



高等学校 规划教材
工科电子类

通信系统

吴诗其 冯 钢

TONGXINXITONG

电子科技大学出版社

458

73.458

272

DG 60/30/10

通信系统

吴诗其 冯 钢 编

电子科技大学出版社

[川] 新登字 016 号

内 容 提 要

本书系工科电子类专业统编教材，介绍现代通信系统的原理和组成。

本书共分八章，涉及短波通信、微波中继通信、卫星通信、光纤通信、计算机通信、程控交换机和移动通信系统等。内容紧密结合工程实际，并反映了相应技术领域的最新发展。

本教材适用于大学应用电子技术、无线电技术、信息工程和图像传输与处理等专业相应课程，也可作为通信类专业的大专教材，以及通信技术人员的培训教材。

通信系统

吴诗其 冯 钢 编

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

四川省郫县唐昌印制厂印刷

新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 13.125 字数 319.4 千字

版次 1996 年 10 月第一版 印次 1996 年 10 月第一次印刷

印数 1—5000 册

ISBN 7—81043—545—0/TN·60

定价：13.00 元

4411111111

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

4015919

前 言

本教材是参照“应用电子技术专业”专业课“通信系统”的编写要求进行编写的，作为通信类专业的大专课程教材，课程参考学时数为 54 学时。

本教材共有八章，涉及短波，微波中继，卫星和光纤通信系统，并专门讨论计算机通信网、程控交换及移动通信。本教材系统、完整、并力求简明地阐述各类通信系统的组成，关键技术，技术标准和系统设计考虑与计算。分析过程尽量避免繁琐的数学推导，而是从工程实用的角度介绍主要内容，同时这些内容也反映了相应技术领域内的最新发展。

本教材适用于应用电子技术、无线电技术、信息工程和图象传输与处理等专业的相应课程，也可作为通信工程、计算机通信专业的重要参考书，以及通信工程技术人员的培训教材。

本教材第一至四章和第八章由吴诗其编写，冯钢编写第五、六、七章。全书由四川联合大学龙德浩教授主审，值此表示诚挚的谢意。在本书的编写过程中，得到电子科技大学出版社总编辑舒标编审的大力帮助，仅此表示谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者
1995 年 4 月

目 录

第一章 通信系统概论

1.1 通信系统的组成	(1)
1.2 通信系统的分类	(2)
1.3 通信技术的发展状况	(3)
1.4 通信系统的质量指标	(4)

第二章 短波通信系统

2.1 短波的传播特性	(6)
2.2 多径传播对通信系统性能的影响	(9)
2.3 单边带通信系统	(12)
2.4 短波信道上的数据传输	(15)
小结	(16)
习题	(17)

第三章 微波中继通信系统

3.1 概述	(18)
3.2 视距传播特性	(19)
3.3 微波中继通信系统的组成	(23)
3.4 系统设计	(28)
3.5 系统性能估算	(32)
小结	(35)
习题	(36)
附录 3.1 模拟调频系统信噪比	(37)

第四章 卫星通信系统

4.1 概述	(39)
4.2 通信卫星	(41)

4.3	卫星通信系统的组成与参数	(42)
4.4	多址方式与信道分配技术	(45)
4.5	调频通信系统	(49)
4.6	数字通信系统	(53)
4.7	卫星数据分组通信系统	(54)
4.8	国际通信卫星组织的 Intelsat-VI 简介	(56)
4.9	VSAT (甚小口径天线终端) 系统	(57)
4.10	国际海事卫星通信系统 (Inmarsat)	(59)
4.11	(陆地) 卫星移动通信系统	(62)
	小结	(64)
	习题	(65)
附录 4.1	等效噪声温度公式推导	(66)
附录 4.2	调频制增益公式的推导	(67)

第五章 光纤通信系统

5.1	概述	(69)
5.2	光纤传输线	(71)
5.3	光发信机	(77)
5.4	光接收机	(88)
5.5	光纤无源器件	(96)
5.6	光纤通信系统的总体设计和技术发展	(97)
	小结	(105)
	习题	(106)

第六章 计算机通信网

6.1	概述	(107)
6.2	计算机通信网的硬件配置	(109)
6.3	网络拓扑、数据交换与信息流控制	(111)
6.4	计算机通信网络协议	(118)
6.5	通信控制规程	(122)
6.6	计算机通信网络实例简介	(130)
	小结	(135)

