

面向21世纪

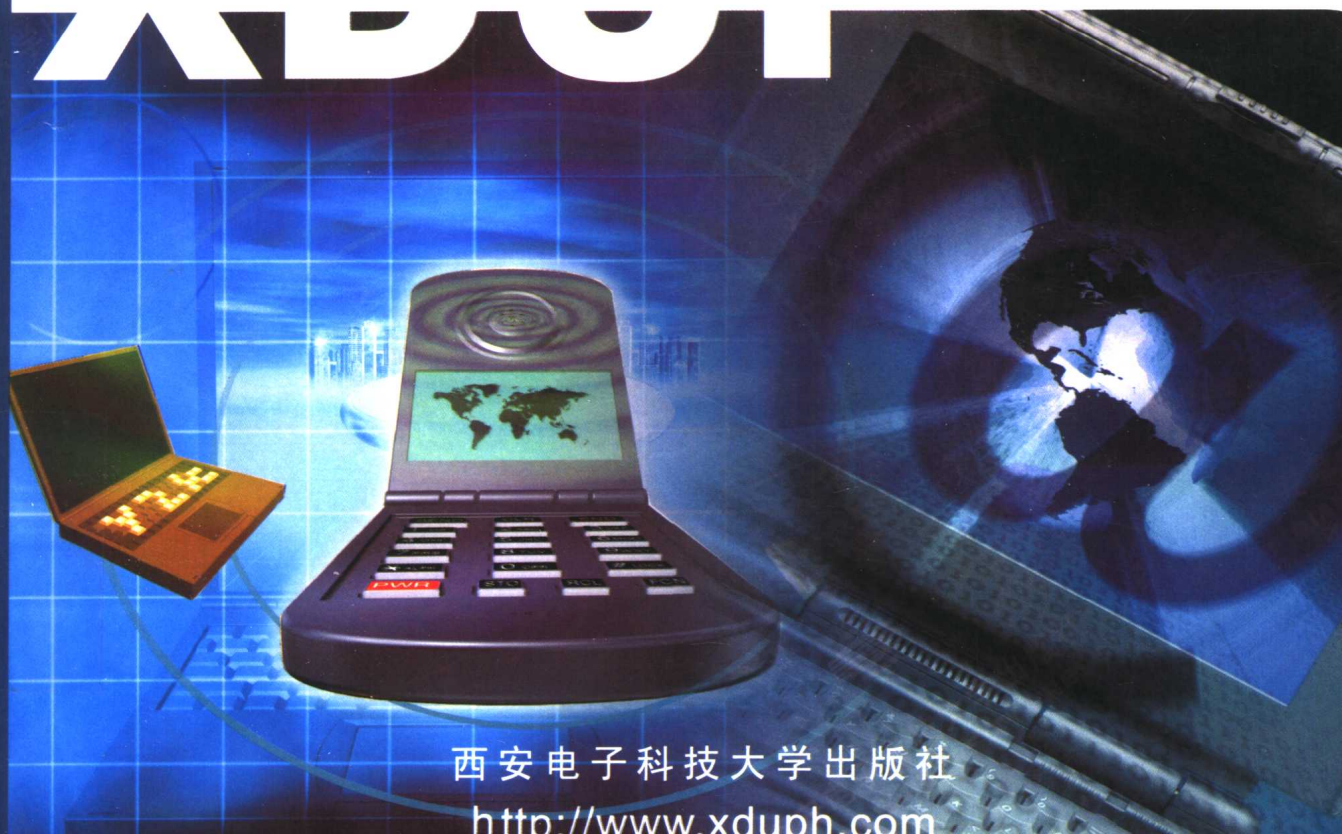
高等学校信息工程专业系列教材

现代通信技术与网络应用

Modern Communication Technology and Network Practices

张宝富 张曙光 田 华 编 著

李玉权 主 审



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等院校电子信息类专业系列教材

现代通信技术与网络应用

Modern Communication Technology and Network Practices

张宝富 张曙光 田华 编著

李玉权 主审



西安电子科技大学出版社

2004

内 容 简 介

本书系统地讲述了现代通信的相关内容,包括现代通信系统与网络的基本概念、数字通信和数据通信的基本原理、现代通信终端、现代电信交换、光纤通信、移动通信、数字微波通信、卫星通信、电话网络、蜂窝移动网络、数据与计算机通信网、多媒体网络等。

本书是通信与电子类专业的一本基础性教材,也是一本普及性读物,可供高等院校电子工程、通信工程、广播电视及相关专业作为教材使用,同时也可作为广大科技人员的自学用书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术与网络应用=Modern Communication Technology and Network Practices

/张宝富等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2004.2

(面向21世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1349-7

I. 现… II. 张… III. ①通信技术-高等学校-教材 ②计算机网络 高等学校-教材

IV. ①TN91 ②TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第121158号

策 划 马乐惠

责任编辑 龙晖 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安文化彩印厂

版 次 2004年2月第1版 2004年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21.625

字 数 510千字

印 数 1~4000册

定 价 23.00元

ISBN 7-5606-1349-7/TN·0255(课)

