



高等学校信息工程类“十二五”规划教材

现代通信系统新技术

◎王兴亮 高利平 主编

XIANDAITONGXIXITONG
XINJISHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

现代通信系统新技术

王兴亮 高利平 主编

田 宠 寇媛媛 李 伟 等参编

周义健 李 凡 惠 亮

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

随着通信技术的快速发展,通信系统和新技术得到了广泛的应用。本教材较为全面地综述了各种通信系统和通信热点技术,分析了通信的发展趋势,并对通信技术的应用做了深入的介绍。

本教材共有 7 章内容,包括通信基础、数字通信、微波与卫星通信、卫星导航与定位、移动通信、光通信和宽带接入网络。

本教材内容新颖,反映了当今最新的通信技术的发展和应用情况。在文字叙述中突出概念的描述,避免繁琐的公式推导,重点讲述各种通信技术的性能和物理意义,并列举了大量的例子加以说明。每章都以本章教学要点开始,以小结结束,并附有适量的思考与练习题。

本教材语言简练、通俗易懂,内容系统全面,材料充实丰富,可作为通信工程、计算机通信、信息技术及其他相关专业的本科生教材,也可供相关 IT 行业的科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统新技术/王兴亮,高利平主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2012.6

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2793-9

I. ① 现… II. ① 王… ② 高… III. ① 通信技术—高等学校—教材 IV. ① TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 083030 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马晓娟 陈洪艳

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 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限公司

版 次 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17.5

字 数 412 千字

印 数 1~3000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978-7-5606-2793-9/TN · 0654

XDUP 3085001-1

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。

前 言

通信技术的发展日新月异、突飞猛进,使得通信技术的应用渗透到了社会的各个层面,各行各业都离不开通信技术。

本教材共 7 章,包括通信基础、数字通信、微波与卫星通信、卫星导航与定位、移动通信、光通信和宽带接入网络。

第 1 章为通信基础,着重介绍通信的概念,包括通信的定义、分类、方式以及通信系统的模型等。信息论基础是通信技术的必备知识,学习者应学会信息的度量和计算。通信系统的性能指标是贯穿全书的指标体系,要求学习者掌握和运用好通信系统的性能指标,如有效性指标、可靠性指标、信道容量等基本参量。

第 2 章为数字通信,主要介绍了模拟信号数字化传输通信系统中的 PCM 30/32 路典型终端设备、准同步数字体系(PDH)、同步数字体系等。

第 3 章为微波与卫星通信,首先对信号的传输与复用、信号的调制与解调、编解码技术作了介绍;其次对微波通信系统、微波无线固定接入方法做了介绍;然后对卫星通信技术及系统,包括静止卫星通信系统、移动卫星通信系统、VSAT 卫星通信系统、卫星通信新技术的应用作了介绍;最后对微波与卫星通信技术的发展和应用展开讨论,使学习者对微波通信和卫星通信的前景有一个清晰的认识。

第 4 章为卫星导航与定位,首先重点介绍了 GPS 的组成、信号结构、定位原理和误差以及 GPS 信号接收机的基本组成;然后全面阐述了导航定位系统的原理和定位技术;最后叙述了四大全球定位系统的现代化进程以及卫星导航定位系统在科学领域的各方面应用。

第 5 章为移动通信,首先主要介绍了移动通信的基本概念、特点、分类及系统的组成;其次阐述了移动通信的基本技术,包括蜂窝组网技术、多址技术、调制技术、交织技术、自适应均衡技术和信道配置技术;接着阐述了 GSM 系统

的网络结构、GSM 系统的无线空中接口和移动用户的接续过程，并且介绍了两种常用的第三代移动通信系统、移动通信新技术和后 3G 移动通信关键技术；最后简单介绍了正交频分复用。

第 6 章为光通信，首先对光纤通信的基本概念、组成和应用进行了概述；然后介绍了相干光通信技术、光孤子通信、无线光通信和全光通信系统。本章的目的就在于将这些新技术介绍给读者，让读者很快地了解和掌握通信新技术，进而应用这些新技术。

第 7 章是宽带接入网络，从 xDSL 各种接入技术入手，讲解了无线高保真(Wi-Fi)接入、全球微波接入互操作性(WiMAX)等技术，旨在使读者了解更多、更新的系统新技术。

本教材由王兴亮和高利平教授主编，参加编写的还有田宠、寇媛媛、李伟、周义健、李凡、惠亮、田秀劳、李成斌、张德纯、张亮、武文斌、任啸天、刘敏、刘莎、侯灿靖、牟京燕、储楠和蒋波。全书由王兴亮统稿。

