

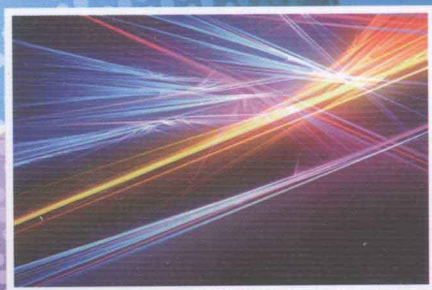


普通高等教育“十二五”规划教材

◎ 电子信息科学与工程类专业 规划教材

宽带通信系统 与网络测量技术

◎ 裴昌幸 朱畅华 权东晓 韩宝彬 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书内容主要由“通信系统测量”与“网络测量”两大部分组成。通信系统测量部分除讨论通信系统模型、指标,信号频谱、误码率、功率测量技术外,重点探讨了宽带移动通信系统信道测量,以及光纤通信系统性能测量技术;在网络测量部分中,主要讨论网络测量基础知识,网络性能和网络设备指标测量,网络拓扑发现方法与可视化,入侵检测与脆弱性分析,网络流量测量与建模,非合作探测的方法以及黑客、木马等技术。本书最后较详细地介绍了物联网的概念、RFID系统和无线传感器网络的测量方法。各章后配有习题与思考题,并配有免费电子课件。

本书可作为电子、通信、信息系统及网络工程等专业本科生或研究生教材,经裁剪也可作为专科教材,同时可作为相关领域的工程技术人员和管理人员深造、研究和开发的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

宽带通信系统与网络测量技术 / 裴昌幸, 朱畅华, 权东晓等编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.7

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-17332-5

I. ①宽… II. ①裴… ②朱… ③权… III. ①宽带通信系统—计算机通信网—高等学校—教材 IV. ①TN915.142

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第125202号

责任编辑: 竺南直 特约编辑: 郭 莉

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.75 字数: 505千字

印 次: 2012年7月第1次印刷

印 数: 4 000册 定价: 45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

著名科学家门捷列夫一针见血地指出：“没有测量，就没有科学”。在通信系统和网络的研究、开发和运营过程中同样如此，测量起着验证、评测、优化等极其重要的作用。这些测量包括器件、部件（编码器、调制解调器等）、整机（发射机、接收机、交换机、路由器，或收发终端等）、天线，以及系统测量，涉及面极广。具体的通信与网络系统千差万别，不同频段、不同通信体系都有着不同的测量要求，因而也有不同的测量原理、指标和技术手段。

对于通信和信息类专业的本科生、研究生以及从事通信行业的研究开发人员，都需要学习和掌握通信系统和网络的指标及测量方法。在校学习期间，同学们对通信与信息系统和网络测量概念、理论、方法等涉及较少，而实际工作中却大量涉及测量问题；另外，随着卓越工程师培养计划的实施，测试和测量对这部分同学加深理解所学理论、掌握实际知识、积累分析和解决问题的经验尤为重要。本书正是为适应上述需求而编写的。

本书所以命名为“宽带通信系统与网络测量技术”，因为她包含了通信系统测量和网络测量两部分内容：在通信系统测量部分，特别突出了宽带移动通信与 MIMO 通信系统信道测量以及高传输容量的光纤通信系统传输指标测量的讨论；在网络测量部分重点讲述了网络测量体系架构、网络性能指标测量、合作与非合作探测以及入侵检测和网络攻防技术等，同时还讨论了物联网的概念、技术和测量方法。特色十分鲜明。

本书具有内容新颖、取材得当、文字简练、理论联系实际、便于阅读和理解的特点。为了读者课后复习和总结提炼，每章都附有相应的习题和思考题。考虑到部分读者对某些问题颇感兴趣，需要深入研究和探讨，书中还提供了必要的参考文献，其中不少文献是编著者从事国家自然科学基金重点项目面上项目、国家重大专项、陕西省科技攻关等项目研究成果的总结和凝练，极具参考价值。

全书共分为 12 章。第 1 章为通信系统测量概述。在此给出模拟与数字通信系统模型以及主要指标，为后续分析测量打下基础。第 2 章讲述通信系统典型指标测量。包括频谱测量，功率测量，误码率测量。通过这几个主要指标的测量揭示测量的基本方法。第 3 章讲述宽带移动通信系统测量，MIMO 通信系统测量等。第 4 章讲述光纤通信系统测量。包括光收、发信机参数测试，光端机收发自环测试，抖动、漂移、眼图和光纤传输特性测量，光通信网络测量。以上两章重点突出宽带通信系统测量原理方法和技术。第 5~11 章重点讨论网络测量。其中第 5 章讲述网络测量的概念，体系结构、指标体系、方法和技术以及网络测量的关键技术。第 6 章讲述网络端到端性能测量。主要包括：端到端时延测量与时延测量中的同步方法，端到端瓶颈带宽测量以及网络的可用带宽，丢包率的概念及测量方法等。第 7 章讲述不同类型的网络拓扑的发现。内容包括：基于网络管理协议的拓扑发现；基于网络主动探测的拓扑发现；无线网络拓扑发现；P2P 应用层拓扑发现及网络拓扑可视化。第 8 章讲述流量测量和高速网络流量抽样方法；流量建模的基本方法以及自相似性模型。

