



# 光 纤 通 信 原 理 与 系 统

(第 4 版)

GUANGXIAN TONGXIN YUANLI YU XITONG

○ 张明德 孙小菡  
○ 东南大学出版社

# 光纤通信原理与系统

(第4版)

张明德 孙小菡

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书在“光纤通信原理与系统”第3版的基础上修订而成,旨在详细阐明光通信技术基本原理的同时,尽可能结合光通信系统与设计的实际,以及光通信的新技术、新发展,以满足高年级本科生及低年级研究生学习光通信技术的需要,同时亦可供从事光通信技术工作的科研与工程技术人员参考。

读者只要具有大学物理、高等数学及电磁场理论的基本知识,就可阅读本书。全书共分7章,第1章介绍光通信的特点、历史、系统结构组成;第2章介绍光纤传输原理与特性、光无源器件;第3章介绍光源与光发送机,包括半导体光源的基本工作原理、应用特性;第4章介绍光检测器与光接收机,对光接收机的性能特性进行系统分析;第5章对半导体光放大器、掺铒光纤放大器、光纤拉曼放大器的原理、特性进行详细讨论;第6章为光通信系统,首先对数字光纤通信系统的结构、性能进展及设计进行详细介绍,接着对模拟光纤通信系统及更复杂的光纤通信系统,如相干光纤通信、波分复用(WDM)系统、孤子通信系统等进行讨论;第7章为光网络,在简要介绍网络拓扑结构、光交换的基础上,着重介绍SDH同步传送网及WDM光网络,最后介绍光接入网。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理与系统 / 张明德,孙小菡. —4版.

南京:东南大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-5641-1430-5

I. 光… II. ①张…②孙… III. 光纤通信—  
通信系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第161985号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编210096)

出版人:江 汉

江苏省新华书店经销 常州市武进第三印刷有限公司印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:22.5 字数:560千字

2009年1月第4版 2009年1月第9次印刷

ISBN 978-7-5641-1430-5/TN·21

印数:22001—26000 定价:38.00元

(凡因印装质量问题,可直接向读者服务部调换。电话:025—83792328)

## 第4版 前言

本书第3版出版至今已有5个年头了,光纤通信市场在经过了一段艰难的隆冬时期之后,撇去破碎的网络泡沫,迎来了阳光明媚的春天,光纤通信技术又取得了长足的进展。

在第3版使用过程中,有关院校的师生提出了许多宝贵的意见,作者一方面在此表示深切的感谢,另一方面也警示我们需要对第3版进行一次修订了。

鉴于上述原因,第4版对第3版的内容进行了全面的修订,特别是改写了第1、5、6章,增加了第7章;为了培养学生的分析和计算能力,还补充了大量的例题。

与第3版一样,第4版也为选用本教材的教师备有教学支持光盘,如需要可向东南大学出版社索取。

对于书中的不足与不妥之处,敬请不吝赐教。

作者

2008年8月

## 第3版 前言

本书第3版对第2版的内容进行了全面的删节修订,根据光纤通信技术的发展,增加了部分内容,如平面光波导、光子晶体光纤及色散补偿技术等。同时,在第3版中还增加了习题,供教学时选用。

为了支持制作多媒体课件的需要及教师教学的方便,第3版还为任课教师准备了一张教学支持光盘,任课教师可凭本书最后的证明直接向出版社索取。

尽管尽了最大努力,但由于作者学识有限,书中仍难免有不足与错误之处,敬请不吝指正。

作者  
2003年6月

## 第2版 前言

本书第1版自1996年12月出版以来,每年重印,以满足许多院校每年教学用书及科技工作者参考的需要。但由于光纤通信技术的飞速发展,近几年来涌现出了许多新技术,光纤通信发展到了一个新的阶段。虽然原书讲述的原理仍是学习光纤通信技术的基础,但也显得已难以适应光纤通信发展的形势,这就是本书再版修订的原因。在第2版中增加了一些对当今光纤通信发展有重要影响的内容,主要有:

- (1) 单模光纤中的非线性效应;
- (2) 光纤光栅;
- (3) 光放大器;
- (4) 波分复用光纤通信系统;
- (5) 光纤通信网络;
- (6) 全光通信技术。

由于这些内容本身十分丰富,而篇幅又有限,因此对某些内容的阐述仍未能深入展开。尽管如此,本书的篇幅比第1版时仍有了较大的增加。由于第1版的内容已是非常基础,难以做大的删节,增加内容的同时稍增加篇幅也是不得已而为之,请读者见谅。

