



新视野民航飞行技术专业规划教材

民航飞机无线电设备

孙进平 王 俊 张玉玺 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



新视野民航飞行技术专业规划教材

民航飞机无线电设备

孙进平 王 俊 张玉玺 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了民航飞机不同类型无线电设备的功能、原理、组成及使用。全书共分为6章,包括:无线电技术基础、无线电通信原理、民航飞机通信设备、无线电导航设备、雷达设备、警告与监视设备。此外,在附录A中提供了民航常用缩略词表,在附录B中选编了160道复习题,基本覆盖了新版《航线运输驾驶员执照理论考试大纲(飞机)》和《私用驾驶员执照理论考试大纲(飞机)》中对相关电子设备的知识点要求。

本书可作为高校民航飞行专业和机务维修专业的本科生教材,也可作为民航管理、技术实施部门的工程技术人员以及航空爱好者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

民航飞机无线电设备 / 孙进平, 王俊, 张玉玺编著

. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5124-2267-4

I. ①民… II. ①孙… ②王… ③张… III. ①民用飞机—航空设备—电信设备 IV. ①V243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 234098 号

版权所有, 侵权必究。

民航飞机无线电设备

孙进平 王 俊 张玉玺 编著

责任编辑 冯 颖

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

北京市同江印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 15.75 字数: 336 千字

2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷 印数: 2 000 册

ISBN 978-7-5124-2267-4 定价: 45.00 元

前 言

为保障飞行安全,提高飞行效率,现代民航飞机上安装有各种先进的无线电通信、导航、雷达和监视设备。在飞行任务中,飞行员需要借助这些电子设备提供的各种信息,保证飞机在各种气象条件下,准确、迅速地沿预定的航线飞行和着陆。在遇到威胁安全飞行的意外环境或事件时,飞行员也能够通过这些电子设备提前感知,并进行有效规避。尽管飞行技术专业不要求深入掌握这些机载电子设备的设计理论和电路实现方法,但为了更好、更高效地使用和维护这些电子设备,也需要理解其基本工作原理,并掌握其系统组成、性能参数、使用方法等。

本书是根据飞行技术专业培养目标,以中国民航《CCAR-61部》和《CCAR-141部》规章为依据,参考新版《航线运输驾驶员执照理论考试大纲(飞机)》和《私用驾驶员执照理论考试大纲(飞机)》的知识点要求编写的。全书共分6章,较为系统地介绍了民航飞机不同类型无线电设备的功能、原理、组成及使用。第1章简要介绍了民航飞机相关设备工作原理所需的无线电基础知识;第2章简要介绍了无线电通信的基础原理;第3章介绍了高频通信系统、甚高频通信系统、选择呼叫系统、应急电台、卫星通信系统、数据链通信以及飞机通信与寻址报告系统;第4章介绍了自动定向机、甚高频全向信标系统、仪表着陆系统、测距机、卫星导航系统以及基于性能的导航;第5章介绍了民航一次雷达、民航二次雷达、无线电高度表、机载气象雷达系统;第6章主要介绍了近地警告系统、交通警戒与防撞系统以及自动相关监视系统。此外,在附录A中提供了民航常用缩略词表,在附录B中选编了160道复习题。

作者在编写本书的过程中得到了北京航空航天大学程吉宽教授的指点和帮助,以及北京航空航天大学飞行学院和电子信息工程学院领导的大力支持,并且参考了国内外许多作者的著作,在此一并深表感谢。

