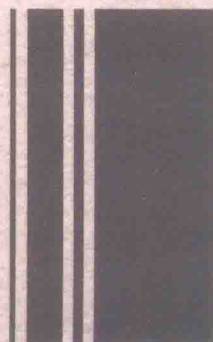
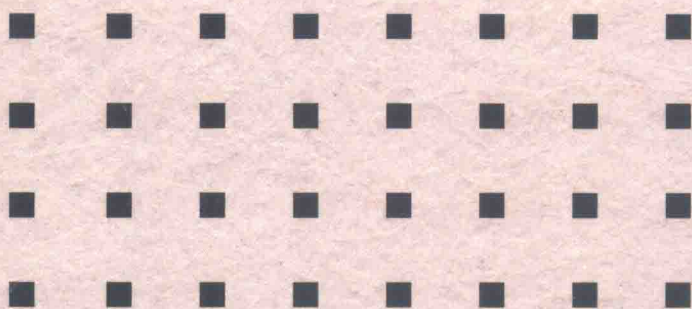


中国电子教育学会高教分会推荐·现代通信技术系列教材
高等学校新工科应用型人才培养“十三五”规划教材



数据通信 与计算机网络

中兴通讯亚太区实训总部 组编
陈彦彬 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐·现代通信技术系列教材
高等学校新工科应用型人才培养“十三五”规划教材

数据通信与计算机网络

中兴通讯亚太区实训总部 组编

陈彦彬 主编



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容涵盖了数据通信与计算机网络的基本概念、原理和应用。全书共 8 章, 主要介绍了通信网络、数据通信的发展、网络的 OSI 模型和 TCP/IP 模型、数据通信设备和技术、局域网、广域网、互联网、无线网络、物联网、SDN 网络、网络操作系统、网络安全等内容, 最后在第 8 章给出了网线制作、交换机 Telnet 远程登录等 6 个实训项目。本书既体现了知识的实用性、前沿性, 也考虑了技术发展的关联性。

本书由校企合作共同完成编写, 实践性、技术性、综合性较强, 可以作为高等院校电子信息工程、通信工程、物联网、信息工程、电气工程、自动化、计算机等相关专业的教材, 也可供相关岗位培训使用或作为自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数据通信与计算机网络/陈彦彬主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2018.8

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5004 - 3

I. ① 数… II. ① 陈… III. ① 数据通信 ② 计算机网络

IV. ① TN919 ② TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 156835 号

策划编辑 李惠萍

责任编辑 张静雅 雷鸿俊

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 北京虎彩文化传播有限公司

版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15

字 数 350 千字

印 数 1~1000 册

定 价 37.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5004 - 3/TN

XDUP 5306001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

《数据通信与计算机网络》

编委会名单

主 编	陈彦彬					
副主编	李晓芹					
主 任	王中训	王 平	齐现伟	荆 蕾	徐红梅	
	曲昇港					
编 委	晋 刚	王作鹏	谭业武	刘汉平	李跃田	
	徐 健	王元国	薛庆文	姜 荣	梁 强	
	吴晓燕	张立春	李 峰	徐桂洪	安庆森	
	原 帅	段嗣妍	刘美娟	孙宝江	崔维群	
	肖丰霞	王金平	李洪秀	李德刚	史 瑞	
	郑雅嫔	邓倩倩				

前言

数据通信、计算机网络技术是信息时代的关键技术,随着 3G、4G、5G 无线通信网络的应用以及物联网、人工智能的技术发展,数据通信基本理论、通信网络的基本原理以及各种电信的新技术已经与每个人的学习、工作和生活密切相关。

本书由校企合作共同完成。与同类教材相比,本书更注重联系实际,强调实用性和综合性,简洁易懂。全书内容丰富,既介绍了技术发展的历史,也介绍了技术发展的方向。结合应用型高校的特点,将数据通信技术、网络技术和计算机技术相结合。通过本书内容的学习,可以提高学生的实践应用能力,并能帮助学生为今后的就业和创业打下良好的基础。