习题.....	(136)
---------	-------

第七章 数字程控电话交换基础

7.1 概述	(137)
7.2 数字交换原理	(140)
7.3 数字程控交换机基本组成	(148)
7.4 程序控制基本原理	(153)
7.5 数字程控交换系统示例	(165)
小结.....	(172)
习题.....	(173)

第八章 移动通信系统

8.1 概述	(174)
8.2 移动无线通信网基本结构	(175)
8.3 信道共用和信道选择方式	(177)
8.4 信令、系统监控与交换	(179)
8.5 移动通信的电波传播特性	(184)
8.6 频率配置和干扰	(186)
8.7 GSM 系统简介	(190)
小结.....	(197)
习题.....	(199)

第一章 通信系统概论

1.1 通信系统的组成

通信的任务是克服信息源与收信者之间在地理（距离）上的障碍，迅速而准确的传送信息。

传送信息的方式是多种多样的，而且取决于社会生产力的发展水平。中国古代以点燃烽火传递预先约定的信息（比如，表示敌军的入侵），也可以说是一种通信手段。现代社会是一个信息社会，通信的重要性更加突出，成为推动人类社会文明、进步和发展的推动力。现代通信是以电信号的形式传递语音、数据、图象和文本等信息的。

通信系统是传送信息所需设备的总和。粗略地可分为信息源、发送设备、传输媒介、接收设备和收信者，如图 1-1 所示。下面分别介绍各个组成部分的内涵及其功能。

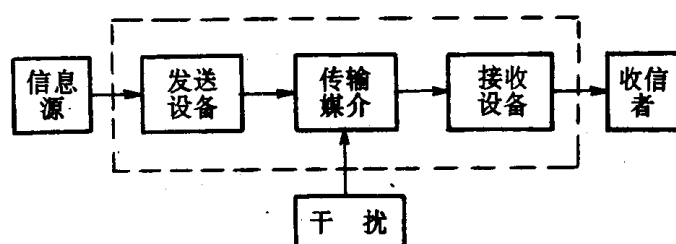


图 1-1 通信系统的一般模型

信息源和收信者：信息源输出的信号可以是电话机、摄像机送出的话音、图象信息，也可以是计算机、电传机送出的脉冲（符号）序列；收信者可以是人，也可以是设备。

发送设备：信息是通过传输媒介进行长距离传输的。发送设备的任务是将信息源与传输媒介匹配起来，即对信源来的信号进行处理，使之转换为适合于媒介传输的信号形式。例如传输媒介是无线信道时，由于电话信号频率约为 $300\sim 3400\text{Hz}$ ，很难通过天线辐射出去。必须在发送设备中通过调制的方法将电话信号搬移到适合天线辐射的较高的射频频段，使电话信号与传输媒介相匹配。

传输媒介：是用以传送信息的媒介，其特性决定了发送设备采用的信号变换方式。从物理特性来分类，传输媒介可分为有线和无线两大类。有线可以是光纤或电缆；无线媒介可利用的频段从中、长波到激光，有较宽的频段。在不同的频段，利用不同性能的设备和配置方法，可组成不同的通信系统。比如，在以下几章将讨论的短波、微波中继、卫星和移动通信系统均是媒介为无线的通信系统。通信系统中，信号通过媒介一般要经过长距离传输。传输损耗将使进入接收设备的信号十分微弱，极易受到噪声（对于通常予以考虑的热噪声，它总是存在的，除非环境温度达到绝对温度的零度，即摄氏零下 273 度）的干扰。

因此, 可以认为系统的干扰是由传输媒介引入的。

接收设备: 接收设备的作用有两个方面: 1. 对接收信号进行与发送设备相反的变换处理, 以便恢复发端信息源送出的信号。2. 由于接收的信号已叠加有噪声干扰, 接收设备应尽可能的抑制干扰, 使所恢复的信号尽可能准确。

图 1-1 所示的系统是单向的传输系统。广播、无线寻呼系统等即为单向的通信系统。但一般的说, 作为信息交流的通信系统通常是双向的, 比如电话。此时通信的两端都设置有发、收信设备。当然, 传输媒介也应当是能双向传输的。

