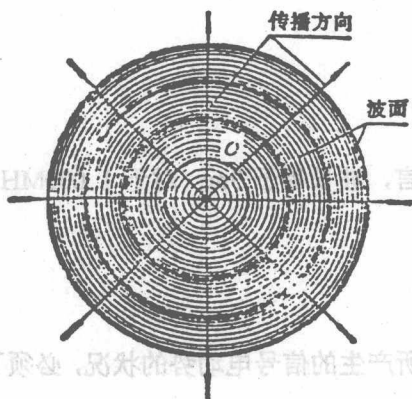


图 7—5 球面波

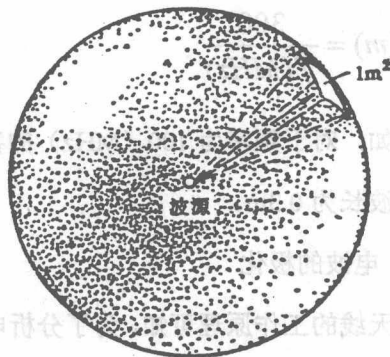


图 7—6 能流密度

实际上, 在距天线遥远的地方, 天线所接收到的只是球面波的一个极小部分。此时的波

阵面，可以看成是一个平面。波阵面为平面的电波，称为平面波。

## 6. 电波的能量密度

为了衡量接收天线处信号电磁波的强度，可以引用能流密度的概念。能流密度是指在与电波传播方向相垂直的单位面积上，单位时间内所通过的电磁能量。设理想无方向性波源的辐射功率为  $P$ ，则距波源  $r$  处的能流密度  $S$  就是  $P$  与半径为  $r$  的球面积的比值：

$$S = \frac{P}{4\pi r^2}$$

见图 3—6。上式表明，距波源  $r$  处的信号能量是与距离的平方成反比的。

## 7. 电波的传播速度

电波在真空中的传播速度等于光速  $c$  ( $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ )。

电波在空气或其他媒质中的传播速度与媒质的相对介电系数  $\epsilon_r$  和相对导磁系数  $\mu_r$  有关：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

对空气而言， $\epsilon_r$ ， $\mu_r$  略大于 1，故电波在空气中的传播速度略小于光速，但通常可认为是等于光速  $c$  的。

## 8. 电波的频率与波长

电波的频率等于发射信号的频率  $f_0$ 。

在信号一个周期内电波前进的距离称为波长。波长  $\lambda$  等于传播速度  $v$  与周期  $T$  的乘积，即

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

若频率以兆赫为单位，则以米为单位的波长为

$$\lambda(\text{m}) = \frac{300}{f(\text{MHz})}$$

例如，对于频率为 100 (MHz) 的甚高频频率而言，波长等于 3m；对于 1 000MHz 的信号，波长为 0.3m。

## 9. 电波的极化

由天线的工作原理可知，为了分析电波在天线上所产生的信号电动势的状况，必须了解电波的电场（及磁场）的方向及其变化规律。

电波在空间传播时，其电场向量是按照一定的规律变化的，这就是电波的极化。电波的

电场方向称为它的极化方向。

### (1) 线性极化与圆极化波

如果空间某点电波电场向量终端随时间变化的轨迹为一条直线,则这种电波称为线极化波;如果电场向量终端的轨迹为一个圆,则称为圆极化波。此外,电场终端向量的轨迹还可能为椭圆——这样的电波为椭圆极化波。

