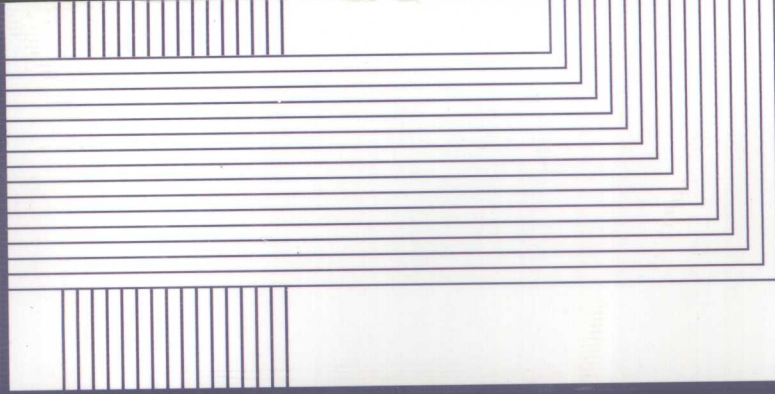




短波通信系统

王坦 主编

王立军 邓才全 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

短波通信系统

王 坦 主编

王立军 邓才全 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

短波通信系统是无线电通信系统的重要组成部分。本书首先简要介绍了电波传播知识、短波固定通信台站系统组成、短波在无线通信系统中的重要作用及发射与接收信息的基本理论和主要特性参数。着重从短波通信工程应用角度出发,系统地阐述了短波通信天线、短波通信馈线、短波发信台、短波收信台和短波收、发信台的建设;另外短波通信系统的电磁防护与抗毁、短波通信系统指标与测试方法在本书中也有详细阐述。本书分析了大地对短波通信系统的影响,同时还介绍了短波台站的各种馈电技术、接地技术、防雷技术、电源技术、系统安装与调试技术及常用仪器。

本书可作为从事短波通信类人员的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

短波通信系统/王坦主编. —北京:电子工业出版社, 2008.8
ISBN 978-7-121-06990-1

I. 短… II. 王… III. 短波通信—通信系统 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 094298 号

责任编辑:雷洪勤

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:544 千字

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数:8 000 册 定价:45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

序

短波通信系统是无线电通信系统的重要组成部分。

近几年来,短波通信系统在世界范围内得到了迅速发展并且不断有新的技术出现,主要在于射频硬件处理技术的不断发展,从第一代模拟点频短波通信到当前普遍使用的数字跳频、扩频短波通信系统,并在我国逐步建成了布局合理、手段多样、业务齐全、覆盖面广、机动性较强的短波通信系统,有效地保障了国防通信和国家应急通信。

在短波通信网的建设过程中,几代通信科技人员投入了毕生的精力和智慧,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的成果,形成了具有特色的短波通信系统建设程序和装备体系。为适应国防短波通信系统建设的标准、模式的深刻变化,紧跟通信技术发展的步伐,培养新一代短波通信系统设计、建设人才,作者编写了一套既适合短波通信技术人才培养需要,又对短波通信系统建设工作具有一定指导作用的教材,具有重要的现实意义和深远的历史意义。

本教材以大专以上学历的短波通信系统工程技术人员和通信指挥管理人员为主要对象,以短波通信系统的组成、原理、体制、技术标准与规范、系统设计方法与测试手段、短波通信技术的发展动态和方向为主要内容,以系统的设计和技术应用为重点。

该书具有较强的理论性、实用性、系统性和技术前瞻性,既可用于短波通信系统建设技术人员的培训亦可作为相关院校、相关专业师生的参考书。

中国工程院院士:



2008年7月

前 言

本书首先简要介绍了电波传播知识、短波固定通信台站系统组成、短波在无线通信系统中的重要作用及发射与接收信息的基本理论和主要特性参数。着重从短波通信工程应用角度出发,系统地阐述了短波通信天线、短波通信馈线、短波发信台、短波收信台和短波收、发信台的建设;另外,短波通信系统的电磁防护与抗毁、短波通信系统指标与测试方法在本书中也有详细阐述。本书分析了大地对短波通信系统的影响,同时还介绍了短波台站的各种馈电技术、接地技术、防雷技术、电源技术、系统安装与调试技术及常用仪器。