作为通信系统, 信息的传输是必不可少的, 但是作为一个完整的通信网来说, 信息在多用户之间的交换也是必不可少的。

对于信息源和收信者为计算机的通信系统, 通常是由通信系统的发、收设备(接口)和传输媒介将众多的计算机、终端设备连接起来, 并配以相应的网络软件, 使计算机、终端之间按一定的规程交换信息, 共享网络资源, 这就是计算机通信网, 将在第六章专门讨论。

1.2 通信系统的分类

通信系统的分类方法较多, 通常采用按传输信号特征分类, 和按传输媒介及系统构造特点来分类的方法。

一、按传输信号特征分类

在“信号与系统”等课程中我们已经知道有两类信号: 模拟信号和数字信号。模拟信号在其取值范围内是连续的, 而数字信号的取值只有有限个离散值。比如, 在 $0 \sim 1$ 之间取值的模拟信号可取 $0 \sim 1$ 之间的任何值, 即有无限多个取值; 而数字信号, 比如 $(0, 1)$ 的二进制信号, 其取值不为 0, 便是 1。只有这两种取值。而这些“信号的取值”正代表了所传输的信息。

以信道(传输媒介可理解为狭义的信道)上传送的是数字信号还是模拟信号, 可将通信系统分为数字通信系统和模拟通信系统两类。

数字通信系统与模拟通信系统相比较, 有如下的特点:

1. 抗干扰能力强。若发端以发 $-1V$ 和 $+1V$ 分别表示 0 码和 1 码。传输到接收端后, 接收信号(经放大后仍为 $-1V$ 或 $+1V$)已叠加了干扰, 但只要干扰的幅度(绝对值)小于 $1V$ 。就不会改变发送信号的极性, 而收端按“信号+噪声”的极性来判决是“0”, 还是“1”码就不会出现错误。这相当于将噪声干扰的影响完全去除了。对于模拟通信系统, 由于发出信号的取样是连续的, 传输过程中即使叠加有较小的干扰, 接收端也无法完全消除它而准确恢复原有信号。

2. 电路易于集成化, 系统可靠性高。

3. 便于采用各种数字信号处理技术; 易于与计算机接口。

4. 便于将电话, 图象和数据等业务结合起来, 实现综合业务通信。

5. 就目前的技术状况而言, 一般说数字通信系统频带利用率较低。比如, 一路模拟电话占用 $4kHz$ 带宽, 而一路 PCM(脉冲编码调制)数字电话的速率为 $64kb/s$, 若采用二进制编码, 至少需要 $32kHz$ 的带宽。但是, 高效编码和调制技术, 以及数字信号形成技术的

最新发展,已使数字通信系统在这一方面正在赶上并超过模拟通信系统。

由于通信发展的历史原因,各国(特别是发达国家)曾先发展模拟通信系统,但数字通信系统是发展方向。今后,我国的公用通信干线网将以发展数字通信网为主。

二、按传输媒介和系统组成特点分类

实用通信系统都是针对特定的传输媒介,并遵循有关国际标准组成的。实用的通信系统有下述5类:

1. 短波通信系统

它工作在 $2\sim 30\text{MHz}$ 的短波波段,传输带宽窄,系统容量小。由于电离层对电波的反射,信号可以传送很远的距离,但传播特性随时间变化。短波系统主要用于特殊业务和军事通信。

2. 微波中继通信系统

采用微波波段($2\sim 13\text{GHz}$)进行通信,传输带宽宽,系统容量大。由于微波的视距传播特性,需要相隔几十公里设置一个中继站,以达到长距离通信的目的。

3. 卫星通信系统

它是以卫星作为中继站的微波通信系统。利用三颗同步卫星可以覆盖全球,是越洋通信的主要手段之一。

4. 光纤通信系统

光纤通信系统具有容量大、成本低(并节省有色金属)的优点。由于新器件、新工艺和新技术的不断推出,性能日益完善,已广泛用于大容量通信干线。横跨大西洋、太平洋的海底光缆通信系统已经开通。

光纤与电缆相比,具有成本低、带宽宽的优点。我国今后不再敷设新的长途电缆线路,而是全部采用光缆(光缆内有若干条光纤)。

5. 移动通信系统

移动通信系统适应了现代社会人们活动频繁,并随时随地都要进行通信的要求,所以近年来发展十分迅速。目前的蜂窝公用系统和专用调度系统已发展成无线、有线融为一体,移动、固定用户互联的通信网。