由于作者的专业水平和实际工程经验有限,书中疏漏及不足之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

作 者

2016年8月



录

第1章 无线电技术基础	1
1.1 电波的传播规律	1
1.1.1 电波的传播	1
1.1.2 地面与电离层对电波传播的影响	5
1.2 电波的传播特点	9
1.2.1 电波频段的划分	9
1.2.2 各波段电波的传播特点	10
1.3 天线和馈线	13
1.3.1 天线的作用与分类	13
1.3.2 天线的特性指标及其影响因素	15
1.3.3 馈线	18
1.4 无线电信号的发射与接收	19
1.4.1 无线电发射机	19
1.4.2 无线电接收机	22
第2章 无线电通信原理	27
2.1 通信概述	27
2.1.1 通信方式	28
2.1.2 信号频谱与信道	30
2.1.3 通信系统的主要问题及性能指标	32
2.2 模拟调制通信系统	34
2.2.1 幅度调制	34
2.2.2 频率调制与相位调制	37
2.3 数字调制通信系统	41
2.3.1 数字调制	41
2.3.2 数字调制通信系统的性能特点	44
第3章 民航飞机通信设备	46
3.1 高频通信系统	46
3.1.1 高频通信系统的组成	47
3.1.2 高频通信系统的工作原理	49

3.2 甚高频通信系统	52
3.2.1 甚高频通信系统的组成	52
3.2.2 甚高频通信系统的工作原理	54
3.3 选择呼叫系统	56
3.3.1 选择呼叫系统的组成	56
3.3.2 选择呼叫系统的工作原理	57
3.4 应急电台	58
3.5 卫星通信系统	58
3.5.1 卫星通信的特点	59
3.5.2 静止卫星通信系统	59
3.5.3 航空移动卫星业务	62
3.6 数据链通信	64
3.6.1 民航数据链的分类	66
3.6.2 民航数据链的应用	67
3.6.3 甚高频数据链	68
3.7 飞机通信与寻址报告系统(ACARS)	69
3.7.1 ACARS 系统的组成	70
3.7.2 ACARS 的协议与报文	73
第4章 无线电导航设备	76
4.1 导航系统概述	76
4.1.1 导航系统分类	77
4.1.2 位置线与无线电导航定位	78
4.1.3 无线电导航系统的要求	80
4.2 自动定向机	82
4.2.1 自动定向机的功能及组成	83
4.2.2 自动定向机的基本原理	89
4.2.3 自动定向机的测向误差	91
4.3 甚高频全向信标(VOR)	92
4.3.1 VOR 的特点及功用	92
4.3.2 CVOR 的工作原理	96
4.3.3 DVOR 的工作原理	101
4.3.4 机载 VOR 接收系统	104
4.3.5 航道偏离与向/背台指示	108
4.4 仪表着陆系统(ILS)	110
4.4.1 着陆过程与标准等级	111
4.4.2 ILS 的组成	113

4.4.3 ILS 的工作原理	116
4.5 测距机(DME)	119
4.5.1 DME 的功用与波道划分	119
4.5.2 DME 的工作原理	122
4.5.3 应答识别——频闪搜索	124
4.5.4 机载测距机	125
4.6 卫星导航系统(GNSS)	128
4.6.1 GNSS 的特征及组成	129
4.6.2 全球卫星定位系统(GPS)	130
4.6.3 GLONASS 系统	140
4.6.4 北斗卫星导航系统	141
4.6.5 Galileo 系统	144
4.6.6 GNSS 增强技术	145
4.7 基于性能的导航(PBN)	147
4.7.1 PBN 的产生与发展	147
4.7.2 RNAV 与 RNP	150
4.7.3 PBN 导航规范简介	152
第 5 章 雷达设备	154
5.1 雷达工作原理	154
5.2 民航一次雷达(PSR)	157
5.3 民航二次雷达(SSR)	160
5.3.1 SSR 的组成及工作概况	160
5.3.2 SSR 的询问信号和应答	162
5.3.3 SSR 的特点	167
5.3.4 SSR 的性能	168
5.3.5 S 模式二次雷达	170
5.4 无线电高度表	174
5.4.1 无线电高度表的组成与工作原理	174
5.4.2 无线电高度表的分类	176
5.4.3 无线电高度表指示器	177
5.5 机载气象雷达	179
5.5.1 机载气象雷达的工作方式与组成	179
5.5.2 机载气象雷达对目标的探测	181
5.5.3 机载气象雷达系统的工作	183
5.5.4 机载气象雷达维护注意事项	187