本书主要内容如下:第 1 章介绍了数据通信网络;第 2 章介绍了数据通信基础知识,包含传输方式、传输介质、交换技术、复用技术、差错控制技术;第 3 章介绍了 OSI 模型和 TCP/IP 模型,其中 OSI 模型重点介绍了数据链路层以及 MAC 地址、网络层以及 IP 地址定义, TCP/IP 模型重点介绍了传输层的 TCP/UDP 协议、应用层的各种协议;第 4 章介绍了网络接口、网卡、集线器、网桥、交换机、路由器、网关等网络设备,在交换机部分重点介绍了 VLAN 以及 802.1Q 协议,在路由器部分重点介绍了路由;第 5 章介绍了网络体系的划分,包括局域网、广域网、互联网、无线网络、SDN 网络、物联网;第 6 章介绍了各种网络操作系统;第 7 章介绍了网络安全技术,包括防火墙、安全网关、VPN 网络技术以及产品;第 8 章介绍了网线制作、交换机 Telnet 远程登录、静态路由应用、ACL 访问控制列表、FTP 服务器搭建等实训项目。附录部分给出了常见通信类英文缩写词。本书在章节内容的安排上,考虑到人们日常工作习惯,将 MAC 地址、IP 地址放在了 OSI 模型部分,以使读者对二层交换和三层路由的知识有更好的理解;将 TCP/UDP 协议、端口的定义等相关知识放在了 TCP/IP 模型部分,这样初学者对于传输层和应用层之间关系的学习就不会受到 OSI 模型的干扰;本

书也为初学者更好地理解数据通信的原理提供了清晰的思路。

本书编写过程中参考了相关领域成熟的优秀教材，所参考书籍的内容对本书的完成起到了重要作用。在此，本书的编写人员对所有被参考书籍的作者表示诚挚的谢意。

由于数据通信与计算机网络技术和无线通信、卫星通信、物联网等新技术结合越来越紧密，涉及的面已经不仅仅限于传统的数据通信设备，书中可能有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2018 年 4 月

目录

MULU

第 1 章 通信网络概述	1	2.3.1 有线传输介质	24
1.1 数据通信概述	1	2.3.2 无线传输介质	28
1.1.1 数据通信的发展过程	1	2.3.3 传输介质特性	28
1.1.2 模拟通信和数字通信	2	2.4 数据交换技术	29
1.1.3 数据通信系统模型	4	2.4.1 电路交换	29
1.1.4 数据通信系统的主要技术指标	5	2.4.2 报文交换	29
1.1.5 数据通信系统的传输手段	7	2.4.3 分组交换	29
1.2 计算机网络概述	9	2.5 多路复用技术	30
1.2.1 计算机网络的形成与发展	9	2.5.1 频分多路复用	30
1.2.2 计算机网络的概念、功能和性能指标	11	2.5.2 时分多路复用	31
1.2.3 计算机网络的组成与分类	12	2.5.3 码分多路复用	31
1.2.4 常见的国际标准化组织	18	2.5.4 空分多路复用	31
本章练习题	19	2.6 多址接入技术	32
本章小结	20	2.6.1 频分多址	32
第 2 章 数据通信基础知识	21	2.6.2 时分多址	32
2.1 数据和信号	21	2.6.3 码分多址	33
2.1.1 数据	21	2.6.4 空分多址	33
2.1.2 信号	21	2.7 差错控制技术	35
2.2 数据通信传输方式	22	2.7.1 差错控制简介	35
2.2.1 通信方式	22	2.7.2 差错控方法	36
2.2.2 传输方式	22	2.7.3 差错控制作用	39
2.3 传输介质及特性	24	本章练习题	39
		本章小结	40