1.3 通信技术的发展状况

一、通信技术的发展历史

通信技术发展史上的重要事件如下:

19世纪30~50年代:1838年莫尔斯发明有线电报,至1844年已能传送40英里;1858年,大西洋海底电缆第一次解决了越洋通信,但原始的电缆带宽极窄,90个字的电报需要花费67分钟。

19世纪70年代:1876年贝尔发明电话;1873年马克斯韦尔提出电磁波辐射原理。

19世纪末:1895年马可尼(波波夫)发明无线电报。

20世纪初:1901年跨越大西洋(长波)无线电报开通;1907年发明电子管,数年后开

始用于长、中、短波的电报、电话；1918年调幅广播和超外差收音机问世；1925年出现明线三路载波电话。

30年代：调制理论和多路复用技术的发展；1936年调频广播开播；1937年发明脉冲编码调制；1938年广播电视开播。

40年代：40~45年二次大战刺激了雷达和微波通信的发展；1948年发明晶体管；香农提出信息论。

50年代：1950年时分多路用于电话；1958年发射第一颗通信卫星。

60年代：激光器件出现和完善；发明集成电路；1962年第一颗同步通信卫星发射入轨；彩色电视问世；出现高速计算机；数字传输理论与技术迅速发展。

70年代：大规模集成电路出现和发展；1977年第一条光纤通信线路投入运行；商用国际卫星通信系统建立；程控数字交换机进入实用阶段；微处理机在通信领域的应用迅速发展。

80年代：超大规模集成电路制成；光纤通信进入实用阶段；移动通信的迅速发展；综合业务数字网的崛起。

二、我国通信发展状况

我国通信事业近年来发展十分迅速。预计到2000年，我国通信网局用交换机总容量达1.7亿门，电话机总数约1.05亿部；长途干线电路240万路；蜂窝移动电话达1500万户，无线寻呼用户约2500万户。

1.4 移动通信系统的质量指标

在设计或评价一个通信系统时，将涉及通信系统的质量指标。通信系统最主要的质量指标是有效性和可靠性。

有效性是指在给定的信道内能传送信息的多少，而可靠性是指接收端所恢复信号的准确程度。

对于模拟通信系统，工程上常用可传输的电话信号路数（简称话路数）来衡量传输信息的多少。因此，系统有效性的不高，就转化为在给定信道（即给定带宽）内可传话路数的多少。比如，电话信号经单边带调制后的信号带宽比调频后的带宽窄。因此，在同样的信道带宽时，可传送单边带信号的路数将比调频的路数多，也就是有效性高，或者说频带利用率高。

模拟通信系统的可靠性用接收设备输出端的信噪比（平均信号功率对噪声功率之比）来表示。对于电话信号，一般要求20~50dB（对移动电话质量要求低，而商业长途电话质量要求高，可达50dB）。电视信号的信噪比在40dB左右。

单边带调制和调频相比较，在相同的接收机输入信噪比条件下，调频系统的输出信噪比将大于单边带系统，即调频系统有更高的可靠性。可以看出，可靠性与有效性是矛盾的，并可相互转换。

数字通信系统的有效性是以在给定信道内的信息传输速率 R_b 来表示的。信息速率的单位是比特/秒（b/s）。比特（bit）是信息量的单位，对于（0，1）等概出现的二进码，一个

码元（或称符号）所携带的信息量为 1bit。为了提高有效性（在相同信道带宽时提高信息传输速率），可采用 M 进制（ $M > 2$ ）传输。 M 进制码元（符号）有 M 个取值，如果 M 种取值是等概的，则一个 M 进制码所携带的信息量为 $\log_2 M$ 比特。比如，一个四进制或八进制码携带的信息量为 2 或 3 比特。