限于编者水平，书中难免存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

E-mail: 8185wxl@21cn.com, wxl20060910@yahoo.com.cn。

编 者
2012 年 3 月于西安

目 录

第 1 章 通信基础.....1	2.4 同步数字体系(SDH)..... 44
【本章教学要点】.....1	2.4.1 SDH 的基本概念..... 44
1.1 通信的概念.....1	2.4.2 SDH 的速率和帧结构..... 45
1.1.1 通信的定义.....1	2.4.3 同步复用结构..... 46
1.1.2 通信的分类.....1	2.4.4 映射的方法..... 50
1.1.3 通信的方式.....3	2.4.5 定位..... 54
1.1.4 通信系统的模型.....5	2.4.6 复用..... 57
1.2 信息论基础.....6	小结..... 60
1.2.1 信息的度量.....6	思考与练习 2..... 61
1.2.2 平均信息量.....7	第 3 章 微波与卫星通信..... 63
1.3 通信系统的性能指标.....8	【本章教学要点】..... 63
1.3.1 一般通信系统的性能指标.....8	3.1 微波通信技术..... 63
1.3.2 通信系统的有效性指标.....8	3.1.1 微波中继通信..... 64
1.3.3 通信系统的可靠性指标.....10	3.1.2 数字微波通信的特点..... 65
1.4 通信信道的基本特性.....10	3.1.3 微波信号的传播..... 65
1.4.1 信道的概念.....11	3.1.4 微波通信的频率配置..... 66
1.4.2 传输信道.....13	3.1.5 信号的传输与复用..... 68
1.4.3 信道内的噪声.....15	3.1.6 信号的调制与解调..... 68
1.4.4 常见的几种噪声.....16	3.1.7 编解码技术..... 69
1.4.5 信道容量.....18	3.2 微波通信系统..... 70
小结.....21	3.2.1 数字微波通信系统..... 70
思考与练习 1.....21	3.2.2 数字微波通信系统的性能..... 72
第 2 章 数字通信.....23	3.3 微波无线固定接入..... 75
【本章教学要点】.....23	3.3.1 LMDS 无线接入..... 75
2.1 数字通信系统模型.....23	3.3.2 MMDS 无线接入..... 78
2.2 时分多路复用(TDM).....25	3.3.3 LMDS/MMDS 混合无线接入..... 80
2.2.1 TDM 基本原理.....25	3.4 卫星通信技术..... 81
2.2.2 TDM 信号的带宽及相关问题.....27	3.4.1 卫星通信的特点..... 81
2.2.3 时分复用的 PCM 通信系统.....28	3.4.2 卫星信号的传输..... 82
2.2.4 PCM 30/32 路典型终端设备.....28	3.4.3 信号处理技术..... 85
2.3 准同步数字体系(PDH).....30	3.4.4 卫星通信中的多址技术..... 89
2.3.1 数字复接的概念和方法.....31	3.5 卫星通信系统..... 93
2.3.2 同步复接与异步复接.....32	3.5.1 静止卫星通信系统..... 93
2.3.3 PCM 高次群.....40	3.5.2 移动卫星通信系统..... 97