硕士研究生万骏俊及周亚凌为本书的图稿作了大量工作,特致谢意。

书中不妥及错误之处,恳请不吝指正。

作者  
2001年3月

## 原版前言

光纤通信在现代信息科学技术中的举足轻重地位已是有口皆碑,它的出现与迅速发展大大地改观了信息技术的面貌。当今世界上光纤通信得到了广泛的应用,不仅陆地上使用,而且还铺设了许多跨越大洋大海的海底光缆。可以毫不夸张地说,光缆现在已经包裹了整个地球。光纤通信已成为现代通信的支柱、世界通信网的骨干。用光缆代替传统使用的电缆,使电信网光纤化已是大势所趋。虽然一般地讲光纤通信技术已经成熟,但其发展势头方兴未艾,各种新技术、新产品、新构思仍雨后春笋般地涌现,推动着光纤通信技术的进一步发展。“信息高速公路”铺设到各个家庭已不是遥远的事,必将更深刻地影响到人们的生活方式、工作方式与学习方式,并推动人类社会的文明进步与发展。

目前,国内外许多高校,无论是工科还是理科,纷纷开设了光纤通信的有关课程,以满足社会对各种层次人才的需求。本书旨在希望用不太大的篇幅,在详细阐明光纤通信技术基本原理的同时,尽可能结合光纤通信系统与设计的实际,以及光纤通信的新技术、新发展,以满足高年级本科生及低年级研究生学习光纤通信原理与系统的需要,同时亦可供从事光纤通信技术工作的科研与工程技术人员参考。

读者只要具有电磁场理论、大学物理及高等数学的基本知识,就可阅读本书。如读者学习过光电子学及通信原理的基本知识当然更好,但这并不是阅读本书的前提。全书共分5章,主要围绕应用最广的强度调制、直接检测光纤通信系统展开讨论。第一章光纤通信概论,介绍光纤通信的特点、历史、系统结构组成与发展。接着三章介绍光纤通信系统的核心部分,其中第二章介绍光纤传输原理与特性;第三章介绍光源与光发送机,包括半导体光源的基本工作原理、应用特性、驱动电路与调制技术;第四章介绍光检测器与光接收机,包括半导体光检测器的光检测原理及主要特性,然后着重对光接收机的性能特性进行系统分析。第五章为光纤通信系统。首先对光纤通信系统的元件选择、设计原则与方法进行综合讨论,接着对模拟光纤通信系统及数字光纤通信系统的组成与性能作详细介绍,然后对更复杂的光纤通信系统如相干光纤通信、波分复用、光纤网等进行讨论,最后对光纤通信新技术如光放大器与全光通信、光纤孤子通信等进行介绍。

本书是在作者讲授光纤通信原理与系统课程的基础上编写而成的。在课程讲授过程中吸收了多届学生的建议,书稿编写过程中承蒙徐淦卿教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此向他们表示深切的谢意。由于水平有限,对书中的不足及错误之处,祈请专家学者与读者不吝赐教批评指正。

作者

1996年3月

# 目 录

<b>1 光纤通信概论</b> .....	1
1.1 光纤通信技术的演进 .....	1
1.2 信号及调制 .....	4
1.2.1 脉冲编码调制 .....	4
1.2.2 基本信息速率 .....	6
1.2.3 调制码型 .....	8
1.3 光通信系统.....	10
<b>2 光 纤</b> .....	13
2.1 概 述 .....	13
2.2 光线在光纤中的传输.....	15
2.2.1 阶跃光纤中的光线分析 .....	15
2.2.2 梯度光纤中的光线分析 .....	17
2.2.3 平面光波导 .....	19
2.3 光纤的波动理论.....	24
2.3.1 波动方程.....	24
2.3.2 归一化变量 .....	25
2.3.3 贝塞尔方程的场解 .....	26
2.3.4 特征方程.....	29
2.3.5 线偏振模及其特性 .....	29
2.3.6 传播常数 $\beta$ 与归一化频率 $V$ 的关系 .....	31
2.3.7 光纤中的功率流 .....	32
2.3.8 单模光纤.....	33
2.4 光纤的损耗特性.....	37
2.4.1 材料的吸收损耗 .....	39
2.4.2 光纤的散射损耗 .....	40
2.4.3 辐射损耗.....	40
2.5 光纤的色散特性及带宽.....	41
2.5.1 群时延和时延差 .....	42
2.5.2 材料色散和波导色散 .....	43
2.5.3 高斯脉冲在单模光纤中的传播 .....	48
2.5.4 偏振模色散 .....	49
2.5.5 模间色散.....	50