第3章 计算机网络模型详解	41	4.2 网卡	88
3.1 计算机网络的体系结构	41	4.2.1 网卡简介	88
3.1.1 定义和形成	41	4.2.2 网卡功能详解	88
3.1.2 OSI模型标准简介	42	4.2.3 网卡的主要功能	89
3.2 OSI七层模型详解	42	4.3 集线器	89
3.2.1 物理层	42	4.3.1 集线器简介	89
3.2.2 数据链路层	45	4.3.2 集线器的工作原理	89
3.2.3 网络层	49	4.3.3 集线器的主要功能	90
3.2.4 传输层	62	4.3.4 集线器的应用场景	90
3.2.5 会话层	63	4.4 网桥	90
3.2.6 表示层	64	4.4.1 网桥的工作原理	91
3.2.7 应用层	65	4.4.2 网桥的优缺点	91
3.3 TCP/IP参考模型	66	4.4.3 网桥的分类	91
3.3.1 网络接口层	66	4.4.4 网桥的基本特性	92
3.3.2 网络层	66	4.5 交换机	93
3.3.3 传输层	66	4.5.1 交换机的工作原理	93
3.3.4 应用层	70	4.5.2 交换机的分类	95
3.4 模型对比	77	4.5.3 交换机的层级划分	95
3.4.1 共同点	77	4.5.4 VLAN技术	97
3.4.2 不同点	77	4.5.5 交换机产品介绍	100
3.5 数据封装	78	4.6 路由器	106
3.5.1 封装原理	78	4.6.1 路由简介	106
3.5.2 封装过程	78	4.6.2 路由器的工作原理	107
3.5.3 数据解封装	79	4.6.3 路由工作过程	107
3.5.4 IP报文格式	79	4.6.4 路由协议分类	109
本章练习题	82	4.6.5 路由优先级	112
本章小结	83	4.6.6 路由器产品介绍	112
第4章 设备及技术详解	84	4.6.7 ACL访问控制	115
4.1 网络接口类型	84	4.7 网关	119
4.1.1 局域网接口	84	本章练习题	120
4.1.2 广域网接口	86	本章小结	121
4.1.3 逻辑接口	86	第5章 计算机网络体系介绍	122
		5.1 局域网	122

5.1.1 局域网概述	122
5.1.2 介质访问控制方法	127
5.1.3 以太网技术	130
5.2 广域网	132
5.2.1 广域网特点	133
5.2.2 广域网类型	133
5.2.3 广域网实例	134
5.3 互联网	136
5.3.1 发展历程	136
5.3.2 互联网的组成	137
5.3.3 互联网的运行原理	137
5.3.4 互联网接入技术	138
5.4 无线网络	139
5.4.1 无线网络概述	140
5.4.2 无线网络技术分类	140
5.4.3 无线网络标准	147
5.4.4 无线局域网	148
5.5 SDN 网络	152
5.5.1 SDN 的概念	152
5.5.2 SDN 发展历程	152
5.5.3 SDN 体系架构	153
5.5.4 SDN 的特征	154
5.5.5 部署 SDN 优势	154
5.5.6 SDN 与网络虚拟化	155
5.6 物联网	155
5.6.1 物联网的概念	155
5.6.2 物联网的关键技术及层次	156
5.6.3 物联网的应用	157
5.6.4 NB-IoT 介绍	158
5.6.5 ThingxCloud 兴云平台	160
本章练习题	161
本章小结	162

第 6 章 网络操作系统	164
6.1 操作系统概述	164
6.1.1 基本概念	164
6.1.2 系统特点	164
6.1.3 主要功能	165
6.1.4 系统作用	167
6.1.5 系统分类	167
6.1.6 主要类型	168
6.2 主流操作系统	170
6.2.1 Windows 操作系统	170
6.2.2 Linux 操作系统	172
6.2.3 UNIX 操作系统	180
本章练习题	181
本章小结	182
第 7 章 网络安全技术	183
7.1 网络安全概述	183
7.1.1 网络安全的概念	183
7.1.2 网络安全的主要特性	183
7.1.3 网络安全系统功能	184
7.1.4 等级保护级别分类	185
7.2 网络攻击概述	185
7.2.1 网络攻击简介	185
7.2.2 网络攻击的分类	186
7.2.3 网络攻击的层次	187
7.2.4 网络攻击的方法	188
7.2.5 网络攻击的步骤	192
7.3 主流网络安全系统	193
7.3.1 防火墙系统	193
7.3.2 入侵检测系统	198
7.3.3 入侵防御系统	202
7.3.4 安全网关系统	204
7.3.5 Web 应用防火墙系统	206

7.3.6 网络防病毒系统	207	8.2 交换机 Telnet 远程登录	218
7.3.7 VPN 网络技术	208	8.3 交换机 VLAN 应用	220
7.3.8 产品介绍	211	8.4 静态路由应用	222
本章练习题	215	8.5 ACL 访问控制列表	224
本章小结	216	8.6 FTP 服务器搭建	226
第 8 章 相关实训项目	217	附录 常见通信类英文缩写词	228
8.1 网线制作	217	参考文献	230