第9章讲述了网络设备的指标及其测量,包括相关标准、路由器、交换机和服务器的性能指标及测量方法。第10章讲述了入侵检测系统、入侵检测的方法;脆弱性分析的基本概念和方法。第11章讲述了非合作探测,包括黑客、木马及其攻击技术、网络扫描技术和操作系统识别技术。第12章重点讲述物联网概念、关键技术、测量原理和方法。本书各章配有习题与思考题,并提供免费电子课件,任课教师可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书由裴昌幸主编,朱畅华、权东晓、韩宝彬参编。其中裴昌幸编写了第1、2、5、12章,并对全书进行统稿;朱畅华编写了第3、6、7、8、9章和4.6节光网络部分;权东晓编写了第10、11章,同时还编写了各章习题和思考题;韩宝彬编写了第4章;本书的出版,得到西安电子科技大学李建东教授、李晖教授以及诸位学者的关注,提出有指导意义的修改意见;通信与网络测量研究室陈南、易运晖、何先灯给予了较多的支持和帮助,多位博士和硕士研究生参与了打印、绘图、校稿等烦琐而细致的工作,为本书出版付出了辛勤的劳动;电子工业出版社为了此书的尽快出版并及时奉献给读者,进行了深入细致的编审工作,在此一并表示衷心的感谢!

由于时间仓促,编著者水平有限,书中难免有疏漏和错误,敬请广大读者批评和斧正。

编 著 者

2012年5月于西安

目 录

第 1 章 通信系统测量概述	1
1.1 通信系统组成	1
1.1.1 通信系统基本组成	1
1.1.2 模拟通信系统组成	2
1.1.3 模拟通信系统传输指标	3
1.2 数字通信系统组成	3
1.2.1 数字通信系统基本组成	3
1.2.2 数字通信主要特点	4
1.2.3 数字通信系统传输指标	5
1.3 光纤通信系统	6
1.3.1 光纤通信系统基本组成	6
1.3.2 光纤通信系统特点	9
1.3.3 光纤通信系统传输指标	9
1.4 通信系统测量	9
1.4.1 通信系统测量指标和方法	9
1.4.2 通信系统测量的常用仪器	10
1.4.3 测量误差及分析	15
习题与思考题	16
第 2 章 通信系统典型指标测量	17
2.1 通信信号频谱测量	17
2.1.1 多通道滤波器型频谱测量	17
2.1.2 快速傅里叶变换 (FFT) 型频谱测量	18
2.1.3 显示扫频型频谱测量	18
2.1.4 调谐滤波器型频谱测量	18
2.1.5 扫频超外差型频谱测量	19
2.1.6 通信系统的带宽	19
2.2 误码率测量	20
2.2.1 误码率的定义与产生原因	20
2.2.2 电信业务对误码性能的要求	21
2.2.3 误码特性的评定方法与性能参数	21
2.2.4 误码率的测量	22
2.3 功率测量	24
2.3.1 功率的基本概念	24
2.3.2 平均功率的测量方法	25
2.3.3 脉冲峰值功率测量方法	29
2.3.4 功率计	33
习题与思考题	33
第 3 章 宽带无线通信系统信道测量	34
3.1 无线通信系统电波传播信道参数	34
3.1.1 传播损耗	34

3.1.2	时延	34
3.1.3	多普勒频移	34
3.1.4	离开角和到达角	35
3.2	移动通信系统电波传播模型	35
3.2.1	无线信道传播模型	35
3.2.2	MIMO 信道模型	36
3.3	移动通信信道测量	37
3.3.1	基于时分的信道测量	37
3.3.2	基于频分的信道测量	37
3.3.3	基于码分的信道测量	38
3.3.4	基于 MIMO-OFDM 的信道测量	38
3.3.5	各种信道测量方法对比	39
3.4	基于时分的 MIMO 系统信道测量	39
3.4.1	测量系统组成	39
3.4.2	同步方案	41
3.4.3	其他测量方法	41
3.5	分布式 MIMO 系统的信道测量	42
3.5.1	分布式 MIMO 系统概述	42
3.5.2	分布式 MIMO 系统信道模型	43
3.5.3	分布式 MIMO 信道测量	44
3.6	信道特性估计算法	45
3.6.1	SAGE 算法	45
3.6.2	基于 SAGE 算法的 MIMO 信道参数估计	46
	习题与思考题	49
第 4 章	光纤通信系统测量	50
4.1	光纤数字通信系统测量概述	50
4.1.1	假设数字参考连接	50
4.1.2	系统性能指标	51
4.1.3	系统的可靠性指标	54
4.2	光发射机性能参数及测试	55
4.2.1	平均发送光功率	56
4.2.2	消光比	57
4.3	光接收机性能参数及测量	57
4.3.1	光接收机基本组成	58
4.3.2	光接收机的主要参数及其测量	58
4.4	光纤通信系统性能测试	61
4.4.1	光端机收/发自环测试	61
4.4.2	抖动和漂移测试	62
4.4.3	眼图	65
4.5	光纤、光缆及其测量	67
4.5.1	光纤传输特性	68
4.5.2	光纤及光缆测试	75
4.6	光网络的测量	83
4.6.1	SDH 光传送网的测量	83
4.6.2	WDM 系统的测量	90
	习题与思考题	96