2.5.6	光纤的传输带宽	51
2.6	单模光纤中的非线性效应	52
2.6.1	媒质中的非线性效应	53
2.6.2	光纤中的受激散射效应	53
2.6.3	非线性折射率调制效应	55
2.6.4	光脉冲在光纤中的传输方程	58
2.7	光纤光栅	59
2.7.1	基本工作原理	59
2.7.2	耦合模理论及布拉格光栅的滤波特性	60
2.7.3	啁啾光纤光栅	63
2.7.4	长周期光纤光栅	64
2.7.5	抽样光栅	65
2.7.6	光纤光栅在光纤通信中的应用	66
2.8	无源光器件	67
2.8.1	光纤的连接与光纤连接器	68
2.8.2	光纤分路器及耦合器	68
2.8.3	GRIN 透镜连接器	70
2.8.4	光隔离器和光环行器	70
2.8.5	光开关	70
2.9	聚合物光纤与光子晶体光纤简介	73
2.9.1	聚合物光纤	73
2.9.2	光子晶体光纤	74
	习题	77
<b>3</b>	<b>光源与光发送机</b>	<b>79</b>
3.1	半导体中的光发射	80
3.1.1	光的吸收与发射	80
3.1.2	半导体的光发射	83
3.2	发光二极管	87
3.2.1	发光二极管的结构	87
3.2.2	发光二极管的主要特性	89
3.3	半导体激光器的工作原理与结构	92
3.3.1	半导体激光器的工作原理	92
3.3.2	半导体激光器的结构	97
3.4	半导体激光器的工作特性	103
3.4.1	$P-I$ 特性	103
3.4.2	模式特性与线宽	106
3.4.3	调制特性	107
3.4.4	波长调谐特性	112
3.4.5	噪声特性	113



3.4.6 半导体激光器的安全使用 .....	115
3.5 光发送机 .....	115
3.5.1 光载波的调制 .....	116
3.5.2 发光二极管驱动电路 .....	117
3.5.3 激光二极管驱动电路 .....	119
3.6 光源与光纤的耦合 .....	121
3.7 光源的外调制技术 .....	122
3.8 光子集成光源 .....	127
习题 .....	129
<b>4 光检测器与光接收机</b> .....	<b>130</b>
4.1 概述 .....	130
4.2 光检测器 .....	131
4.2.1 光检测器的工作原理 .....	131
4.2.2 光检测器的主要工作特性 .....	136
4.2.3 高带宽光检测器 .....	140
4.3 光接收机的噪声 .....	140
4.3.1 光接收机中的噪声源 .....	140
4.3.2 接收机等效电路及放大器电路噪声 .....	142
4.3.3 光检测器噪声 .....	143
4.3.4 背景噪声 .....	146
4.3.5 光检测器信噪比 .....	147
4.3.6 等效噪声功率 .....	148
4.4 模拟接收机的噪声及信噪比 .....	149
4.4.1 均方信号电流 .....	149
4.4.2 等效噪声带宽 .....	150
4.4.3 信噪比及接收灵敏度 .....	151
4.5 数字接收机的噪声分析 .....	152
4.5.1 概述 .....	152
4.5.2 数字接收机的分析模型 .....	153
4.5.3 信号分析 .....	153
4.5.4 放大器电路噪声 .....	155
4.5.5 光检测器噪声 .....	155
4.5.6 输入输出脉冲形状及 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $\Sigma_1$ 值 .....	157
4.6 光接收机前置放大器 .....	161
4.6.1 高阻抗前置放大器 .....	162
4.6.2 互阻抗放大器 .....	168
4.6.3 动态范围 .....	170
4.7 数字接收机的误码率和接收灵敏度 .....	171
4.7.1 数字接收机的误码率 .....	171

4.7.2	数字接收机的接收灵敏度 .....	175
4.7.3	光前置放大器接收机 .....	177
4.7.4	影响灵敏度的其他因素 .....	178
4.7.5	数字接收机的灵敏度极限——量子极限 .....	179
4.8	数字接收机中的定时提取与判决再生 .....	180
4.8.1	定时提取 .....	181
4.8.2	判决再生 .....	181
	习题 .....	183
<b>5</b>	<b>光放大器</b> .....	<b>185</b>
5.1	概述 .....	185
5.1.1	半导体光放大器 .....	186
5.1.2	掺铒光纤放大器 .....	187
5.1.3	光纤拉曼放大器 .....	188
5.1.4	光放大器在光通信系统中的应用 .....	189
5.2	光放大器基本特性 .....	190
5.2.1	增益和带宽 .....	191
5.2.2	饱和输出功率 .....	192
5.2.3	噪声特性 .....	193
5.2.4	光放大器存在的问题 .....	196
5.3	半导体光放大器 .....	197
5.3.1	基本工作原理 .....	197
5.3.2	增益特性 .....	197
5.3.3	功率输出特性 .....	200
5.3.4	带宽特性 .....	200
5.3.5	噪声特性 .....	201
5.3.6	多信道放大特性 .....	202
5.3.7	半导体光放大器的应用 .....	203
5.4	掺铒光纤放大器 .....	206
5.4.1	基本工作原理 .....	207
5.4.2	增益特性 .....	208
5.4.3	功率输出特性 .....	211
5.4.4	噪声特性 .....	212
5.4.5	多信道放大特性 .....	216
5.4.6	宽带 EDFA .....	218
5.4.7	EDFA 的应用 .....	220
5.5	光纤拉曼放大器 .....	224
5.5.1	耦合方程组 .....	224
5.5.2	增益特性 .....	226
5.5.3	噪声特性 .....	227