全书共分12章,全书总纲由王坦编写,第1,5,6,7,8,9章由王立军、邓才全编写,第2,10章由朱军编写,第3,4章由巩明树编写,第11章由林文波编写,第12章由杨先桂、伍明光编写。本书由王立军主审,由马银珠统筹;另外,参与本书编写工作的还有韩晓明、姜洪亮、刘瑞军、刘芸江、何晓菊,哈金泽等。全书遵循立足当前、面向未来、能力为本、培养应用型人才的原则,尽量做到取材精练、突出重点、概念清楚、基本理论分析简明易懂,注重对实际工程设计和实际应用的介绍,还增加了对近年来的新技术和新应用的介绍。

本书可作为从事短波通信类人员的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

本书的相关技术原理得到了曹伟教授、周良明教授的指导,在此表示感谢。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者给予指正。

编 者

2008年7月于北京

目 录

第 1 章 电波传播知识	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 地面波(表面波)传播	(1)
1.1.2 直射波传播	(1)
1.1.3 天波传播	(2)
1.1.4 散射传播	(2)
1.2 地面波传播	(2)
1.2.1 地面波的一般性能	(2)
1.2.2 地面波场强的计算	(2)
1.3 天波传播	(4)
1.3.1 天波的一般性能	(4)
1.3.2 电离层的形成、结构及变化规律	(4)
1.3.3 电离层对无线电波传播的影响	(5)
1.3.4 通信距离与工作波段的关系	(8)
1.3.5 通信距离与发射仰角的关系	(8)
1.3.6 如何选择工作频率	(9)
第 2 章 短波通信系统的组成	(10)
2.1 系统组成	(10)
2.2 要素的配置及作用	(10)
2.3 主要附属设备的作用	(12)
2.4 系统连接关系	(12)
2.5 短波通信在军事通信中的地位及作用	(14)
2.5.1 安全性	(14)
2.5.2 覆盖面积	(14)
2.5.3 经济性	(14)
2.5.4 各方面技术的应用	(14)
第 3 章 短波发信台	(16)
3.1 短波发信台的作用	(16)
3.2 发信台要素配置及作用	(16)
3.2.1 发信台电源	(16)
3.2.2 发信机房	(16)
3.2.3 传输配线	(17)
3.2.4 发信天线	(18)
3.3 常用发射机性能及操作使用	(18)

3.3.1	单边带发射机	(18)
3.3.2	200W 全能数字化电台	(21)
3.3.3	400W 发射机	(21)
3.3.4	1000W 短波数字化发射机	(25)
3.3.5	10kW 短波固态线性功率放大器	(26)
3.4	发信集中控制台及操作使用	(26)
3.4.1	发信控制台的组成及功能	(27)
3.4.2	发信控制台的安装	(28)
第 4 章	短波收信台	(32)
4.1	短波收信台的作用	(32)
4.2	收信台要素配置及作用	(32)
4.2.1	供电系统的配置及要求	(32)
4.2.2	综合配线传输系统配置及要求	(33)
4.2.3	收信和办报要素配置及要求	(35)
4.3	常用收信机性能及操作使用	(36)
4.3.1	高频独立边带接收机	(37)
4.3.2	自适应单边带接收机性能及操作使用	(50)
4.3.3	短波自适应通信系统组成、指标及操作使用简介	(53)
4.4	收信集中控制台及使用	(55)
4.4.1	收信集中控制台的作用及整体结构	(55)
4.4.2	系统的安装	(56)
4.4.3	软件安装	(59)
4.4.4	系统的调试	(71)
第 5 章	短波通信天线	(73)
5.1	天线概述	(73)
5.1.1	天线的作用与分类	(73)
5.1.2	电磁波的辐射	(73)
5.1.3	对称振子	(73)
5.1.4	天线方向性的讨论	(74)
5.1.5	天线的极化	(77)
5.1.6	天线的输入阻抗	(79)
5.1.7	天线的工作频率范围(频带宽度)	(80)
5.2	短波天线及通信附属设备	(80)
5.2.1	短波全向宽带天线	(80)
5.2.2	短波定向宽带天线	(98)
5.2.3	短波非金属远程收发信系统	(116)
5.3	天线安装说明及注意事项	(126)
5.3.1	安装桅杆	(126)