XDUP 1620001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类专业教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。这套教材预计在 2004 年春季全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会
2002 年 8 月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

光纤通信的出现使大容量的信息传输成为可能；移动卫星通信使得通信具有了个性化特征；通信技术与计算机技术的融合，更使得通信具有了智能化的特点。通信与计算机技术的蓬勃发展以及架构于其上的宽带综合业务数字网 ISDN 的迅速崛起，都标志着现代通信正成为信息网络的平台和信息产业的重要支柱。

本书共分为 9 章。第 1 章概述，介绍了现代通信的概念、通信系统模型、网络概念及组成。第 2 章现代通信终端，介绍了电话、传真、图像终端、多媒体终端等现代通信终端的基本原理。第 3 章现代传输技术，介绍了光纤通信、移动通信、数字微波中继通信、卫星通信的基本原理及主要的关键技术。第 4 章现代交换技术，介绍了交换的基本原理及主要的交换方式。第 5~8 章介绍了现代通信网络的应用情况，包括电话通信网、移动通信网、数据和计算机通信网和宽带接入网。第 9 章介绍了现代通信网络的发展。

本书的写作特点是：力求按照循序渐进的原则，将现代通信的基本概念、所需的技术基础、各种通信技术手段以及通信网络应用等内容，融成一个有机的整体，避免将各种通信技术手段进行罗列。教材中安排了如模拟信号的数字化、数字复接、数字传输体制、数据传输、数据通信协议等内容，这些内容在原理课中并非重点，但对于后面的通信技术来说又是必备的。这样的安排可使现代通信原理与现代通信技术之间衔接得更好，便于教学和读者自学。

本书的第 1、2、8 章由张宝富编写，第 4、5、7、9 章由张曙光编写，第 3、6 章由田华编写。在编写的同时，编者得到了诸多专家的指导，也听取了多位教师的建设性意见以及学生提供的反馈意见，在此向他们表示诚挚的感谢。

由于本书涉及的内容是跨专业的，写作难度大，书中难免存在不足之处，请读者多提宝贵意见。E-mail: zhangbaofu@163.com。

编 者
2003 年 11 月

目 录

第 1 章 概 述

1.1 通信的基本概念	1	1.3 数据通信	38
1.1.1 通信系统模型	1	1.3.1 基本概念	38
1.1.2 电磁频谱	2	1.3.2 串行与并行数据传输	39
1.1.3 通信信道与通信容量	3	1.3.3 同步与异步数据传输	40
1.1.4 基带与频带传输	10	1.3.4 调制与解调	42
1.1.5 通信方式	10	1.3.5 传输格式与通信协议	43
1.1.6 模拟与数字通信	11	1.4 多路复用与多址通信	46
1.1.7 通信系统性能与噪声	11	1.4.1 频分复用与多址	47
1.2 数字通信	14	1.4.2 时分复用与多址	48
1.2.1 基本概念	14	1.4.3 码分多址复用	50
1.2.2 信源的数字化	16	1.4.4 波分复用	50
1.2.3 数字复接	24	1.5 通信网络及其构成	51
1.2.4 数字传输	25	1.6 现代通信的发展	53
1.2.5 数字编码与差错控制	27	习题	54
1.2.6 数字调制	31		

第 2 章 现代通信终端

2.1 电话机	56	2.4 多媒体计算机	72
2.1.1 电话机的组成原理	56	2.4.1 多媒体的主要特点	72
2.1.2 电话机的种类和功能	57	2.4.2 多媒体计算机的关键技术	73
2.2 传真机	60	2.4.3 多媒体计算机的组成	74
2.2.1 传真机的种类	60	2.5 现代多媒体终端	74
2.2.2 典型传真机的组成原理	61	2.5.1 掌上电脑	74
2.3 图像终端	70	2.5.2 多媒体手机	75
2.3.1 图像获取设备	70	2.5.3 信息电话	77
2.3.2 图像显示终端	71	习题	78

第 3 章 现代传输技术

3.1 光纤通信	79	3.1.1 光纤通信的特点	79
----------------	----	---------------------	----

3.1.2 光纤及其传输特性	82	3.2.8 功率控制.....	108
3.1.3 光发送机	86	3.2.9 组网技术.....	110
3.1.4 光接收机	90	3.2.10 移动数据服务.....	119
3.1.5 光放大器与中继器	92	3.3 数字微波通信.....	125
3.1.6 光纤链路设计	93	3.3.1 微波通信概述.....	125
3.1.7 WDM 系统	93	3.3.2 数字微波通信系统.....	126
3.2 移动通信.....	95	3.3.3 微波信道电波传播.....	127
3.2.1 移动通信的特点	95	3.3.4 SDH 数字微波通信系统	128
3.2.2 移动通信的发展	96	3.3.5 数字微波通信的应用.....	129
3.2.3 移动通信系统	98	3.4 卫星通信.....	129
3.2.4 移动通信中的电波传播	99	3.4.1 概述.....	129
3.2.5 话音编码与信道编码	101	3.4.2 卫星通信系统的组成 与网络结构.....	133
3.2.6 数字调制与分集接收	104	习题.....	138
3.2.7 多址方式	107		