第 5 章 网络测量概论	97
5.1 网络测量概述	97
5.1.1 什么是网络测量	97
5.1.2 网络测量的意义	98
5.1.3 网络测量与网络行为学	100
5.2 网络测量体系结构	101
5.2.1 网络测量的分层架构	101
5.2.2 网络测量的指标体系	102
5.3 网络测量的方法、协议与关键技术	104
5.3.1 网络测量方法	104
5.3.2 网络测量协议	105
5.3.3 网络测量的关键技术	106
5.4 TCP/IP 协议简介	107
5.4.1 链路层	108
5.4.2 网络层	109
5.4.3 传输层	112
5.4.4 应用层	115
5.5 网络测量工具	115
5.5.1 最基本的工具软件	115
5.5.2 其他常用工具	124
5.6 网络编程的实现	125
5.6.1 网络通信的工作方式	125
5.6.2 典型的异步通信方式	126
5.6.3 原始套接字	132
习题与思考题	133
第 6 章 网络端到端性能测量	134
6.1 概述	134
6.2 端到端时延测量	135
6.2.1 时延的概念	135
6.2.2 时延测量方法	136
6.2.3 时钟同步方法	139
6.3 网络端到端带宽测量	151
6.3.1 端到端带宽测量的用途、方法和工具	151
6.3.2 端到端瓶颈带宽测量	153
6.3.3 端到端可用带宽测量	155
6.4 丢包率测量	156
6.4.1 丢包率的基本概念	156
6.4.2 丢包率的测量方法	157
习题与思考题	157
第 7 章 网络拓扑发现	158
7.1 概述	158
7.2 基于网络管理协议的拓扑发现	160
7.2.1 基于 SNMP 的网络层拓扑发现	160
7.2.2 基于交换表信息的链路层拓扑发现	161
7.3 基于主动探测的拓扑发现	162

7.3.1	基于 ICMP 的拓扑发现	162
7.3.2	基于端到端性能测试的拓扑推算	163
7.4	无线网络的拓扑发现	164
7.5	基于 ICMP 和 UDP 的拓扑发现实例	166
7.5.1	算法的几个关键技术	167
7.5.2	拓扑发现算法	168
7.5.3	算法性能分析	169
7.6	组播网拓扑发现实例	169
7.6.1	模型描述和丢包率推算	169
7.6.2	二叉丢包树 (BLT) 的拓扑发现算法	170
7.7	拓扑可视化	171
7.8	P2P 应用层拓扑发现及流量控制	173
7.8.1	P2P 技术简介	174
7.8.2	P2P 流量识别	174
7.8.3	P2P 流量识别模块的设计	177
7.8.4	基于可视化拓扑的 P2P 流量优化策略	183
	习题与思考题	186
第 8 章	网络流量测量与建模	187
8.1	概述	187
8.2	网络流量测量方法	188
8.2.1	Winpcap 工作机理	188
8.2.2	以太网中数据包的捕获	191
8.3	高速网络中流量的抽样	194
8.3.1	抽样技术的特点及演进	194
8.3.2	报文抽样分类	195
8.3.3	报文抽样技术的应用及发展趋势	196
8.4	网络流量的模型	197
8.4.1	网络流量模型	197
8.4.2	网络业务量的自相似性	202
8.4.3	流量的一般特性	207
	习题与思考题	209
第 9 章	网络设备指标测量	210
9.1	相关标准、参数与测量仪表	210
9.1.1	相关标准	210
9.1.2	测量参数	210
9.1.3	网络设备测量仪表	213
9.2	路由器的性能测量	213
9.2.1	路由器的主要性能指标	214
9.2.2	路由器测量	216
9.3	交换机性能指标测量	222
9.3.1	交换机的主要性能指标	222
9.3.2	交换机性能指标的测量方法	224
9.4	Web 服务器测量	227
9.4.1	Web 服务器的基础架构	227
9.4.2	Web 服务器测量	228
	习题与思考题	236