5.3.2	安装天线体	(127)
5.3.3	制作地线	(127)
5.3.4	涂防腐润滑脂	(128)
5.3.5	架设标准	(128)
5.3.6	安装注意事项	(128)
第 6 章	短波通信馈线	(132)
6.1	概述	(132)
6.1.1	馈线的基本概念及分类	(132)
6.1.2	馈线的工作状态及常用名词浅释	(132)
6.1.3	馈线的基本特性公式	(135)
6.2	发信天线馈线	(139)
6.2.1	对发信天线馈线的基本要求	(139)
6.2.2	常用发信馈线的特性	(139)
6.2.3	发信馈线的结构	(143)
6.3	接收天线馈线	(147)
6.3.1	对接收天线馈线的要求	(147)
6.3.2	接收天线馈线的特性	(147)
6.3.3	接收天线馈线的结构	(148)
6.4	收、发信天线馈线的工艺要求	(152)
6.5	收发信机到天线的阻抗匹配与变换	(155)
6.5.1	匹配的基本概念	(155)
6.5.2	馈线变阻线	(156)
6.5.3	常用变阻线与天线和馈线的连接	(160)
6.5.4	馈线与收发信机间的连接	(160)
6.6	天线交换	(161)
6.6.1	天线交换的必要性	(161)
6.6.2	发信天线交换矩阵	(161)
6.6.3	收信天线交换矩阵	(162)
6.7	避雷设备	(165)
6.7.1	天线的避雷	(165)
6.7.2	发信馈线的避雷	(165)
6.7.3	收信馈线的避雷	(165)
6.8	馈线的维修	(166)
6.8.1	馈线维修的内容	(166)
6.8.2	馈线维修的技术标准	(166)
6.8.3	馈线的检测	(166)
6.9	天线馈线常用材料	(168)
6.9.1	常用导线及吊索	(168)

6.9.2	常用射频电缆	(168)
6.9.3	线杆	(170)
6.9.4	天线、馈线的主要铁件	(171)
6.9.5	天线、馈线常用绝缘子	(182)
第 7 章	新型短波综合网	(191)
7.1	短波通信网络化	(191)
7.2	系统结构	(191)
7.2.1	网络拓扑结构	(191)
7.2.2	系统结构	(192)
7.2.3	运行支撑系统	(193)
7.2.4	短波业务终端	(193)
7.2.5	业务服务系统	(193)
7.3	物理互联网络	(194)
7.3.1	物理互联网络	(194)
7.3.2	基于 VPN 组网协议	(194)
7.3.3	基于电话通信网	(194)
7.4	运行支撑系统	(195)
7.4.1	分系统组成	(195)
7.5	综合业务	(197)
7.5.1	无线报文业务	(197)
7.5.2	语音业务	(198)
7.5.3	通用数据承载业务	(199)
第 8 章	短波移动通信	(201)
8.1	航空通信	(201)
8.1.1	机载短波通信的特点和系统构成	(201)
8.1.2	通信应用	(201)
8.1.3	通信技术	(203)
8.2	舰艇通信	(206)
8.2.1	舰艇通信系统的发展现状	(206)
8.2.2	典型的舰艇对外通信	(207)
8.2.3	舰艇通信技术发展趋势	(208)
8.3	潜水艇水下无线通信	(211)
第 9 章	短波收、发信台建设	(213)
9.1	收、发信台场地的选择	(213)
9.2	收、发信台天线布局原则	(216)
9.3	收、发信台机房形状及馈线布局	(220)
9.4	接地	(222)
9.4.1	接地的一般概念	(222)