第 4 章 现代交换技术

4.1 引言.....	140	4.3.3 信元交换.....	156
4.2 交换的有关概念.....	143	4.4 交换机典型的组成原理.....	162
4.2.1 接线器和接续网.....	143	4.5 交换机的控制原理.....	169
4.2.2 交换和交换机的基本概念.....	144	4.6 ATM 交换机	172
4.2.3 电交换与光交换.....	145	4.7 IP 交换机	178
4.2.4 集中控制与分散控制.....	146	4.8 光交换机.....	181
4.3 主要的几种交换方式及其原理.....	147	4.9 移动交换机.....	183
4.3.1 时隙交换.....	147	习题.....	185
4.3.2 分组交换.....	152		

第 5 章 电话通信网

5.1 引言.....	187	5.3.3 国际电话编号.....	195
5.2 电话网的结构	188	5.4 电话网的业务及服务质量.....	196
5.2.1 市内电话网和本地电话网	189	5.4.1 电话网的业务种类.....	196
5.2.2 长途电话网	191	5.4.2 电话网的服务质量.....	198
5.2.3 国际长途电话网	192	5.5 电话网的支撑网.....	200
5.3 电话网的编号	193	5.5.1 数字同步网.....	200
5.3.1 本地网的编号	193	5.5.2 公共信道信令网.....	204
5.3.2 国内长途网的编号	194	5.5.3 电信管理网.....	209

第6章 移动通信网

6.1 引言.....	213	6.5 无线寻呼网.....	253
6.2 GSM 数字蜂窝移动通信网.....	216	6.5.1 无线寻呼系统概述.....	253
6.2.1 系统组成.....	217	6.5.2 无线寻呼系统的组成与分类.....	254
6.2.2 网络结构.....	219	6.5.3 无线寻呼技术体制.....	255
6.2.3 无线空中接口.....	220	6.6 公用无绳电话网.....	256
6.2.4 网络控制与管理.....	227	6.6.1 CT-1 与 CT-2.....	256
6.2.5 GPRS.....	233	6.6.2 DECT.....	257
6.3 CDMA 数字蜂窝移动通信网.....	237	6.6.3 PHS.....	257
6.3.1 扩频通信.....	237	6.6.4 “小灵通”.....	257
6.3.2 CDMA 蜂窝移动通信技术 的演进与标准.....	239	6.7 卫星移动通信网.....	258
6.3.3 系统结构与特点.....	240	6.7.1 低轨道卫星移动通信.....	259
6.3.4 无线接口特性.....	244	6.7.2 “铱”系统.....	259
6.3.5 CDMA2000.....	246	6.7.3 “全球星”系统.....	260
6.4 集群移动通信网.....	250	6.8 第三代移动通信.....	260
6.4.1 集群通信的概念.....	250	6.8.1 基本概念.....	260
6.4.2 集群通信的特点与功能.....	251	6.8.2 发展历程.....	261
6.4.3 集群系统的分类.....	251	6.8.3 通信标准.....	262
6.4.4 典型的集群移动通信网.....	252	6.8.4 向第三代系统的演进.....	262
		习题.....	263

第7章 数据与计算机通信网

7.1 概述.....	264	7.3.3 帧中继业务应用.....	275
7.2 数字数据网 DDN.....	265	7.4 IP 网络.....	276
7.2.1 概述.....	265	7.4.1 概述.....	276
7.2.2 DDN 的结构与业务.....	266	7.4.2 TCP/IP.....	277
7.2.3 DDN 的应用.....	270	7.4.3 IP 电话.....	280
7.3 帧中继 FR.....	270	7.5 高速网络技术.....	286
7.3.1 概述.....	270	习题.....	288
7.3.2 帧中继技术原理.....	272		

第8章 宽带接入网

8.1 概述.....	289	8.2.2 HDSL.....	294
8.2 xDSL.....	291	8.2.3 ADSL.....	295
8.2.1 概述.....	291	8.2.4 VDSL.....	297

8.3 混合光纤同轴网 HFC.....	298	8.4.3 家庭宽带 FTTH.....	304
8.3.1 HFC 的概念.....	298	8.5 无线接入.....	305
8.3.2 HFC 的系统构成和频谱分布.....	298	8.5.1 无线接入的概念.....	305
8.3.3 局端系统 CMTS.....	300	8.5.2 无线局域网 WLAN.....	305
8.3.4 线缆调制解调器 CM.....	301	8.5.3 本地多点分配业务 LMDS	316
8.4 FTTx	301	8.5.4 直接广播卫星 DBS.....	317
8.4.1 光纤接入的基本概念	301	8.5.5 混合光纤无线 HFR.....	317
8.4.2 无源光网络 PON	303	习题.....	318