5.5.4	宽带拉曼放大器 .....	234
5.5.5	拉曼放大器的应用 .....	237
	习题 .....	239
<b>6</b>	<b>光纤通信系统</b> .....	<b>241</b>
6.1	数字光纤通信系统 .....	241
6.1.1	光纤传输系统最适合于传输数字信号 .....	241
6.1.2	数字光纤通信系统的基本结构 .....	242
6.1.3	线路码型 .....	243
6.1.4	前向纠错(FEC) .....	245
6.1.5	数字光纤通信系统的性能 .....	247
6.1.6	数字光纤通信系统的主要性能指标测试 .....	252
6.2	系统设计考虑 .....	255
6.2.1	工作波长的选择 .....	255
6.2.2	元件的选择 .....	255
6.2.3	损耗限制系统的计算——功率预算法 .....	256
6.2.4	色散限制系统的计算——上升时间预算 .....	258
6.3	模拟光纤通信系统 .....	262
6.3.1	模拟调制技术 .....	262
6.3.2	基带直接强度调制(D-IM) .....	264
6.3.3	副载波复用强度调制(SCM-IM) .....	265
6.4	相干光纤通信系统 .....	271
6.4.1	基本原理 .....	272
6.4.2	调制与解调技术 .....	273
6.4.3	相干光纤通信的优点及关键技术 .....	274
6.4.4	相干光纤通信系统实例 .....	275
6.5	光纤孤子通信 .....	275
6.5.1	基本原理 .....	275
6.5.2	损耗管理孤子系统 .....	278
6.5.3	色散管理孤子系统 .....	279
6.6	波分复用光纤通信系统 .....	280
6.6.1	概述 .....	280
6.6.2	WDM光传送系统结构 .....	282
6.6.3	光滤波器 .....	284
6.6.4	波分复用/解复用器 .....	285
6.6.5	光源技术 .....	290
6.6.6	光纤技术 .....	291
6.6.7	色散补偿技术 .....	292
6.6.8	调制码型 .....	296
6.6.9	WDM光传送系统现状 .....	299

6.6.10 WDM的发展 .....	301
习题 .....	303
<b>7 光网络</b> .....	<b>305</b>
7.1 通信网技术的演进 .....	305
7.1.1 概述.....	305
7.1.2 通信网的结构 .....	307
7.1.3 通信网的演进 .....	309
7.2 SDH 光同步数字传送网 .....	311
7.2.1 帧结构和复用映射结构 .....	311
7.2.2 自愈环 .....	313
7.2.3 SDH 网络 .....	315
7.3 WDM 光传送网 .....	317
7.3.1 光传送网的分层结构 .....	318
7.3.2 光网络的结构及波长路由 .....	319
7.3.3 节点设备 .....	321
7.3.4 IP over WDM 网技术 .....	327
7.3.5 WDM 光网络概况 .....	328
7.4 光接入网 .....	330
7.4.1 光接入网的参考配置 .....	331
7.4.2 光接入网的应用类型 .....	332
7.4.3 无源光网络 .....	333
7.4.4 HFC 接入网 .....	341
<b>附录</b> .....	<b>344</b>
<b>主要参考资料</b> .....	<b>345</b>

人类为了生存和发展,在生产及社会活动中,常常需要把信息从一个地方传送到遥远的另一个地方,这种信息的传递称为通信。通信必须依靠通信系统来完成。任何一个通信系统均包括三个主要的组成部分,即发送、传输和接收,光纤通信也不例外。需要传送的信息在发送端输入到发送机中,将信息叠加或调制到作为信息信号载体的一个正弦电磁波(即所谓的载波)上,然后将已调制的载波通过传输媒质传送到远处的接收端,由接收机解调出原来的信息。通常,信息的载波是射频波、微波、毫米波等,传输媒质为金属导线、同轴电缆、金属波导管或大气等。但以光波为载波、光纤作为传输媒质的光纤通信异军突起,发展最为迅速,已成为现代通信产业的支柱,是通信史上的一次革命。

