



高等学校信息工程类专业“十三五”规划教材

现代通信技术与网络应用

(第三版)

张宝富 张曙光 田华 编著◎

XIANDAI TONGXIN JISHU
YU WANGLUO YINGYONG



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校信息工程类专业“十三五”规划教材

现代通信技术与网络应用

(第三版)

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

内 容 简 介

本书全面系统地讲述了现代通信的基本原理、通信新技术和通信网络的应用,内容包括通信系统模型、通信网络的概念与结构组成、数字通信与数据通信的基本原理、移动智能通信终端、程控数字交换与软交换、大容量光纤传输与长距离卫星传送、传统的电话网络、高速无线与宽带光纤接入网络、计算机网络与物联网以及下一代通信网络等。

本书内容的选取兼顾了正广泛使用的通信技术和通信技术的最新进展,所选内容具有代表性和稳定性,便于理解在此基础上发展起来的各种新技术。

本书是现代通信技术的基础性教材,也是普及性读物,可作为高等院校电子工程、通信工程、广播电视及相关专业的教材,同时也适合作为技术培训教材以及广大科技人员的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术与网络应用/张宝富,张曙光,田华编著.3版.一西安:西安电子科技大学出版社,2017.1

高等学校信息工程类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4197-3

I. ① 现… II. ① 张… ② 张… ③ 田… III. ① 通信技术—高等学校—教材

② 计算机通信网—高等学校—教材 IV. ① TN91 ② TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 325801 号

策 划 马乐惠

责任编辑 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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2017年1月第3版 2017年1月第5次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 19

字 数 447千字

印 数 17001~20000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-4197-3/TN

XDUP 4489003-5

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。

高等学校计算机、信息工程类专业 规划教材编审专家委员会

主 任：杨 震（南京邮电大学校长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电大学通信与信息工程学院前院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机学院前院长、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教授）

王小华（杭州电子科技大学计算机学院教授）

孙力娟（南京邮电大学计算机学院院长、教授）

李秉智（重庆邮电大学计算机学院教授）

孟庆昌（北京信息科技大学教授）

周 娅（桂林电子科技大学计算机学院教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院教授）

信息工程组

组 长：张德民（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

王 晖（深圳大学信息工程学院教授）

胡建萍（杭州电子科技大学信息工程学院教授）

徐 祎（解放军电子工程学院教授）

唐 宁（桂林电子科技大学通信与信息工程学院教授）

章坚武（杭州电子科技大学通信学院副院长、教授）

康 健（吉林大学通信工程学院教授）

蒋国平（南京邮电大学副校长、教授）

前 言

本书自 2004 年出版以来,已在全国许多高等院校与培训机构使用。本次改版吸收了选用本书的老师和同学通过各种方式提供的许多宝贵意见。为了适应时代的需要,及时反映当下主流的通信技术及其最新的研究成果,修订时修改了部分章节并增加了相应的内容。修订后本书内容共分 9 章,具体安排如下:

第 1 章:概述,介绍现代通信系统模型、数字与数据通信的基本原理、多路复用与多址通信技术以及通信网络的概念。

第 2 章:现代通信终端,介绍电话机、平板电脑、智能手机及移动智能终端。

第 3 章:现代传输技术,介绍光纤通信、移动通信、数字微波与 VSAT 卫星通信的基本原理与关键技术。

第 4 章:现代交换技术,介绍数字程控交换、移动交换、软交换与光交换的基本原理及交换机的组成结构。

第 5 章:电话通信网,介绍传统电话网络的结构、电话网编号、公共信令网与数字同步网。

第 6 章:移动通信网,介绍 GSM/CDMA 网络、LTE/4G/5G 移动通信网。

第 7 章:数据与计算机通信网,介绍 DDN 数据网、帧中继网络、IP 网络及物联网。

第 8 章:宽带接入网,重点介绍铜缆的 ADSL 接入、宽带光纤接入(Cable MODEM 和 PON)、高速无线接入(Wi-Fi、WiMAX、RFID/NFC、UWB、FSO/SHF、ROF 等)。