第 9 章 现代通信网络的发展

9.1 宽带 IP 网.....	319	9.3.3 IN 的实现方案与关键技术	327
9.1.1 IP 网的现状.....	319	9.4 虚拟专用网 VPN.....	328
9.1.2 宽带 IP 技术.....	320	9.4.1 VPN 的概念.....	328
9.2 多媒体通信网	321	9.4.2 VPN 的实现方法和接入方式	330
9.2.1 多媒体通信网的组成和特点	321	9.4.3 VPN 的业务类型.....	331
9.2.2 多媒体通信网的发展历史	321	9.4.4 VPN 业务的典型应用	332
9.2.3 中国公众多媒体通信网	322	9.5 个人通信.....	332
9.2.4 基于 IP 的多媒体通信业务.....	322	9.5.1 个人通信的概念.....	332
9.2.5 宽带多媒体通信网	322	9.5.2 个人通信的特点.....	333
9.3 智能网 IN	324	9.5.3 实现个人通信的途径.....	334
9.3.1 IN 的概念	324	习题.....	334
9.3.2 IN 的构成	325		

参考文献.....	336
-----------	-----

第1章 概述

自古以来,通信就是人们的基本需求之一。从3000多年前人们利用烽火台的火光传递信息,到1876年贝尔(Alexander Graham Bell)发明了电话;从1894年马可尼(Guglielmo Marconi)成功地发射了第一个无线电信号,到1970年光纤通信的出现,无不验证了这一点。这同时也表明了现代通信正处于电通信(如无线、微波、卫星等)和光通信(如大气光通信、光纤通信等)共存的格局,虽然通信的实现方法和具体的电路形式千差万别,但它们所涉及的通信的基本原理(如通信系统模型、通信的容量、通信的质量(有效性和可靠性)、数字化传输、多路通信、通信网络的基本组成等)是相对稳定的。对这些基本概念的理解将使读者快速理解任何可能产生的通信新技术。本章对它们进行了广泛而深入的讨论,为了简化,避免了复杂的数学推导,尽可能地列出了一些必需的公式。

1.1 通信的基本概念

人类社会进入信息时代以来,人们之间相互传递和交换信息日益频繁,这不仅改变了人类的生产和生活方式,而且对全球的政治、经济、军事领域产生了强烈冲击。现代通信作为信息传递和交换的手段,已成为信息时代的社会发展和经济活动的生命线。它克服了时间和空间的限制,使得大容量、远距离的信息传递和交换成为可能。

本书中的通信是指以电的形式来传递和交换信息的方式,即利用有线电、无线电、光或其他电磁系统对符号、文字、信号、图像、声音或任何性质的信息进行传递或交换。

完成信息的传递和交换要通过一套设备。将一个用户的信息传递到另一个用户的全部设施称为一个通信系统。通信系统传递信息量的大小(即通信容量)与其采用的电磁频谱有关。电磁能量可以由幅值连续的信号(通信中称为模拟信号)携带着向前传递,也可以由幅值不连续的间断信号(通信中称为数字信号)携带着向前传递,因此通信系统有两种最基本的类型,即模拟通信系统和数字通信系统。

1.1.1 通信系统模型

点与点之间建立的通信系统是通信的最基本形式,其模型可用图1.1表示。这一模型包括信源、变换器、信道、噪声源、反变换器和信宿等六个部分。

(1) 信源是指发出信息的信息源。在人与人之间通信的情况下,信源是指发出信息的人;在机器与机器之间通信的情况下,信源是发出信息的机器,如计算机或其他机器。不同的信源构成不同形式的通信系统,如对应语音形式信源的是电话通信系统,对应文字形式信源的是电报通信系统和传真通信系统等。

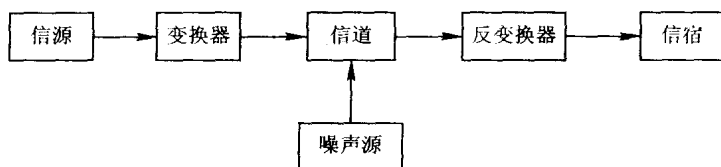


图 1.1 点到点通信系统模型

(2) 变换器的功能是把信源发出的信息变换成适合在信道上传输的信号。一般分几步完成：首先把非电信号变成电信号，然后对电信号进行变换和处理，使它适合信道传输。在现代通信系统中，为满足不同需求，需要进行不同的变换和处理，如调制、数/模转换、加密、纠错等。

(3) 信道是信号传输媒介的总称。不同的信源形式对应的变换处理方式不同，与之对应的信道形式也不同。从大的类别来分，传输信道的类型有两种，一种是电磁信号在自由空间中传输，这种信道叫做无线信道；另一种是使电磁信号被约束在某种传输线上传输，这种信道叫做有线信道。

(4) 反变换器的功能是变换器的逆变换。因为变换器把不同形式的信息变换和处理成适合信道传输的信号，通常这种信号不能为信息接收者直接接收，需要用反变换器把从信道上接收的信号变换为接收者可以接收的信息。

(5) 信宿是信息传送的终点，也就是信息接收者。它可以与信源相对应，构成人—人通信或机—机通信；也可以与信源不一致，构成人—机通信或机—人通信。

(6) 噪声源不是人为实现的实体，在实际的通信系统中客观存在，在模型中将它集中表示。实际上，干扰噪声可能在信源处就混入了，也可能从构成变换器的电子设备中引入。传输信道中的电磁感应以及接收端的各种设备中也都可能引入干扰。