### (2) 水平极化与垂直极化

如线极化波的电场是与地面垂直的,就称为垂直极化波;如与地面平行,就称为水平极化波。

显然,与地面垂直的天线所产生的的是垂直极化波;要有效地接收垂直极化波,接收天线也应当是垂直安置的。

## (二) 无线电波传播的基本规律

人们对于自然界中可见光的传播规律是比较熟悉的。尽管无线电波的波长比光波长,但它们都是电磁波,因而具有许多相同的传播规律。

### 1. 理想条件下无线电波的传播

所谓理想条件,就是把大气看作均匀媒质。电波在均匀媒质中传播时,其介电系数  $\epsilon$  和导磁系数  $\mu$  为:

$$\epsilon = \epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12} \text{ 法/米}$$

$$\mu = \mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ 亨/米}$$

其中:  $\epsilon_0$ 、 $\mu_0$  为真空中导磁系数和介电系数,将  $\epsilon$ 、 $\mu$  代入上式可得到电波在理想条件下的传播速度  $V = 3 \times 10^8$  米/秒,这一数值恰好与光波的传播速度一样。可见电波在理想条件下传播,其速度是恒定的,传播方向不会发生任何变化。甚高频通讯信号、甚高频导航信号、测距信号、空中交通管制应答信号等,都可以认为是沿直线在收发天线之间传播的。

### 2. 实际条件下无线电波的传播

在实际条件下,大气的介电系数和导磁系数是不相同的,因此电波的传播速度要发生变化。对于任意介质中的电磁波传播速度可用下式表示:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

式中:  $C$  为光速,等于  $3 \times 10^8$  米/秒;  $\epsilon_r$  是相对介电系数,即某介质的介电系数与  $\epsilon_0$  的比值;  $\mu_r$  是相对导磁系数,即某介质的导磁系数与  $\mu_0$  的比值。

当无线电波通过不均匀的媒质时,不仅电波的传播速度会发生变化,而且电波的传播方

向也会发生变化，产生反射、折射、绕射及散射现象，以下利用与光的传播相对比的方法，分别说明这几种电波方向变化现象的规律及原因。

### (1) 反射

光线遇到镜面会被反射。电波经过不同媒质的交界面时，也会产生反射现象。尤其是当电波遇到相对导电系数  $\epsilon_r$  很大的金属或其他导体时，电波的能量几乎全部被分界面所反射。

当反射面是平面且远大于电波波长时，电波的反射遵循光的反射规律——反射线与入射线及反射点处的法线处于同一平面内，且反射角等于入射角。

### (2) 折射

观察一根插入玻璃杯中的筷子，可以发现筷子在水中“变弯了”，这是由于光线由空气进入水中时产生折射而造成的现象。电波由一种媒质进入另一种媒质时，除了在交界面上产生反射以外，通常也会产生折射现象，如图 7—7 (a) 所示。

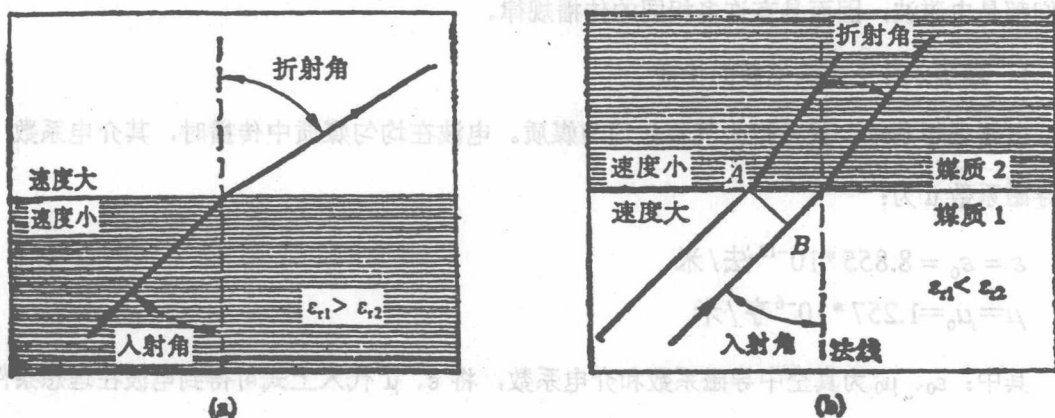


图 7—7 电波的折射

(a)  $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$  时的情形

(b)  $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$  时的情形

产生折射的原因是由于在两种介电系数不等的媒质中，电波的传播速度不同，经过交界面后波阵面发生偏转，从而改变了传播方向。这就如同当行进中的纵队一侧的人放慢速度时，队伍会向该侧偏转一样。