本章概述光通信的发展史、通信系统中信号与调制的基本问题、光通信系统的组成特点等。

## 1.1 光纤通信技术的演进

利用光进行通信并不是一个新概念,我国古代使用的烽火台就是大气光通信的最好例子。后来的手旗、灯光甚至交通红绿灯等均可划入光通信的范畴,但可惜它们所能传递的距离和信息量都是十分有限的。

近代光通信的雏形可追溯到 1880 年 Bell 发明的光电话:用阳光作为光源、硒晶体作为光接收检测器件,通过 200 m 的大气空间成功地传送了语音信号。虽然在以后几十年中,人们对 Bell 的光电话具有浓厚的兴趣,但由于缺乏合适的光源及严重的大气衰减,这种大气通信光电话未能像其他电通信方式那样得到发展。

在光通信发展受阻的同时,电通信技术得到了迅速发展。首先是 1838 年 Morse 发明了电报,开创了电通信的新纪元,采用新的编码技术(Morse 码)使码速增加到了 $\sim 10$  bit/s,使用中继站时通信距离达到了约 1000 km,甚至穿越了大西洋;然后是 1876 年电话的发明及 20 世纪世界电话网的迅速发展。采用同轴电缆代替双绞线后大大增加了系统容量:1940 年,能传送 300 路模拟话音信道的第 1 条 3 MHz 同轴电缆系统投入运行;1948 年,载波频率为 4 GHz 的第 1 个微波通信系统投入运行;到 1975 年,最先进的同轴电缆系统速率达到了 275 Mb/s(可传送约 4000 路数字语音)。但由于与频率相关的损耗,其中继距离非常短( $\sim 1$  km)。同时,由于可传输的信息总量是与载波的频率范围直接相关,因此提高载波频率在理论上可以增加传输带宽及信息传输容量,电通信的载波频率也从射频波提高到了微波、毫米波。但它们的载波频率仍是有限的,难以进一步提高传输带宽及容量。既然光波的频率要比微波高 5 个数量级,因此用光波作为载波的光通信的容量能比电通信提高几个数量级也就不足为奇了。

近代光通信的真正发展则只是近 40 年的事,其中起主导作用的是激光器和光纤的诞生。首先是 1960 年激光器的发明,激光器产生的强相干光为现代光通信提供了可靠的光

源。这种单波长的激光具有普通无线电波一样的特性,可对其调制而携带信息。利用激光的早期光通信也是通过大气传输的。但很快发现,许多因素如雾、雨、云,甚至一队偶然飞过的鸽子,都会干扰光波的传播,因而只能作短距离通信用。显然,需要一种像射频或微波通信的电缆或波导那样的光波通信传输线,以克服这些影响,实现信息的长距离稳定传输。

1965年,报导了由金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导,可避免大气传输的缺点,但因其结构太复杂且精度要求太高而不能实用。而另一方面,光导纤维的研究正在扎实进行。早在1951年就发明了医疗用玻璃纤维,但这种早期的光导纤维由于损耗太大( $>1000\text{ dB/km}$ ),也不能作为光通信的传输媒质。1966年,“光纤通信之父”高锟(见图1.1.1)等发表了对光通信发展具有历史里程碑意义的著名论文。他们在分析了造成光纤传输损耗高的主要原因后指出,如能除去玻璃中的杂质,损耗就可以降到 $20\text{ dB/km}$ ——相当于同轴电缆的损耗水平,那么光纤就可用来进行光通信了。在这种预想的鼓舞下,Corning公司终于在1970年研制出了损耗为 $20\text{ dB/km}$ 的光纤,从而为光纤通信的发展铺平了道路。而后,随着新的制造方法的出现及工艺水平的不断提高,光纤损耗不断降低。到1979年,单模光纤在 $1550\text{ nm}$ 波长的损耗已降到 $0.2\text{ dB/km}$ ,接近石英光纤的理论损耗极限。自此以后,光通信技术得到了飞速的发展,揭开了通信容量以惊人速度增长的序幕。图1.1.2为通信系统容量的发展图,可见只有采用光纤通信之后才实现了通信容量的指数式增长。