9.4.2	接地装置	(223)
9.4.3	场地选择要求	(223)
9.4.4	实现接地的主要方法	(225)
9.4.5	接地电阻的测量和接地系统的维护	(228)
第 10 章	短波通信系统的电磁防护与抗毁	(231)
10.1	电磁防护的作用与意义	(231)
10.1.1	电磁脉冲武器	(231)
10.1.2	电磁脉冲武器的使用方式	(234)
10.1.3	电磁脉冲武器效能	(235)
10.2	短波通信台站的电磁防护	(235)
10.2.1	耦合模式	(236)
10.2.2	电磁防护的意义及任务	(236)
10.2.3	电磁脉冲的防护等级	(237)
10.2.4	短波通信系统抗电磁毁伤的新方法	(238)
10.3	台站交流稳压电源的电磁防护要求与测试方法	(240)
第 11 章	短波通信系统指标与测试方法	(246)
11.1	天线的常用指标与测试方法	(246)
11.1.1	天线测试条件	(246)
11.1.2	方向图测量	(249)
11.1.3	增益测量	(249)
11.1.4	输入阻抗测量	(251)
11.1.5	天馈线测量仪表	(254)
11.2	发信机测试的常用指标与方法	(257)
11.2.1	400W 短波自适应通信系统发信机测试	(257)
11.2.2	400W 短波单边带自适应通信系统发信机测试	(260)
11.2.3	1kW 短波数字化通信系统发信机测试	(262)
11.2.4	1kW 短波单边带自适应通信系统发信机测试	(265)
11.3	收信机测试的常用指标与方法	(267)
11.3.1	400W 短波自适应通信系统收信机测试	(267)
11.3.2	400W 短波单边带自适应通信系统收信机测试	(269)
11.3.3	1kW 短波数字化通信系统收信机测试	(270)
11.3.4	1kW 短波单边带自适应通信系统收信机测试	(271)
11.4	通信台站电源系统维护技术指标的测试方法	(273)
11.4.1	通信台站电源系统的组成	(273)
11.4.2	通信电源系统技术指标的测量	(273)
11.5	电源设备维护技术指标的测试方法	(286)
11.5.1	交流稳压器	(286)
11.5.2	整流设备 (包括开关电源和相控电源)	(288)

11.5.3	直流—直流变换设备·····	(293)
11.5.4	通信用逆变设备·····	(297)
11.5.5	交流不间断电源 (UPS) ·····	(299)
11.5.6	蓄电池·····	(301)
11.5.7	发电机组·····	(304)
第 12 章	短波通信展望 ·····	(309)
12.1	技术发展状况·····	(309)
12.1.1	短波通信的特点及其发展历程·····	(309)
12.1.2	国外短波通信系统的发展现状·····	(310)
12.1.3	短波通信技术的发展现状·····	(314)
12.2	短波通信的发展趋势·····	(316)
12.2.1	短波自适应技术的应用·····	(317)
12.2.2	通信系统数字化技术的研究和装备·····	(317)
12.2.3	全固态功率合成技术扩大装备·····	(317)
12.2.4	宽带天线小型化 ·····	(317)
12.2.5	保密抗干扰技术的研究·····	(318)
12.2.6	软件无线电技术研究·····	(318)
12.3	应用前景·····	(319)
附录 A	通信台站电磁防护标准 ·····	(320)
附录 B	短波无线电收信台 (站) 对高压架空送电线无线电干扰保护间距的 计算方法 (补充件) ·····	(323)
附录 C	我国短波收信台 (站) 的背景噪声场强值 ·····	(324)
参考文献	·····	(326)

第 1 章 电波传播知识

无线电广播、电视、雷达、无线电通信等都要靠无线电波的传播来实现。

电波在各种媒介质及媒介质分界面上传播的过程中，由于折射、反射、散射或绕射，其方向经历各种变化，由于扩散和媒介质的吸收，其场强不断减弱。为了使接收点有足够的场强，我们首先必须掌握电波传播的途径、特点及其基本规律。

1.1 概 述

按对无线电波传播起主要影响的介质或介质分界面来分类，常遇到的电波传播方式分为：地面波传播、直射波传播、天波传播、散射传播。

1.1.1 地面波（表面波）传播

沿大地与空气的分界面传播的电波，叫地面波或表面波。

地面波的传播途径如图 1.1 所示。其传播途径主要决定于地面的电特性。这种传播方式用于长波和中波远距离通信，军用短波和超短波小型电台的近距离通信也用这种传播方式。