第 10 章 入侵检测与脆弱性分析	237
10.1 入侵检测	237
10.1.1 入侵检测的概念	237
10.1.2 入侵检测的方法	238
10.1.3 入侵检测系统	242
10.1.4 入侵与入侵检测技术的发展	244
10.2 脆弱性分析	245
10.2.1 脆弱性分析	245
10.2.2 脆弱性分析实现	248
习题与思考题	250
第 11 章 非合作探测	251
11.1 网络扫描技术	251
11.1.1 基本概念和原理	251
11.1.2 网络扫描技术	252
11.1.3 IP 网络扫描器设计	253
11.2 操作系统识别技术	257
11.2.1 操作系统识别的基本方法	257
11.2.2 操作系统识别实例	260
11.3 黑客及其攻击技术	264
11.3.1 黑客概述	264
11.3.2 特洛伊木马	265
11.3.3 木马的隐藏	268
11.3.4 木马设计实例	270
习题与思考题	274
第 12 章 物联网及其测量技术	275
12.1 概述	275
12.1.1 什么是物联网	275
12.1.2 物联网的架构	276
12.1.3 物联网的标准化	277
12.2 射频识别技术及其标准化	278
12.2.1 射频识别技术 (RFID)	278
12.2.2 RFID 技术标准	283
12.3 RFID 通信系统测量	283
12.3.1 系统测量总体框架	284
12.3.2 测量要求与仪器选择	284
12.3.3 使用实时频谱分析仪测量 RFID 系统	286
12.4 传感器网络及其测量	289
12.4.1 传感器网络	289
12.4.2 传感器网络的测量	293
习题与思考题	300
参考文献	301

第 1 章 通信系统测量概述

本章主要介绍通信系统组成，模型和性能指标；包括通信系统基本组成，模拟通信系统模型和特征，数字通信系统模型和特征，光通信系统模型和特征，相应的测试指标、测试仪器及测量误差分析等。

1.1 通信系统组成

1.1.1 通信系统基本组成

通信即两地之间传递和交换信息。通信系统是实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒体的总和。点对点之间的通信系统是最简单的通信系统，其基本组成如图 1.1 所示。图 1.1 (a) 是两用户双向互通信息的双工通信系统组成原理图，在这种系统中双方都必须具备接收设备和发送设备，彼此作为信源和信宿。在有些情况下，通信系统只有单向通信功能，这类系统称为单工通信系统，如图 1.1 (b) 所示。

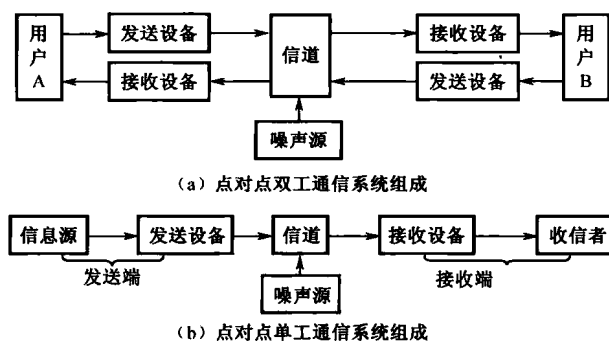


图 1.1 通信系统基本组成

图 1.1 (b) 中，信息源是消息的发源地，常称为信源。其作用是把各种消息转换成原始电信号，称为消息信号或基带信号。电话机、摄像机、电传机、计算机等终端设备都可以称为信源。其中输出模拟电信号的属于模拟信源，输出数字离散信号的属于数字信源。收信者也可称为信宿，信宿是传输信息的归宿点，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

发送设备的基本功能是将信源和信道匹配起来，即将信源产生的基带信号变换成适合在信道中传输的信号。其变换方式有多种形式，在需要频谱搬移的场合，调制是最常见的变换方式。对数字通信系统来说，发送设备还应包括信源编码与信道编码等。

信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道即为自由空间；在有线信道中，信道可以是电缆、光纤、同轴线、电力线等。有线和无线信道均有多种物理媒质。媒质的固有特性

及引入的干扰与噪声直接影响到通信的质量。根据研究对象的不同,需要对实际的物理媒质建立不同的数学模型,以便分析传输媒质对所传输信号的影响。

噪声不是人为加入的,而是通信系统中各种设备以及信道中所固有的,并且是通信过程中所不希望的。噪声的来源途径很多,主要可分为内部噪声和外部噪声,外部噪声往往是从信道引入的,因此,为了分析方便,把噪声源视为各处噪声的集中表现而抽象地加入到信道中。

接收设备的基本功能是发送设备各功能的反变换,即进行解调、译码、解码等。它的任务是从携带有干扰和噪声的接收信号中正确地恢复出相应的原始基带信号,对于多路复用信号,还应包括解除多路复用和实现正确分路等功能。

图 1.1 概括地描述了一个通信系统的组成,它反映了通信系统的共性。根据研究的对象以及所关注的问题不同,图 1.1 中的各小方框的内容和作用将有所不同,因而相应有不同形式的更具体的通信模型。通信系统总体上可以分为模拟通信系统和数字通信系统,前者用模拟信号传递信息,后者用数字信号传递信息。