3.5.3 VSAT 卫星通信系统	98	4.6.3 系统的开发计划	134
3.5.4 卫星通信新技术	100	4.7 北斗卫星系统	135
3.6 卫星通信技术的发展	104	4.7.1 北斗一号卫星系统	135
3.6.1 激光技术的应用	104	4.7.2 北斗二号卫星导航系统	139
3.6.2 先进通信技术卫星	105	4.8 卫星导航定位系统的应用	140
3.6.3 宽带多媒体卫星移动通信系统	105	4.8.1 测量技术中的应用	140
小结	107	4.8.2 在民航中的应用	142
思考与练习 3	107	4.8.3 气象方面的应用	143
第 4 章 卫星导航与定位	108	4.8.4 军事上的应用	143
【本章教学要点】	108	小结	144
4.1 GPS 概述	108	思考与练习 4	144
4.1.1 GPS 的基本概念	108	第 5 章 移动通信	146
4.1.2 GPS 的组成及作用	109	【本章教学要点】	146
4.1.3 GPS 的信号	112	5.1 概述	146
4.2 GPS 的定位原理	114	5.1.1 移动通信的特点	146
4.2.1 GPS 坐标系统	115	5.1.2 移动通信的分类	148
4.2.2 GPS 时间系统	118	5.1.3 移动通信系统的小区制	149
4.2.3 测量误差	120	5.2 移动通信的基本技术	150
4.3 GPS 信号接收机	123	5.2.1 蜂窝组网技术	150
4.3.1 GPS 接收机的基本概念	123	5.2.2 多址技术	155
4.3.2 接收机分类	24	5.2.3 调制技术	157
4.3.3 接收机天线	125	5.2.4 交织技术	157
4.3.4 接收单元	125	5.2.5 自适应均衡技术	159
4.3.5 GPS 卫星接收机参数	127	5.2.6 信道配置技术	159
4.4 GPS 现代化	127	5.3 GSM 移动通信系统	160
4.4.1 概述	127	5.3.1 GSM 系统的网络结构	161
4.4.2 GPS 民用现代化	128	5.3.2 GSM 系统的无线空中接口(Um)	164
4.4.3 GPS 军用现代化	128	5.3.3 移动用户的接续过程	171
4.4.4 GPS 现代化的阶段	129	5.4 第三代移动通信系统	173
4.5 GLONASS 系统	129	5.4.1 CDMA2000 系统简介	173
4.5.1 卫星结构与组成	129	5.4.2 TD-SCDMA 系统简介	176
4.5.2 GLONASS 发展历程	130	5.4.3 移动通信新技术	178
4.5.3 地面支持系统	131	5.4.4 后 3G 移动通信关键技术	186
4.5.4 GLONASS 与 GPS 系统的 特征比较	131	5.5 正交频分复用(OFDM)	188
4.5.5 GLONASS 系统现代化	132	5.5.1 OFDM 的基本原理	188
4.6 Galileo 系统	133	5.5.2 OFDM 的核心技术	194
4.6.1 系统概述	133	小结	199
4.6.2 系统的结构和组成	134	思考与练习 5	200

第 6 章 光通信	201	思考与练习 6	228
【本章教学要点】	201	第 7 章 宽带接入网络	229
6.1 波分复用技术	201	【本章教学要点】	229
6.1.1 波分复用的基本原理	201	7.1 xDSL 接入	229
6.1.2 WDM 通信系统	204	7.1.1 HDSL 接入技术	229
6.2 相干光通信技术	208	7.1.2 ADSL 接入技术	235
6.2.1 相干光通信的基本原理	208	7.1.3 VDSL 接入技术	244
6.2.2 相干光通信的关键技术	210	7.2 无线高保真(Wi-Fi)接入	246
6.3 光孤子通信	211	7.2.1 无线接入的概念	246
6.3.1 光孤子的基本特征	211	7.2.2 无线高保真(Wi-Fi)技术	247
6.3.2 光孤子通信系统	213	7.2.3 Wi-Fi 技术的应用	249
6.4 无线光(FSO)通信	214	7.2.4 Wi-Fi 技术的展望	254
6.4.1 无线光通信技术的发展	214	7.3 全球微波接入互操作性(WiMAX)	257
6.4.2 无线光通信系统的构成及 工作原理	215	7.3.1 WiMAX 的简介	257
6.4.3 无线光通信系统的优点	216	7.3.2 WiMAX 的技术特点	257
6.4.4 无线光通信的关键技术	217	7.3.3 WiMAX 宽带无线接入特点	258
6.4.5 无线光通信的典型应用	218	7.3.4 WiMAX 网络架构的参考模型	260
6.5 全光通信系统	220	7.3.5 WiMAX 宽带无线接入 应用模式	261
6.5.1 全光通信的概念	221	7.3.6 WiMAX 无线城域网的 具体应用	264
6.5.2 全光通信的关键器件和技术	221	小结	268
6.5.3 全光通信网	224	思考与练习 7	268
6.5.4 光时分复用	227	参考文献	270
小结	228		

第1章

通信基础



【本章教学要点】

- ※ 通信的概念
- ※ 信息论基础
- ※ 通信系统的性能指标
- ※ 通信信道的基本特性

通信基础主要论述通信系统的基本概念、性能指标以及相关的理论基础，同时对通信信道的基本性能加以论述。

1.1 通信的概念

1.1.1 通信的定义

通信(Communication)就是信息的传递，是指由一地向另一地进行信息的传输与交换，其目的是传输消息。从本质上讲，通信是实现信息传递功能的一门科学技术，它要将大量有用的信息快速、准确、无失真、高效率、安全地进行传输，同时还要在传输过程中将无用信息和有害信息抑制掉。当今的通信不仅要能有效地传输信息，还要有存储、处理、采集及显示信息等功能。通信已成为信息科学技术的一个重要组成部分。

