



普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

光纤通信技术

邱 琪 编著



科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

光纤通信技术

邱 琪 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍光纤传输的基础理论和通信系统的构成,并根据各类通信信号对光纤通信系统的技术要求,阐述了实现这些目标的各种技术途径、方案和新技术。全书共分9章,包括导论、光纤和光缆、光电子器件、光纤通信原理、模拟信号光纤传输系统、数字信号光纤传输系统、波分复用技术、光放大技术和光纤通信新技术等内容。全书围绕光纤通信系统三个重要组成部分:光源(光发射机)、光纤(光缆)和光检测器(光接收机)展开,重点阐述了光纤通信系统的设计原理,并通过对模拟和数字光纤传输系统的具体分析,进一步深化了系统设计的理念和途径。减少光纤损耗和色散对系统的限制,提高系统的传输距离和容量是光纤通信技术高速发展的源动力,基于这一思想介绍了光放大、波分复用技术和光纤通信新技术。

本书可作为电子科学与技术专业(光电工程与光通信方向)、光信息科学与技术专业、通信工程专业和网络工程专业等相关专业的本科生及研究生的教材或教学、考研参考书,也可供从事光纤通信技术研究和开发的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/邱琪编著. —北京:科学出版社,2011.6
普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材
ISBN 978-7-03-031763-6

I. ①光… II. ①邱… III. ①光纤通信-高等学校-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 119700 号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:钟 洋
责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年7月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1-4 000 字数:430 000

定价:34.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

时光荏苒,岁月如梭,作者从事光纤通信领域的教学和科研工作已有 24 个年头。见证了光纤通信技术的高速发展并正在改变每一个人的工作和生活方式。经历了模拟信号从 MHz 到几十 GHz、数字信号从 10Mbps 到 40Gbps,从粗波分复用(CWDM)到密集波分复用(DWDM),从掺铒光纤放大器到光纤拉曼放大器,从直接强度检测到相干光通信等技术的飞跃发展。享有了宽带的模拟和数字电视,高速互联网,各种语音、视频服务。如此多姿多彩的信息服务都得益于宽带光纤通信技术的不断进步和全面应用。

本次编写《光纤通信技术》一书,试图使其成为这样一本教材——既要呈现光纤通信技术的全貌,又要展现光纤通信的新技术和系统应用。全书共分 9 章,内容包括导论、光纤和光缆、光电子器件、光纤通信系统原理、模拟信号光纤传输系统、数字信号光纤传输系统、波分复用技术、光放大技术和光纤通信新技术等。本书可以分章节内容作为相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事光纤通信系统和技术研究与开发的科技人员参考。

本书 1~9 章由邱琪编写。课程组的史双瑾和兰岚老师参加了部分校稿。博士研究生苏君和郭勇完成了部分插图和资料收集。参与插图工作的硕士研究生还有邱中华、张梅、丁之、周凌尧、田宣宣等。

本次有幸将 20 多年的教学经历和科研体会汇入这本教材,首先要感谢培养我进入光纤通信领域的电子科技大学,感谢 20 多年来合作过的老师、同事和学生。还要感谢教学科研团队的同仁们给予的大力支持和帮助。特别感谢我的家人对我的关爱与支持。同时,还要感谢为本书出版付出辛勤劳动的编辑和支持这本书出版的各级领导。

光纤通信领域的知识如浩瀚的海洋,由于本人从事教学、科研工作的局限性,难免出现一隅之见。同时受到作者知识面和学术水平的限制,全书难免存在错误和不足。希望读者不吝赐教,以便更好地为读者服务。



2011 年 6 月 18 日

邮箱:qqiu@uestc.edu.cn

目 录

前言

第 1 章 导论	1
1.1 光纤通信的发展和演进	1
1.1.1 光纤通信的简史	1
1.1.2 光纤通信技术的广泛应用	3
1.1.3 光纤通信技术要点	3
1.2 光纤通信的基础知识和概念	4
1.2.1 模拟信号与数字信号	4
1.2.2 带宽与速率	6
1.2.3 调制与解调	6
1.2.4 光纤通信系统组成的 3 个要素	6
1.2.5 数字光纤通信系统	8
1.2.6 模拟光纤传输系统	10
1.3 光纤通信技术的学习思路	11
习题 1	11
第 2 章 光纤和光缆	12
2.1 光纤	12
2.1.1 光纤的结构与分类	12
2.1.2 光纤传输原理	14
2.2 单模光纤	21
2.2.1 单模条件与截止波长	21
2.2.2 模场直径和光强分布	21
2.2.3 单模光纤的双折射和线偏振模	22
2.3 光纤的色散和损耗	22
2.3.1 光纤的色散	23
2.3.2 光纤的损耗	26
2.4 光纤和光缆的设计与制造	28
2.4.1 光纤的设计与标准化	28
2.4.2 光纤的制备工艺	30
2.4.3 光缆的技术要求与结构	34
2.5 光纤的测量技术	36
2.5.1 光纤损耗的测量	36
2.5.2 光纤带宽的测量	39
2.5.3 光纤色散的测量	40
小结	41