传输数字信息所需带宽只与码元（符号）速率有关，而与 M 值无关。所以，采用多进制传输可提高通信系统的有效性。

若 M 进制信号的码元速率 R_b （其单位为波特，baud），则其信息速率 R_b 为：

$$R_b = R_b \log_2 M \quad (1-1)$$

数字通信系统的可靠性用比特或码元（符号）错误概率来衡量。误比特率或信息错误概率 P_b 为

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

误码率或码元（符号）错误概率为

$$P_{\text{码}} = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

第二章 短波通信系统

短波通信使用 3~30MHz 的短波波段,但实际上现有的短波通信设备覆盖了 2~30MHz 的范围。

由于短波信道频带窄,传播特性不稳定,干扰严重,因此短波通信一般不作为公用通信网的传输手段,但是,它是一种廉价的远距离通信手段,被广泛用于政府、外交、气象和军事等专业部门。

2.1 短波的传播特性

短波波段的电波有天波和地波两种传播形式。地波传播损耗随频率的升高而增大,且与传输路径状况密切有关,只能在几十公里以内通信,不宜作长距离通信。在距离超过 200km 时,电波传播主要取决于天波。天波依靠电离层对电波的反射,可建立几千公里的远距离通信线路。在天波和地波作用距离之间的(几十至一百多公里)区域内,短波信号很弱,称为寂静区。

一、电离层的结构和电特性

电离层是地面上空的一个区域,在该区域中,稀薄的空气在太阳紫外线作用下被充分地电离,它可反射或吸收无线电波,而这种作用的大小与电子密度密切相关。通常,将电离层又分为 D、E 和 F 三层:

D 层:离地面高度 60~90km。它在白天太阳照射下才形成,夜间消失。D 层不足以反射短波,但都给穿透 D 层的电波以较大的吸收损耗。所以 D 层又称为吸收层。随着频率的降低,吸收损耗加大。当工作频率低于某一“最低可用频率”时,过大的吸收损耗(同时较低频段干扰也较大)将使通信中断。

E 层:高度 100~120km。与 D 层一样,在太阳照射下形成,能对短波起反射作用。但夜间 E 层近于消失,失去对短波的反射作用。

F 层:对短波有良好的反射作用,也称反射层。它对短波的远距离传播起重要的作用。F 层又分为 F_1 和 F_2 层; F_1 层高度为 170~220km,电子密度较 F_2 层低,夜晚明显减弱; F_2 层高度在 225~450km 左右,夜间虽不完全消失,但电子密度较白天降低一个量级,保持了对短波的反射作用。

图 2-1 可以用来很好地说明电离层的特性:由“中午”的曲线可以看出,白天存在有 D、E、 F_1 和 F_2 层。从七、八十公里的 D 层开始,随着高度的增加,电子密度将迅速增加(达到 E 层),使其具有反射短波的能力。随着高度进一步的增加,电子密度继续增加(达到 F_1 、 F_2 层)、反射能力更强。但在夜晚(见“午夜”曲线),D、E 和 F_1 层消失, F_2 层的电子密度也减少一个量级,但仍能对短波起反射作用。此外,从图上还可以看出,夜晚 F_2 层(电子密度最大处)的高度也有所下降。

由于太阳辐射是不规则的，所以电离层的电子密度和高度将随季节、一天中的不同时刻、以及太阳黑子活跃性有较大的变化。此外，太阳黑子常出现耀斑暴发，将引起电离层的强烈的短时间骚动。

