

— 21 世纪 —

高等院校电子信息类规划教材

*Xiandai Tongxin Xitong
Yu Wangluo Celiang*

现代通信系统 与网络测量

© 裴昌幸 主编 裴昌幸 朱畅华 韩宝彬 权东晓 编著

21 世纪高等院校电子信息类规划教材

现代通信系统与网络测量

裴昌幸 主 编

裴昌幸 朱畅华 韩宝彬 权东晓 编 著



人民邮电出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统与网络测量 / 裴昌幸主编: 裴昌幸等编
著. —北京: 人民邮电出版社, 2008.4
21 世纪高等院校电子信息类规划教材
ISBN 978-7-115-17612-7

I. 现… II. ①裴…②裴… III. ①通信系统—测量—高等学校—教材②通信网—测量—高等学校—教材 IV.
TN914 TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 017844 号

内 容 提 要

本书主要包括通信系统测量与网络测量两部分内容。其中, 第 1~4 章介绍通信系统测量, 包括通信系统的模型及一般指标、通信信号频谱及功率测量、通信系统误码率测量以及光纤通信系统性能测量。第 5~13 章介绍网络测量, 包括网络测量的基本概念、网络测量的基础知识、网络性能测量、网络设备的指标及其测试、网络拓扑发现、入侵检测和脆弱性分析、网络流量测量与建模、Web 服务器测试以及非合作测量。

本书可作为高等院校本科生教材或研究生选修课教材, 同时也可作为通信、计算机领域相关工程技术人员和管理人员的参考书。

21 世纪高等院校电子信息类规划教材

现代通信系统与网络测量

- ◆ 主 编 裴昌幸
- 编 著 裴昌幸 朱畅华 韩宝彬 权东晓
- 责任编辑 刘 博
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.25
字数: 418 千字
印数: 1—3 000 册
- 2008 年 4 月第 1 版
2008 年 4 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17612-7/TN

定价: 28.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前言

通信系统和网络已成为现代信息社会的重要基础设施之一。从古老的飞鸽传书、烽火通信,到可以覆盖全球的移动通信网络,直至用于空间探测的深空通信,通信的手段和能力获得了巨大的发展。在通信系统和网络的研究、开发、建设和运营过程中,测量起到了极其重要的作用。这些测量涉及器件、部件(编码器、调制解调器、天线等)、整机(发射机、接收机、交换机、路由器或收发终端等)、协议以及系统的测试,涉及面非常广。而且,通信系统多种多样,如长波通信、短波(HF)通信、甚高频(VHF)通信、超高频(UHF)通信、微波通信、光通信,以及固定通信网、卫星通信网、移动通信网等,每种频段、每种通信方式都有着不同的测量要求,因而也就有不同的测量指标和测量手段。通信专业的学生和通信行业的研究开发人员需要了解和掌握通信系统和网络的性能指标及其测量方法。2004年,国家电子信息科学与工程类专业教学指导委员会在南京召开通信工程专业发展及规范研讨会,与会专家们认为通信产业发展很快,学生在校期间对通信系统和相关网络的测试知之甚少,而实际工作中却大量地涉及到测试及系统测量,因此一致建议为通信专业的本科生开设“通信与网络测量”课程,本书正是出于此目的而编写的。

本书讨论了通信系统指标的测量方法和 Internet 的指标及其测量。全书分为 13 章。

第 1 章讲述通信系统的模型及一般指标。

第 2 章讨论了通信信号频谱及功率测量,包括多通道滤波器型频谱测量、快速傅里叶变换(FFT)型频谱测量、显示扫频型频谱测量、调谐滤波器型频谱测量、扫频超外差型频谱测量,给出了平均功率和脉冲峰值功率的测量方法以及功率计的基本原理。