在自然科学中，“通信”一般指“电信”(Telecommunication)，即利用有线电、无线电、光和其他电磁媒质，对消息、情报、指令、文字、图像、声音等进行传输。电信业务可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话等。从广义的角度看，广播、电视、雷达、导航、遥测、遥控等也可列入电信的范畴。这种通信具有迅速、准确、可靠等特点，且几乎不受时间、空间的限制，因而得到了飞速发展和广泛应用。

1.1.2 通信的分类

1. 按传输媒质分

按消息由一地向另一地传递时传输媒质的不同，通信可分为两大类：一类为有线通信，另一类为无线通信。所谓有线通信，是指传输媒质为导线、电缆、光缆、波导等的通信形式，其特点是媒质能看得见、摸得着。所谓无线通信，是指传输消息的媒质看不见、摸不

着(如电磁波)的通信形式。

通常,有线通信也可进一步分为明线通信、电缆通信、光缆通信等。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信等。

2. 按信道中传输的信号分

信道是个抽象的概念,这里可理解成传输信号的通路。通常,信道中传输的信号可分为数字信号和模拟信号两种,由此,通信也可分为数字通信和模拟通信,与它们相对应的系统是数字通信系统和模拟通信系统。

若信号的某一参量(如连续波的振幅、频率、相位,脉冲波的振幅、宽度、位置等)可以取无限多个数值,且直接与消息相对应,则称其为模拟信号。模拟信号有时也称为连续信号,这个“连续”是指信号的某一参量可以连续变化(即可以取无限多个值),而不一定在时间上也连续。例如,将在第2章介绍的脉冲幅度调制(PAM, Pulse Amplitude Modulation)信号,经过调制后,已调信号脉冲的某一参量是可以连续变化的,但在时间上是不连续的。这里的“某一参量”是指所关心的并作为研究对象的那一参量,而不是仅指时间参量。当然,参量在连续时间上连续变化的信号,毫无疑问也是模拟信号,如强弱连续变化的语言信号、亮度连续变化的电视图像信号等。

若信号的某一参量只能取有限个数值,并且常常不直接与消息相对应,则称其为数字信号。数字信号有时也称为离散信号,这个“离散”是指信号的某一参量是离散(不连续)变化的,而不一定在时间上也离散。

3. 按工作频段分

根据通信设备工作频率的不同,通信通常可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。为了使读者对通信中所使用的频段有一个比较全面的了解,下面把通信使用的频段及其说明列入表1-1中作为参考。

表1-1 通信使用的频段及其说明

频率范围(f)	波长(λ)	符号	常用传输媒质	用途
3 Hz~30 kHz	$10^8 \text{ m} \sim 10^4 \text{ m}$	甚低频 VLF	有线线对、长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30 kHz~300 kHz	$10^4 \text{ m} \sim 10^3 \text{ m}$	低频 LF	有线线对、长波无线电	导航、信标、电力线通信
300 kHz~3 MHz	$10^3 \text{ m} \sim 10^2 \text{ m}$	中频 MF	同轴电缆、中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3 MHz~30 MHz	$10^2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$	高频 HF	同轴电缆、短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30 MHz~300 MHz	$10 \text{ m} \sim 1 \text{ m}$	甚高频 VHF	同轴电缆、米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航、集群通信、无线寻呼
300 MHz~3 GHz	$100 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$	特高频 UHF	波导、分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3 GHz~30 GHz	$10 \text{ cm} \sim 1 \text{ cm}$	超高频 SHF	波导、厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30 GHz~300 GHz	$10 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$	极高频 EHF	波导、毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \text{ GHz} \sim 10^7 \text{ GHz}$	$3 \times 10^{-4} \text{ cm} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}$	紫外、可见光、红外	光纤、激光空间传播	光通信

通信中, 工作频率和工作波长可互换, 公式为

$$c = \lambda \cdot f \quad (1-1)$$

式中, λ 为工作波长; f 为工作频率; c 为电波在自由空间中的传播速度, 通常认为 $c = 3 \times 10^8$ m/s。

4. 按调制方式分

根据消息在送到信道之前是否进行调制, 通信可分为基带传输和频带传输。基带传输是指信号没有经过调制而直接送到信道中去传输的通信系统; 频带传输是指信号经过调制后再送到信道中传输, 且接收端有相应解调措施的通信系统。表 1-2 列出了一些常用的调制方式。