本次修订主要集中在现代通信终端、移动通信、无线接入网、现代交换技术等方面。修订工作得到了多位专家教授的大力支持,在此表示诚挚的谢意。全书由张宝富负责统稿。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

作者电子邮箱:zhangbaofu@163.com。

编 者

2016 年 10 月

第一版前言

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	2.1.1 电话机的组成原理	55
1.1 通信的基本概念	1	2.1.2 电话机的种类和功能	56
1.1.1 通信系统模型	1	2.2 传真机	59
1.1.2 电磁频谱	2	2.2.1 传真机的种类	59
1.1.3 通信信道与通信容量	3	2.2.2 典型传真机的组成原理	60
1.1.4 基带与频带传输	10	2.3 图像终端	69
1.1.5 单工与双工传输	10	2.3.1 图像获取设备	69
1.1.6 模拟与数字通信	11	2.3.2 图像显示终端	70
1.1.7 通信系统性能与噪声	11	2.4 多媒体计算机	71
1.2 数字通信	14	2.4.1 多媒体技术的主要特点	71
1.2.1 基本概念	14	2.4.2 多媒体计算机的关键技术	72
1.2.2 信源的数字化与编码	16	2.4.3 多媒体计算机的组成	73
1.2.3 数字复接	24	2.5 现代多媒体终端	73
1.2.4 数字信号基带传输	25	2.5.1 掌上电脑	73
1.2.5 数字编码与差错控制	26	2.5.2 多媒体手机	74
1.2.6 数字调制	30	2.5.3 信息电话	76
1.3 数据通信	37	2.6 移动通信终端	77
1.3.1 基本概念	37	2.6.1 平板电脑	77
1.3.2 串行与并行数据传输	38	2.6.2 智能手机	78
1.3.3 同步与异步数据传输	39	2.6.3 移动智能终端	78
1.3.4 调制与解调	41	习题	79
1.3.5 传输格式与通信协议	42		
1.4 多路复用与多址通信	45	第 3 章 现代传输技术	80
1.4.1 频分复用与多址	46	3.1 光纤通信	80
1.4.2 时分复用与多址	47	3.1.1 光纤通信的特点	80
1.4.3 码分多址复用	49	3.1.2 光纤及其传输特性	83
1.4.4 波分复用	49	3.1.3 光发送机	87
1.5 通信网络及其构成	50	3.1.4 光接收机	91
1.6 现代通信的发展	52	3.1.5 光放大器与中继器	92
习题	53	3.1.6 光纤链路设计	93
		3.1.7 WDM 系统	94
第 2 章 现代通信终端	55	3.2 移动通信	95
2.1 电话机	55	3.2.1 移动通信的特点	95

3.2.2 移动通信系统.....	96
3.2.3 移动通信中的电波传播.....	96
3.2.4 组网技术.....	99
3.3 数字微波通信.....	107
3.3.1 微波通信概述.....	107
3.3.2 数字微波通信系统.....	109
3.3.3 微波信道电波传播.....	110
3.3.4 SDH 数字微波通信系统.....	111
3.3.5 数字微波通信的应用.....	112
3.4 卫星通信.....	112
3.4.1 概述.....	112
3.4.2 卫星通信系统的组成 与网络结构.....	116
3.4.3 VSAT.....	120
习题.....	123