第 3 章讨论了通信系统误码率测量,包括误码率的基本概念、各种电信业务对误码性能的要求、误码特性的评定方法与误码性能参数以及误码率的测量方法。

第 4 章讲述了光纤通信系统性能测量,包括光发射机参数测试、光接收机的主要参数及其测试方法、光端机收发自环测试、抖动和漂移测试、眼图、光纤传输特性及其测试。

第 5 章讲述了网络测量的概念,包括网络测量的体系结构、网络测量的指标体系、网络测量的方法和技术、网络测量的关键技术、国内外研究进展以及研究网络测量的意义。

第 6 章回顾了网络测量的基础知识,包括 TCP/IP 基础知识和网络测量常用工具,以及 Windows 下的网络编程。

第 7 章讨论了几个主要的端到端网络性能指标的测量,包括时延、带宽和丢包率测量,介绍了单向主动测量协议(OWAMP)。

第 8 章讨论了网络设备的指标及其测试,包括相关标准、路由器的主要性能指标及测试,交换机的主要性能指标及测试方法。

第 9 章讲述了网络拓扑发现,包括基于网络管理协议的拓扑发现、基于主动探测的拓扑发现、无线网络的拓扑发现,并给出了基于 ICMP 和 UDP 的拓扑发现和组播网拓扑发现两个实例,还探讨了拓扑可视化和拓扑发现面临的问题及未来的研究工作。

第 10 章讲述了入侵检测和脆弱性分析,包括入侵检测的方法、入侵检测系统和入侵检测系

统的发展方向，脆弱性分析的基本概念和几种脆弱性分析方法。

第 11 章讨论了网络流量测量与建模问题，包括流量测量与建模的意义，并以 Winpcap 为例说明了网络流量测量方法，高速网络中流量的抽样，还讨论了网络流量的模型。

第 12 章讲述了 Web 服务器测试，包括功能、性能、可用性、客户端兼容性和安全性测试。

第 13 章讨论了非合作测量，包括黑客及其攻击技术、网络扫描技术和操作系统识别技术。

本书由裴昌幸主编，裴昌幸、朱畅华、韩宝彬、权东晓编写。其中裴昌幸编写了第 1、2、3、5、6 章并对全书进行统稿；朱畅华编写了第 7、8、9、10、11 章；韩宝彬编写了第 4 章；权东晓编写了第 12、13 章以及全书各章习题，还绘制了部分插图。本书能够如期出版，也离不开潘乔、肖海云、王红剑、周建亮、李秀婷等的辛勤工作以及陈南、易运晖等老师的支持和帮助，在此我们一并表示感谢。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中难免存在错误或不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月于西安

目 录

第1章 通信系统的模型及指标	1
1.1 通信系统一般模型	1
1.1.1 通信系统一般模型	1
1.1.2 模拟通信系统模型	2
1.1.3 数字通信系统模型	2
1.1.4 光纤通信系统模型	4
1.2 通信系统的主要指标	7
习题与思考题	8
第2章 通信信号频谱及功率测量	9
2.1 通信信号频谱测量	9
2.1.1 多通道滤波器型频谱测量	9
2.1.2 快速傅里叶变换型频谱测量	10
2.1.3 显示扫频型频谱测量	10
2.1.4 调谐滤波器型频谱测量	10
2.1.5 扫频超外差型频谱测量	11
2.1.6 通信系统的带宽	11
2.2 功率测量	12
2.2.1 功率的基本概念	12
2.2.2 平均功率的测量方法	13
2.2.3 脉冲峰值功率测量方法	17
习题与思考题	21
第3章 通信系统误码率测量	22
3.1 误码率的基本概念	22
3.1.1 误码率的定义	22
3.1.2 各种电信业务对误码性能的要求	23
3.1.3 误码发生的原因	23
3.1.4 误码特性的评定方法与误码性能参数	24
3.2 误码率的测量	25
3.2.1 测试码发生器	25
3.2.2 误码检测器	25
习题与思考题	26
第4章 数字光纤通信系统性能测量	27
4.1 数字光纤通信系统测量概述	27
4.1.1 假设参考连接	27