1.1.2 模拟通信系统组成

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统。信源产生的原始电信号被称为基带信号,如语音信号的频谱范围为 $300\sim 3400\text{Hz}$,图像信号的频谱范围为 $0\sim 6\text{MHz}$ 。基带信号的特征是下限频率很低,其频谱下限一般接近零频。由于这种信号含有频率很低的频谱分量,一般不易直接传输,而需要对其变换,将基带信号变换成适合在信道中传输的频带信号,并可在接收端进行反变换。完成这种变换和反变换作用的通常是各种类型的调制器和解调器。经过调制器调制后的信号称为已调信号。

已调信号具有三个基本特征:携带有信息;适合在信道中传输;信号的频谱具有带通形式,且中心频率远离零频。因而已调信号又称为频带信号。

需要指出的是,消息从发送端到接收端的传输过程中,不仅仅只有连续消息与基带信号以及基带信号与频带信号之间的两种变换,实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。由于调制与解调两种变换对信号的变化起决定性作用,而其他过程不会使信号发生质的变化,只是对信号进行了放大或改善了信号特性,因而被认为是理想的,通常在研究通信系统性能时不予讨论。

模拟通信系统基本组成如图 1.2 所示,其中体现模拟通信特征的是模拟调制器与解调器。模拟调制包括幅度调制和角度调制,幅度调制是指高频载波的振幅按照基带信号振幅瞬时值的变化规律而变化的调制方式。它属于线性调制,即已调信号的频谱是基带信号频谱的线性搬移,频谱结构不发生改变。幅度调制包括调幅(AM)、双边带(DSB)、单边带(SSB)和残留边带(VSB)调制。角度调制是指高频载波的频率或相位按照基带信号的规律而变化的一种调制方式。它属于非线性调制,即已调信号的频谱与原来的频谱结构不同。角度调制包括调频(FM)和调相(PM)。

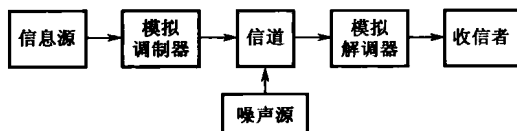


图 1.2 模拟通信系统基本组成

1.1.3 模拟通信系统传输指标

通信的目的是为了传输信息。从这个角度讲,评价通信系统优劣的最主要性能指标应该是系统的有效性与可靠性指标。

(1) 有效传输带宽

对于模拟通信系统,有效性体现在系统的有效传输带宽,可用 B 来表示。不同的调制方式对应不同的频带宽度,带宽越小,有效性越好。在前述调制方式中,若基带信号带宽为 f_m ,则 AM 和 DSB 信号的带宽为 $2f_m$,SSB 信号的带宽为 f_m ,VSB 信号的带宽略大于 f_m ;若调频信号的调制指数为 m_f ,则 FM 信号的带宽为 $2(m_f+1)f_m$ 。

(2) 输出信噪比

模拟通信系统的可靠性可以采用接收端的输出信噪比 (S/N) 来衡量。信噪比是指接收端信号的平均功率和噪声的平均功率之比。在相同的条件下,系统输出端的信噪比越大,则系统抗干扰的能力越强,可靠性越高。不同调制方式在同样信道信噪比下所得到的最终解调后的信噪比是不同的。一般来说,角度调制的抗噪声性能优于幅度调制,但其占用的带宽比幅度调制宽。

此外,也可以用发送的模拟信号与接收端解调得到的模拟信号之间的均方误差来衡量系统的可靠性,均方误差越小,接收得到的信号越逼真。

1.2 数字通信系统组成

1.2.1 数字通信系统基本组成

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统,其基本组成如图 1.3 所示。实际的数字通信系统不一定包括图中的所有环节。如在某些有线信道中,若传输距离不太远且通信容量不太大时,数字基带信号无需调制,可以直接传送,称之为数字信号的基带传输。其模型中就可以不包括调制与解调环节。还应指出,模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输,数字电话系统就是以数字方式传输模拟语音信号的例子。

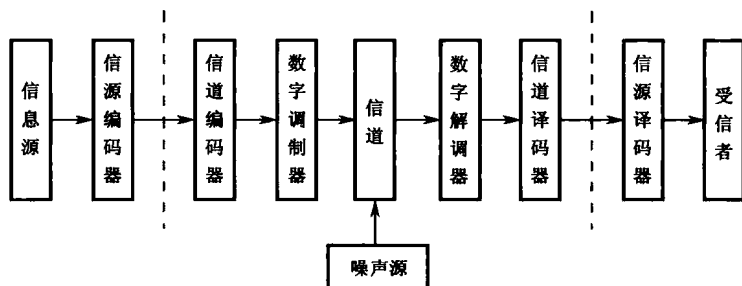


图 1.3 数字通信系统基本组成

数字通信系统涉及的技术环节较多,除图 1.3 中包括的信源编码与译码、信道编码与译码、数字调制与解调外,通常还包括数字复接与解复接、载波同步、位同步以及加密和解密等环节。