第1章 通信网络概述

【本章内容简介】

本章主要介绍了两部分内容,即数据通信概述及计算机网络概述。其中数据通信概述部分包括模拟通信、数字通信以及数据通信的发展史及演变过程,介绍了每种通信技术的概念、特点、关键技术等相关知识;计算机网络概述包括计算机网络的发展史、功能、特点、组成、分类及拓扑结构等基础知识。

【本章重点难点】

重点掌握数据通信概述及计算机网络概述两大部分的相关概念、发展过程、特点、关键技术及模型框架等知识。

1.1 数据通信概述

数据通信是依照一定的通信协议,在两点或多点之间通过某种传输媒介(如电缆、光缆),完成数据传输、信息交换和通信处理等任务的过程。数据通信是为了实现计算机与计算机或终端与计算机之间的信息交互而产生的一种通信技术。数据是把事件的某些属性规范化后的表现形式;信号是数据的具体的物理表现,它把消息用电信号的形式表达。而通信就是把消息这一数据的具体物理表现从一个地方传递到另一个地方,完成信息(或消息)的传输和交换。

1.1.1 数据通信的发展过程

1937年,英国人A. H. 里夫斯提出脉冲编码调制(PCM),从而推动了模拟信号数字化的进程。1947年,美国贝尔实验室研制出供实验用的24路电子管脉码调制装置,证实了实现PCM的可行性。1953年,不用编码管的反馈比较型编码器被发明,扩大了输入信号的动态范围。20世纪60年代,数字传输理论与技术得到迅速发展;计算机网络开始出现。1962年,美国研制出晶体管24路1.544 Mb/s脉码调制设备,并在市话网局间使用。20世纪70年代,商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统投入使用;一些公司制定计算机网络体系结构。20世纪80年代,开通数字网络的公用业务;个人计算机和计算机局域网出现;网络体系结构国际标准陆续制定。20世纪90年代,蜂窝电话系统开通,各种无线通信和数据移动通信技术不断涌现;光纤通信得到迅速普遍的应用;国际互联网和多媒体通信技术得到极大发展。1997年,68个国家签订国际协定,互相开放电信市场。20世纪90年代,数字通信向超高速大容量长距离方向发展,高效编码技术日益成熟,语声编码已走向实用化,

新的数字化智能终端进一步发展。

1.1.2 模拟通信和数字通信

按照传输信号的种类可以将数据通信分为模拟通信和数字通信,下面分别进行介绍。

1. 模拟通信

1) 模拟通信的定义

模拟信号指在一定范围内可以连续取值的信号。时间上连续的模拟信号包括连续变化的图像(电视、传真)信号等,时间上离散的模拟信号是一种抽样信号。模拟信号分布于自然界的各个角落,如每天温度的变化。电学上的模拟信号主要是指振幅和相位都连续的电信号,此信号可以通过模拟电路进行各种运算,如放大、相加、相乘等。

模拟通信是一种以模拟信号传输信息的通信方式。电话通信是最常用的一种模拟通信。模拟通信系统主要由用户设备、终端设备和传输设备等部分组成。其工作过程是:在发送端,先由用户设备将用户送出的非电信号转换成模拟电信号,再经终端设备将它调制成适合信道传输的模拟电信号,然后送往信道传输。到了接收端,信号经终端设备解调,然后由用户设备将模拟电信号还原成非电信号,送至用户。

2) 模拟通信的特点

模拟通信系统设备简单,占用频带窄且容易实现,但存在以下几个缺点:

(1) 保密性差。模拟通信,尤其是微波通信和有线明线通信,很容易被窃听。只要收到模拟信号,就容易得到通信内容。

(2) 抗干扰能力弱。电信号在沿线路的传输过程中会受到外界的和通信系统内部的各种噪声干扰,噪声和信号混合后难以分开,从而使得通信质量下降。线路越长,噪声的积累也就越多。

(3) 设备不易大规模集成化。

(4) 不适于飞速发展的计算机通信要求。

2. 数字通信

1) 数字通信的定义

数字信号是一种离散的脉冲序列,它的取值是有限个数。数字通信是一种以数字信号传输信息或用数字形式对载波信号进行调制后再传输的通信方式。电话和电视模拟信号经数字化后,再进行数字信号的调制和传输,便称为数字电话信号和数字电视信号。以计算机为终端机的相互间的数据通信,因信号本身就是数字信号而属于数字通信。卫星通信中采用的时分或码分的多路通信也属于数字通信。