4.1.2 系统对性能指标的要求	28
4.1.3 系统的可靠性指标	31
4.2 发射机性能参数及测试	33
4.2.1 平均发送光功率	34
4.2.2 消光比	34
4.3 光接收机性能参数及测试	35
4.3.1 光接收机基本组成	35
4.3.2 光接收机的主要参数及其测试方法	36
4.4 光纤通信系统性能测试	39
4.4.1 光端机收发自环测试	39
4.4.2 抖动和漂移测试	39
4.4.3 眼图	43
4.5 光纤、光缆及其测量	45
4.5.1 光纤传输特性	45
4.5.2 光纤及光缆测试	53
习题与思考题	62
第5章 网络测量概论	63
5.1 网络测量的定义与体系结构	63
5.1.1 网络测量的定义	63
5.1.2 网络测量的体系结构	64
5.2 网络测量的指标体系	65
5.2.1 按指标内容划分	65
5.2.2 按协议层划分	65
5.2.3 按测试范畴划分	66
5.3 网络测量的方法与协议	67
5.3.1 网络测量方法	67
5.3.2 网络测量协议	68
5.4 网络测量的关键技术	69
5.4.1 探测分组的选择	69
5.4.2 “噪声”分组的过滤	69
5.4.3 测试点的选择	69
5.4.4 业务模型分析	70
5.4.5 时钟同步	70
5.5 网络测量与网络行为学	70
5.6 网络测量的意义及研究进展	71
5.6.1 研究网络测量的意义	71
5.6.2 国内外研究进展	74
习题与思考题	76

第 6 章 网络测量的基础知识	77
6.1 TCP/IP 基础知识	77
6.1.1 链路层	78
6.1.2 网络层	79
6.1.3 传输层	82
6.1.4 应用层	85
6.2 网络测量常用工具	85
6.2.1 Ping	85
6.2.2 Tracert	88
6.2.3 Netstat	89
6.2.4 Net	90
6.2.5 Tcpdump	92
6.2.6 Windump	95
6.2.7 其他常用工具	95
6.3 Windows 下网络编程的实现	95
6.3.1 客户机/服务器体系结构	96
6.3.2 阻塞与非阻塞工作方式	96
6.3.3 典型的非阻塞方式通信程序	96
6.3.4 原始套接字	102
习题与思考题	104
第 7 章 网络端到端性能测量	105
7.1 概述	105
7.2 端到端时延测量	106
7.2.1 时延的基本概念	106
7.2.2 时延测量方法	107
7.2.3 基于 GPS 授时的时钟同步	110
7.2.4 基于 NTP 的时钟同步方法	115
7.2.5 基于时延特征的数学分析方法	121
7.3 端到端带宽测量	122
7.3.1 IP 网络端到端带宽测量研究现状	123
7.3.2 IP 网络端到端瓶颈带宽测量	124
7.3.3 IP 网络端到端可用带宽测量	126
7.4 丢包率	127
7.4.1 丢包率的基本概念	127
7.4.2 丢包率的测量方法	128
7.5 单向主动测量协议	128
7.5.1 RFC4656 简介	129
7.5.2 OWAMP-Control 协议	129
7.5.3 OWAMP-Test 协议	139