习题 2	41
第 3 章 光电子器件	43
3.1 半导体光电器件的基本原理	43
3.1.1 光发射与光吸收	43
3.1.2 异质结与双异质结的工作原理	44
3.1.3 半导体材料与波长	46
3.2 半导体发光二极管(LED)和激光器(LD)	47
3.2.1 LED 的结构与工作原理	47
3.2.2 LED 的工作特性	48
3.2.3 LD 的结构与工作原理	50
3.2.4 LD 的工作特性	53
3.2.5 单模半导体激光器	58
3.3 半导体光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)	60
3.3.1 PIN 的结构与工作原理	61
3.3.2 PIN 的工作特性	62
3.3.3 APD 的结构与工作原理	64
3.3.4 APD 的工作特性	65
3.4 无源光器件	66
3.4.1 光纤连接器	67
3.4.2 光纤耦合器	69
3.4.3 光隔离器和光环行器	72
3.4.4 光调制器	74
3.4.5 光开关	76
3.4.6 光衰减器	77
小结	78
习题 3	78
第 4 章 光纤通信系统原理	80
4.1 光纤通信系统的组成	80
4.1.1 光纤通信系统的组成	80
4.1.2 光发射机的组成	81
4.1.3 光接收机的组成	81
4.2 光发射机	81
4.2.1 光发射机的技术要求	82
4.2.2 LED 和 LD 的封装结构	83
4.2.3 LED 光发射机	84
4.2.4 LD 光发射机	88
4.3 光接收机	92
4.3.1 光接收机的技术要求	92
4.3.2 光接收前置放大器	93
4.3.3 光接收机的噪声	94

4.3.4	模拟光接收机	95
4.3.5	数字光接收机	97
4.3.6	主放大器、自动增益控制和动态范围	101
4.4	光纤通信系统的设计和考虑	101
4.4.1	拓扑结构的设计	101
4.4.2	传输波长与光纤的设计	104
4.4.3	功率与带宽的设计	105
	小结	106
	习题 4	106
第 5 章	模拟信号光纤传输系统	108
5.1	基带模拟信号的光纤传输	108
5.1.1	工作原理和系统组成	108
5.1.2	基带电视信号的光纤传输系统	109
5.2	多路副载波信号的光纤传输	113
5.2.1	多路副载波系统原理和系统组成	114
5.2.2	多路电视调幅副载波的光纤传输系统	116
5.2.3	多路电视调频副载波的光纤传输系统	121
5.3	微波信号光纤传输系统	123
5.3.1	微波信号光纤传输原理	123
5.3.2	直接调制微波信号光纤传输	124
5.3.3	外调制微波信号光纤传输	125
	小结	126
	习题 5	126
第 6 章	数字信号光纤传输系统	127
6.1	异步数字信号光纤传输系统	127
6.1.1	异步数字信号光纤传输原理	127
6.1.2	连续数字信号光纤传输系统	128
6.1.3	串行数字信号光纤传输系统设计	131
6.2	同步数字信号光纤传输系统	133
6.2.1	SDH 同步数字系列	133
6.2.2	同步数字光纤传输的工作原理	144
6.3	突发模式光纤传输系统	148
6.3.1	突发模式光纤传输的应用方向与技术要求	148
6.3.2	突发模式光发射机	150
6.3.3	突发模式光接收机	152
6.3.4	突发模式同步技术	155
	小结	157
	习题 6	158
第 7 章	波分复用技术	159
7.1	波分复用技术的工作原理	159

7.1.1	波分复用技术的提出	159
7.1.2	波分复用技术的工作原理	160
7.2	波分复用的关键技术	162
7.2.1	波分复用的国际标准	162
7.2.2	波分复用器	166
7.2.3	稳定的光源	171
7.3	波分复用技术的应用	171
7.3.1	大容量点对点传输系统	171
7.3.2	多信道广播与分配网	171
7.3.3	多路多址光纤网络	172
	小结	173
	习题 7	173
第 8 章	光放大技术	174
8.1	光放大器的工作原理	174
8.1.1	光放大器的提出	174
8.1.2	光放大器的主要技术参数	174
8.1.3	光放大器的分类和特征	177
8.2	半导体光放大器	177
8.2.1	半导体光放大器工作原理与技术特点	177
8.2.2	半导体光放大器的应用	180
8.3	掺铒光纤放大器	180
8.3.1	掺铒光纤放大器工作原理与技术特点	180
8.3.2	掺铒光纤放大器的设计	182
8.3.3	EDFA 的特点与技术参数	184
8.4	非线性光纤放大器	184
8.4.1	光纤拉曼放大器	184
8.4.2	光纤布里渊放大器	188
8.5	光放大器的应用	190
8.5.1	光放大器的对比	190
8.5.2	光放大器的应用	191
	小结	192
	习题 8	192
第 9 章	光纤通信新技术	194
9.1	相干光通信技术	194
9.1.1	工作原理	194
9.1.2	相干光通信的调制与解调	196
9.1.3	相干光接收机的误码率和灵敏度	200
9.1.4	相干光接收机灵敏度恶化与系统设计考虑	202
9.1.5	相干光通信系统的性能	203
9.2	光孤子通信技术	204