通常,在数字通信系统模型中,信源输出的是模拟信号,经过数字终端的信源编码器编码后成为数字信号,终端输出的数字信号经过信道编码器后变成适合于信道传输的数字信号,然后由解调器把数字信号调制到系统所使用的数字信道上,再传输到接收端,经过相反的转换后最终送到信宿。数字通信系统的组成框图如图 1-1 所示。

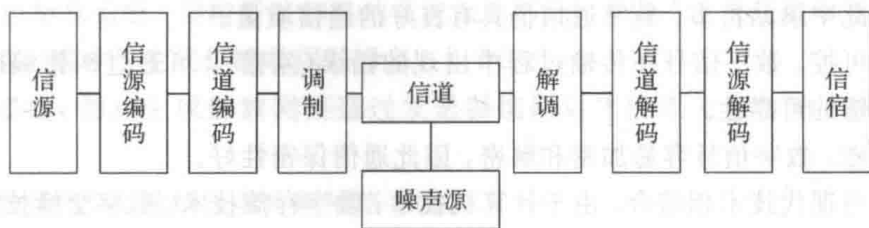


图 1-1 数字通信系统的组成框图

数字通信系统各部分的作用如下：

(1) 信源的作用：把原始信息变换成原始电信号。

(2) 信源编码的作用。

① 实现模拟信号的数字化，即完成 A/D 变化。

② 提高信号传输的有效性，即在保证一定传输质量的情况下，用尽可能少的数字脉冲来表示信源产生的信息。信源编码也称为频带压缩编码或数据压缩编码。

(3) 信道编码的作用。

① 信道编码的目的：信道编码主要解决数字通信的可靠性问题。

② 信道编码的原理：对传输的信息码元按一定的规则加入一些冗余码(监督码)，形成新的码字，接收端按照约定好的规律进行检错甚至纠错。

③ 信道编码又称为差错控制编码、抗干扰编码、纠错编码。

(4) 数字调制的概念和作用。

① 数字调制技术的概念：把数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适合在信道中传输的频带信号。

② 数字调制的主要作用：提高信号在信道上传输的效率，达到信号远距离传输的目的。

(5) 同步的概念和作用。

同步是指通信系统的收、发双方采用统一的时间标准，使它们的工作“步调一致”。对于数字通信而言，同步是至关重要的。如果同步存在误差或失去同步，通信过程中就会出现大量的误码，导致整个通信系统失效。

(6) 信道：信号传输媒介的总称。传输信道的类型有有线信道(如电缆、光纤)和无线信道(如自由空间)两种。

(7) 噪声源：通信系统中各种设备以及信道中所固有的噪声。为了分析方便，把噪声源视为各处噪声的集中表现而抽象加入信道。

2) 数字通信的特点

数字通信系统的优点如下：

(1) 抗干扰能力强。由于在数字通信中，传输的信号幅度是离散的，以二进制为例，信号的取值只有两个，这样接收端只需判别两种状态。信号在传输过程中受到噪声的干扰，必然会使波形失真，接收端对其进行抽样判决，以辨别是两种状态中的哪一个。只要噪声的大小不足以影响判决的正确性，就能正确接收(再生)。

数字通信抗噪声性能好，还表现在微波中继通信时，它可以消除噪声积累。这是因为数字信号在每次再生后，只要不发生错码，它仍然像信源中发出的信号一样，没有噪声叠

加在上面。因此中继站再多，数字通信仍具有良好的通信质量。

(2) 差错可控。数字信号在传输过程中出现的错误(差错)，可通过纠错编码技术来控制，以提高传输的可靠性。

(3) 易加密。数字信号容易加密和解密，因此通信保密性好。

(4) 易于与现代技术相结合。由于计算机技术、数字存储技术、数字交换技术以及数字处理技术等现代技术飞速发展，许多设备、终端接口均是数字信号，因此极易与数字通信系统相连接。