二、多径传播

在短波的电离层反射传播过程中，电波可以通过不同的路径到达接收端。在图 2-2 中示出可能的一些反射传播模式，反射主要在 E、F₂ 和大地之间。

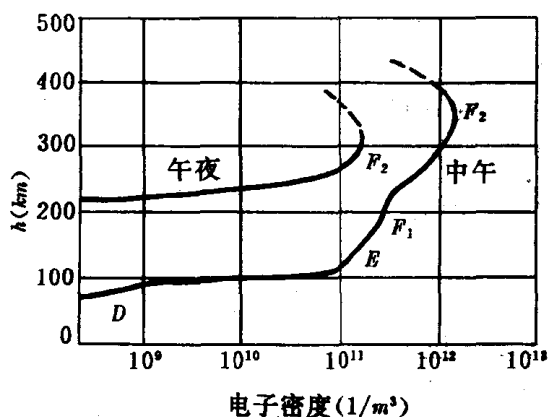


图 2-1 电离层各层高度与电子密度的关系

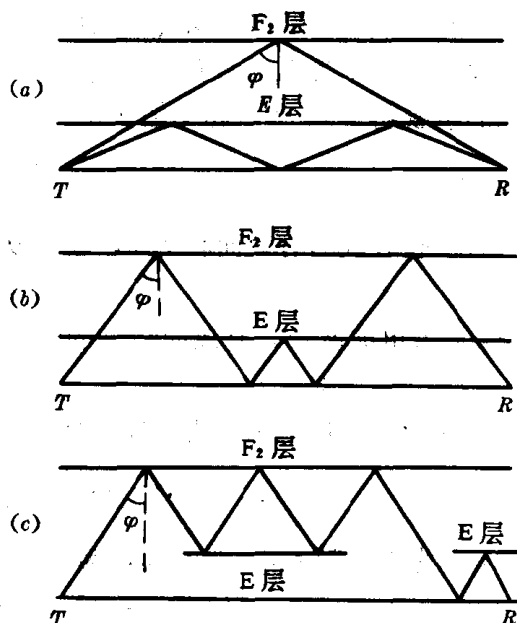


图 2-2 电离层可能出现的传播模式

电波通过多条路径传播到接收端的现象称为多径传播，所建立的通信线路又称为多径信道。它对通信系统的性能有较大的影响：使接收信号（起伏）衰落；信道带宽变窄。这些不利影响将在下节详细讨论。

三、最高可用频率

对于电离层各分层的电子密度，都存在一个相应的最高频率 f_c ，称为临界频率。在此频率时，该层对垂直入射波的电波将起反射作用；而当频率高于 f_c 时，垂直入射的电波将穿出该层。如果电波是以入射角 φ 斜射 ($\varphi > 0^\circ$ ，入射角定义见图 2.2) 电离层，频率为 f_c 的电波不会穿出该层，而是更高的某一频率 f_{max} 才穿出该层。 f_{max} 被称为在入射角为 φ 时的最大可用频率，它可以表示为：

$$f_{max} = f_c \sec \varphi \quad (2-1)$$

当 $\varphi = 0^\circ$ 时， $\sec = 1$ ； $\varphi = 90^\circ$ 时， $\sec \varphi = \infty$ 。可见 $f_{max} \geq f_c$ 。

在设计短波通信线路时，工作频率采用接近于最高可用频率是合适的。这是因为，低频率的电波将受到较大的吸收损耗；同时，对于较低频率的电波，电离层的各分层都可能对它产生反射，多径传播效应严重。整个电离层的最高可用频率实际上为电子密度最大的

F₂层的最高可用频率。如果较高的频率(均穿透D、E、F₁层),而在F₂层上又只有一个反射点,理论上只有一条传播路径,从而避免了多径传播带来的种种弊端。

在实际应用中,由于电离层特性的不规则变化,为避免电波可能穿透电离层而不被反射回地面,通常将工作频率取在(0.8~0.9) f_{max} 。

四、线路传播损耗

短波传播线路的损耗 L 包括自由空间传播损耗 L' , 电离层吸收损耗 L_a , 地面反射损耗 L_g 和系统额外损耗 L_s 。

下面首先推导自由空间传播损耗 L' 的公式。

设发射功率为 P_t 且发射天线各向均匀辐射。以发射点为圆心, d 为半径的球面上的单位面积的接收功率 P_0 为(参见图 2-3)

$$P_0 = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (2-2)$$

若接收天线的有效面积为 S , 在接收天线无方向性时有

$$S = \lambda^2/4\pi \quad (2-3)$$

其中, λ 为电波波长, 有效面积 S 的天线接收功率 P_R 为

$$P_R = P_0 S \quad (2-4)$$

定义天线无方向性时的自由空间传播损耗 L' 为

$$L' \triangleq \frac{P_t}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2 \quad (2-5a)$$

其中, f 为电波频率, c 为光速, 为 3×10^8 km/s。于是, 以分贝计的自由空间损耗为

$$L'(\text{dB}) = 32.44 + 20\lg d(\text{km}) + 20\lg f(\text{MHz}) \quad (2-5b)$$