第4章 现代交换技术.....125

4.1 交换机的基本概念.....	125
4.1.1 交换网络.....	125
4.1.2 控制系统.....	126
4.2 时隙交换.....	127
4.2.1 复用器与分路器.....	128
4.2.2 时间接线器(T 接线器).....	129
4.2.3 空间接线器(S 接线器).....	131
4.2.4 数字交换网络.....	132
4.3 分组交换.....	133
4.4 ATM 交换.....	136
4.5 软交换.....	143
4.6 数字程控交换机.....	145
4.6.1 数字程控交换机的硬件组成.....	146
4.6.2 程控交换机的软件组成.....	150
4.6.3 程控交换机的控制原理.....	152
4.7 IP 交换机.....	155
4.8 光交换机.....	158
4.9 移动交换机.....	160
习题.....	163

第5章 电话通信网.....164

5.1 电话网的结构.....	164
-----------------	-----

5.1.1 市内电话网和本地电话网.....	164
5.1.2 长途电话网.....	167
5.1.3 国际长途电话网.....	168
5.2 电话网的编号.....	169
5.2.1 本地网的编号.....	169
5.2.2 国内长途网的编号.....	170
5.2.3 国际电话编号.....	171
5.3 电话网的业务及服务质量.....	172
5.3.1 电话网的业务种类.....	172
5.3.2 电话网的服务质量.....	172
5.4 电话网的支撑网.....	174
5.4.1 数字同步网.....	174
5.4.2 公共信道信令网.....	178
5.4.3 电信管理网.....	181
习题.....	184

第6章 移动通信网.....185

6.1 引言.....	185
6.2 GSM 数字蜂窝移动通信网.....	188
6.2.1 系统组成.....	189
6.2.2 网络结构.....	190
6.2.3 无线空中接口.....	192
6.2.4 网络控制与管理.....	196
6.2.5 GPRS.....	196
6.3 CDMA 数字蜂窝移动通信网.....	200
6.3.1 扩频通信.....	200
6.3.2 CDMA 蜂窝移动通信技术的 演进与标准.....	202
6.3.3 CDMA 系统的结构与特点.....	202
6.3.4 无线接口特性.....	205
6.3.5 CDMA 2000.....	207
6.4 集群移动通信网.....	210
6.4.1 集群通信的概念.....	211
6.4.2 集群通信的特点与功能.....	211
6.4.3 集群系统的分类.....	211
6.4.4 典型的集群移动通信网.....	212
6.5 卫星移动通信网.....	213
6.5.1 低轨道卫星移动通信.....	213
6.5.2 “铱”系统.....	214

6.5.3 “全球星”系统.....	215	8.4.3 家庭宽带 FTTH.....	256
6.6 LTE/4G/5G.....	215	8.5 无线接入网.....	257
习题.....	217	8.5.1 无线接入网的概念.....	257
第 7 章 数据与计算机通信网	218	8.5.2 WPAN 与蓝牙/ZigBee.....	257
7.1 概述.....	218	8.5.3 无线局域网 WLAN.....	259
7.2 数字数据网 DDN.....	219	8.5.4 WMAN 与 WiMAX.....	265
7.2.1 概述.....	219	8.5.5 RFID 与 NFC.....	266
7.2.2 DDN 的结构与业务.....	219	8.5.6 超宽带(UWB)无线.....	268
7.2.3 DDN 的应用.....	224	8.5.7 FSO/SHF.....	269
7.3 X.25 与帧中继 FR.....	224	8.5.8 光载无线 (ROF)接入.....	270
7.3.1 概述.....	224	习题.....	271
7.3.2 帧中继技术原理.....	226	第 9 章 通信网络新技术	272
7.3.3 帧中继业务应用.....	229	9.1 宽带 IP 网.....	272
7.4 IP 网络.....	230	9.1.1 IP 网的现状.....	272
7.4.1 概述.....	230	9.1.2 宽带 IP 技术.....	273
7.4.2 TCP/IP.....	231	9.1.3 多协议标记交换(MPLS)技术.....	275
7.4.3 IP 电话.....	234	9.1.4 新一代 IP 协议 IPv6.....	276
7.5 物联网.....	238	9.1.5 宽带 IP 与光网络融合.....	277
习题.....	239	9.1.6 云计算.....	278
第 8 章 宽带接入网	241	9.2 智能网 IN.....	279
8.1 概述.....	241	9.2.1 IN 的概念.....	279
8.2 xDSL.....	243	9.2.2 IN 的构成.....	281
8.2.1 概述.....	243	9.2.3 智能光网络(ASON).....	285
8.2.2 HDSL.....	246	9.3 虚拟专用网 VPN.....	286
8.2.3 ADSL.....	247	9.3.1 VPN 的概念.....	286
8.2.4 VDSL.....	249	9.3.2 VPN 的实现方法和接入方式.....	288
8.3 混合光纤/同轴网 HFC.....	250	9.3.3 VPN 的业务类型.....	288
8.3.1 HFC 的概念.....	250	9.3.4 VPN 业务的典型应用.....	289
8.3.2 HFC 的系统构成和频谱分布.....	250	9.3.5 软件定义网络(SDN).....	289
8.3.3 局端系统 CMTS.....	252	9.4 NGN.....	290
8.3.4 线缆调制解调器 CM.....	253	9.4.1 NGN 技术概述.....	290
8.4 FTTx.....	253	9.4.2 NGN 的功能分层结构.....	292
8.4.1 光纤接入的基本概念.....	253	9.4.3 NGN 的进展.....	292
8.4.2 无源光网络 PON.....	255	习题.....	293
		参考文献	294