1.1.2 电磁频谱

电磁能量(信号)几乎可以分布在无限的频率范围内，通信系统中所采用的电磁信号的频谱如图 1.2 所示。频率范围的划分如下：

(1) 话音频率 VF(Voice Frequencies): 300~3000 Hz 范围内的信号，并包含通常与人类语音相关的频率。标准电话信道带宽为 300~3000 Hz，统称话音频率或话音频带信道。

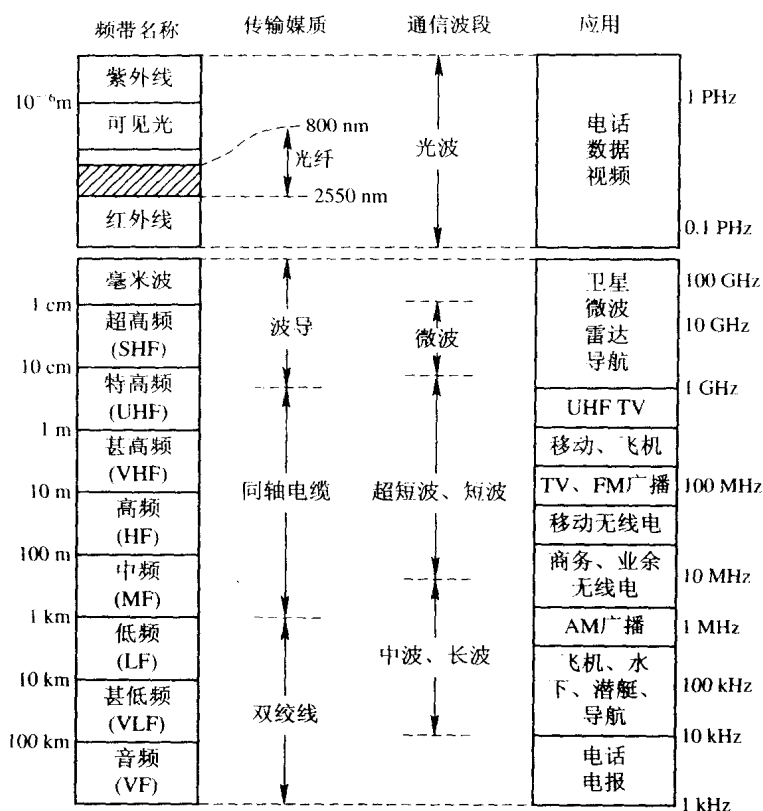
(2) 甚低频 VLF(Very Low Frequencies): 3~30 kHz 范围内的信号，它包括人类听觉范围的高端。VLF 用于某些特殊的政府或军事系统，比如潜艇通信。

(3) 低频 LF(Low Frequencies): 30~300 kHz 范围内的信号，主要用于船舶和航空导航。

(4) 中频 MF(Medium Frequencies): 300 kHz~3 MHz 范围内的信号，主要用于商业 AM 无线电广播(535~1605 kHz)。

(5) 高频 HF(High Frequencies): 3~30 MHz 范围内的信号，常称为短波(Short Wave)。大多数双向无线电通信使用这个范围。业余无线电和民用波段(CB)无线电也使用 HF 范围内的信号。

(6) 甚高频 VHF(Very High Frequencies): 30~300 MHz 范围内的信号，常用于移动通信、船舶和航空通信、商业 FM 广播(88~108 MHz)及频道 2~13(54~216 MHz)的商业电视广播。



占赫兹(GHz): 10^{-9} Hz; 大赫兹(THz): 10^{12} Hz; 拍赫兹(PHz): 10^{15} Hz;

图 1.2 通信系统中的电磁频谱

(7) 特高频 UHF(Ultra High Frequencies): 300 MHz~3 GHz 范围内的信号, 由商业电视广播频道 14~83、陆地移动通信业务、蜂窝电话、某些雷达和导航系统、微波及卫星无线电系统所使用。一般说来, 1 GHz 以上的频率被认为是微波频率, 它包含 UHF 范围的高端。

(8) 超高频 SHF(Super High Frequencies): 3~30 GHz 范围内的信号, 主要包括用于微波及卫星无线电通信系统的频率。

(9) 极高频 EHF(Extremely High Frequencies): 30~300 GHz 范围内的信号, 除了十分复杂、昂贵及特殊的应用外, 很少用于无线电通信。极高频亦称毫米波。

(10) 红外(Infrared): 红外频率是 0.3~300 THz 范围内的信号, 通常不认为是无线电波。红外归入电磁辐射, 通常与热有关系。红外信号常用于制导系统、电子摄影及天文学。