9.2.1	光孤子原理和特性	204
9.2.2	光孤子的传输与放大	206
9.2.3	光孤子系统的通信容量及其限制因素	207
9.2.4	光孤子的传输控制	209
9.2.5	多信道光孤子系统	209
9.2.6	光纤孤子通信系统	210
9.3	光网络技术	211
9.3.1	光网络的概念	211
9.3.2	光传送网	212
9.3.3	光交叉连接和光分插复用	214
9.3.4	光网络的拓扑结构	217
9.3.5	光路由与波长分配	219
9.3.6	自动交换光网络	224
9.4	光交换技术	229
9.4.1	光交换的原理	229
9.4.2	光交换的关键技术	232
9.4.3	光波长路由	236
9.4.4	光突发交换	237
9.4.5	光分组交换	241
9.5	光纤接入网技术	243
9.5.1	光纤接入网	244
9.5.2	光纤数字接入网——PON 接入网	248
9.5.3	APON	249
9.5.4	EPON	255
9.5.5	GPON	258
9.5.6	PON 光纤传输的设计要点	262
9.5.7	光纤模拟接入网——HFC 接入网	263
	小结	266
	习题 9	266
	参考文献	268

第 1 章 导 论

本章将介绍光纤通信发展的历程,阐述光纤通信技术的特点和优势,及其在通信领域的重要作用和不可或缺的地位。简要讲述了与光纤通信相关的一些通信基础知识,如数字信号与模拟信号、带宽与速率、数字与模拟光纤传输系统、调制与解调和光发射机与光接收机的组成等。最后简要分析了光纤通信技术课程的教学思路。

1.1 光纤通信的发展和演进

1.1.1 光纤通信的简史

19 世纪 80 年代美国的贝尔完成了著名的光电话实验,翻开了光通信的历史新篇章。人们认识到频率高达 10^{14} Hz 的光波具有 10^{12} Hz 通信带宽的能力,这一理论基础驱使研究者们展开了对光源、探测器和传输介质的研究,造就了光通信事业发展的辉煌历程。特别是在 20 世纪 70~90 年代,光纤通信系统在全球范围内得到了应用和发展,引领了信息领域的一场翻天覆地的变化。

1960 年激光器问世,该光源具有单色性好、相干性佳、发散角小和功率大的突出优点,为光通信提供了高性能的光源,再次激发了人们研究光通信的热情。1966 年 7 月,英国标准电信研究所的高琨等发表文章,提出了带有包层的玻璃纤维具有传导光信号能力的理论,并预言这种光纤的传输损耗可小于 20dB/km(当时玻璃纤维的损耗达到 1000dB/km)。与此同时,激光技术以前所未有的速度发展,在 20 世纪 60~70 年代,研制出了固体激光器、气体激光器、半导体激光器。特别是室温连续工作的 GaAs 半导体激光器,在体积和波长方面与光纤通信的要求极为匹配,半导体激光器成为光纤通信系统光源的首选。在光电探测器方面,经历了从热电探测技术,到光电探测技术,再到半导体光电探测技术的发展,得到了适应光纤通信波长的宽带、高效、小体积、低功耗的半导体光电探测器。光纤通信的 3 个要素是光纤、光源和探测器,在 70 年代初期从理论到实践都得到了充分的论证,使人们看到了光纤通信发展的曙光,掀开了光纤通信发展的历史新篇章。

1970~1980 年的研究确立了光纤通信的 3 个重要通信波段,分别是 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 。近 40 年来的研究发展,光纤从多模到单模,国际电信联盟通信标准化组织(International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)先后推出了 G. 651、G. 652、G. 653、G. 654、G. 655、G. 656、G. 657 等多个国际标准。光源从低速的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)到高速的半导体激光器(Laser Diode, LD)已成熟应用。在光探测器方面,成功地开发出了宽带、高效的 PIN 光电二极管和光电雪崩二极管(Avalanche Photo Diode, APD)。特别是 20 世纪 90 年代中期出现的光放大技术和密集波分复用技术加速了光纤通信技术和全面应用。归纳起来,可以把光纤通信的发展分成 5 个阶段,如图 1.1-1 所示。