第 6 章 警告与监视设备	189
6.1 近地警告系统(GPWS)	189
6.1.1 GPWS 的组成	190
6.1.2 GPWS 的工作方式	192
6.1.3 增强型 GPWS	200
6.2 交通警戒与防撞系统	202
6.2.1 TCAS II 的基本原理	202
6.2.2 TCAS II 的组成	205
6.2.3 TCAS II 的显示和语音信息	208
6.2.4 TCAS II 的机组响应和运行抑制	213
6.3 自动相关监视系统	213
6.3.1 合约式自动相关监视(ADS-C)	215
6.3.2 广播式自动相关监视(ADS-B)	218
6.3.3 ADS-C 和 ADS-B 的特性比较	221
附录 A 缩略词表	223
附录 B 总复习题	227
参考文献	241

第 1 章

无线电技术基础

航空无线电设备主要是指采用无线电信号传输或获取信息的机载设备。本章简要介绍了民航飞机相关设备工作原理所需的无线电基础知识,包括无线电波的传播规律、各波段无线电波的传播特点、用于发射和接收无线电波的天线及馈线的基本概念以及无线电发射机与接收机技术的基础知识。

1.1 电波的传播规律

在空间传播的交变电磁场称为电磁波(Electromagnetic Wave)。无线电波通常指频率在 300 GHz 以下的电磁波,简称电波。

1.1.1 电波的传播

1. 电波的基本概念

1) 电波的形成与传播

天线是一种能量转换设备,当把射频信号输入至天线输入端后,天线将使射频信号所包含的能量辐射到空中,在空中形成电波。也就是说,天线把射频能量转化成空间电磁能。由于电波的交变特性,它可以按照一定的规律向远处扩散,如图 1.1 所示。天线在 A 点形成的交变电场 E ,形成了 B 点的交变磁场,而 A 点的交变磁场 H 又形成了 B 点的交变电场, A 点的交变电磁场便传递到了 B 点。同理, B 点的电磁场又会在 C 点形成交变电磁场,因此,天线产生的电波就不断地向远处传播。

2) 电波的分布

由于空间电波是由天线中的射频信号形成的,所以其变化规律取决于射频信号的变化规律。需要注意的是,电磁波在空间任意一点处的电场向量(实线箭头)与磁

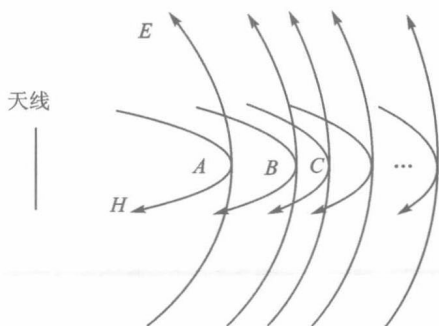


图 1.1 电波的传播

场向量(虚线箭头)始终是垂直的,并且二者又都与传播方向垂直,如图 1.2(a)所示。

3) 电波的相位

在电波的传播途径中,一个波长范围内电场强度是不同的。某点场强的大小、方向和变化趋势的瞬时状态,称为电波的相位。习惯上用角度来表示电波的相位,称为电波的相位角,通常用 φ 表示,如图 1.2(b)所示。两点之间的相位之差称为相位差,用 $\Delta\varphi$ 表示。 $\Delta\varphi$ 满足如下公式:

$$\Delta\varphi = (d/\lambda) \cdot 360^\circ$$

式中: d 为传播途径中两点的距离差(取值限制在一个波长内), λ 为波长。

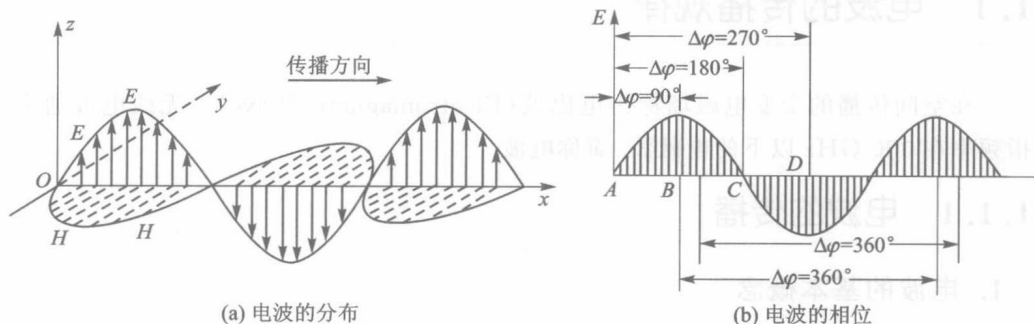


图 1.2 电波的分布与相位

4) 电波的传播方向

空间电波的电场向量 E 和磁场向量 H 以及电波的传播方向是垂直的,这种电波称为横电磁波,它的传播方向可用右手螺旋法则进行判断,如图 1.3 所示。右手 4 指指向电场向量方向,再使 4 指弯曲朝向磁场向量方向,则拇指方向就是电波的传播方向。

5) 电波的传播速度

电波在真空中的传播速度等于光速 c ($c = 3 \times 10^8$ m/s)。在空气或其他媒质中的传播速度为

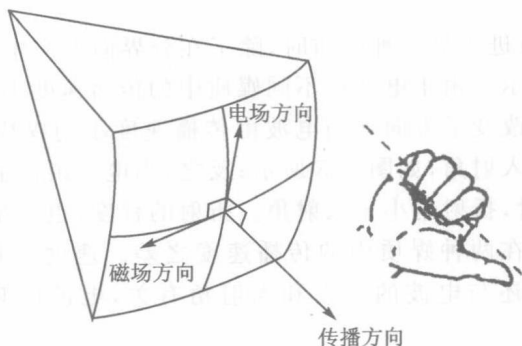


图 1.3 电波的传播

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

式中： ϵ_r 为媒质的相对电容率（也称为相对介电系数）； μ_r 为媒质的相对导磁系数。在均匀媒质中，电波的传播方向和速度都是恒定的。这里可以认为空气是近似均匀的媒质。

6) 电波的极化

电磁场的电场强度矢量在垂直于传播方向的平面内随时间变化的方式称为电波的极化。电波的电场强度矢量方向称为极化方向。

① 线极化波和圆极化波。如果电波在空间某点的电场向量终端随时间变化的轨迹是一条直线，则称这种电波为线极化波；如果电场向量终端的轨迹是一个圆，则称为圆极化波。

② 水平极化波和垂直极化波。在线极化波中，如果电场强度矢量是与地面垂直的，则称为垂直极化波；如果电场强度矢量是与地面平行的，则称为水平极化波。要有效地接收垂直（水平）极化波，天线必须垂直（水平）安装。对于机载高频通信系统和甚高频通信系统，它们发射的电波为垂直极化波，所以接收天线要求垂直安装。但电波在实际传播过程中，由于各种干扰的存在，其极化方向有一些变化，因而接收天线也应该适当做些调整。

2. 电波的反射、折射、绕射和散射

当电波在不均匀媒质中传播时，即媒质的 ϵ 和 μ 发生变化时，不仅电波的传播速度会发生变化，而且传播方向也会改变，产生反射、折射、绕射和散射现象。

1) 反 射

电波在经过不同媒质交界面时会产生反射现象，尤其是遇到 ϵ 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。电波频率越高，反射越强。当反射面远大于波长时，反射线与入射线及法线处于同一平面，如图 1.4 所示。