(11) 可见光(Visible Light): 落入人眼视觉范围(0.3~3 PHz)内的电磁频率。

习惯将红外、可见光等称为光频区域, 对应的电磁波称为光波, 光波通信系统已成为通信系统的一种主要传输技术。

1.1.3 通信信道与通信容量

通信信道是通信系统的重要组成部分, 是信号的传输媒体, 可以分为有线信道和无线信道。有线信道的电磁能量被约束在某种传输线上传输, 包括平行导体传输线、同轴电缆

传输线、微带传输线、波导传输线、光纤传输线等。无线信道有地波、空间波、天波等。

1. 有线信道

传输线通常分为平衡式和非平衡式两类。有线信道采用双线平衡线，两个导体承载电流，其中一个导体承载发出的信号，另一个承载返回的信号，这类传输称为差分或平衡信号传输。平衡线对的优点是大部分感应的噪声干扰(有时称共模电压)在两条线上相等，在负载端抵消。共模信号被抵消称为共模抑制(CMR)。共模抑制比(CMRR)通常是 40~70 dB。

只要两根导线都不与地相连，任何一对传输线都可以在平衡模式下工作，包括有两根中心导体和一个屏蔽线的同轴电缆。屏蔽线通常连接到地，以避免透过中心导体的静态干扰。

有线信道采用非平衡传输线，一根电线是地电位，另一根是信号电位，这种传输称为单端传输或非平衡信号传输。采用非平衡信号传输，地线可以作为其他信号传输线的参考。在这种情况下，信号传输到什么地方，地线也必须连接到那里。由于电线长度有阻抗、电感和电容，在地线任意两点之间有一较小的电位差，因此，地线不是理想的参考点，而且还会引入噪声。标准的两导体同轴电缆是非平衡线，屏蔽线通常连接到地。

明线电缆是双线并行导体，如图 1.3(a)所示。它仅仅由两根并行线组成，中间由空气隔离。间隔相等的设置绝缘衬垫可以保证两导体的距离恒定，两导体的距离通常在 2~6 英寸(1 英寸=2.54 cm)之间。在传输 TEM 波的两导体周围，绝缘体仅仅是空气。这类传输线的惟一优点是它的结构简单。因为没有屏蔽，所以明线传输线辐射损耗高并且易受噪声的影响，这些是明线传输线最大的缺点。因此，明线传输线通常在平衡模式下工作。

双线电缆是另一种双线平行导体传输线，如图 1.3(b)所示。双线电缆通常称为带状电缆。除了两导体间的衬垫用连续固体绝缘体取代以外，双导线与明线传输线本质上极为相似，这可以确保沿整个电缆均衡间隔。电视传输电缆两导体间的距离是 5~16 英寸。通常，绝缘体的材料是特氟隆和聚乙烯。

双绞线电缆是由两根绝缘的导体扭绞在一起而形成的。通常以对为单位，并把它作为电缆的内核，根据用途不同，其芯线要覆以不同的护套。相邻的线对要以不同的节距(扭绞长度)进行扭绞，以减少由于相互感应而形成的干扰。双绞线电缆的主要常数是电参数(阻抗、感抗、电容和电导率)，它们要随物理环境，如温度、湿度和机械压力以及制造工艺误差等因素的变化而变化。双绞线电缆如图 1.3(c)所示。

屏蔽电缆对是在平行双线导体传输线外包上导电的金属编织物。编织物要连接到地，起屏蔽作用，以减少辐射损耗和干扰，编织物可以避免信号辐射出去，也可以阻止电磁干扰到达内部的信号导体。屏蔽的平行线对如图 1.3(d)所示，它包括两个由固体绝缘体分隔的平行导体。整个结构是包裹在编织导管中，然后再覆盖保护的塑料外套。

同轴电缆。平行导体传输线适合于低频应用。然而在高频段，它们的辐射损耗和绝缘损耗很大。因此，同轴导体被广泛地用于高频应用以减少损耗并隔绝传输线路。基本的同轴电缆包括一个中心导体，周围是同心的(与中心距离相同)外部导体。在相对高的频段上，同轴外导体提供极好的屏蔽以防止外部干扰。然而在低频应用中，屏蔽的作用并不有效。同样，同轴电缆的外导体一般是接地的，这限制了它只能用于非平衡应用。