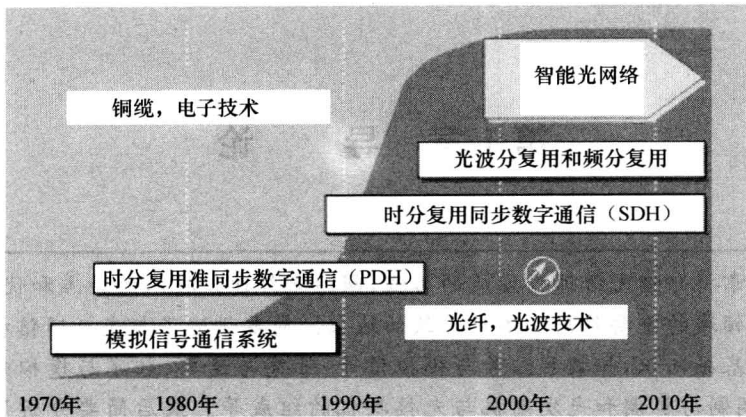


图 1.1-1 光纤通信发展的 5 个阶段

1970~1990 年,出现了以多模光纤(G. 651 光纤)和模拟传输技术为主体的第一代光纤通信系统。这一代光纤系统的特征是:工作波段为 $0.85\mu\text{m}$ 、中继距离较短和通信带宽较低。1978 年投入使用的商业系统,工作波长为 $0.85\mu\text{m}$ 波段,速率为 $50\sim 100\text{Mbps}$,中继距离约为 10km 。与当时的主要通信手段——同轴电缆相比,光纤通信技术在带宽和中继距离两方面带来了革命性的变化,由此光纤通信技术在低速、短距离的商用系统得到了大量应用和全面发展。

1985~1995 年,出现了以单模光纤(G. 652@ $1.31\mu\text{m}$)和数字传输技术为主体的第二代光纤通信系统。这一代的特征是:工作波段为 $1.31\mu\text{m}$,中继距离达 100km 和通信带宽达到 GHz 量级。研究发现,G. 652 光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 波段具有较小的损耗(典型值为 0.35dB/km)和最小的色散(典型值为 $2\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$),同时成功研制了 $1.31\mu\text{m}$ 的 InGaAsP 半导体激光器和探测器。这一代光纤传输系统的商用化,出现在 20 世纪 80 年代中后期,1987 年实现了中继距离为 50km 、速率为 1.7Gbps 的 $1.31\mu\text{m}$ 波长的单模光纤传输系统。特别是在 90 年代以后,建设了大量的采用 G. 652 光纤的 $1.31\mu\text{m}$ 波长通信系统,这类系统至今仍然大量使用。

1990~2000 年,出现了以单模光纤(G. 652@ $1.55\mu\text{m}$)和波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术为主体的第三代光纤通信系统。这一代光纤系统的特征是:工作波段 $1.55\mu\text{m}$,中继距离达数百 km 和通信带宽达到 10GHz ,并具有波分复用功能。信息社会的高速发展,使得对光纤传输带宽的需求越来越大,要求的中继距离越来越远。研究表明,G. 652 光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波段具有最小的损耗(典型值为 0.22dB/km)和较小的色散(典型值为 $20\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$)。这一代光纤通信系统实现商用化出现在 1990 年代初期,工作波长为 $1.55\mu\text{m}$,速率为 2.5Gbps 。采用这一系统有效地拓展了中继距离,但由于在 $1.55\mu\text{m}$ 波段色散较大,使传输带宽受限,在此基础上采用波分复用技术进一步增加传输带宽,这类光纤通信系统目前仍大量商用。

1995~2005 年,第四代光纤传输系统以 G. 655 单模光纤为标志,辅以密集波分复用技术(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)和光放大技术(Optical Amplifier, OA),实现了超长距离和超大容量的信息传输。G. 655 光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波段具有最小的损耗(典型值为 0.22dB/km)和最小的色散(典型值为 $2\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$)。20 世纪 90 年中期成功商用化的光放大器和 DWDM 技术引起了光纤通信领域的一场变革,目前最高复用信道数已达到 4000 多个,最高速率达到 $256\times 40\text{Gbps}=10\text{Tbps}$,已实现了 3Tbps 速率的信号光纤传输 7300km 。这类光纤通信系统是目前干线通信网络的主流技术。

2002~2003年,人们提出了下一代光纤通信技术的概念,至今仍在不断完善中。目前光纤通信前沿技术的研究和开发,主要针对下一代光纤通信系统的关键技术。下一代光纤通信系统至少具有以下基本特征:①超宽带,单根光纤传输容量在 Tbps 量级以上。②超长距离,光放大距离达到数千千米。③光交换,在光域进行光信号交换,克服电交换瓶颈。④智能化,将智能化技术引入光网络。