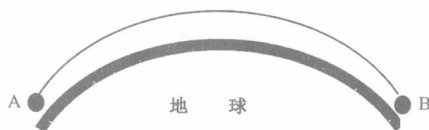


图 1.1 地面波传播

1.1.2 直射波传播

直射波的传播如图 1.2 所示。接收点的场强由两路组成：一路由发射天线直接到达接收天线，另一路由地面反射后再到达接收天线。直射波传播方式主要用于超短波和微波视距范围通信。

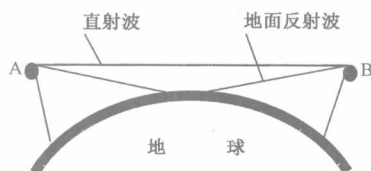


图 1.2 直射波传播

1.1.3 天波传播

天波传播途径如图 1.3 所示。由天线向高空辐射出的电波，经大气上空的电离层反射或折射后到达接收点。天波传播主要用于短波远距离通信。

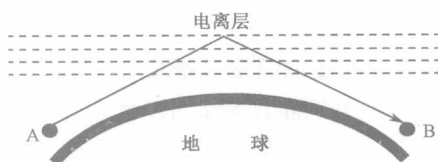


图 1.3 天波传播

1.1.4 散射传播

散射传播是电波投射到低空大气或电离层中的不均匀介质上，或者投射到流星余迹上时产生散射现象，其中只有一部分能量到达接收点，如图 1.4 所示。散射传播广泛应用于超短波远距离通信中。

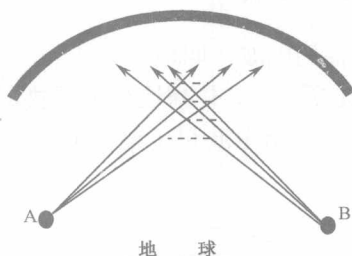


图 1.4 散射传播

1.2 地面波传播

1.2.1 地面波的一般性能

地面波主要受其所跨越的那部分地球表面的影响，地面使电波衰减。衰减的快慢与电波频率、地面的电参数有关。频率越高，衰减越大；干地上衰减最快，湿地上次之，海面上最小。此外，地形和地面覆盖物对地面波也有影响。

地面波通信，信号稳定。这种传播方式只适宜于长波、超长波的远距离通信和短波、超短波低频段的近距离通信。

1.2.2 地面波场强的计算

采用低架天线（对于陆地，一般而言天线距地面不足一倍波长；对于海面，天线架

高小于 5 倍波长) 的长波、中波、短波和超短波, 天线辐射出的电波主要以地面波传播。

1.2.2.1 近距离地面波场强的计算

在地面波传播中, 当通信距离不超过 $\frac{80}{\sqrt[3]{f_{(\text{MHz})}}} \text{ (km)}$ 时, 按平面地计算场强。图 1.5

给出了中等湿度、中等起伏地、辐射功率为 100W 的直立发信天线, 在不同频率时接收点场强和通信距离的关系曲线。当辐射功率不是 100W 时, 可按照下式计算场强:

$$E = E_1 \sqrt{\frac{P(\text{W})}{100}} \quad (1.1)$$

式中, E_1 ——由图查得的场强数值;

P ——天线的辐射功率, 单位是 W。

当已知在某个通信距离上电场强度与发射功率的数值关系时, 可按照图 1.5 所示比例关系算出各种情况下发射功率、通信距离和接收场强的数值 (关系)。

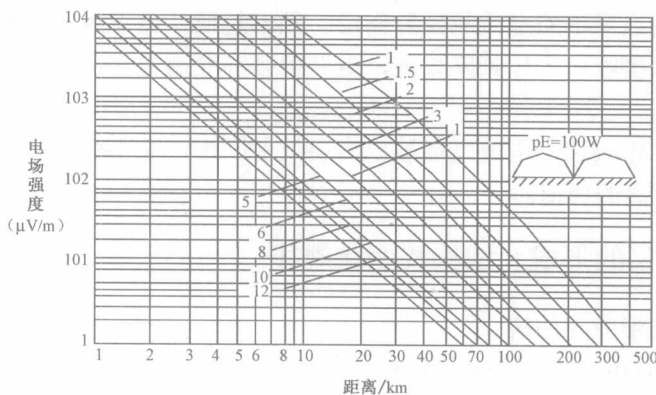


图 1.5 近距离中等湿度地上地面波场强计算曲线 ($\lambda = 25 \sim 300\text{m}$)