2) 折 射

电波由一种媒质进入另一种媒质时,除了在分界面上产生反射外,还会发生折射现象,如图 1.5 所示。由于电波在不同媒质中的传播速度不同,经过交界面时波阵面发生偏转,从而改变了方向。当电波由传播速度小的媒质进入传播速度大的媒质时,折射角大于入射角,如图 1.5 所示;反之,当电波由传播速度大的媒质进入传播速度小的媒质时,折射角小于入射角。折射的程度,也就是折射角与入射角之差,主要取决于电波在两种媒质中的传播速度之差。速度差越大,折射程度就越大。另外,折射程度还与电波的频率和入射角有关,电波的频率越低,入射角越大,折射程度就越大。

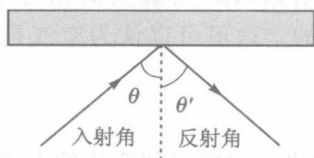


图 1.4 电波的反射

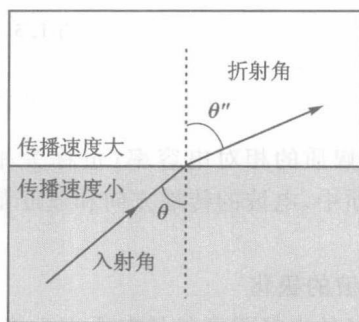


图 1.5 电波的折射

3) 绕 射

电波遇到障碍物时,有时能绕过障碍物继续前进,这种现象称为绕射。由于电波具有绕射能力,所以它能够沿起伏不平的地球表面传播,如图 1.6 所示。电波的绕射能力与波长有关,波长越长,绕射能力越强,传播距离越远。

4) 散 射

在大气对流层中有时会有一些尺寸很小且很不均匀的尘埃和小水滴,当电波遇到这些微粒时,就会向四面八方散射,这就是散射现象(见图 1.7)。散射的原因是由于小颗粒在电波的作用下激起电流,形成新的波源,因而向各个方向辐射电波。目前,在散射通信中就是利用电波散射的特点来增加传输距离的。

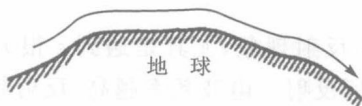


图 1.6 电波的绕射

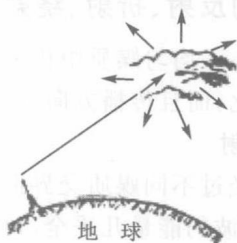


图 1.7 电波的散射

3. 电波的传播方式

电波在大气层中传播,由于本身的频率不同,以及地面和电离层对它的不同影响,因此形成了不同的传播方式,如图 1.8 所示。

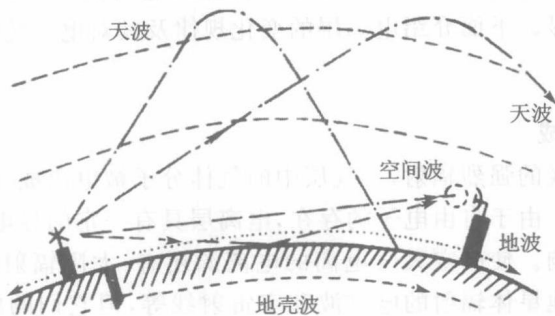


图 1.8 电波的传播方式

1) 天 波

电波由发射天线向空中辐射,被电离层反射后到达接收点,这种靠电离层的反射传播的电波称为天波。当被调制的无线电波信号在电离层内传播时,组成信号的不同频率成分有着不同的传播速度,所以波形会发生失真。同时,由于自由电子受电场作用而发生运动,所以当电波经过电离层时,其能量会被吸收一部分。

2) 地 波

沿地球表面传播的电波,称为地波或表面波。由于此时电波是紧靠着地面传播的,地面的性质、地貌、地物等都会影响电波的传播。

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至接收点,称为直达波;经地面反射后到达接收点的电波,称为地面反射波。空间波在大气层的底层传播,传播的距离受到地球曲率的影响。收/发天线之间的最大距离基本上被限制在视线范围内,要扩大通信距离,就必须增加天线高度。