1.1.2 光纤通信技术的广泛应用

光纤通信技术经过近 40 年的发展,已成功地应用于工业领域的各个环节,并深入影响现代生活的各个方面,贯穿信息产业和现代服务业的各领域,已经成为不可或缺的重要技术门类,并形成了巨大的产业链。

光纤通信技术可以传输模拟信号,也可以传输数字信号,并成功地应用于通信网、互联网、广播电视网及其他的专用网络。按应用平台可划分为以下几类。

(1) 在通信网的应用。包括在骨干网、接入网、用户网的应用;光纤骨干网用于 10~40Gbps 高速数据长距离传输,包括 OXC、OADM、PDH、SDH、ATM、DWDM 和光放大等技术;光纤接入网建立从骨干网到用户网的桥梁,速率为 155Mbps~2.5Gbps,主要技术有无源光网络(Passive Optical Network, PON),如 APON、EPON 和 GPON 等接入网技术;用户网解决用户间的互联互通,有基于光纤、同轴电缆、双绞线等多种技术方案。

(2) 在互联网的应用。包括 100Mbps~10Gbps 的光纤以太网光纤传输设备。

(3) 在广播电视网的应用。主要是光纤同轴电缆混合(Hybrid Fiber Coaxial-cable, HFC)技术的应用,通常称为光纤有线电视网络。

(4) 其他应用平台。如光纤监控网络;机载、舰载、航天器等专用光纤数据总线;光纤制导的导弹、鱼雷;光纤传感网络等。

总之,光纤通信技术已经深入人们生活的各个环节,无论打电话、上网、看电视,还是办公、理财,都在享用光纤通信技术带来的便利和快捷。

1.1.3 光纤通信技术要点

1. 光纤通信技术的优势

1) 宽带、大容量

光波作为传输的载体具有 10^{14} Hz 数量级的超高频率,按照通信理论它将能够传输 10^{12} Hz 带宽的信号,因此光通信的通信容量潜力巨大。光纤通信系统主要由电光转换(光发射机)、光纤波导和光电变换(光接收机)3部分组成,这样通信带宽将受到半导体激光器、调制器、光电探测器及光纤的限制,即便是这样,光纤通信的容量也会比电缆高 3~5 个数量级,与微波通信相比高 2~4 个数量级。因此,光纤通信潜在的巨大传输容量是该项技术高速发展的原动力。

2) 低损耗、中继距离长

石英光纤通常有 3 个窗口用于通信,分别是 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波段。它们的传输损耗分别为 3dB/km、0.35dB/km 和 0.22dB/km(典型值),为电缆损耗的 0.1%~10%。传输中继距离可到达数百千米,采用相干光通信技术可达 1000km 以上。光纤传输与电缆比较,最为吸引人的特点是传输损耗几乎与传输信号带宽无关,而后者与带宽成反比,且成指数衰减。

3) 体积小、重量轻

通信用裸光纤直径为 $125\mu\text{m}$, 加上被覆层后为 $300\sim 900\mu\text{m}$ (不同光纤结构有所差异)。显而易见, 与电缆相比, 光缆体积小、重量轻, 是电缆的 $0.01\%\sim 1\%$ 。因此, 光纤通信技术不仅在现代通信网中拥有重要地位, 而且体积和重量的优势使得光纤通信技术广泛应用于飞机、航天器、船舶、导弹等军用和民用系统。

4) 抗干扰、保密性好

光纤主要成分为石英 (SiO_2), 且通信载体为光波, 因此光纤通信线路不受电磁场的干扰, 天然拥有抗电磁干扰和抗闪电雷击的能力, 特别适用于煤矿井下、油田、电力系统等易燃易爆的环境。在光纤中传输的光波信号不易泄漏、难以窃听, 因此光纤通信具有保密性好的特点。

5) 光纤资源广博、节约有色金属

石英光纤主要原料为 SiO_2 , SiO_2 在地球上取之不尽, 用之不竭, 与普通金属电缆相比可以节约大量的有色金属, 如铜 (Cu)、铝 (Al)、铅 (Pb) 等贵金属材料。

2. 光纤通信技术的要点

光纤通信技术在近 40 年高速发展中, 紧紧围绕着大容量和长距离传输这两个基本要点, 进行了深入的研究和开发, 新理论、新技术层出不穷, 系统传输容量和距离的极限被不断刷新, 光纤通信系统的性价比越来越高, 并成功地应用于生活和工作的各个方面。

1) 宽带、大容量

光纤通信带宽从几十 MHz 发展到 THz, 贯穿的技术脉络有低色散传输光纤、半导体激光高速调制技术、高速半导体光电探测技术、宽带波导调制技术 (外调制技术)、波分复用技术、密集波分复用技术及光波相位的调制与解调技术等。