数字通信系统的缺点如下：

(1) 频带利用率不高。系统的频带利用率，可用系统允许最大传输带宽(信道的带宽)与每路信号的有效带宽之比来表示。数字通信中数字信号占用的频带要宽得多，以电话为例，一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽，但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据 20~60 kHz 的带宽。因此，如果系统传输带宽一定的话，模拟电话的频带利用率要高出数字电话的 5~15 倍。

(2) 系统设备比较复杂。数字通信中，要准确地恢复信号，接收端需要严格的同步系统，以保持接收端和发送端严格的节拍一致。因此，数字通信系统及设备一般都比较复杂，体积较大。

不过，随着新的宽带传输信道(如光导纤维)的采用、窄带调制技术和超大规模集成电路的发展，数字通信的这些缺点已经弱化。随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展和广泛应用，数字通信在当今的通信方式中取代模拟通信而占主导地位。

1.1.3 数据通信系统模型

数据通信系统模型是指远端的数据终端设备 DTE 通过数据电路与计算机系统相连。数据电路由通信信道和数据通信设备 DCE 组成。如果通信信道是模拟信道，DCE 的作用就是把 DTE 送来的数据信号转换成模拟信号再送往信道，信号到达目的节点后，把信道送来的模拟信号转换成数据信号再送到 DTE；如果通信信道是数字信道，DCE 的作用就是实现信号码型与电平的转换、信道特性的均衡、收发时钟的形成与供给以及线路接续控制。

数据通信系统模型如图 1-2 所示。

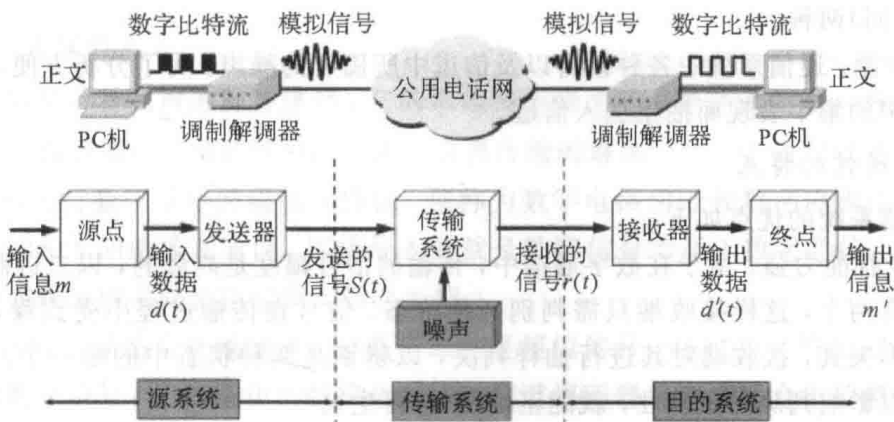


图 1-2 数据通信系统模型

该模型包括源系统、传输系统和目的系统三个部分,有以下5个组成要素:

- (1) 源点,通常是生成传输数据的设备,如PC机。
- (2) 发送器,源点生成的数据要通过发送器编码后才能成为在传输系统中传输的信号。
- (3) 传输系统,传输线或者传输网络系统。
- (4) 接收器,接收来自传输系统的信号,并转换为终点能处理的信息。
- (5) 终点,获取来自接收器数据的设备。

各个组成部分的具体实现及相关技术将在其余章节予以详述。

1.1.4 数据通信系统的主要技术指标

数据通信系统的指标包括有效性指标和特征性指标。有效性指标指衡量数据通信系统的传输能力的指标。常用的有效性指标包括带宽、传输速率和频带利用率等。特征性指标指衡量数据通信系统传输质量的指标。这些指标与有效性指标有很大关系。常用的特征性指标包括差错率、可靠性、通信的建立时间、适应性和可维护性、经济性、标准性。下面就其中的几个重要指标进行说明。

1. 频谱与带宽

信号是数据的电磁编码,信号中包含了所要传递的数据。信号一般以时间为自变量,以表示消息(或数据)的某个参量(振幅、频率或相位)为因变量。信号按其自变量时间的取值是否连续,可分为连续信号和离散信号;按其因变量的取值是否连续,又可分为模拟信号和数字信号。