4) 散射波

电波利用电离层或对流层的散射作用传播,称为散射波。这种通信方式适用于无法建立微波中继站的地区,例如:用于海岛之间和跨越湖泊、沙漠、雪山等的地区。但是,由于散射波信号相当微弱,所以散射传播接收点的接收信号也相当微弱,即传播损耗很大,这样散射通信就必须采用大功率发射机、高灵敏度接收机和高增益天线。

1.1.2 地面与电离层对电波传播的影响

当电波沿地球表面传播时,地面将吸收电波的部分能量,造成电波能量的衰减,衰减的程度与地面导电系数和电波的频率有关。地球表面的导电系数越大,电波的

衰减就越小。由于海水的导电系数比较大,所以电波沿海面可以传播更远的距离。另一方面,电波的频率越高,衰减就越大,在地球表面传播的距离越近,因此,沿地面远距离传播的电波,其频率一般不超过 3 MHz。

通常把地球周围的大气层分为对流层、同温层、电离层 3 层,其中电离层对电波传播的影响最为明显。下面介绍电离层的变化规律及其对电波传播的影响。

1. 电离层

1) 电离层的形成

由于太阳紫外线的强烈辐射,大气层中的气体分子被电离成自由电子和正离子,因而形成了电离层。由于自由电子的存在,电离层具有一定的导电性,因而对电波的传播产生明显的影响。使高空大气电离的电离源还有:太阳辐射的 X 射线、为数众多的微流量以及其他星体辐射的电磁波和宇宙射线等,但它们的电离作用较小。电离不仅受太阳紫外线的影响,而且与大气层的密度、湿度及成分有关。高空气体稀薄,电离后的自由电子很少,而低空由于太阳紫外线很弱,电离后的自由电子也很少,因此电离层主要分布在距地面 60~500 km 的高空。通常用电子密度来表示电离层的电离情况。由于大气成分不同、高度不同以及受到阳光辐射程度不同,电离层的电子密度也不均匀,且随季节、时间而变化。实际测量表明,在夏季的白天,电离层有 3 个电子密度最大的区域,从下向上分别称为 D 层、E 层和 F 层,如图 1.9 所示。

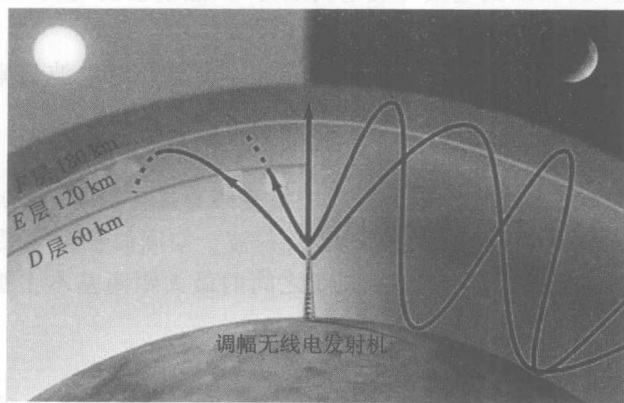


图 1.9 电离层的分层图

2) 电离层的变化规律

D 层: D 层在电离层中处于最低位置,离地高度为 60~90 km,其电子密度最大值在约 80 km 处。D 层在日出后出现并在中午时达到最强,日落后由于强烈的电荷中和而逐渐消失。

E 层: E 层在电离层中的区域大约在离地 110 km 的高度。E 层较为稳定,它的电子密度和高度变化都比较有规律。白天时电子密度较大,夜间电子密度减小并几乎保持不变。

F 层: F 层是天波传播最重要的部分。在夏季的白天, F 层又可分为 F_1 层和 F_2 层。 F_1 层离地高度约为 160 km, 其变化规律和 D 层类似。 F_2 层白天和夜间都出现, 其离地高度约为 300 km。 F_2 层有着明显的冬季特性和夏季特性: 冬季特性是指电子密度在黎明最小, 下午最大; 夏季特性是指电子密度在夏季的中午反而比冬季的中午小。