2) 长距离

光纤通信距离从几十千米发展到 $1000\sim 10000\text{km}$, 贯穿的技术脉络有低损耗传输光纤的研制、大功率半导体激光器、高灵敏度半导体光电探测器、光放大技术、相干光通信技术及光孤子通信技术等。

光纤通信技术的发展演进, 正是不断面对容量和距离的挑战, 并应运而生了一个又一个新理论、新技术, 创造了光纤通信技术宽带、长距离的新局面。我们对光纤通信技术的学习依然遵循这一规律, 循序渐进掌握其中的要点, 为应用打下坚实的基础。

1.2 光纤通信的基础知识和概念

1.2.1 模拟信号与数字信号

在光纤通信系统中, 需要传送的信号包括模拟和数字两大类。模拟信号的特征是信号幅度电平随时间连续变化, 常见的模拟信号有音频信号、视频信号、模拟有线电视信号等。光纤模拟信号传输系统的主要技术指标有传输带宽、传输信噪比 (SNR) 或传输载噪比 (CNR) 和非线性等。数字信号的特征是信号电平随时间周期呈离散分布, 包括两电平和多电平数字信号, 光纤通信系统普遍采用两电平数字信号, 称为“1”码或“0”码, 每一个码有一定的持续时间 T_B , 称为比特时间。描述数字信号的另一个量称为比特率 B , 它被定义为每秒钟的比特数, 即 $B=1/T_B$ 。无论是模拟信号还是数字信号, 都具有一定的信号带宽, 信号带宽表征了信号在频域的频率响应

范围。

模拟信号在频域的特征可以通过如图 1.2-1 所示的幅频特性来描述,包括了信号带宽、中心频率、幅度及幅度范围等技术参数。传输将带来对信号的劣化,除了满足上述幅频特性的要求外,还需要达到信噪比或载噪比、非线性等方面的技术要求。

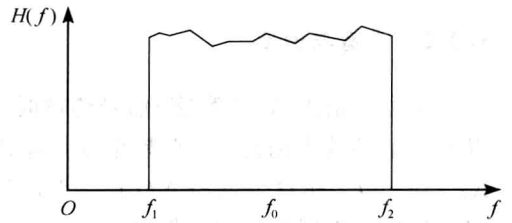


图 1.2-1 模拟信号的频域特征

数字信号的特征通常采用如图 1.2-2 所示的数字信号时域响应曲线来描述,包括了信号的编码形式、幅度、脉宽及上升与下降时间等技术参数。传输将带来信号的劣化,除了满足上述时域的技术要求外,还需要达到一定传输误码率的技术要求。

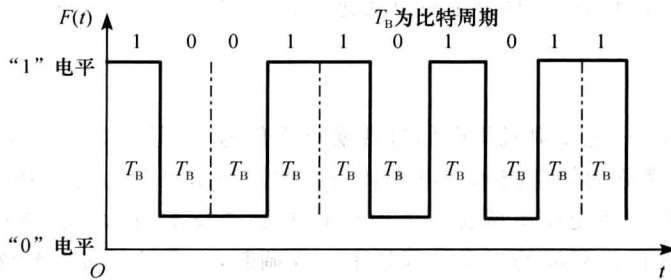


图 1.2-2 数字信号的时域波形

模拟信号和数字信号交相辉映构成了千姿百态的信息世界。模拟信号在人们感知世界、人机界面等领域起着不可替代的作用。数字信号是现代信息技术的产物,在信息的传输、存储、处理中起着重要作用。现代电子技术在模拟信号和数字信号间建立了一个桥梁,即数模转换技术,包括模数(A/D)转换和数模(D/A)转换,可以实现模拟信号变换成数字信号,也能够将数字信号还原成模拟信号。图 1.2-3 所示为数模转换与光纤传输的过程。



图 1.2-3 数模转换的过程

A/D 转换取样速率 f_s 由模拟信号的带宽 Δf 决定,根据奈奎斯特定理: $f_s \geq 2\Delta f$ 。经过 A/D 和 D/A 变换后,模拟信号需要保证达到一定的信噪比(SNR,单位为 dB)要求,A/D 变换形成数字信号的比特率(B,单位为 bit/s 或 bps)应满足

$$B > (\Delta f)(\text{SNR})/3 \quad (1.2-1)$$

式(1.2-1)表明了带宽为 Δf 、信噪比优于 SNR 的模拟信号进行数字化所需的最小比特率。例如,模拟视频信号带宽 $\Delta f = 8\text{MHz}$, $\text{SNR} > 50\text{dB}$,则 A/D 变换的比特率 $B > 133\text{Mbps}$,表明 A/D 变换后的数字信号对带宽的要求大大提高。光纤通信系统具有巨大的带宽潜力和易于完成高速数字信号传输的优势,因此光纤通信系统均采用数字方式传输。但是,在进行宽带的模拟信号光纤传输时,如微波信号,还是会采用模拟信号直接传送,这是因为目前还没有实用的技术来解决宽带的模拟信号的数模转换。因此,光纤通信技术采用数字和模拟两种传输方案,解决目前面临的所有应用需求。