第1章 概 述

自古以来，通信就是人们的基本需求之一。从三千多年前人们利用烽火台的烟光传递信息，到 1876 年贝尔(Alexander Graham Bell)发明了电话，从 1895 年马可尼(Guglielmo Marconi)成功进行无线电波传输信号实验，到 1970 年光纤通信的出现，无不验证了这一点。目前，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可帮助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，略去了复杂的数学推导，但尽可能地列出了必需的公式。

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、军事领域都产生了强烈的冲击。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、光或其他电磁能量对符号、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所需的全部设施称为一个通信系统。

1.1.1 通信系统模型

点与点之间的通信是通信的最基本形式，其模型可用图 1.1 表示。

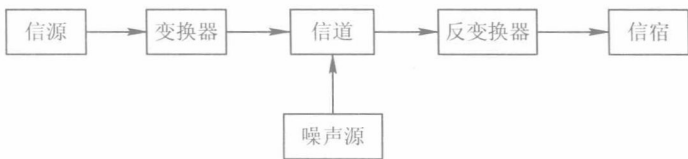


图 1.1 点到点通信系统模型

点到点的通信系统模型包括信源、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,信源是指发出信息的机器,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,如对应话音形式信源的是电话通信系统,对应数据形式信源的是数据通信系统等。

(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、模/数转换、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) 反变换器的功能是实现变换器的逆变换。因为变换器把不同形式的信息变换和处理成适合在信道传输的信号,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,而是在实际通信系统中客观存在的,在模型中将它集中表示。实际上,干扰噪声可能是在信源处就混入了,也可能是从构成变换器的电子设备中引入的。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

通信系统中所采用的电磁能量,其信号的频谱如图 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,包含通常与人类话音相关的频率。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。