当地面波所经地面为陆地时:

- 发射功率一定, 接收点场强与通信距离的平方成反比;
- 通信距离一定, 接收点场强与发射机发射功率的平方根成正比;
- 接收点场强一定, 通信距离与发射功率的 4 次方成正比。

当地面波所经路径为海面时:

- 发射功率一定, 接收点场强与通信距离成反比;
- 通信距离一定, 接收点场强与发射功率的平方根成正比;
- 接收点场强一定, 通信距离与发射功率的平方成正比。

1.2.2.2 远距离地面场强的计算

当地面波传播的距离超出 $\frac{80}{\sqrt[3]{f_{(\text{MHz})}}} \text{ (km)}$ 时, 按曲面地计算场强。若不是 1kW, 天

线辐射功率产生的场强可按如公式（1.2）计算：

$$E = E_K \sqrt{P_{(kW)}} \quad \mu V / m$$

(1.2)

式中， E_K ——由曲线上查得的某一距离的场强；

E ——欲求的场强；

P ——给定的辐射功率，kW。

1.3 天 波 传 播

1.3.1 天波的一般性能

天波是由高空电离层反射而到达接收点的电波，受电离层的影响很大。而电离层的高度、密度及稳定性等随年份、季节、日夜、气候的不同而改变，因此天波传播信号很不稳定。在短波波段有严重的衰落现象，有时还会因电离层暴变而使通信中断。

电离层只对适当频率的电波起反射作用。频率越低，电波越容易被电离层吸收，反射信号很弱，难以接收；工作频率太高，电波很容易穿透电离层，根本无法实现地球上两点间的通信。

选择适当的工作频率，电波既能被电离层反射回来，又不受到严重的衰减，可用较小的功率实现远距离的通信。

1.3.2 电离层的形成、结构及变化规律

(1) 电离层的形成与结构

电离层是指从 60km 左右到 9000km 左右处于电离状态的高层大气区域。

上疏下密的高空大气层，在太阳紫外线、太阳日冕的软 X 射线和太阳表面喷出的微粒流作用下，大气气体分子或原子中的电子分裂出来，形成离子和自由电子，这个过程叫电离。电离后的大气层称为电离层。电离的程度以单位体积的自由电子数（电子密度）来表示。电离层内存在 4 个密度不同的区域，它们分别称为 D、E、F1 及 F2 层。电离层主要数据列于表 1.1 中。

表 1.1 电离层主要数据

层名	D	E	F1	F2
各层数据				
夏季白天高度/km	60~90	85~150	150~200	>200
夏季夜间高度/km	消失	90~140	消失	>150
冬季白天高度/km	60~90	85~150	160~180 (常消失)	>170

续表

层名 各层数据	D	E	F1	F2
冬季夜间高度/km	消失	90~140	消失	>150
白天最大电子密度 (个/cm ³)	约 2×10 ³	5×10 ⁴ ~2×10 ⁵	2×10 ⁵ ~4.5×10 ⁵	8×10 ⁵ ~2×10 ⁶
夜间最大电子密度 (个/cm ³)	消失	10 ³ ~10 ⁴	消失	10 ⁵ ~3×10 ⁶
电子密度最大值时高度/km	约 90	115	约 180	200~350
白天临界频率/MHz	小于 0.4	小于 3.6	小于 5.6	小于 12.7
夜间临界频率/MHz	——	小于 0.6	——	小于 5.5

(2) 电离层的变化规律

电离层各层的电子密度及高度等参数随日夜、季节、太阳活动性周期而变化。

白天的电子密度大于夜间，中午的密度大于早晚。夜间 D 层消失，E 层和 F₂ 层电子密度减小。夏季的电子密度大于冬季。

电离层密度随太阳黑子数增加而增大。太阳黑子数的变化周期是 11 年，因此电离层的变化也与 11 年周期有关。

电离层还有不定期 Ec 层、突然骚扰和暴变等不规则的变化。

有时 E 层突然出现强大的电离层，称做 Ec 层。

太阳发生耀斑时产生的强烈 X 射线，使 D 层电子层密度突然增大，这称为电离层的突然骚扰。突然骚扰可使短波通信中断 1~2 小时。

太阳面上局部地区发生扰动时喷出大量带电粒子流，使电离层的结构发生异常变化，这就是电离层暴变。电离层的暴变可以遍及全球，持续时间可长达数日之久，其间通信不稳以致中断。