1.2.2 带宽与速率

带宽是指模拟(或数字)信号传输时,在频域所占用的频谱范围。如图 1.2-1 所示,通常采用以下几个参数来描述,中心频率 f_0 ,起始频率 f_1 ,终止频率 f_2 。其中, $f_0 = (f_1 + f_2)/2$,带宽 $\Delta f = f_2 - f_1$,相对带宽为 $\Delta f/f_0$ 。无论是模拟信号还是数字信号,均会占用一定的带宽,通常数字信号通过编码处理,使其占用的带宽较集中,相对带宽较小,易于传输或处理。而模拟信号,占用的带宽较宽,相对带宽也较大,光纤传输这类信号时,带宽将成为系统的关键技术指标。这样就知道了通信中带宽的真正意义。

速率是指数字信号传输时,在时域单位时间传输的比特个数或字节个数,单位为 bps 或 byte/s。要掌握一个数字信号的特征,需要知道传输的速率和编码形式,通过了解编码就能够获得数字信号占用带宽的信息,这样就能够准确地完成数字信号光纤传输系统的设计。

1.2.3 调制与解调

在光纤通信系统中,光发射机将电信号转换成光信号,光接收机将光信号转换为电信号,前者称为调制技术,后者称为解调技术。电光转换的调制技术可分为直接将电信号加载到光源和采用外调制器来获得调制光输出两类。光电转换的解调技术包括直接强度探测和相干探测两类。首先研究如何选择光载波的一个物理量来完成调制,实现信号加载到光波上,根据电磁场理论,光载波的标量数学形式为

$$\mathbf{E} = eA \cos(\omega t + \phi) \quad (1.2-2)$$

式中, \mathbf{E} 为电场矢量; e 为光偏振方向单位矢量; A 为幅度; ω 为载波角频率; ϕ 为相位。光波的幅度 A 、角频率 ω 或相位 ϕ 都可以被选为调制对象。在模拟调制中,这 3 个过程分别叫做调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM),实质上就是对光波的强度、频率、相位进行调制。在数字通信中,同理可以实现对光波的幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)。最简单的一种 ASK 叫做开关调制(OOK),它以光信号的有无来表示“1”或“0”,大多数数字光纤通信系统采用 OOK 的开关强度调制。

对应于光波的幅度、频率、相位调制方案,解调方案也必须与之一一对应。

(1) 对光波的幅度调制,实际上就是对光强度调制,因此解调采用光强度直接检测就可以完成,这也是目前最成熟、应用最广泛的技术。

(2) 对光波的频率和相位调制,光强将不发生改变,强度检测技术将无效。取而代之的是相干检测技术,通过一个本征光与信号光相干,获取信号光的频率或相位信息,从而达到解调的目的。

1.2.4 光纤通信系统组成的 3 个要素

从光纤通信诞生的那天起,人们就认识到组成光纤通信系统的 3 个要素:光发射机、光纤(光缆)和光接收机。图 1.2-4 所示为光纤通信系统组成的示意图。通常将光发射机和光接收机统称为光端机或光收发器,也可以叫做发射光端机和接收光端机,其主要功能为:在发射端将电信号转换成光信号,并注入光纤中传输,在接收端将光信号转换成电信号,这样就完成了光纤通信系统的整个传输过程。



图 1.2-4 光纤通信系统的组成

1. 光发射机

光发射机的作用就是将电信号转变成光信号,并将光信号耦合注入光纤中传输。图 1.2-5 所示为光发射机的示意图,它主要由驱动电路、光源、调制器和信道耦合器等组成,其中光源是光发射机的核心部分,通常采用半导体激光器(LD)或发光二极管(LED)作为光源。调制有直接调制和间接调制两种,通常在小功率(小于 20mW)和较低带宽(小于 2.5GHz)情况下,采用直接调制技术对半导体光源的注入电流进行调制。当发射机功率较大或带宽较高时,采用间接调制技术,通过驱动电路驱动外调制器,对稳定连续输出的激光光源进行调制。前者结构简单、成本较低、易于实现,后者较为复杂,成本较高。但它们适用不同的应用领域。信道耦合器通常是一个微透镜,它最大限度地地将光信号耦合注入光纤传输。