如图 7—7 (b) 所示，设电波由相对介电系数较小的媒质进入介电系数较大的媒质，当波阵面 AB 左侧先经过交界面进入媒质 2 时，左侧的速度减小而右侧仍在媒质 1 中速度不变，于是整个波阵面向速度较慢的左侧偏转，当整个波阵面都进入媒质 2 时，左右两侧的速度相等，传播方向不再改变。

从以上分析可知，电波通过两种媒质交界面时，其折射方向总是向着相对介电系数  $\epsilon_r$  较大的媒质的法线方向偏折的。短波在进入大气层中的电离层时，就会发生这种折射现象。

### (3) 绕射

任何波通过障碍物时,都可能发生绕射现象。电波遇到某些障碍物时,同样能绕过障碍物继续向前传播,这种现象称为绕射。由于电波具有绕射特性,所以能够沿着起伏不平的地球表面传播,如图 7—8 所示。

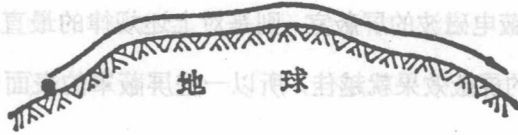


图 7—8 电波绕过起伏的地面

电波的绕射能力与波长有关。波长越长,绕射能力越强。

### (4) 散射

观众可以看到放映机发出的光束,这是由于空气中的微尘引起光波散射的结果。电波在大气中的传播,有时也会产生散射。大气中的其他物质微粒(如水滴、尘土或其他物体)及不均匀的气团均可在电波的作用下激起电流,成为新的波源。散射就是这些新波源向各个方向辐射的结果。

一般讲,甚高频电波的散射现象比较显著。

### (三) 电波传播过程中能量的变化

电波在传播过程中,由于扩散及媒质吸收两方面的原因,会使电波的能量逐渐减小。

如前所述,即使在真空中传播时,由于电波的扩散,波源形成的球面波的能量也是与距离的平方成反比地减小的。

实际上电波总是在一定的媒质中传播的。在电波的作用下媒质中的带电微粒随电场交变而往复运动,同其它微粒相互碰撞而发热,吸收电波的能量。

一般说来,媒质的导电性能越好,电波的频率越高,媒质对电波能量的吸收就越多,电波能量衰减越快。

### (四) 导体与电波传播

电波只能在绝缘体中传播而不能穿过导体。电波是不能在导体中存在的,这是因为如果导体内部存在电场,会立即引起极大的感应电流而形成与原电场方向相反、大小相等的反电场,从而使合成电场为零——即导体内部不可能存在交变电场。同理,如果导体内部存在磁场,也会引起涡流而产生与原磁场大小相等、方向相反的反磁场,从而使合成磁场为零——即导体内部不可能存在交变磁场。因而电波射向导体时全部被反射,这就是在分析波导原理时所说明的边界条件。

从一些维修技术资料中可以看到，对用于刷涂(或喷涂)雷达罩(机鼻罩)或其他天线密封盖及天线本身的油漆种类有着严格的规定。其主要依据之一就是不同类型的油漆对电磁波的传播有不同的影响。不遵守这些规定，也是会影响整个系统的性能的。例如，如果误用具有一定导电性的金属磁漆涂刷雷达天线罩，则就会严重衰减雷达信号而降低雷达的作用距离。至于用金属或金属网来制成屏蔽电磁波的屏蔽室，则是对上述规律的最直接的应用。不难理解，金属导电性越好，对电波的屏蔽效果就越佳，所以一些屏蔽罩的表面也是镀银的，并且屏蔽导体必须良好接地。