信号具有时域和频域两种最基本的表现形式和特性。时域特性反映信号随时间变化的情况。频域特性不仅含有与信号时域中相同的信息量,而且通过对信号的频谱分析,还可以清楚地了解该信号的频谱分布情况及所占有的频带宽度。为了得到所传输的信号对接收设备及信道的要求,只了解信号的时域特性是不够的,还必须知道信号的频谱分布情况。由于信号中的大部分能量都集中在一个相对较窄的频带范围之内,因此将信号大部分能量集中的那段频带称为有效带宽,简称带宽。任何信号都有带宽。一般来说,信号的带宽越宽,利用这种信号传送数据的速率就越高,要求传输介质的带宽也越宽。

下面将简单介绍常见信号的频谱和带宽。

声音信号的频谱大致在20 Hz~2000 kHz的范围(低于20 Hz的信号为次声波,高于2000 kHz的信号为超声波),但用一个窄得多的带宽就能使可接受的话音重现,因而话音信号的标准频谱为300~3400 Hz,其带宽为3 kHz。电视信号的频谱为0~4 MHz,因此其带宽为4 MHz。作为一个特殊的例子,单稳脉冲信号的带宽为无穷大。而对于二进制信号,其带宽一般依赖于信号波形的确切形状以及0、1的次序。信号的带宽越大,它就越忠实地表示着数字序列。

2. 截止频率与带宽

根据傅立叶级数可知,如果一个信号的所有频率分量都能完全不变地通过信道传输到接收端,那么在接收端由这些频率分量叠加起来而形成的信号就和发送端的信号是完全一

样的,即接收端完全恢复了发送端发出的信号。如果所有的频率分量都被等量衰减,那么接收端接收到的信号虽然在振幅上有所衰减,但并没有发生畸变。但现实世界上,没有任何信道能毫无损耗地通过所有频率分量。传输信道和设备对不同的频率分量的衰减程度是不同的,有些频率分量几乎没有衰减,而有些频率分量则衰减明显,这就是说,信道是具有不同的振幅频率特性的,因而导致输出信号发生畸变。通常情况是频率为 0 到 f_c 赫兹范围内的信号在信道传输过程中不会发生衰减(或其衰减是一个非常小的常量),而在 f_c 频率之上的所有信号在传输过程中衰减明显。我们把信号在信道传输过程中某个分量的振幅衰减到原来的 0.707(即输出信号的功率降低了近一半)时所对应的那个频率称为信道的截止频率(Cut-off Frequency)。截止频率反映了传输介质本身所固有的物理特性。有些时候,信道对应着两个截止频率 f_1 和 f_2 ,它们分别被称为下载截止频率和上截止频率,而这两个截止频率之差 $f_2 - f_1$ 被称为信道的带宽。如果输入信号的带宽小于信道的带宽,则输入信号的全部频率分量都能通过信道,因而信道输出端得到的输出波形将是不失真的。但如果输入信号的带宽大于信道的带宽,则信号中某些频率分量就不能通过信道,这样输出得到的信号将与发送端发送的信号有些不同,即产生了失真。为了保证数据传输的正确性,必须限制信号的带宽。

3. 数据传输率

单位时间内能传输的二进制位数称为数据传输率。数字信道是一种离散信道,它只能传送离散值的数字信号,信道的带宽决定了信道中能不失真地传输脉冲序列的最高速率。

一个数字脉冲称为一个码元,人们用码元速率表示单位时间内信号波形的变换次数,即单位时间内通过信道传输的码元个数。若信号码元宽度为 T 秒,则码元速率 $B=1/T$ 。码元速率的单位叫波特(Baud),所以码元速率也叫波特率。早在 1924 年,贝尔实验室的研究员亨利·尼奎斯特就推导出了有限带宽无噪声信道的极限波特率,称为尼奎斯特定理。若信道带宽为 W ,则尼奎斯特定理指出最大码元速率为 $B=2W$ (Baud)。尼奎斯特定理指定的信道容量,也叫尼奎斯特极限,这是由信道的物理特性决定的。超过尼奎斯特极限传送脉冲信号是不可能的,所以要进一步提高波特率就必须改善信道带宽。