表 1-2 常用的调制方式

调制方式			用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK、DPSK、QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语言编码方式 ADPCM、APC、LPC	中低速数字电话

1.1.3 通信的方式

1. 按消息传送的方向与时间划分

如果通信仅在点对点之间, 或一点对多点之间进行, 那么按消息传送的方向与时间的不同, 通信的工作方式可分为单工通信、半双工通信和全双工通信, 如图 1-1 所示。

单工通信是指消息只能单方向传输的通信方式, 如广播、遥控、无线寻呼等。这种通信方式下, 信号(消息)从广播发射台、遥控器和无线寻呼中心分别单向传到收音机、遥控对象和 BB 机上。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发的通信形式,如使用同一频段的对讲机、收发报机等。

全双工通信是指通信双方可同时收发消息的通信方式。很明显,全双工通信的信道必须是双向信道。生活中全双工通信的例子很多,如普通电话、各种手机等。

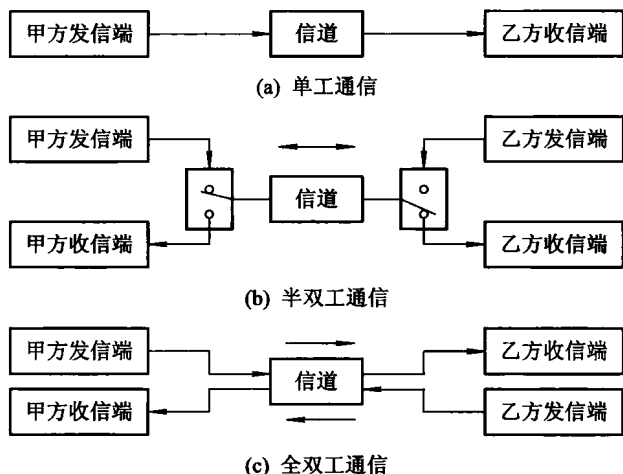


图 1-1 按消息传送的方向与时间划分的通信方式

2. 按数字信号排序划分

在数字通信中,按照数字信号排列顺序的不同,可将通信方式分为串序传输和并序传输。所谓串序传输,是指将代表信息的数字信号序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输的方式,如图 1-2(a)所示;若将代表信息的数字信号序列分割成两路或两路以上同时在信道上传输,则称为并序传输,如图 1-2(b)所示。

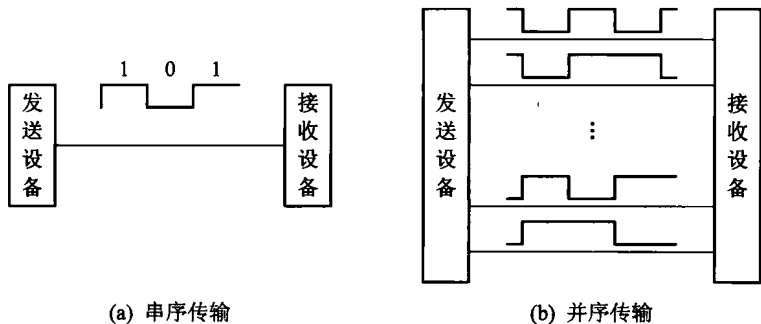


图 1-2 按数字信号排序划分的通信方式

一般的数字通信方式都采用串序传输,其优点是只占用一条通路,缺点是占用通路时间相对较长;并序传输方式在通信中有时也用到,其优点是传输时间较短,缺点是需要占用多条通路。