7.5.4 计算指数分布的伪随机数	143
7.5.5 安全考虑	145
习题与思考题	149
第8章 网络设备的指标及其测试	150
8.1 相关标准简介	150
8.2 路由器的主要指标及测试	153
8.2.1 路由器的主要指标	153
8.2.2 路由器测试	156
8.3 交换机的主要指标及测试	162
8.3.1 交换机的主要指标	162
8.3.2 交换机测试	164
8.4 网络设备测试的相关仪表	168
习题与思考题	169
第9章 网络拓扑发现	170
9.1 拓扑发现概述	170
9.2 基于网络管理协议的拓扑发现	172
9.2.1 基于 SNMP 的网络层拓扑发现	172
9.2.2 基于交换表信息的链路层拓扑发现	173
9.3 基于主动探测的拓扑发现	174
9.3.1 基于 ICMP 的拓扑发现	175
9.3.2 基于端到端性能测试的拓扑推算	175
9.4 无线网络的拓扑发现	177
9.5 基于 ICMP 和 UDP 的拓扑发现实例	178
9.5.1 算法的几个关键技术	179
9.5.2 拓扑发现算法描述	180
9.5.3 算法性能分析	181
9.6 组播网拓扑发现实例	182
9.6.1 模型描述和丢包率推算	182
9.6.2 二叉丢包树的拓扑发现算法及其改进	183
9.7 拓扑可视化	184
9.8 拓扑发现面临的问题及展望	187
习题与思考题	189
第10章 入侵检测和脆弱性分析	190
10.1 入侵检测和入侵检测系统	190
10.1.1 入侵检测的方法	191
10.1.2 入侵检测系统	196
10.1.3 入侵技术和入侵检测系统的发展	197
10.2 脆弱性分析及实现	198
10.2.1 脆弱性分析	198

10.2.2 脆弱性分析实现	201
习题与思考题	203
第 11 章 网络流量测量与建模	204
11.1 概述	204
11.2 网络流量测量方法	205
11.2.1 WinPcap 工作机理	205
11.2.2 以太网中数据包捕获的实现	208
11.3 高速网络中流量的抽样	210
11.3.1 抽样技术的特点及演进	210
11.3.2 报文抽样分类	212
11.3.3 报文抽样技术的应用及发展趋势	213
11.4 网络流量的模型	214
11.4.1 网络流量模型	214
11.4.2 网络流量的自相似性	218
11.4.3 流量的一般特性	224
习题与思考题	226
第 12 章 Web 服务器测试	227
12.1 Web 服务器简介	227
12.1.1 服务器的基本概念	227
12.1.2 Web 服务器的基础架构	227
12.2 Web 服务器测试	228
12.2.1 功能测试	229
12.2.2 性能测试	230
12.2.3 可用性测试	232
12.2.4 客户端兼容性测试	233
12.2.5 安全性测试	233
12.2.6 基准测试	236
习题与思考题	237
第 13 章 非合作测量	238
13.1 网络扫描技术	238
13.1.1 网络扫描的基本原理	238
13.1.2 网络扫描的主要技术	239
13.1.3 网络扫描器设计实例	241
13.2 操作系统识别技术	244
13.2.1 操作系统识别的基本方法	244
13.2.2 操作系统识别实例	246
13.3 黑客及其攻击技术	251
13.3.1 黑客概述	251
13.3.2 特洛伊木马	252

13.3.3 木马的隐藏.....	255
13.3.4 木马设计实例.....	257
习题与思考题.....	261
参考文献.....	262

第 1 章 通信系统的模型及指标

本章主要介绍通信系统的模型和指标,包括通信系统一般模型,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,以及相应的测试指标。

1.1 通信系统一般模型

1.1.1 通信系统一般模型

通信是从信源向信宿传递和交换信息。实现信息传递所需的所有设备和传输媒质的总和称为通信系统。点对点之间的通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

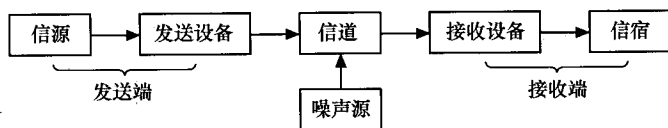


图 1-1 通信系统一般模型

信源是消息的产生地,其作用是把各种消息转换成原始电信号,称之为消息信号或基带信号。电话机、电视摄像机和电机、计算机等各种数字终端设备都是信源。

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。其变换方式多种多样,最常见的变换方式是调制。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。

信道指传输信号的物理媒质。在无线信道中,信道可以是自由空间;在有线信道中,信道可以是电缆或光纤。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关系到通信的质量。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,以反映传输媒质对信号的影响。