电离层电子密度变化的总体规律是夏季比冬季大, 白天比夜晚大, 此外, 不同年份的电子密度也有所不同, 这与太阳的活动有关。图 1.10 给出了电离层昼夜变化的一般规律。

2. 电离层对电波传播的影响

1) 电离层对电波的折射作用

电离层的电子密度是不均匀的: 从下向上各层的电子密度依次增大, 而且每一层中也是中间大两边小。电波进入电离层后, 就会因为产生连续的折射使电波或者返回地面或者穿透电离层而进入外层空间, 如图 1.11 所示。通常, 电离层的相对电容率可表示为

$$\epsilon' = 1 - 80.8N/f^2$$

式中: N 为电离层电子密度(电子数/ m^3), f 为电波频率(kHz)。

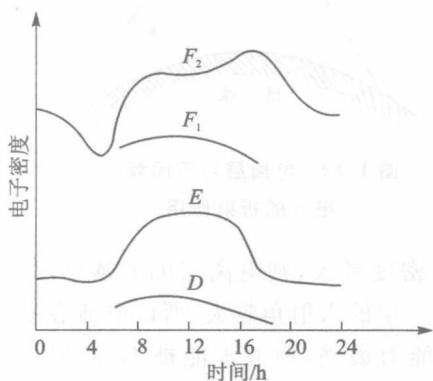


图 1.10 电离层昼夜变化图

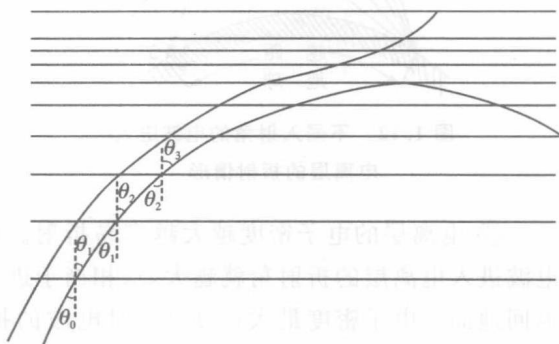


图 1.11 电离层对电波的连续折射

由于各层的电子密度是自下而上依次增加的, 而且一层当中也是中间大、两边小, 因而电离层各层的相对电容率依次减小, 而在某一层中其相对电容率却呈现中间小、上下大的规律。当电波以入射角 θ_0 入射时, 将会产生 $\theta_0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \dots$ 的结果, 如果电波的入射角自下而上依次增大到超过临界入射角时, 电波就产生了全反射, 以后电波就自上而下折回地面。如果电波到达电子密度最大的高度时, 入射角仍然不能大于临界入射角, 那么电波将穿透电离层不再返回地面。电波能否折射后返回地面, 取决于电波的入射角、频率以及电离层的电子密度。

① 电波的入射角越大越容易折射。当电波的频率一定时, 电波入射角越大, 则

经过较少的连续折射即可达到临界入射角,因而较容易返回地面,如图 1.12 中射线 1、2 所示。

从图 1.12 中还可以看出,入射角越大,电波传播的距离越远;反之,电波传播的距离越近。当入射角减小到某一值时,电波传播的距离最近,如图 1.12 中射线 3 所示,这一距离称为越距。若入射角继续减小,则电波将会穿透电离层,如图 1.12 中射线 4、5 所示。

② 电波的频率越低越容易折射。当入射角一定时,电波的频率越低,电离层的相对电容率也就越小,电波进入电离层后的折射角就越大,这相当于电波进入下一层的入射角越大,电波也就越容易折射回地面。若频率超过 30 MHz,则电波一般不会返回地面,而是穿透电离层,进入外层空间,如图 1.13 所示。