实际上有两种同轴电缆：空气填充型和固态柔韧型。图 1.3(e)给出空气填充型同轴电缆。

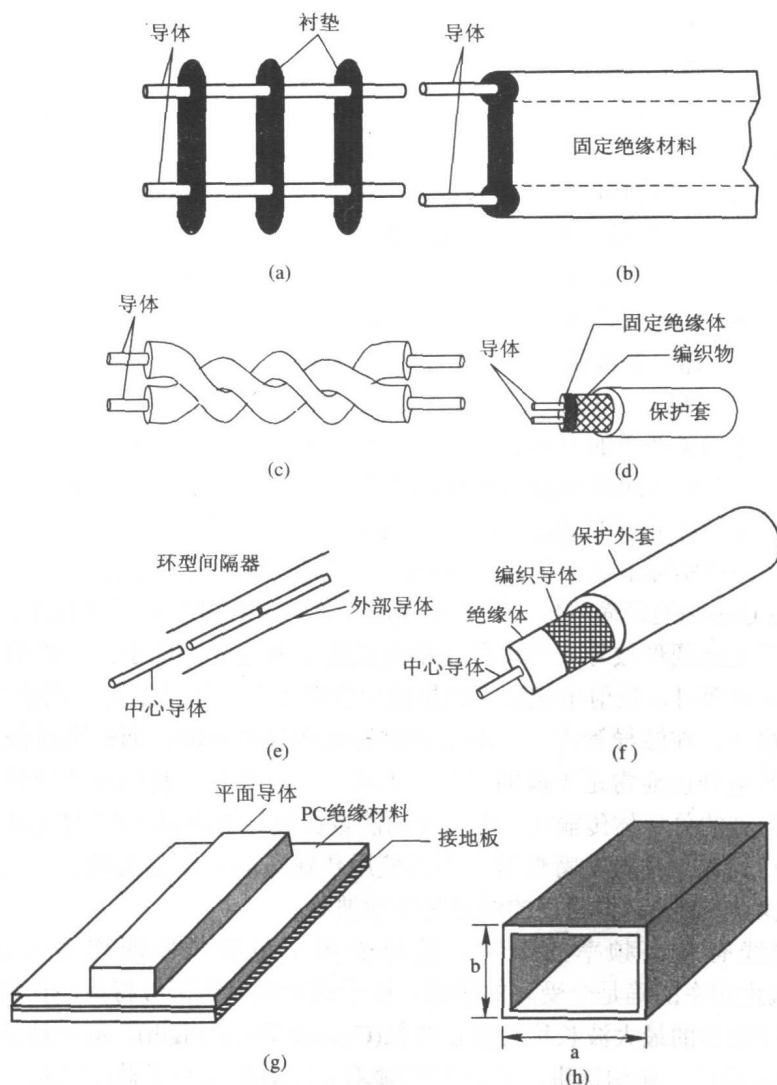


图 1.3 通信中的常用传输媒质

- (a) 明线电缆；(b) 双绞线电缆；(c) 双绞线电缆；(d) 屏蔽电缆对；
(e) 空气填充型同轴电缆；(f) 固态柔韧型同轴电缆；(g) 微带线；(h) 矩形波导

可以看到，中心导体被一同心的管状外部导体包裹，绝缘体是空气。外部导体被物理隔绝，由间隔器与中心导体隔离。间隔器由耐热玻璃、聚苯乙烯和其他一些绝缘体组成。图 1.3(f) 给出的是固态柔韧型同轴电缆，外部导体是柔韧的编织物，并与中心导体同轴，绝缘体是固态绝缘聚乙烯材料，以保证内外导体的电隔离。内导体是柔韧的铜线，可以是实心的也可以是空心的。空气填充型同轴电缆造价相对昂贵，为减少损耗，空气绝缘体必须对湿度无严格限制。固态柔韧型同轴电缆有较低损耗并且易于构造、安装和维护。两种同轴电缆都可以防止外部辐射，自身辐射少且比平行线的工作频段高。同轴电缆的主要缺点是昂贵且必须用于非平衡模式。

微带线应用于高频(300~3000 MHz)。在印制电路板(PC, Printed Circuit)上使用铜线构成的特殊传输线称为微带线或带状线,已在PC板上被用于元件的连接。同样,当传输线源端和负载端的距离只有几英寸或更小时,标准的同轴电缆传输线是不适用的,因为连接件、终接器和电缆本身都太大了。微带线仅仅是一个由绝缘体隔离的、与接地板分离的平面导体。图1.3(g)给出了一个简化的单轨微带线路。接地板作为电路的公共点,必须至少是上层导体宽度的10倍,而且要连接到地。微带线的长度在工作频率上通常是 $1/4$ 或 $1/2$ 波长,并等效于非平衡传输线。短路线通常优于开路线,因为开路线有较大的辐射。标准的传输线对于实际作为电抗元件或是调谐电路来使用是太长了。微带传输线可以用于构成传输线、电感、电容、调谐电路、滤波器、移相器和阻抗匹配设备。

平行传输线,包括同轴电缆,都不能有效地传输20 GHz以上的电磁波,这是由于趋肤效应和辐射损耗造成了严重的衰减。另外,平行传输线也不能用于传输较高功率的信号,因为高电压会导致两导体间的隔离绝缘材料的损坏。因此,在高于UHF的频率及微波中很少应用平行传输线。对于UHF和微波波段,还有多种传输线可供选择,其中包括光缆和波导等传输介质。光纤实际上是一个圆柱波导,光纤的具体内容将在第3章中详细讨论。

波导(Wave Guide)的最简单形式是一个空心导管,其横截面通常是矩形,如图1.3(h)所示,但也有圆形或椭圆形波导,可以限定电磁波能量的边界。由于波导管的管壁是导体,因此在它们的内表面可以反射电磁波。如果波导管壁是良导体且很薄,则壁内无电流流过,因此能量损耗很少。在波导管内,并不是依靠管壁传导能量的,而是通过波导管内的电介质传播能量,其电介质通常是干燥的空气。本质上,波导就是将同轴双导体传输线中的内导体抽出去而得到的单导体传输线。电磁波的能量在波导管内以“Z”字形来回反射并不断向前传播。在讨论波导的传输特性时,不再使用传输线的电压电流概念,而需要依据电磁场的概念(如电场和磁场),最常用的波导是矩形波导。