图 1.1.1 高锟教授在东南大学作报告

在分析了造成光纤传输损耗高的主要原因后指出,如能除去玻璃中的杂质,损耗就可以降到 $20\text{ dB/km}$ ——相当于同轴电缆的损耗水平,那么光纤就可用来进行光通信了。在这种预想的鼓舞下,Corning公司终于在1970年研制出了损耗为 $20\text{ dB/km}$ 的光纤,从而为光纤通信的发展铺平了道路。而后,随着新的制造方法的出现及工艺水平的不断提高,光纤损耗不断降低。到1979年,单模光纤在 $1550\text{ nm}$ 波长的损耗已降到 $0.2\text{ dB/km}$ ,接近石英光纤的理论损耗极限。自此以后,光通信技术得到了飞速的发展,揭开了通信容量以惊人速度增长的序幕。图1.1.2为通信系统容量的发展图,可见只有采用光纤通信之后才实现了通信容量的指数式增长。

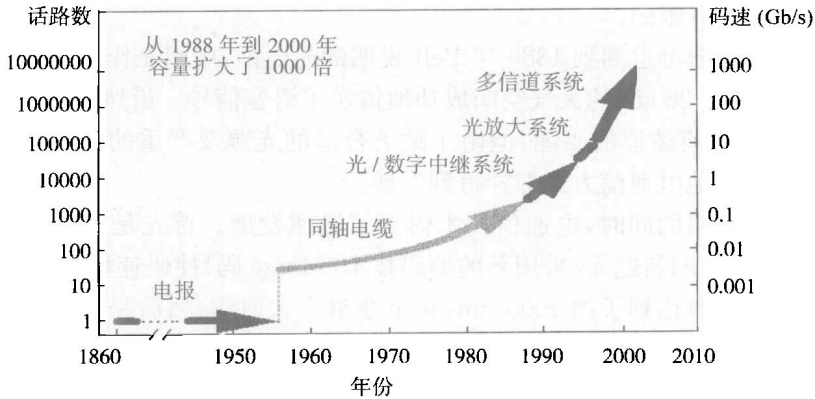


图 1.1.2 通信容量发展图

由于光波频率高,光纤的带宽资源十分可观,是任何其他传输媒质无法比拟的。可以说,光纤是通信工作者梦寐以求的理想传输媒质,有近乎完美的品质:

- 几乎是无限的带宽;
- 几乎是零的损耗;
- 几乎为零的信号失真;
- 几乎为零的功率消耗;
- 几乎为零的材料消耗;
- 几乎为零的占有空间;

· 几乎为零的价格。

因此,从经济学观点看,光纤是传输话音、数据、视频业务最有效的媒质。也可以毫不夸张地说,没有光纤,信息高速公路也许无“路”可走,当今信息革命的新纪元则无从谈起。

在光纤损耗不断降低的同时,光源研究的进展亦十分迅速。1962年,GaAs 半导体激光二极管(LD)问世,意味着现代光通信有了小体积的高速光源。GaAs-LD 的发射波长为 870 nm,在掺杂铝后移到了光纤的短波长低损耗窗口(850 nm)。后来,GaAsAl-LD 又实现了室温下长时间工作。利用四元系合金 InGaAsP 制造出了适用于光纤的两个长波长低损耗窗口(1300 nm 及 1550 nm)的 LD 光源。由于 LD 昂贵,适合光纤通信的高亮度发光二极管(LED)便研制了出来。这样,随着符合光纤传输要求、各种波长、高效率、长寿命、高速率半导体光源的研制成功,光通信的实用化及大发展已是水到渠成。

此外,在光接收机的研究方面,各种波长范围的高效率、高速率半导体光电转换器件(如 APD、PIN)也陆续问世。1973年,S. D. Personick 发表了有关 PCM 数字光接收机分析的论文,解决了现代光通信系统中光接收机的设计问题。数字接收机的灵敏度是很高的,如接收 2.5 Gb/s 的信号时可达 -30 dBm,即 1  $\mu$ W(dBm 的定义见附录 1)。那么,对于似乎很小的 1 mW 的发送功率,光纤损耗为 0.2 dB/km 时,仅从损耗而言的传输距离就可达 100 km 以上。

此外,为了满足系统应用的需要,各种光无源器件(如光纤活动连接器、光衰减器、光波分复用器、隔离器及分路器等)及专用仪器设备(如光纤熔接机、时域反射计、光功率计等)也陆续配套商用。