在图 2-4 的短波电离层反射信道中, 电波在发射和接收 A、B 两点之间的实际传播路径长度为 r , 所以自由空间损耗表示为

$$L(\text{dB}) = 32.44 + 20\lg f(\text{MHz}) + 20\lg r(\text{km}) \quad (2-6)$$

由 2-4 所示的电波传播示意图, 可得 r 为

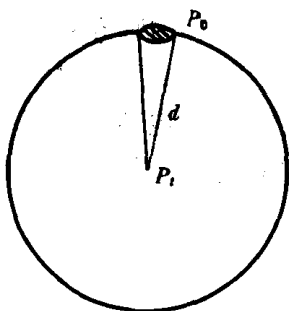


图 2-3 球面上的功率流

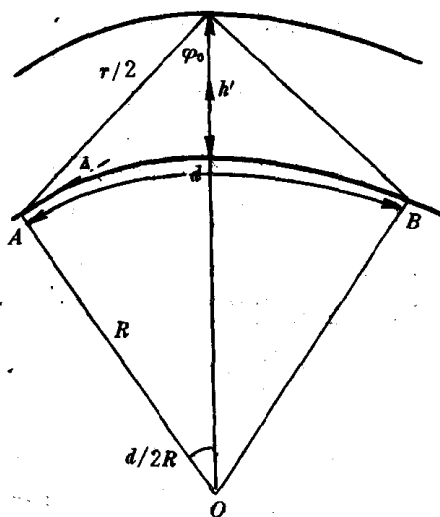


图 2-4 天波传播距离示意图

$$r = \frac{2R(1 + \frac{h'}{R})\sin \frac{d}{2R}}{\cos \Delta} \quad (2-7)$$

其中： Δ 为电波射线仰角； d 是通信距离（也称大圆距离）； R 为地球半径（等于 6378km）； h' 为电离层高度。

吸收损耗 L_a 主要由 D 和 E 层产生。它的数值难以准确计算，即使是采用经验公式，计算过程也十分复杂。吸收损耗与 $D(E)$ 层的吸收指数 I 、发射电波仰角、工作频率和吸收区（电波入射电离层 100km 高处）的地理位置有关。吸收指数越大，吸收损耗也越大。而吸收指数 I 与太阳黑子数“12（滑动）平均值” R_{12} 和太阳天顶角（太阳升高大于 102 度后（夜间）， $I=0$ ，无吸收损耗）有关。电波发射仰角越小，有利于降低吸收损耗。工作频率越高，吸收损耗越小。而且，当工作频率较高（比如大于 6MHz）时，吸收区地理位置不同，对吸收损耗的影响不大。

吸收损耗的计算过程这里不再介绍，有兴趣的读者请参阅其他有关资料。通常，吸收损耗在 6~25dB 之间。注意它与天顶角（反射区的当地时间）有关，夜晚 D 、 E 层消失，吸收损耗近于 0。

地面反射损耗 L_g 与地面状况、仰角和工作频率有一定关系。作为工程计算，可取一次地面反射的反射损耗为 20dB，而海面二次反射损耗可忽略不计。

所谓系统额外损耗是指除上面三种损耗（ D 、 L_a 和 L_g ）之外，还有一些尚未为人们所完全认识和难以准确计算的损耗，统称为系统额外损耗。额外损耗的数值与纬度、季节、本地时间和通信距离有关，通常由统计得到。同时，还应考虑系统裕量（由于上述吸收损耗 L_a 为中值，且系统额外损耗也是随时间而变化的，必须留有一定裕量）以保证较高的通过率。在中纬度地区， L_e 可取 15~18dB（含裕量）。

五、干扰

在短波波段的干扰主要有大气噪声，工业干扰和电台干扰。天电（雷电）是大气噪声的主要来源，它对长波的干扰最强，中、短波次之，对特高频的干扰可忽略。

工业干扰由各种电气设备和电力网产生。在工业区，工业干扰强度远大于大气噪声的干扰，是线路干扰的主要来源。当接收机位于工业城市内时，应将允许的最低接收信号功率提高 10dB，方能正常工作。

电台干扰在短波通信中往往是十分严重的问题，这是因为短波频段窄，用户日益增多所致。系统设计时应有相应的考虑，比如采取实时选频（信道自动切换），采用定向天线等。

2.2 多径传播对通信系统性能的影响

一、多径延时差

上节已经提出，在短波电离层反射信道中，发端发射的电波可能通过多条途径传播到收端。由于不同路径的长度及其对电波的延时不同，信号到达收端的时间有先有后，其（最大）时间差称为多径延时差。它的大小决定了多径传播对通信系统性能影响的程度。