(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(0.3~1 PHz)内的电磁频率。

(12) 紫外线: 1~3 PHz 范围内的信号，这一频率的信号很少用于通信。

习惯将红外、可见光、紫外线等称为光频区域，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。

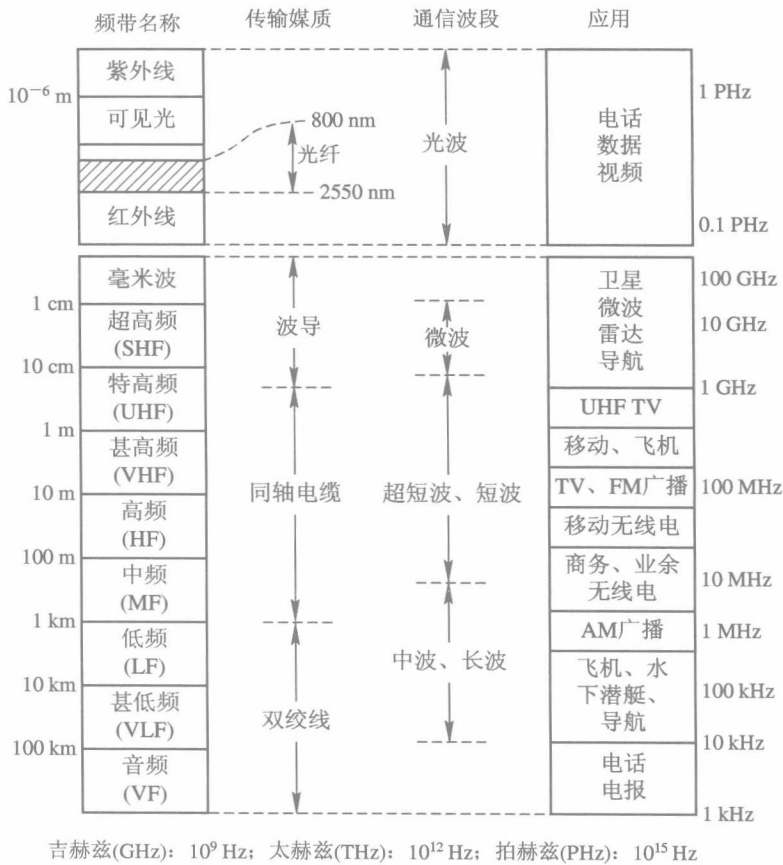


图 1.2 通信系统中的电磁频谱

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，是信号的传输媒体或线路，并可以分为有线信

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(简称微带线)、波导传输线(简称波导)、光纤传输线(简称光纤)等。无线信道有地波、空间波、天波等。

1. 有线信道

传输线包括金属传输线或电缆传输线,分为平衡式和非平衡式两类。有线信道采用双线平衡线时,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,常为共模电压信号,在两条线上相等,在负载端抵消。共模信号被抵消习惯称为共模抑制(CMR),其抑制程度由共模抑制比(CMRR)来衡量,数值为 40~70 dB。

有线信道采用非平衡传输线时,一根电线是地电位,另一根电线是信号电位,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。由于电线上有阻抗、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。这类传输线的优点是结构简单。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定绝缘体取代以外,双线电缆与明线传输线本质上极为相似,电视传输用的双线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龙和聚乙烯。

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构成的。编织物要连接到地,起屏蔽作用,以减少辐射损耗和干扰,金属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用于低频段,因为在高频段,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段,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,周围是与中心导体同心的外部导体。在相对高的频段上,同轴电缆的外导体可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。

实际上同轴电缆有两种形式：空气填充型和固态柔韧型。

图 1.3(e)给出了空气填充型同轴电缆的结构示意。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。外部导体由间隔器与中心导体物理隔离。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有严格限制。固态柔韧型同轴电缆损耗较低并且易于制造、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价格昂贵且只能用于非平衡模式。