### 三、电波的传播方式与各波段电波的传播特点

不同频率的无线电波在大气中传播时，由于本身的传播规律及地面和大气层的不同影响，形成了不同的传播方式。不同波段的电波的传播具有不同的特点。

#### (一) 传播方式

电波由发射天线向空中辐射，遇到电离层后反射到接收点，这种传播方式称为天波传播，如图 7—9 (a) 所示。短波主要利用天波传播。

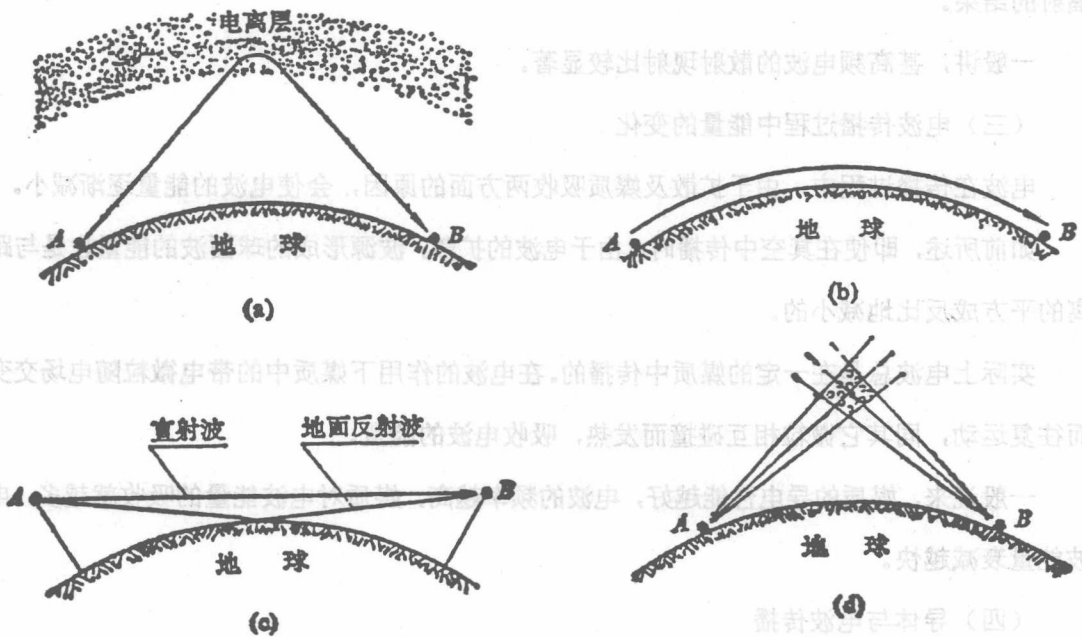


图 7—9 无线电波的传播方式

(a) 天波 (b) 表面波 (c) 空间波 (d) 散射波

#### 2. 地波

电波沿地球表面传播到接收点，称为地波，或称表面波，见图 3—9(b)用地波传播。中波主要利用地波传播。

#### 3. 空间波

空间波包括直达波和地面反射波。电波沿视线直接传播到接收点，称为直达波；经地面

反射后到达接收点的电波，叫地面反射波，见图 3—9(c)。

超短波是利用空间波来传播的。利用空间波的传播称为视距传播。

#### 4. 散射波

电波利用电离层或对流层的不均匀性而散射传播到接收点，称为散射传播。

### (二) 各波段电波的传播特点

#### 1. 超长波和长波的传播特点

超长波和长波的绕射能力很强，地面的吸收很小，所以地波传播距离远；同时长波和超长波可以有效地被电离层反射，电离层的吸收也很小。利用电离层和地面对电波的多次反射，可使电波传播到很远的地方。因此超长波和长波的传播方式以表面波和天波为主。

超长波和长波的传播特点是传播稳定，传播距离远。由于波段很窄，故不能容纳大量的电台。这两个波段的天波干扰最大，由于超长波还可深入水下一定的距离，所以可供潜艇导航使用。