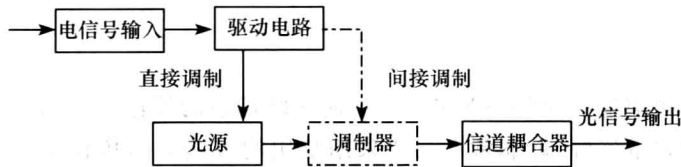


图 1.2-5 光发射机结构

2. 光纤与光缆

在光纤通信系统中,光纤是实际的光传输信道,而在工程应用中是以光缆的形式出现。光纤的作用是将光信号从光发射机传送到光接收机。光纤的两个重要参数是损耗和色散,它们分别限制了光纤通信系统的传输距离和传输容量。光纤的损耗直接决定着长途光纤通信系统的中继距离,而光纤的色散使得光脉冲在光纤中传输时发生展宽,限制了传输容量。在使用多模光纤的情况下,色散尤其严重,因为光纤中不同模式具有不同的传输速率,所以脉冲展宽较大,传输带宽较低。因此,为了满足带宽的要求,大多数光纤通信系统均采用单模光纤传输,单模光纤不存在模式色散,但它的材料色散和波导色散仍然会引起脉冲展宽。对大多数应用系统来说,单模光纤的色散不对光纤通信系统产生负面影响,并且通过控制光源的光谱线宽,可以进一步减小这种色散对光纤传输带宽的限制。

3. 光接收机

图 1.2-6 所示为光接收机的示意图,它主要由耦合器、光电二极管和整形恢复电路构成。耦合器的作用是将光信号耦合到光电二极管上,光电二极管是光接收机的主要部件,它将接收到的光信号转变成电信号,经放大后送入整形恢复电路进行处理,恢复得到电信号。接收信号一般分为模拟信号和数字信号两种,根据它们的不同信号特征设计电路,并依据不同的传输质量要求,来设定技术参数。

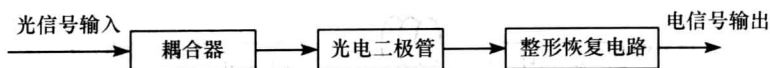


图 1.2-6 光接收机组成

数字信号光纤传输系统的性能主要由误码率(Bit Error Rate, BER)来表征,它定义为光接收机在接收一定速率和平均光功率光信号时出现误码的概率。通常光纤通信系统都将 $BER \leq 10^{-9}$ 的误码率作为对系统的基本要求,有些高性能系统要求 $BER \leq 10^{-11}$ 。光接收机的接收灵敏度是另一个重要的技术参数,定义为在传输一定速率的数字信号时,满足一定误码率,所需要的最小平均接收光功率,它与系统的噪声、带宽等因素有关,体现了系统长距离传输的能力。

模拟信号光纤传输系统的性能表征较为复杂,通常由传输的带宽、信噪比(载噪比)、非线性等技术指标来衡量,不同的模拟传输系统要求不尽相同,需要具体问题具体分析解决。模拟光接收机的接收灵敏度是一个非常重要的技术参数,定义为在传输一定带宽的模拟信号时,满足一定信噪比(载噪比),所需要的最小平均接收光功率,它与系统的噪声、带宽、非线性等因素有关,体现了系统的传输能力。

1.2.5 数字光纤通信系统

1. 信道复用

通常一个数字音频信道的比特率为 64kbps,而光纤信道的传输容量高达 10Tbps 以上,为了充分利用光纤信道的容量资源,就非常有必要采用复用的方法同时传输多路信号。数字信号传输主要采用时分复用(TDM)技术,在时分复用系统中,不同信道的数据交叉间隔形成一个复合数据。采用 TDM 概念,形成了不同的数字系列。在北美洲和日本,将 24 路数字音频信号复合在一起,成为 1.544Mbps 的基群(也称为 T1),而在欧洲则采用 30 路数字音频信号复用,成为 2.048Mbps 的基群(也称为 E1),注意到复用后的信号速率不是简单的复用信道数乘以 64kbps,而是稍高一些,这是因为在复用时加进了一些业务码。二次群信号通过将 4 个基群信号复接而获得,对北美洲和日本来说,速率为 6.312Mbps,欧洲为 8.44Mbps,采用同样的方法可以获得更高次群的信号。表 1.2-1 给出了北美洲、欧洲和日本采用的 5 种不同数字系列的码率。我国根据国情选用了欧洲的制式。

表 1.2-1 准同步数字系列(PDH)的码率和电话容量

群次	码率/Mbps					
	北美洲	电话容量	中国欧洲	电话容量	日本	电话容量
1	1.544	24	2.048	30	1.544	24
2	6.312	96	8.448	120	6.312	96
3	44.736	672	34.386	480	32.064	490
4	274.176	4032	139.264	1920	97.728	1470
5			565.148	7680	396.200	5880

2. 准同步数字系列(PDH)

在光纤通信产业发展的早期,缺乏统一的国际标准,不利于设备的互连互通,后来在国际电信联盟通信标准化组织的努力下,逐步制定了一系列国际标准,定义了 TDM 数字信号的结构。