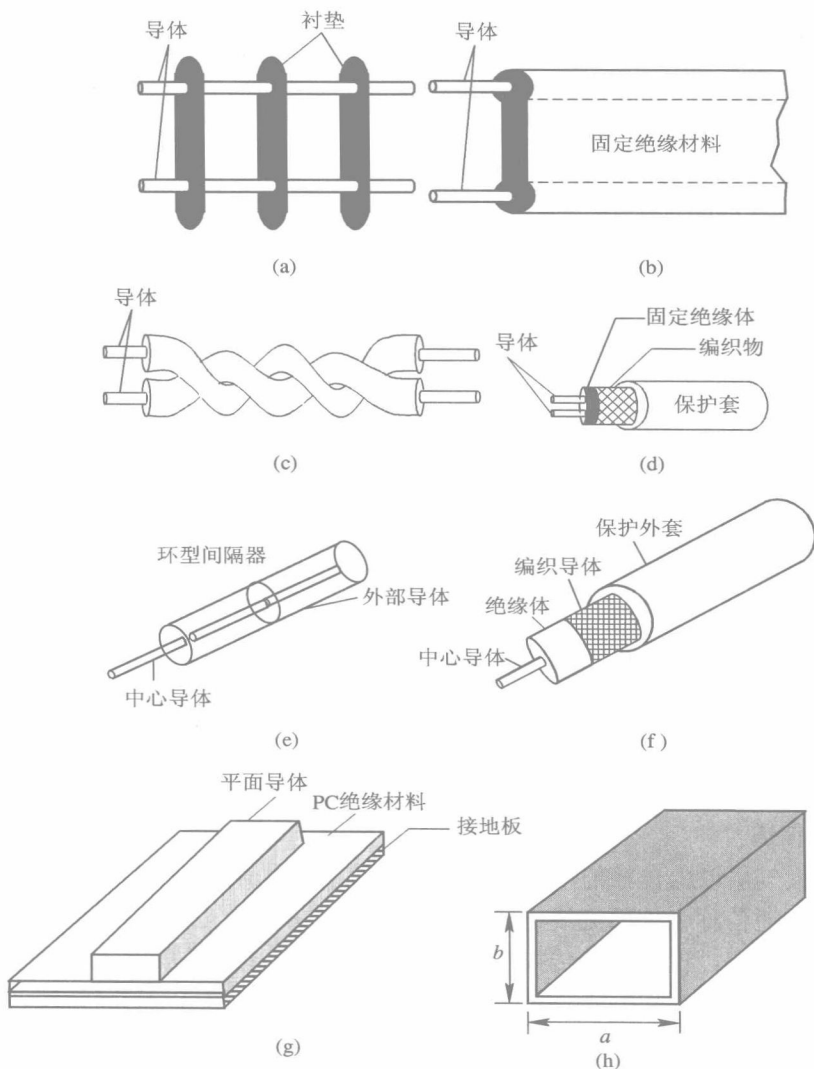


图 1.3 通信中的常用传输媒质

- (a) 明线电缆；(b) 双绞线；(c) 双绞屏蔽电缆；(d) 屏蔽双绞线；
(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

微带线应用于高频(300~3000 MHz)领域。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,当传输线源端和负载端的距离只有几英寸或更短时,标准的同轴电缆传输线是不适用的,因为电缆连接件、终结器和电缆本身都太大了,这时只能采用微带线。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,其中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、移相器和阻抗匹配等部件。

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,其中包括波导和光缆等传输介质。

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,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截止频率(Cut-off Frequency)。低于截止频率的信号不能在波导中传播。相应的,允许通过波导的最大波长称为截止波长(Cut-off Wavelength)。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。

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。

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 显示了电磁波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 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。高频波的传播主要是利用天波,甚高频以上的频率借助于空间波进行传播。

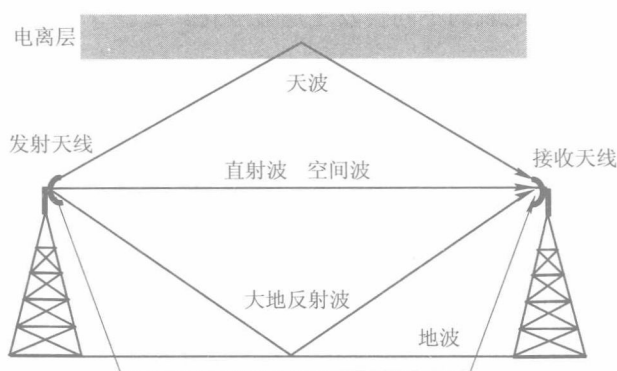


图 1.4 电磁波的三种传播模式

1) 地波

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路径的地形要确保波阵面避免过分倾斜、翻转,避免出现在光滑地面。