奥光伽导航系统就是利用超长波(甚低频)信号传播距离远这一特点来实现全球导航的。

#### 2. 中波的传播特点

地面对中波的吸收比长波大，所以中波的地波比长波的传播距离近。

白天，中波能穿透 D 层，并深入到 E 层后才被反射，吸收较大，因此白天中波不能用来有效地传播信号。夜间 D 层消失，E 层电子密度也减小，电离层对天波的吸收大为减小，因此夜间中波的天波可以比地波传播得更远。

中波的传播方式，以地波为主。中波的地波，与超长波一样，也具有稳定可靠的特点。无线电罗盘工作于中波波段。

#### 3. 短波的传播特点

短波传播以天波为主。电离层对短波的吸收比对中波、长波的吸收都小，因此短波可利用天波传播很远的距离；而地面对短波的吸收比对中、长波大，故地波传播距离近。

短波利用电离层的反射来传播，受电离层变化的影响特别明显，因而导致传播的不稳定，产生衰落现象。所谓衰落现象，是指所接收的信号强度时起时落的不规则现象。

由于电波可能是经两个或两个以上的途径到达接收点的，而反射这些电波的电离层本身经常变化，所以两路电波的相对相位变化不定，造成了合成电波的时强时弱，见图 7—10。

短波的传播有时会出现静区，如图 7—11 所示。发射点 A 发出的地波传播距离近，只能到达图 7—11 中的 B 点，而由 A 点发出的天波，又只能到达比 C 点更远的地区，这样在地波到达不了天波又越过了的区域 BC 就收不到信号，形成了静区。

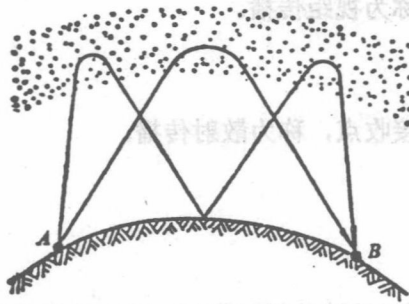


图 7—10 衰落的形式

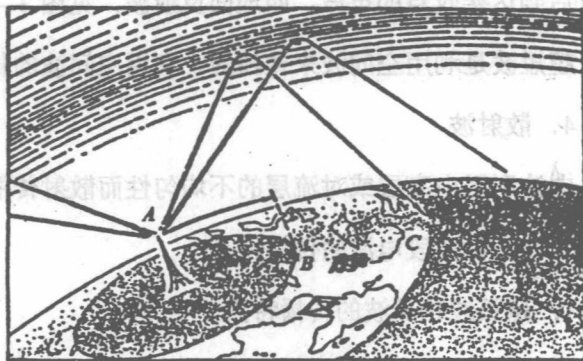


图 7—11 静区的形成

天波虽然具有不够稳定的特点，但使用中小功率的电台便可利用天波传播较远的距离，所以在航空通讯方面获得了广泛的应用。

#### 4. 超短波的传播特点

超短波的频率很高，因而其地波衰减很快，它的天波又一般都会穿过电离层而不能被折射回地面，所以超短波的天波与地波都不能有效地传播，只能以空间波方式传播，如图 7—12 (a) 所示。