3. 按通信网络形式划分

通信网络形式通常可分为三种:点到点通信方式、点到多点通信(分支)方式和多点到多点通信(交换)方式。它们的示意图如图 1-3 所示。

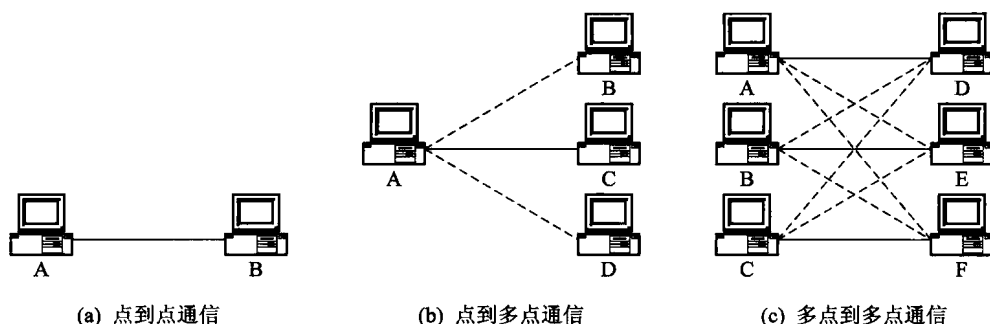


图 1-3 按通信网络形式划分的通信方式

点对点通信是通信网络中最为简单的一种形式。网络中终端 A 与终端 B 之间的线路是专用的。

点到多点通信(分支)方式中,每一个终端(A, B, C, ..., N)都经过同一信道与转接站相连接。此时,终端之间不能直通信息,而必须经过转接站转接,此种方式只在数字通信中出现。

多点到多点通信(交换)是终端之间通过交换设备灵活地进行线路交换的一种方式,即把需要通信的两终端之间的线路接通(自动接通),或者通过程序控制实现消息交换,也就是通过交换设备先把发方来的消息存储起来,然后再转发至收方,这种消息转发可以是实时的,也可以是延时的。

分支方式及交换方式均属网通信的范畴。无疑,它们和点与点直通方式相比,有其特殊的一面,例如通信网中不仅有一套具体的线路交换与消息交换的规定、协议等,而且还有信息控制问题、网同步问题等。尽管如此,点与点之间的通信仍是网通信的基础。

1.1.4 通信系统的模型

通信的任务是完成消息的传递和交换。以点对点通信为例,要实现消息从一地向另一地的传递,通信系统必须有三个部分:发送端、接收端和收发两端之间的信道,如图 1-4 所示。

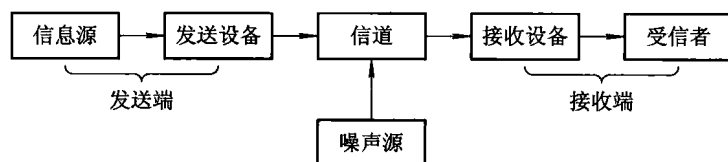


图 1-4 通信系统的模型

通信系统各部分的作用如下。

1. 信息源和受信者

信息源,简称信源,是信息的发生源。受信者,简称信宿,是信息的归宿。根据信源输出信号性质的不同,可将其分为模拟信源和数字(离散)信源,如模拟电话机为模拟信源,数字摄像机及计算机为数字信源。

2. 发送设备

发送设备的作用就是将信源产生的信号变换为传输信道所需的信号(使信源和信道匹

配起来),并送往信道。这种变换根据对传输信号的不同要求有不同的变换方式,通常情况下的要求有实现大功率发射、频谱搬移、信源编码、信道编码、多路复用、保密处理等,其相应的变换方式为功率放大、调制、模/数转换、纠错编码、频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)或时分复用(TDM, Time Division Multiplexing)、加密等。

3. 信道

信道是指传输信号的通道,即信号从发送设备到接收设备之间所经过的媒质。信道可以是有线的,也可以是无线的,两者均有多种传输媒质。信道既给信号提供通路,也对信号产生各种干扰和噪声,直接影响通信的质量,其干扰和噪声的产生由传输媒质的固有特性决定。图 1-4 中的噪声源是信道中的所有噪声及分散在通信系统其他各处噪声的集合。图中这种表示并非指通信中一定要有一个噪声源,而是为了在分析和讨论问题时便于理解而人为设置的。

4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,即进行接收放大、解调、数/模转换、纠错译码、FDM 或 TDM 的分路、解密等,最终从带有干扰的信号中正确地恢复出原始信号。

图 1-4 仅是一个单向通信系统模型,如果实际通信系统要实现双向通信来保证通信双方随时可以交流信息,那么信源兼为信宿,且双方都要有发送设备和接收设备。若两个方向分别使用各自的传输媒质,则双方独立地进行发送和接收;若两个方向共用一个传输媒质,则必须采用频率、时间或代码分割的办法来实现资源共享。

通信系统除了完成信息传输之外,还必须进行信息交换。传输系统和交换系统共同组成一个完整的通信系统。

1.2 信息论基础

1.2.1 信息的度量

虽然“信息”(Information)一词在概念上与消息(Message)相似,但其含义更具普遍性、抽象性。信息可理解为消息中包含的有意义的内容。消息有各种各样的形式,但消息的内容可统一用信息来表述,传输信息的多少可直观地用“信息量”来衡量。