码元携带的信息量由码元取的离散值个数决定。若码元取两种离散值,则一个码元携带 1 比特信息。若码元可取四种离散值,则一个码元携带 2 比特信息,即一个码元携带的信息量 n 与码元的种类数 N 有如下关系:

$$n = \lg N$$

单位时间内在信道上传送的信息量(比特数)称为数据速率。在一定的波特率下提高速率的途径是用一个码元表示更多的比特数。如果把两比特编码为一个码元,则数据速率可成倍提高。对此,有以下公式:

$$R = B \lg N = 2W \lg N \text{ (b/s)}$$

其中 R 表示数据速率,单位是比特每秒,简称为 bps 或 b/s。

数据速率和波特率是两个不同的概念。仅当码元取两个离散值时两者才相等。对于普通电话线路,带宽为 3000 Hz,最高波特率为 6000 Baud。而最高数据速率可随编码方式的不同而取不同的值。这些都是在无噪声的理想情况下的极限值。实际信道会受到各种噪声的干扰,因而远远达不到按尼奎斯特定理计算出的数据传送速率。香农(Shannon)的研究

表明,有噪声的极限数据速率可由下面的公式计算:

$$C = W \lg\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

这个公式叫做香农定理,其中 S 为信号的平均功率, N 为噪声的平均功率, S/N 叫做信噪比。由于在实际使用中 S 与 N 的比值太大,故常取其分贝数(dB)。分贝与信噪比的关系为: $1 \text{ dB} = 10 \lg S/N$ 。例如,当 S/N 为 1000 时,信噪比为 30 dB。这个公式与信号取的离散值无关,也就是说无论用什么方式调制,只要给定了信噪比,则单位时间内最大的信息传输量就确定了。例如,信道带宽为 3000 Hz,信噪比为 30 dB,则最大数据速率为

$$C = 3000 \lg(1 + 1000) \approx 3000 \times 9.97 \approx 30\ 000 \text{ (b/s)}$$

这是极限值,只有理论上的意义。实际上在 3000 Hz 带宽的电话线上数据速率能达到 9600 b/s 就很不错了。

综上所述,我们有两种带宽的概念,模拟信道的带宽按照公式 $W = f_2 - f_1$ 计算,例如 CATV 电缆的带宽为 600 Hz 或 1000 Hz;数字信道的带宽为信道能够达到的最大数据速率,例如以太网的带宽为 10 Mb/s 或 100 Mb/s,两者可通过香农定理互相转换。

1.1.5 数据通信系统的传输手段

根据数据传输系统的传输手段的不同,可以将其分为电缆通信、微波中继通信、光纤通信、卫星通信、移动通信等。下面分别进行介绍。

1. 电缆通信

电缆通信多指采用双绞线、同轴电缆等介质进行通信的一种手段。

双绞线是由两条互相绝缘的铜线组成,其典型直径为 1 mm。这两条铜线拧在一起,就可以减少邻近线对电气的干扰。双绞线既能传输模拟信号,也能传输数字信号。由于性能较好且价格便宜,双绞线得到广泛应用。双绞线可以分为非屏蔽双绞线和屏蔽双绞线两种,屏蔽双绞线性能优于非屏蔽双绞线。双绞线由于性能较好且价格便宜,得到了广泛应用。

同轴电缆比双绞线的屏蔽性要更好,因此在更高速度上可以传输得更远。它以硬铜线为芯(导体),外包一层绝缘材料(绝缘层),这层绝缘材料再用密织的网状导体环绕构成屏蔽,其外又覆盖一层保护性材料(护套)。同轴电缆的这种结构使它具有更宽的带宽和极好的噪声抑制特性。1 km 的同轴电缆可以达到 1~2 Gb/s 的数据传输速率。

2. 微波中继通信

微波是一种频率极高的,波长很短的电磁波。微波对应频率范围为 300 MHz~3000 GHz,波长范围为 1 m~0.1 mm。微波中继通信是指利用微波作为载波并采用中继的方式在地面上进行无线通信的过程。

采用中继方式的原因有两个:一是微波传播具有视距传播特性,即电磁波是沿直线传播的,而地球表面是曲面,若通信两地间的距离较长,且天线所架高度有限,则发送端所发出的电磁波就会受到地面阻挡,而无法到达接收端。所以,为了延长通信距离,需要在通信两地之间设立若干中继站,进行电磁波的转接。另一原因是微波在传播过程中有损耗,在远距离通信时有必要采用中继方式对信号逐段接收、放大和发送。