(1) 信源编码与译码

信源编码是对信息源所进行的编码和处理。其作用之一就是设法减少码元数目,降低码元速率,即通常所说的数据压缩,码元速率将直接影响传输所占的带宽,而传输带宽又直接反映了通信的有效性;作用之二就是,当信息源提供的是模拟信号时,信源编码器将模拟信号转换成数字信号,以实现模拟信号的数字化处理。

(2) 信道编码与译码

数字信号在信道中传输时,由于噪声、衰落以及人为干扰等影响,将会引起差错。为了减少差错,信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分(监督码元),组成所谓“冗余”,实现抗干扰编码。接收端的信道译码器按一定规则进行信道解码,在解码过程中发现错误或纠正错误,从而提高通信系统抗干扰能力,保证信息的可靠传输。

(3) 数字调制与解调

数字调制就是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。基本的数字调制方式有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)。除此而外还有最小频移键控(MSK)、差分相移键控(DPSK)等。对数字已调信号可以通过相干解调或非相干解调以恢复数字基带信号。对高斯噪声下的信号检测,一般用相关接收机或匹配滤波器实现。

(4) 同步与同步提取

同步就是使收、发两端的信号在时间上保持步调一致,它是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件。按照同步的功能不同,可分为载波同步、帧同步、位同步、群同步和网同步。在发送端需要加入不同作用的同步序列,接收端需要从所接收的数字序列中提取同步,以便按照同步所给定的时间关系收发双方进行有序通信。

(5) 加密与解密

为了保证所传信息的安全,人为将被传输的数字序列扰乱,或与给定的数字序列(密码)进行一定的数字运算,这种处理过程通常称为加密。在接收端利用与发送端相同的密码复制品对收到的数字序列进行还原,恢复原来信息,称为解密。在需要实现保密通信的场合需要进行信息序列的加密和解密。

(6) 数字复接

数字复接就是依据时分复用的基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号,以扩大传输容量和提高传输效率。

需要特别说明的是,模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传输的信号种类。数字信号也可以在模拟通信系统中传输,如计算机数据可以通过模拟电话线路传输,但这时必须使用调制解调器(Modem)将数字基带信号进行正弦调制,以适应模拟信道的传输特性。

1.2.2 数字通信主要特点

目前,无论是模拟通信还是数字通信,在不同的通信业务中都得到了广泛的应用。但是,数字通信的发展速度已明显超过模拟通信,成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求。数字通信的最显著特点是:

(1) 抗干扰能力强。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,必然会发生波形畸变,接收端对其进行抽样判决,以辨别

是两个状态中的哪一个。只要噪声的大小不足以影响判决的正确性,就能实现正确接收。而模拟通信系统中传输的是随时间连续变化的模拟信号,它要求接收机能够高度保真地重现原发送信号波形,如果模拟信号叠加上噪声,即使噪声很小,也很难予以消除。此外,在远距离传输中,如中继通信系统中,各中继站可利用数字通信特有的判决再生接收方式,对数字信号波形进行整形再生而消除噪声积累。

(2) 差错可控。可以采用信道编码技术降低传输系统的误码率,从而有效地提高传输的可靠性。

(3) 易于与各种数字终端接口,用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储,从而形成智能网。

(4) 易于集成化。由于数字化通信芯片易于设计、流片,因而易于实现大规模集成,以便使通信设备微型化、智能化。

(5) 易于加密处理。比如发送端可以用一个通信双方确知的数字序列(密码)与数字信息序列通过模2加运算实现加密,接收端再用该数字序列(密码)与接收到的加密序列模2加就可恢复信息序列。这种加密方式比之模拟加密不但实现简单,且保密强度高。

然而,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据4kHz带宽,但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据20~60kHz的带宽,因此数字通信的频带利用率不高。另外,由于数字通信对同步要求高,因而系统设备比较复杂。不过,随着新的宽带传输信道(如光纤)的采用、新的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大为弱化。随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展和广泛应用,数字通信在今后的通信方式中必将逐步取代模拟通信而占据主导地位。

1.2.3 数字通信系统传输指标

数字通信系统的有效性与可靠性通常用传输速率和差错率表征。

1. 传输速率

有效性指通信系统传输消息的快慢,即“速率”问题。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,系统的有效性越好。传输速率又可分为码元传输速率和信息传输速率,二者具有一定的转换关系。

(1) 码元传输速率

码元传输速率简称码元速率,通常又称为数码率、传码率、码率、信号速率或波形速率,用符号 R_b 表示。码元速率是指单位时间(每秒钟)内传输码元的数目,单位为波特每秒,常用符号“B/s”表示。