消息都有其量值的概念。在一切有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对接收者而言,某些消息比另外一些消息具有更多的信息。例如,甲方告诉乙方一件非常可能发生的事情“明天中午 12 时正常开饭”,与告诉乙方一件极不可能发生的事情“明天 12 时有地震”相比,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为对乙方(接收者)来说,前一件事很可能(或必然)发生,不足为奇,而后一事情却极难发生,使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义,而且,对接收者来说,事件越不可能发生,越使人感到意外和惊奇,则信息量就越大。消息是多种多样的,因此,量度消息中所含的信息量值,必须能够估计任何消息的信息量,且与消息种类无关。另外,消息中所含信息的多少也应和消息的重要程度无关。

由概率论可知,事件的不确定程度可用事件出现的概率来描述。事件出现(发生)的可能性越小,则概率越小;反之,概率越大。由此可知:消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关。消息出现的概率越小,则消息中包含的信息量就越大。且概率为零时(不可能发生事件),信息量为无穷大;概率为1时(必然事件),信息量为0。

消息中所含的信息量与消息出现的概率之间的关系应符合如下规律:

(1) 消息中所含信息量 I 是消息出现的概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1-2)$$

(2) 消息出现的概率越小,它所含信息量越大;反之,信息量越小。且

$$I = \begin{cases} 0 & P = 1 \\ \infty & P = 0 \end{cases}$$

(3) 若干个互相独立的事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[P_1(x)P_2(x)\cdots] = I[P_1(x)] + I[P_2(x)] + \cdots$$

可以看出, I 与 $P(x)$ 之间应满足以上三点,且有如下关系式:

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-3)$$

信息量 I 的单位与对数的底数 a 有关, $a = 2$ 时, I 的单位为比特(bit 或 b); $a = e$ 时, I 的单位为奈特(nat 或 n); $a = 10$ 时, I 的单位为笛特(Det)或称为十进制单位; $a = r$ 时, I 的单位称为 r 进制单位。通常使用的单位为比特。

1.2.2 平均信息量

平均信息量 $\bar{I}$ 等于各符号的信息量与各符号出现的概率的乘积之和。

二进制时:

$$\bar{I} = -P(1)\lg P(1) - P(0)\lg P(0) \quad (1-4)$$

把 $P(1) = P$, $P(0) = 1 - P$ 代入,则

$$\bar{I} = -P\lg P - (1-P)\lg(1-P) = -P\lg P + (P-1)\lg(1-P) \quad (\text{b/符号})$$

对于多个信息符号的平均信息量的计算,设各符号出现的概率为

$$\left(\begin{matrix} x_1, & x_2, & \cdots & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots & P(x_n) \end{matrix} \right) \text{ 且 } \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则每个符号所含信息的平均值(平均信息量)为

$$\begin{aligned} \bar{I} &= P(x_1)[- \lg P(x_1)] + P(x_2)[- \lg P(x_2)] + \cdots + P(x_n)[- \lg P(x_n)] \\ &= \sum_{i=1}^n P(x_i)[- \lg P(x_i)] \end{aligned} \quad (1-5)$$

由于平均信息量与热力学中的熵的形式相似,故通常又称其为信息源的熵。平均信息

量 $\bar{I}$ 的单位为 b/符号。

当离散信息源中每个符号等概率出现, 且各符号的出现为统计独立时, 该信息源的信息量最大。此时最大熵(平均信息量)为

$$\bar{I}_{\max} = \sum_{i=1}^n P(x_i) [-\lg P(x_i)] = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{N} \left(\lg \frac{1}{N} \right) = \lg N \quad (n = N) \quad (1-6)$$

1.3 通信系统的性能指标

衡量、比较一个通信系统的好坏时, 必然要涉及系统的主要性能指标。无论是模拟通信还是数字、数据通信, 尽管业务类型和质量要求各异, 但它们都有一个总的质量指标要求, 即通信系统的性能指标。

1.3.1 一般通信系统的性能指标

通信系统的性能指标包括有效性、可靠性、适应性、保密性、标准性、维修性、工艺性等。从信息传输的角度来看, 通信的有效性和可靠性是最主要的两个性能指标。

通信系统的有效性与系统高效率地传输消息相关联, 即通信系统怎样才能以最合理、最经济的方法传输最大数量的消息。

通信系统的可靠性与系统可靠地传输消息相关联。可靠性是一种量度, 用来表示收到的消息与发出的消息之间的符合程度。因此, 可靠性取决于通信系统的抗干扰性。

一般情况下, 要增加系统的有效性, 就得降低可靠性, 反之亦然。在实际应用中, 常依据实际系统要求采取相对统一的办法, 即在满足一定可靠性指标的前提下, 尽量提高消息的传输速率, 即有效性; 或者, 在维持一定有效性的前提下, 尽可能提高系统的可靠性。