1974 年前后,许多国家进行了各种室内的光纤通信传输实验;1976 年后出现了各种实用的光纤通信系统;1980 年美国电报电话公司的 45 Mb/s 光纤通信系统 FT3 实现商用。从 20 世纪 80 年代起进入了光纤通信高速发展的时期,经历了从短波长(850 nm)到长波长(1300 nm、1550 nm)、从多模光纤到单模光纤、从低速率到高速率的发展过程。至今,商用光纤通信系统的发展已经历 4 代,即 850 nm 波长的多模光纤第一代系统(1980 年~)、1300 nm 波长的单模光纤第二代系统(1983 年~)、1550 nm 波长的单模光纤单频激光器第三代系统(1991 年~)及采用光放大器的第四代系统(1995 年~)。现在,传输速率为 2.5 ~40 Gb/s 的系统均已实用化并大量应用,形成了遍布全国、全世界的陆地与海底光纤网。

为了充分发挥光纤的带宽潜力,克服光纤损耗及色散的影响、延长中继距离、扩大传输容量及降低成本,一直是光通信的发展目标。系统的码速距离积一再提高,几乎每 4 年增加一个数量级,极大地满足了人们对信息传递的速度、质量及容量的需求(见图 1.1.2)。在光通信的发展历程中,各种新技术不断涌现,它们将推动光通信技术不断地演进:

(1) 研制新型光纤,有源及无源光器件、系统端机的集成化与模块化,提高速率与性能,简化结构降低成本,是系统发展的技术基础。实现“光电子器件集成化”或“System on chip”是器件研发工作者的追求目标,为新一代的光通信系统与网络提供新的功能器件。

(2) 波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)技术,使单根光纤上能同时传输几十至几百个波长信道,实现超高速、超大容量的传输。WDM 技术使网络容量提高了 2 个数量级以上,为当今数据业务、Internet 的超速发展提供了海量的带宽。WDM 在光网络中的作用犹如 IC 在电子学革命中的作用。

(3) 光放大器技术,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)、

光纤拉曼放大器(FRA, Fiber Raman Amplifier)及其应用。没有 EDFA,就没有当今 WDM 技术的辉煌与成功。

(4) 高速大容量光网络技术。光网络已从电子交换和路由的第 1 代,发展到今天采用可重构光分插复用 (ROADM)或可重构光交叉连接(ROXC)的第 2 代,并正向采用突发或分组交换的第 3 代演进,以提供更大的容量及灵活性、可靠性。为此,必须在关键技术、系统技术及网络控制、管理与规划等方面不断创新。

(5) 光接入网技术。“接入”是指连接用户和网络运营商边缘交换局之间的“最后 1 公里”网络,现在更流行称为“第 1 公里”网络。现在的接入网 90%以上仍然是双绞线主宰的模拟系统,因此成了制约全网发展的瓶颈,光接入网是解决这一困惑的最佳技术手段。

(6) 自由空间光通信(FSO, Free Space Optical Communications)技术。利用大气进行光通信是一项尘封多年的技术,但由于其高速大容量及架设方便快捷、低成本的优势,最近几年又重出“江湖”,在卫星间、宽带接入、短距离通信等领域均占有一席之地。

(7) 光纤孤子通信技术(第 5 代光通信系统技术?)。孤子是基于色散与非线性的平衡,在无损耗光纤中传输时能始终保持其形状不变的一种光脉冲。利用孤子可实现高速信号的长距离传输。

(8) 量子光通信技术(第 6 代光通信系统技术?),它利用光的粒子性,让一个个光子分别传输“0”和“1”的数字信息。理论上,它可以传输无限量的信息,即使考虑到光子在传输过程中的衰减,量子通信技术的通信速度也会比现在的光通信速度快 1000 万倍,从而使通信技术再次发生根本性的变革。

发展新技术的宗旨,都是为了更好地满足日益增长的信息需求。其中,WDM 技术与光放大器技术的完美结合,极大地提高了光纤通信系统的性能与通信容量,成为现代光通信技术的闪亮明珠,通向全光通信网的桥梁。

## 1.2 信号及调制

本节介绍通信系统中常用的几个基本概念,包括数字信号的产生、数模转换与脉冲编码、信道的复用及数字通信系统的体制、信号的调制码型等。

### 1.2.1 脉冲编码调制

在任何通信系统中,需要发送的信息通常采用两种形式——模拟或数字。模拟信号随时间连续变化,如麦克风产生的语音信号为模拟信号。模拟信号通过其幅值、频率或相位的变化来携带信息,显然它们易受噪声及失真的影响,因此要求有更高的可靠性。而数字信号仅取几个分立的值,如计算机数据为数字信号。用二进制表示的数字信号仅取 2 个值。在最简单的情况下,二进制数字信号仅用脉冲的通(“on”)或断(“off”)来表示,即逻辑“1”或逻辑“0”。例如,可以用一个 3.3 V 的电脉冲表示逻辑“1”,而一个 0 V 的电脉冲表示逻辑“0”。数字信号的最大优点是,任何噪声或失真造成的信号幅度在一定范围内的改变并不会改变该信号的逻辑意义。如对于一个幅度在 2.0~3.3 V 之间的脉冲,均代表逻辑“1”;而一个幅度在 0~0.8 V 之间的脉冲,均代表逻辑“0”。因此,数字技术要比模拟技术可靠得多,这也是现代技术大多采用数字技术的主要原因。