(2) 信息传输速率

信息传输速率简称信息速率,又称为传信率、比特率等。信息传输速率是指单位时间(每秒钟)内传送的信息量,用 R_b 来表示,单位为比特每秒(bit/s),简记为b/s或bps。

对于 M 进制的码元(有时也称字符),码元传输速率和信息传输速率的关系为:

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

2. 差错率

可靠性指通信系统传输消息的“质量”，即好坏程度。衡量数字通信系统可靠性的指标，可用信号在传输过程中出错的概率来表述，即用差错率来衡量。差错率越大，表明系统可靠性愈差。差错率通常有两种表示方法。

(1) 码元差错率

码元差错率简称误码率（有时也称误字率），是指发生差错的码元数（字符数）在传输总码元数中所占的比例。更确切地说，误码率就是码元在传输系统中被传错的概率。若发送总的码元（字符）数为 N ，发生错误的码元数目为 N_{err} ，则码元差错率可表示为：

$$P_c = \frac{N_{\text{err}}}{N} \quad (1-2)$$

(2) 信息差错率

信息差错率简称误信率，或误比特率，是指发生差错的信息量在信息传输总量中所占的比例，或者说，它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。若传输的总的比特数为 N_b ，发生错误的比特数为 N_{berr} ，则信息差错率可表示为

$$P_b = \frac{N_{\text{berr}}}{N_b} \quad (1-3)$$

对于 M 进制的码元来说，码元差错率和信息差错率的关系为：

$$P_c = 1 - (1 - P_b)^{\log_2 M} \quad (1-4)$$

对于模拟通信来说，系统的有效性和可靠性可用系统频带利用率和输出信噪比（或均方误差）来衡量。

1.3 光纤通信系统

1.3.1 光纤通信系统基本组成

光纤通信是以光纤光缆作为传输媒质，以光作为信息载体的一种通信形式，其基本组成如图 1.4 所示。发送端首先将所要传送的声音或图像转换成电信号，而后利用这个电信号来改变光的某个参数如光强或频率等，再利用光纤将调制后的光信号传送至接收端，接收端则用光电二极管（PIN-PD）或雪崩光电二极管（APD）等光检测器将光信号恢复为电信号，再经解调放大后恢复出所发送的原始信号。在实际光纤通信系统中所要考虑的因素还很多，如调制方式、发光元件、光纤、光检测器件、放大再生，以及所要传送的信号、传送系统的编码格式、中继设备以及系统的可靠度等因素。

由图 1.4 可见，光纤通信系统主要由光发射机、光接收机、光纤（光缆）、中继器和光纤连接器五部分组成。

(1) 光发射机

光发射机的功能是把输入的电信号转换为光信号，并用耦合技术把光信号最大限度地注入光纤线路。光发射机由光源、驱动器和调制器组成，光源是光发射机的核心。光发射机的性能

主要取决于光源的特性，对光源的要求是：输出光功率足够大，调制频率足够高，谱线宽度和光束发散角尽可能小，输出功率和波长稳定，器件寿命长。目前广泛使用的光源有半导体发光二极管（LED）、半导体激光二极管（LD）和动态单纵模分布反馈（DFB）激光器，也有使用固体激光器作为光源的通信系统。

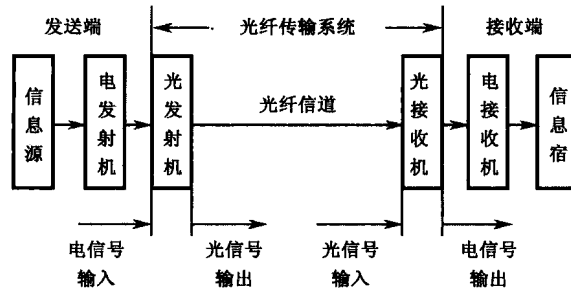


图 1.4 光纤通信系统基本组成

光发射机把电信号转换为光信号的过程称为调制。主要有直接调制和间接调制两种调制方式，如图 1.5 所示。

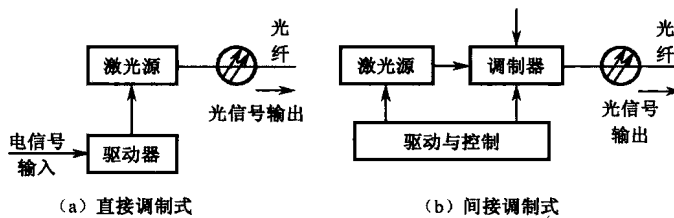


图 1.5 光发射机的组成形式

所谓直接调制是用电信号直接改变半导体激光器或发光二极管的驱动电流，使输出光随电信号变化而变化。这种方案技术简单、成本较低且易于实现，但调制速率受激光器的频率特性所限制。间接调制，亦称外调制，它是把激光的产生和调制相互分开，用独立的调制器调制激光器的输出光实现的。目前有多种调制器可供选择，最常用的是电光调制器。电光调制器利用电信号改变电光晶体的折射率，使通过调制器的光参数随电信号变化而实现的调制方式。间接调制的优点是调制速率高，缺点是技术复杂、成本较高。因此只有在大容量的波分复用和相干光通信系统中使用间接调制。