不像传输线有最高频率的限制,波导受限于最低频率即称为截止频率(Cut-off Frequency)。截止频率的确是个受限的频率,低于截止频率的信号将不能在波导中传播。相应的,允许通过波导的最大波长称为截止波长(Cut-off Wavelength)。截止波长定义为可在波导内传播的最大波长。换句话讲,只有工作频率对应的波长小于截止波长,电磁波才能在波导内传播。截止波长和截止频率由波导的横截面尺寸决定,若波导的横截面宽度尺寸为 a ,则其截止波长为 $\lambda_c=2a$,即截止频率发生在波长为 $2a$ 对应的频率上,同样意味着波导的横截面尺寸应该与传输信号的波长在同一个数量级上。

2. 无线信道

在地球大气层以内传播的电磁波称为陆地波(Terrestrial Wave),因此,在地球上两点或多点之间的通信称为地面无线电通信。陆地波会受到大气层以及地球表面的影响。在地面无线电通信中,电磁波的传播有若干种传播形式,究竟以哪种形式传播取决于系统的类型及外界条件。除地球大气引起传播路径改变外,电磁波总是以直线传播。实际上,在地球大气层内的电磁波有三种传播方式:地波、空间波(包括直射波和大地反射波)以及天波。

图1.4显示了在两个天线之间的基本传播形式。每一种无线电波都有相应的传播形式;然而,在某一频率范围内或某些特殊地形中,有些传播形式可忽略不计。频率低于1.5 MHz以下时,地波将提供最好的覆盖,随着频率的增高,地波损耗会迅速增加。高频波的传播

主要利用天波，甚高频以上的频率借助于空间波进行传播。

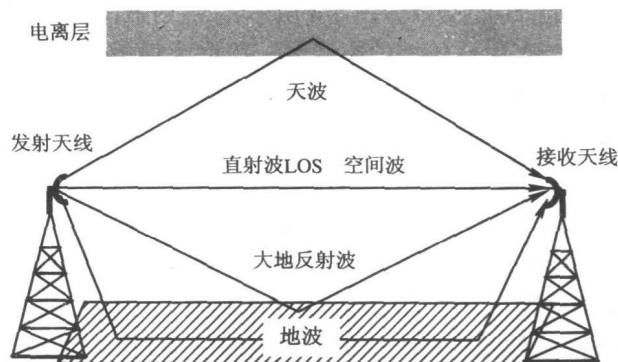


图 1.4 电磁波的三种传播模式

1) 地波传播

地波(Ground Wave)是沿地球表面传播的一种电磁波，地波有时也称为表面波(Surface Wave)。地波应该为垂直极化波，这是因为电场若以相对地球表面平行的水平极化波传播，大地的传导率将会使这种波短路。垂直极化的地波改变了地球表面电场的感应电压，这种感应电压产生的电流类似于传输线中的电流。由于地球表面也存在着电阻损耗和介质损耗，因此地波在传播过程中也必然产生衰减。地波最适于在良导体的表面上进行传播，如海面，在干燥的沙漠地区则很难传播。随着频率的增高，地波的衰减急剧增加，因此，对于地波的传播一般将频率限制在2 MHz以下。地波的传播如图1.5所示。地球的大气密度存在着密度梯度(Gradient Density)，即随着离开地球表面的距离增大大气密度逐渐减小，由此造成波阵面的倾斜，随着向前传播，波阵面的倾斜逐渐增大。因此，地波能够保持贴近地球表面并绕着地球表面传播，在能够提供足够的发射功率时，波阵面沿着地平面可以传播得很远，甚至达到地球的整个周长。值得注意的是，地波传播所选择的频率以及途经的地形要确保波阵面避免过分倾斜、翻转、出现在光滑地面以及传播中断。

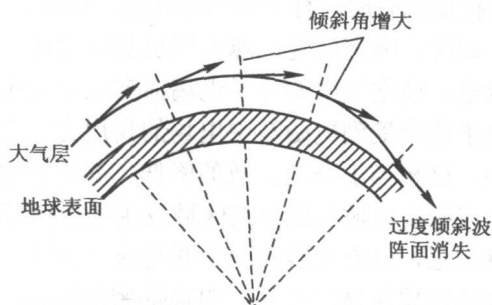


图 1.5 地波传播

地波传播一般多用于舰船之间的通信以及船与岸之间的通信，还常用于无线电导航和海上移动通信。用于地波传播的频率可低到15 kHz。地波传播的缺点如下：

- (1) 地波传播需要很大的发射功率。
- (2) 地波传播的频率限制在甚低频(VLF)、低频(LF)以及中频(MF)范围内，并且需要大尺寸的天线。

(3) 地面损耗随表面材料不同会发生明显变化。

地波传播的优点如下：

- (1) 地波传播可提供足够大的功率，地用于世界上任何两地之间的长距离通信。
- (2) 大气条件的改变对地波传播基本上不产生影响。