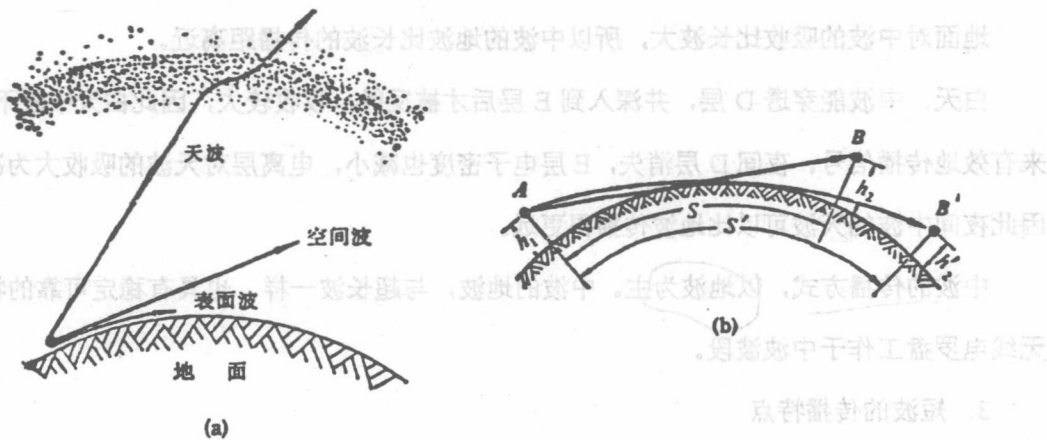


图 7—12 超短波的传播

(a) 超短波的传播方式

(b) 超短波的传播距离

超短波的有效传播距离一般限于视线范围，如图 7—12 (b) 中的 AB 所示。但由于对流层对超短波的折射作用，使得实际的传播距离略大于视线距离，如图 7—12 (b) 中的 AB' 所示。

超短波受天电干扰较小；直线传播方式的保密性也较好。甚高频通讯与甚高频导航系统的信号就是以直达波的方式在地面设备与机载设备之间传播的。

### 四、地面与大气层对电波传播的影响

#### (一) 地面对电波传播的影响



当电波沿地面传播时，地面在电波电磁场的作用下会产生感应电流。由于地面是不良导体，所以感应电流的流动会使电波损耗一部分能量，即地面吸收了电波的部分能量。

地面的导电系数越小，地面损耗越大；另一方面，电波频率越高，损耗也越大。因此，若利用地面来传播电波，则电波的频率应尽量低。海水的导电系数比陆地大，所以电波沿海面可以传播较远的距离。

## （二）大气层对电波传播的影响

通常将地球周围的大气层分为对流层、同温层、电离层三层。最低层（10—12km 以下）为对流层；60km 以上为电离层；两者之间为同温层。电离层对电波传播的影响最为明显。以下说明电离层的变化规律及其对电波传播的影响。

### 1. 电离层的形成

电离层是大气外层中的气体分子在阳光中的紫外线照射下，电离成自由电子和正离子而形成的电离化的大气层。由于电离层中含有较多的电子和正离子，所以具有一定的导电性，对电波传播会产生较为明显的影响。

由于不同高度上大气的成分不同，受阳光照射的程度不同，所以电离层中的电子密度是不均匀的，且随季节、时间而变化。实际测量证明，夏季白天电离层中有四个电子密度最大的区域，分别称为 D 层、E 层、F<sub>1</sub> 层和 F<sub>2</sub> 层，如图 7—13 所示。

### 2. 电离层的变化规律

电离层随季节而变化。夏季的太阳直射到地面上，紫外线较强，因此 E 层的电子密度在夏季最大，冬季最小。但 F<sub>2</sub> 层的密度在夏季中午反而比冬季中午的小。

一天中，白天的电子密度比晚上的大。这是因为气体的电离是在白天阳光照射下发生的，夜间电子与正离子会部分地复合，所以电子密度下这种情况如图 7—15 所示。由图可见，D 层和 F<sub>1</sub> 层入夜后很快消失；E 层电子密度在中午阳光最强时最大，在夜间减弱并几乎保持不变；F<sub>2</sub> 层的电子密度在下午达到最大值，黎明前最小。

电离层的电子密度还与纬度有关。纬度越高的地方，阳光越弱，电子密度就越小。

此外，不同年份电离层的电子密度也有所不同，这是与太阳的活动性有关的。变化的周期为 11 年左右。

### 3. 电离层对电波的折射作用

由上可知，电离层的电子密度是不均匀的；不仅各层的电子密度不同，就是一层中也是中间大两边小的。因此，电波进入电离层后，就会产生折射，连续折射的结果，可能使电波返回地面，也可使电波穿透电离层而进入外层空间，如图 7—16 所示。