对光参数的调制，原理上可以是光强、幅度、频率和相位，但实际上目前大多数光纤通信系统都采用直接光强调制。因为幅度、频率或相位调制，需要幅度和频率非常稳定，且相位和偏振方向可以控制，所以这些调制方式只在新技术系统中使用。

(2) 光接收机

光接收机的功能是把从光纤线路输出、产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经放大和处理后恢复成发射前的电信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成，光检测器是光接收机的核心。对光检测器的要求是响应度高、噪声低、响应速度快。目前广泛使用的光检测器有两种类型：光电二极管和雪崩光电二极管。

光接收机把光信号转换为电信号的过程，是通过光检测器的检测实现的。检测方式有直接检测和外差检测两种。直接检测是用检测器直接把输入光信号转换为电信号。这种检测方式设

备简单、经济实用，是当前光纤通信系统普遍采用的方式。外差检测要设置一个本地振荡器和一个光混频器，使本地振荡光和光纤输出的信号光在混频器中进行混频，从而输出中频光信号，再由光检测器把中频光信号转换为电信号。外差检测方式的难点是需要频率非常稳定、相位和偏振方向可控制、谱线宽度很窄的单模激光源；优点是有很高的接收灵敏度。目前，实用光纤通信系统普遍采用直接调制（直接检测）方式。外调制（外差检测）方式虽然技术复杂，但是传输速率和接收灵敏度很高，是很有发展前途的光通信方式。

光接收机最重要的特性参数是灵敏度。灵敏度是衡量光接收机质量的综合指标，它反映接收机调整到最佳状态时，接收微弱光信号的能力。灵敏度主要取决于组成光接收机的光电二极管和放大器的噪声，并受传输速率、光发射机的参数和光纤线路色散的影响，同时还与系统要求的误码率或信噪比有密切关系。灵敏度是反映光纤通信系统质量技术指标。

（3）光纤或光缆

光纤线路的功能是把来自光发射机的光信号，以尽可能小的失真和衰减传输到光接收机。光纤信道由光纤、光纤接头和光纤连接器组成。光纤是光纤信道的主体，接头和连接器是不可缺少的器件。实际工程中使用的是可容纳许多根光纤的光缆。光纤线路的性能主要由光缆内光纤的传输特性决定。对光纤的基本要求是损耗和色散这两个传输特性参数尽可能小，同时还要求光纤有足够好的机械特性和环境特性，即要求光纤或光缆在不可避免的应力作用下或环境温度改变时，也能保持传输特性稳定。

目前使用的石英光纤有多模光纤和单模光纤，单模光纤的传输特性比多模光纤好，价格比多模光纤便宜，因而得到更广泛的应用。单模光纤配合半导体激光器，适合大容量长距离光纤通信系统，而小容量短距离系统用多模光纤配合半导体发光二极管更加合适。为了适应不同通信系统的需要，市场上已经出现了多种结构不同、特性优良的单模光纤。

石英光纤在近红外波段，除杂质吸收峰外，其损耗随波长的增加而减小，在 850nm、1310nm 和 1550nm 有三个损耗很小的波长“窗口”。在这三个波长窗口损耗分别小于 2dB/km、0.4dB/km 和 0.2dB/km。石英光纤在波长 1310nm 色散为零，带宽极大值高达几十 GHz。通过光纤设计，可以将零色散波长移到 1550nm，实现损耗和色散都最小的色散移位单模光纤；或者设计在 1310nm 和 1550nm 之间色散变化不大的色散平坦单模光纤等。根据光纤传输特性的特点，光纤通信系统的工作都选择在 850nm、1310nm 和 1550nm，特别是 1310nm 和 1550nm 应用更加广泛。因此，作为光源的激光器的发射波长和光检测器光电二极管的波长响应，都要和光纤这三个波长窗口相一致。目前在实验室条件下，1550nm 的损耗已达到 0.154 dB/km，接近石英光纤损耗的理论极限。

（4）中继器

中继器由光检测器、光源和判决再生电路组成。它的作用有两个：一是补偿光信号在光纤中传输时产生的衰减；另一个是对波形失真的光脉冲进行校正。

（5）光纤连接器、耦合器等无源器件

由于光纤或光缆的长度受光纤制作工艺和光缆施工条件的限制，且光纤的拉制长度也是有限的（如 1km），因此一条光纤线路可能存在多根光纤相连接的问题。于是，光纤间的连接、光纤与光端机的连接及耦合，对光纤连接器、耦合器等无源器件的使用是必不可少的。

光纤通信系统也分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统，前者传模拟信号，后者传数字信号。