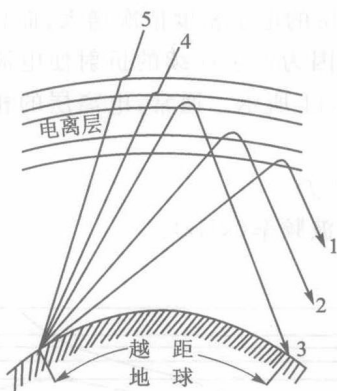


图 1.12 不同入射角的电波进入电离层的折射情形

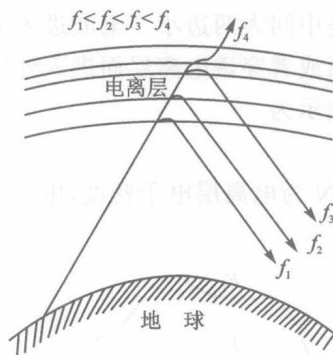


图 1.13 电离层对不同频率电波的折射作用

③ 电离层的电子密度越大越容易折射。电子密度越大,则电离层的 ϵ 越小,故电波进入电离层的折射角就越大,这相当于进入下一层的入射角越大,所以电波容易返回地面。电子密度最大的 F 层,对电波的折射能力最强,短波不能被 D、E 层折射,却能被 F 层折射;中波不能被 D 层折射,却能被 E 层折射;长波和超长波将被 D 层直接折射回地面。

2) 电离层对电波的吸收作用

电离层对电波的影响除了折射作用外,还表现在它对电波能量的吸收上。电波进入电离层后,会引起其中的自由电子发生振动,电子在振动时与其周围的正离子和气体分子碰撞,产生热量,使电波的部分电磁能转变成热能而损耗。电波能量的损耗主要与电波的频率和电离层的电子密度有关。此外,电波的频率在电离层自由电子的固有振荡频率 1400 kHz 附近时,被电离层吸收的能量最多。

① 电波的频率越高,损耗越小。电波的频率越高,则周期越短,自由电子所受的单向电场力作用时间也越短,运动速度越慢,振幅也越小,从而由于碰撞而损耗的能

量也越小。

② 电离层电子密度越大,电波能量损耗越大。电子密度越大,单位空间内的自由电子数目就越多,自由电子之间以及自由电子与其他分子碰撞的机会也就越多,因而电波的损耗也就越大。

1.2 电波的传播特点

1.2.1 电波频段的划分

由前面的知识可知电波的传播规律与其频率密切相关,不同频率的电波具有不同的特点,适用于不同用途的无线电系统,因此对无线电波进行频段划分就十分必要。目前,国际上广泛采用的电波频段和波段划分如表 1.1 所列。

表 1.1 无线电波频段和波段划分表

频段名称	符 号	频率范围	波长范围	波段名称	用 途
甚低频	VLF	3~30 kHz	10~100 km	超长波	导航
低频	LF	30~300 kHz	1~10 km	长波	导航
中频	MF	0.3~3 MHz	0.1~1 km	中波	导航、广播
高频	HF	3~30 MHz	10~100 m	短波	通信
甚高频	VHF	30~300 MHz	1~10 m	超短波	通信、导航
超高频	UHF	0.3~3 GHz	1~10 dm	分米波	导航、卫星通信
特高频	SHF	3~30 GHz	1~10 cm	厘米波	雷达、卫星通信
极高频	EHF	30~300 GHz	1~10 mm	毫米波	雷达

注:有些分类方法,通常把中频的高端 1.5~3 MHz 划分到高频的范围。

对于短波以上的波段,有超短波和微波的叫法。对于微波波段,通常用特定字母来表示一定的频率范围,如表 1.2 所列。

表 1.2 微波常用波段代号

波段代号	频率范围 /GHz	波长范围 /cm	标称波长 /cm
L	1.0~2.0	15~30	22
S	2.0~4.0	7.5~15	10
C	4.0~8.0	3.75~7.5	5
X	8.0~12.5	2.4~3.75	3
Ku	12.5~18.0	1.67~2.4	2
K	18.0~26.5	1.13~1.67	1.25
Ka	26.5~40.0	0.75~1.13	0.8