1.3.2 通信系统的有效性指标

在模拟通信系统中, 每一路模拟信号需占用一定的信道带宽, 如何在信道具有一定带宽时充分利用它的传输能力? 这可有几个方面的措施。其中两个主要方面, 一是多路信号通过频率分割复用, 即频分复用(FDM), 以复用路数的多少来体现其有效性。例如, 同轴电缆最高可容纳 10 800 路 4 kHz 的模拟语音信号; 目前使用的无线频段为 $(10^5 \sim 10^{12})$ Hz 范围的自由空间, 更是利用多种频分复用方式实现了各种无线通信。另一方面, 要提高模拟通信有效性, 可根据业务性质减少信号带宽, 如语音信号的调幅单边带(SSB)为 4 kHz, 就比调频信号带宽小数倍, 但其可靠性较差。

数字通信的有效性主要体现为单个信道通过的信息速率。对于基带数字信号, 可以采用时分复用(TDM)以充分利用信道带宽。数字信号频带传输, 可以采用多元调制来提高有效性。数字通信系统的有效性可用传输速率来衡量, 传输速率越高, 则系统的有效性越好。通常可从以下三个角度来定义传输速率。

1. 码元传输速率 R_B

码元传输速率通常又称为码元速率, 用符号 R_B 表示。码元速率是指单位时间(每秒)内传输码元的数目, 其单位为波特(Baud), 用符号“B”表示。例如, 某系统在 2 s 内共传送

4800 个码元, 则系统的码元速率为 2400 B。

数字信号一般有二进制与多进制之分, 但码元速率 R_B 与信号的进制无关, 只与码元宽度 T_B 有关, 即

$$R_B = \frac{1}{T_B} \quad (1-7)$$

通常在给出系统码元速率时, 要说明码元的进制。多进制(M)码元速率 R_{BM} 与二进制码元速率 R_{B2} 之间, 在保证系统信息速率不变的情况下, 可相互转换, 转换关系式为

$$R_{B2} = R_{BM} \cdot \lg M (B) \quad (1-8)$$

式中, $M = 2^k$, $k = 2, 3, 4, \dots$ 。

2. 信息传输速率 R_b

信息传输速率简称信息速率, 又可称为传信率、比特率等。信息传输速率用符号 R_b 表示。 R_b 是指单位时间(每秒)内传送的信息量, 单位为比特/秒(bit/s), 简记为 b/s。例如, 若某信源在 1 s 内传送 1200 个符号, 且每一个符号的平均信息量为 1 b, 则该信源的 R_b 为 1200 b/s。

因为信息量与信号进制数 M 有关, 所以, R_b 也与 M 有关。例如, 在八进制中, 当所有传输的符号独立等概率出现时, 一个符号能传递的信息量为 $\lg 8 = 3$, 当符号速率为 1200 B 时, 信息速率为 $1200 \times 3 = 3600$ b/s。

3. R_b 与 R_B 的关系

在二进制中, 码元速率 R_{B2} 同信息速率 R_{b2} 的关系在数值上相等, 只是单位不同。

在多进制中, R_{BM} 与 R_{bM} 数值不同, 单位也不同。它们之间在数值上有如下关系式:

$$R_{bM} = R_{BM} \cdot \lg M \quad (1-9)$$

在码元速率保持不变的情况下, 二进制信息速率 R_{b2} 与多进制信息速率 R_{bM} 之间的关系为

$$R_{bM} = (\lg M) R_{b2} \quad (1-10)$$

4. 频带利用率 η

频带利用率指传输效率。我们不仅关心通信系统的传输速率, 还要看在这样的传输速率下所占用的信道频带宽度是多少。如果频带利用率高, 说明通信系统的传输效率高, 否则相反。

频带利用率的定义是单位频带内码元传输速率的大小, 即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (B/Hz) \quad (1-11)$$

频带宽度 B 的大小取决于码元速率 R_B , 而码元速率 R_B 与信息速率有确定的关系。因此, 频带利用率还可用信息速率 R_b 的形式来定义, 以便比较不同系统的传输效率, 即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (b/s \cdot Hz^{-1}) \quad (1-12)$$