1.3.3 电离层对无线电波传播的影响

电波投射到电离层后，主要是受到电离层的“反射”和“吸收”。“反射”使电波从甲地到乙地，构成甲、乙两点间的通信。“吸收”使电波能量受到衰减。

1. 电离层的等效电参数

电离层对电波来说相当于半导体介质，其等效电参数以 ϵ_e 、 σ_e 表示。在短波波段内， ϵ_e 和 σ_e 表示为：

$$\epsilon_e' = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_0} = 1 - 80.8 \frac{N}{f^2} \tag{1.3}$$

$$\sigma_e = 2.82 \times 10^{-8} \frac{N\nu}{(2\pi f)^2} \left(\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right) \tag{1.4}$$

式中， ν ——电子每秒与气体分子平均碰撞次数；

N ——1 立方厘米气体中的自由电子数，即电子密度；

f ——电波频率，Hz。

2. 电离层对电波的反射与折射

电波由空气进入电离层, 相当于从 $\epsilon' = 1$ 的介质进入到 $\epsilon'_e < 1$ 的介质, 而且电离层的介电常数 ϵ'_e 随电子密度而变, 因此进入电离层的电波将不沿直线传播而产生连续折射。

电离层折射指数 n 为:

$$n = \sqrt{1 - \frac{80.8N}{f^2} \epsilon'_e \epsilon_e} \quad (1.5)$$

对于反射层电离层, 在共电子密度极大值以下, 随着高度增加, 射线越来越趋向于水平方向, 即产生连续折射。当电波到达最高点时, 电离层对电波产生全反射, 然后电波沿着折射角减小的轨迹返回地面, 这就是电波在电离层中的反射现象, 如图 1.6 所示。

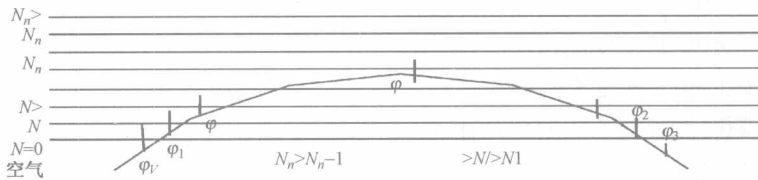


图 1.6 电波在电离层内的连续折射

电波在电离层中产生全反射的条件为:

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - 80.8 \frac{N_n}{f^2}} \quad (1.6)$$

式 (1.6) 表示实现短波通信, 频率、入射角和反射点的电子密度之间的关系。

(1) 频率一定、入射角 φ_0 一定的电波进入电离层, 一直要深入到电子密度 N 满足式 (1.6) 所要求的数值时, 才能由该点反射回来。若电离层的最大电子密度 $N_{\max}$ 尚不能满足式 (1.6) 所要求的数值, 则电波穿出电离层而不能反射。

(2) 频率一定的电波投射到电离层时的入射角 φ_0 越小, 使电波反射所需的 N 应越大, 因此电波将越深入电离层; 垂直投射时, 电波深入电离层最深, 最不容易反射。

图 1.7 给出了频率相同、入射角不同的电波被电离层反射的情况:

- 入射角 $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 < \varphi_4$;
- 入射角越小, 电波传播距离越近, 如③远于②, ④远于③;
- 入射角小于某一数值时, 电波穿过电离层不再返回地面, 如图中①。

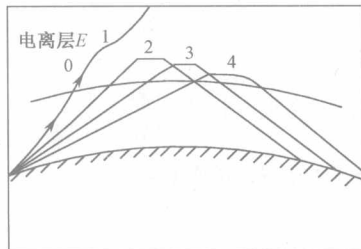


图 1.7 相同频率不同入射角电波反射