噪声源是通信系统中各种设备以及信道中所固有的,并且是人们不希望有的。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。为了方便分析,把噪声源视为各种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进行发送设备的反变换,即进行解调、译码、解码等。它的任务是从带有干扰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。

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。

图 1-1 概括地描述了一个通信系统的组成，反映了通信系统的共性。根据研究的对象以及关注问题的不同，图 1-1 模型中的各小方框的内容和作用会有所不同，因而相应有不同形式的更具体的通信模型。

根据信道中传输的是模拟信号还是数字信号，通信系统总体上可分为模拟通信系统和数字通信系统。

1.1.2 模拟通信系统模型

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信号称为基带信号，基带的含义是指信号的频谱从零频附近开始，如语音信号为 $300\sim 3400\text{Hz}$ ，图像信号为 $0\sim 6\text{MHz}$ 。由于这种信号具有频率很低的频谱分量，一般不宜直接传输，这就需要把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调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号。

已调信号具有 3 个基本特征：一是携带有信息，二是适合在信道中传输，三是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，消息从发送端到接收端的传递过程中，不仅仅只有连续消息与基带信号之间、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，而其他过程对信号不会发生质的变化，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，在这里不予讨论。

模拟通信系统模型可由图 1-1 所示的模型略加演变，即可得到如图 1-2 所示的模型。

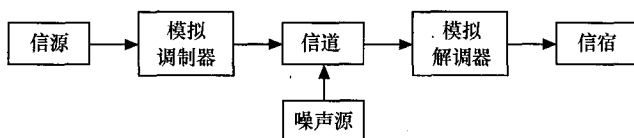


图 1-2 模拟通信系统模型

1.1.3 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统，如图 1-3 所示。数字通信涉及的技术问题较多，其中主要包括信源编码与译码、信道编码与译码、数字调制与解调、加密与解密、同步与复接等。

（1）信源编码与译码

通过信源编码当信源给出的是模拟语音信号时，信源编码器将其转换成数字信号，以实现模拟信号的数字化传输，对于数字信号进行数据压缩，提高通信效率。接收端的信源译码器按一定规则解码。

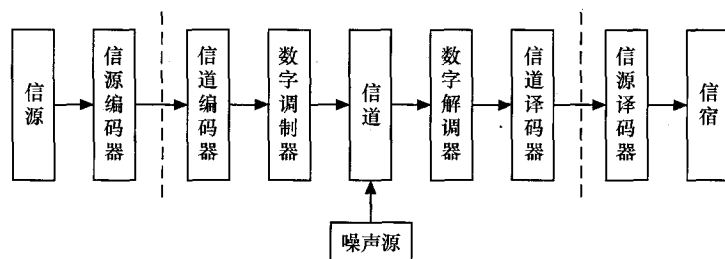


图 1-3 数字通信系统模型

(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（监督元），组成所谓“抗干扰编码”。接收端信道译码器按一定规则进行解码，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，实现可靠通信。

(3) 加密与解密

在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，人为地将被传输的数字序列扰乱，即加上密码，这种处理过程称为加密。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解密，恢复原来信息，称为解密。

(4) 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）、绝对相移键控（PSK）、相对（差分）相移键控（DPSK）。对这些信号可以采用相干解调或非相干解调从而还原为数字基带信号。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。

(5) 同步与复接

同步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。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的功用不同，可分为载波同步、位同步、群同步和网同步。

数字复接就是依据一定的复用基本原理（如时分复用、频分复用、码分复用等）把若干个数字信号合并成一个数字信号，以扩大传输容量和提高传输效率。

图 1-3 所示是数字通信系统的一般化模型。实际的数字通信系统不一定包括图 1-3 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。还应该指出的是，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。

当然，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。可见，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。

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。数字通信有以下主要特点。

(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, 接收端对信号进行抽样判决, 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, 信号就能正确地被接收。而模拟通信系统中传输的是连续变化的模拟信号, 它要求接收机能够高度保真地重现信号波形, 如果模拟信号叠加上噪声, 即使噪声很小, 也很难消除它。此外, 数字信号在远距离传输过程中, 如采用微波中继通信时, 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, 从而消除噪声积累。