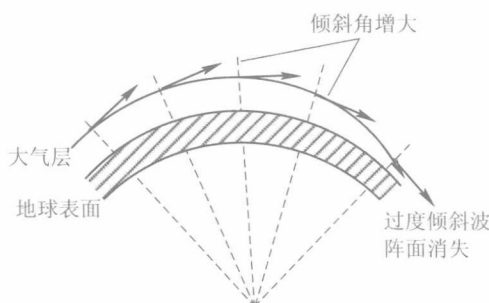


图 1.5 地波传播

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) 地面损耗随地形、地貌的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, 可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。

2) 天波

一般天波(Sky Wave)是指在某一方向上相对于地球仰起一个很大的角度来辐射的电磁波。天波是朝着天空辐射并凭借电离层反射或折射回地面的。正是由于这个原因, 天波传播的这种形式有时也称为电离层传播。电离层位于地球上空约 50~400 km(30~250 英里)空间区域内。电离层是地球大气层最上面的一部分, 因吸收了大量的太阳辐射的能量, 使空气中的分子电离而产生自由电子。无线电波进入到电离层后, 电离层中的自由电子就会因受到电磁波中电场的作用力而产生振动。振动的电子会减少电流的流动, 这相当于介电常数的降低。介电常数的减小可以增加传播速度, 并且使电磁波从电子的高密度区域向低密度区域发生弯折(也就是增大了折射)。离地球越远, 电离作用就越强, 因此, 在大气层的高层区域, 分子电离的比例要比大气层的低层区域高很多, 而电离的密度越高, 折射率就越小。另外, 由于电离层的非均匀结构以及它的温度和密度都是变量, 一般将电离层进行分层分析。电离层通常分为 D、E、F 三层, 如图 1.6 所示。从图中可以看出, 电离层的分层在同一天不同的时间有不同的高度和不同的电离密度。电离密度在一年中随着季节呈周期性波动, 并且这种周期性的变化还随着太阳黑子活动以大约 11 年为一个周期发生着变化。在太阳光最强的时期电离层的密度最大(在夏天的中午时段)。

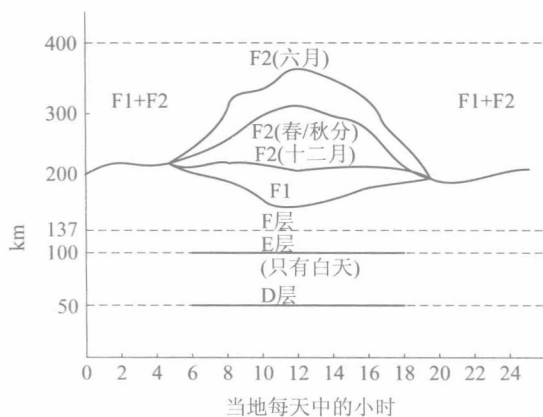


图 1.6 电离层的分导层

D 层是电离层的最底层, 距地球表面大约 50~100 km。由于离太阳的距离最远, 电离的程度最弱, 因此电离层的 D 层对无线电波的传播方向影响最小。然而, D 层中的离子对电磁能量有明显的吸收作用。在 D 层中的电离程度取决于朝向太阳时在地平线上的海拔高度, 所以在日落之后电离消失。电离层的 D 层主要对 VLF 波和 LF 波有反射作用, 对 MF 波和 HF 波会产生吸收现象。

E 层距地球表面大约 100~140 km。由于它是由两名科学家首先发现的, 因此电离层的 E 层有时也称为肯内利-亥维赛层(Kennelly-Heaviside)。正午时, E 层在距地面大约 70 英里处出现最大密度。与 D 层一样, 在日落之后 E 层电离几乎全部消失。电离层的 E 层有助