既然我们是生活在以模拟信号为主的世界里,但为了享受数字方式带来的好处,就需要将模拟信号转换成数字信号,即模/数(A/D)转换,这是采用数字技术需要付出的第一个代价。在数字光通信系统中,传输的是二进制光脉冲“0”码与“1”码,它是由二进制数字信号对光源进行通断调制而产生的。而数字信号是对连续变化的模拟电信号进行抽样、量化和编码产生的,称为脉冲编码调制(PCM)。这种电的数字信号称为数字基带信号,由PCM电端机产生。图1.2.1示出了时间和幅度都是连续的模拟信号变换成时间和幅度都是离散的数字信号的过程。

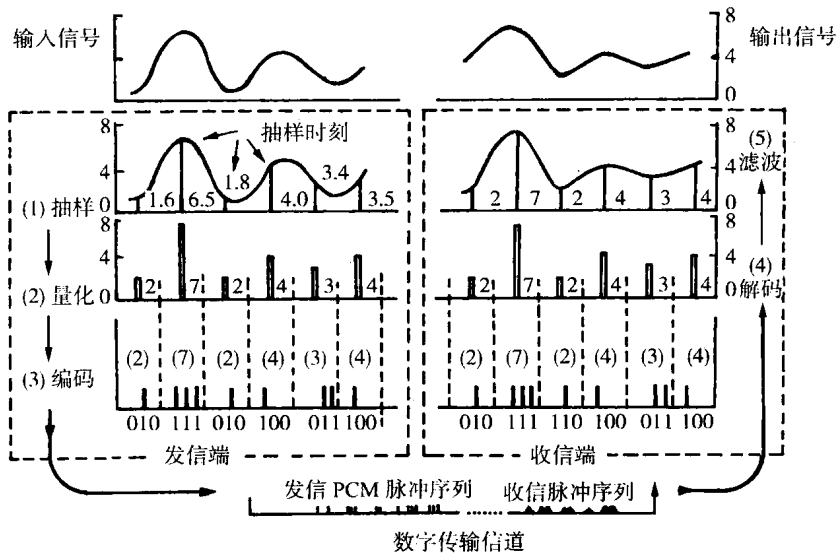


图 1.2.1 信号抽样编码及传输原理

(图中的编码:000=0,001=1,010=2,011=3,100=4,101=5,110=6,111=7)

把图1.2.1的(1)中的连续模拟信号按一定的抽样频率或时间间隔  $T$  分别抽出模拟信号的瞬时幅度值(简称样值),然后让这些抽样后幅度无限多的样值信号通过一个量化器,四舍五入,使其幅度变为有限的几种。在图1.2.1的(2)中仅限于0,1,2,...,7共8种,如原来的幅度1.8变为2,3.4变为3等等,这就是幅度离散的抽样信号。显然,量化会引起失真。但幅度种数分得愈多,量化失真就愈小。如用3位二进制码代表上面的8种幅度,每种码的排列表示一种幅度,这就是时间离散的数字信号编码,如图中的(3)所示。图中的(4)、(5)示出了该数字信号经信道传输后恢复出原模拟信号的相反过程。

实用中并不需要将连续模拟信号波形逐点全部进行传输,而只要像图1.2.1中那样每隔一定时间间隔传送一个表示信号幅度的抽样值就可以了。按抽样定理,对于一个带宽限制的信号,只要抽样频率  $f_s$  等于或大于所传送模拟信号带宽  $\Delta f$  的两倍,即  $f_s \geq 2\Delta f$ ,则该模拟信号用分立的抽样值来代替时,在接收端就可能察觉不到信号的不连续性,且在经过低通滤波器后,就可逼真地恢复出原来的模拟信号。设模拟信号的最大幅值为  $A_{max}$  (电流或电压),则抽样值可取  $0 \leq A \leq A_{max}$  范围内的任何值。将  $A_{max}$  分成  $M$  个分立的间隔(不一定等间隔),即  $M$  个抽样值,然后对抽样信号进行量化。由于在量化过程中幅度值取整,即量化后的信号与抽样信号间有个差值(称为量化误差),使接收端的信号与原信号间有一定的误差,这种误差表现为接收噪声,称为量化噪声。为使量化噪声最小,需要抽样值的数目  $M$