(2) 差错可控。可以采用信道编码技术使误码率降低, 提高传输的可靠性。

(3) 易于与各种数字终端接口, 可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, 从而使通信设备微型化。

(5) 易于加密处理, 且保密强度高。

但是, 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, 一路模拟电话通常大约占据 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、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将不断被弱化。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主导地位。

1.1.4 光纤通信系统模型

1. 光纤通信简介

光纤通信是 20 世纪 70 年代问世的通信新技术, 它采用光波作为信息载体, 以光纤作为传输媒质。极大的可用带宽和极低的传输损耗使光纤通信发展速度非常快, 已逐渐取代了铜缆成为有线信道最主要的传输方式。

光纤通信采用光波承载信息, 与电通信相比, 光纤通信拥有更大的带宽和信息容量; 而且抗干扰能力强。目前光纤通信已被广泛地应用于军事以及民用设施中。军事上, 光纤不但用于干线信息传输, 而且也用于武器装备系统上。在飞机、雷达、舰艇、导弹内部都已使用光纤替代电线和电缆, 以提高通信容量, 减轻重量, 抗电磁波干扰和抗电磁辐射性能。现代地面长途干线通信也以光纤通信为主体, 通信波长以 1550nm 和 1310nm 为中心波长 ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。

2. 光纤通信系统

光纤通信是以光纤作为传输媒质, 以光作为信息载体的一种通信形式。因此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到远处的接收端, 接收端则用光电二极管 (PIN) 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原始

信号。在光纤通信系统中所要考虑的因素很多,如调制方式、发光元件、光纤、光检测器件、放大再生等,还需考虑所要传送的信号、传送系统编码格式、传输距离、中继设备以及系统的可靠度等因素。

光纤通信系统基本组成如图 1-4 所示。光纤通信系统主要由光发射机、光纤、中继器、光纤连接器、光接收机等部分组成。

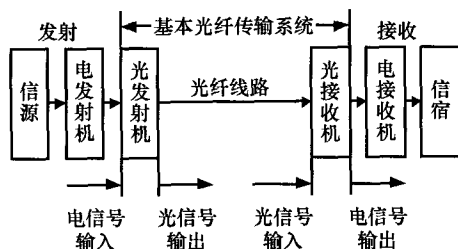


图 1-4 单向传输的光纤通信系统基本组成

(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。

光发射机把电信号转换为光信号的过程称为调制。调制方式主要有直接调制和间接调制两种,如图 1-5 所示。

所谓直接调制是用电信号直接调制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实现的。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。

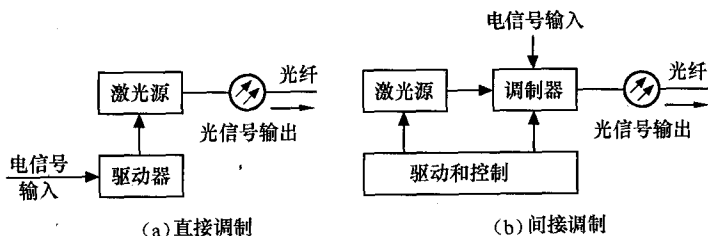


图 1-5 调制方式

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过程。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,原理上可以有光强、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，要求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（如相干光通信）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：PIN 光电二极管（PIN-PD）和雪崩光电二极管（APD）。

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。间接调制—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，是很有发展前途的通信方式。

（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。光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器组成。光纤是光纤线路的主体，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，并成功地投入实际应用。

（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：一个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造工艺和光缆施工条件的限制，且光纤的控制长度也是有限度的。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，都需要使用光纤连接器、耦合器等无源器件。

实际应用中光缆可以架空安装，可铺设于管道中，也可铺设于海底或直埋于地下，如图 1-6 所示。