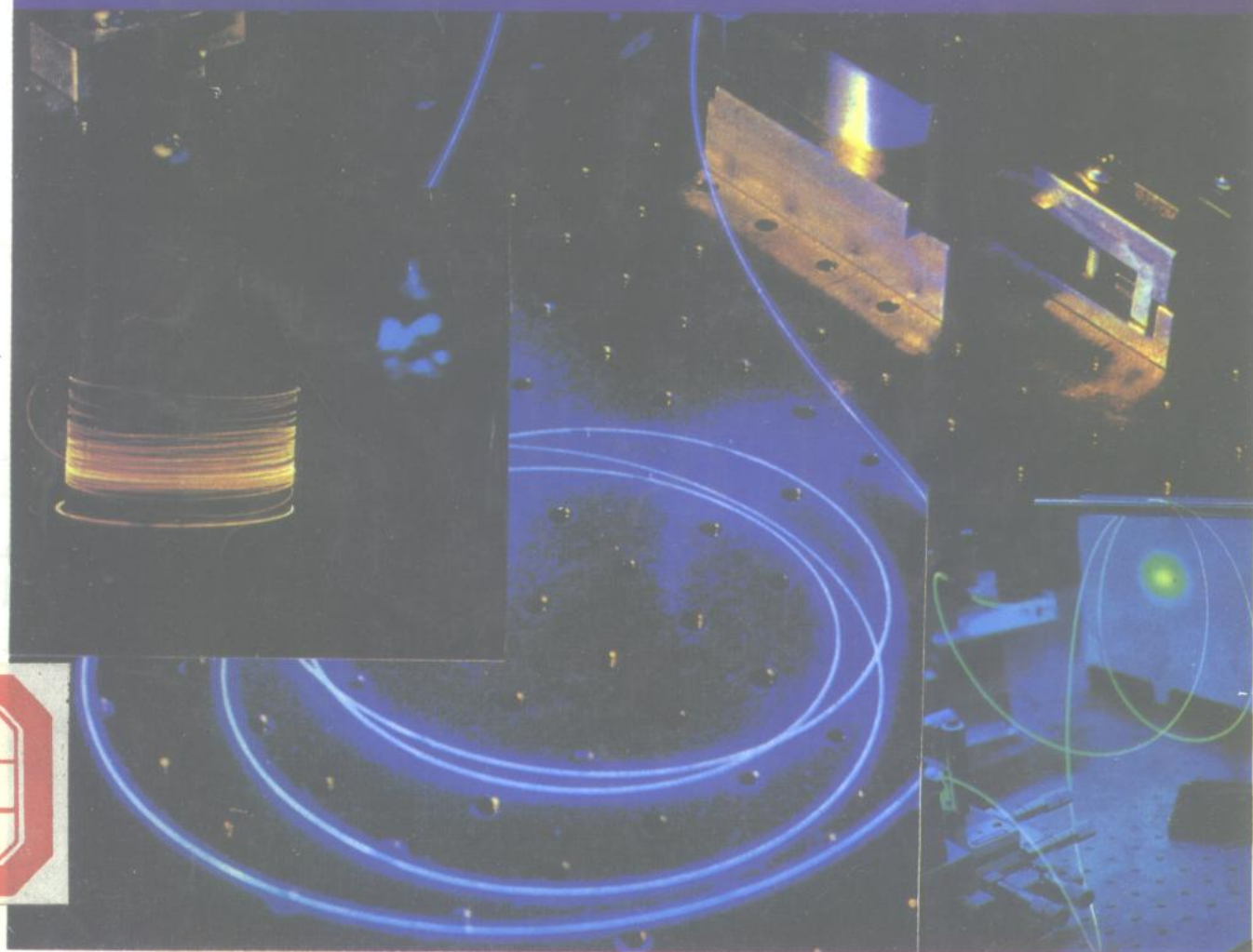


光纤通信丛书

光纤通信导论

邱 昆 编著 唐明光 审校

INTRODUCTION
TO OPTICAL FIBER COMMUNICATION



电子科技大学出版社

光纤通信导论

邱 昆 编著

唐明光 审校

[川]新登字 016 号

内 容 提 要

本书介绍光纤通信。全书共分十章,内容包括光纤通信的基本原理、光纤和光缆、光纤通信用光电器件、光发射机与光接收机、光纤通信系统设计和性能、光纤通信中的测量、多信道复用系统、光放大器、相干光通信、孤子通信系统等。

本书内容既包括光纤通信的基本知识和基础理论,又介绍了光纤通信领域的新成果和新进展,可供从事光纤通信研究和开发的科技人员参考,也可以分章节内容作为高等院校有关专业本科生和研究生的教材。

光纤通信导论

邱 昆 编著 唐明光 审校

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.75 字数 383.3 千字

版次 1995年1月第一版 印次 1995年1月第一次印刷

印数 1—3000册

ISBN 7-81043-100-5/TN·8

定价: 15.00 元

序

迄今为止,我国已经出版了十几本光纤通信方面的书籍,其中有专著,有教材,亦有实际光纤通信设备汇编。但是光纤通信技术发展如此之迅速,一些早期著作中的某些内容已经陈旧,需要加以更新,一些基础内容亦需扩展。

本书是作者 1993 年在美国罗彻斯特大学进行光纤放大器及应用的合作项目研究期间,在该校著名光纤通信专家 G·P·Agrawal 教授所授课程《光纤通信系统》内容的基础上,结合自己的研究心得撰写而成。本书无论在基础理论和技术上,还是在实践(设计、测试和应用)上都进行了全面、深入的探讨,对光纤通信领域最新进展也作了较好的论述。就我所知,该书是近年来出版的光纤通信书籍中最系统、全面、新颖的一本书。本书叙述具体、理论联系实际、文字深入浅出,既便于教学中灵活取材,又便于自学。可供大专院校、研究所、工厂从事光纤通信技术研究、设计、开发和应用的同志参考。

唐明光

一九九四年八月

于电子科技大学

光纤通信国家重点实验室

目 录

第一章 绪 论

§ 1.1 光纤通信发展简史	1
§ 1.2 光纤通信系统	3
§ 1.2.1 概述	3
§ 1.2.2 光纤通信系统的基本构成	4
§ 1.2.2.1 光纤	4
§ 1.2.2.2 光发射机	4
§ 1.2.2.3 光接收机	5
§ 1.3 几个基本概念	5
§ 1.3.1 模拟信号与数字信号	5
§ 1.3.2 信道复用	7
§ 1.3.3 调制方式	8
§ 1.3.4 信道容量	9

第二章 光纤和光缆

§ 2.1 光纤的几何光学分析	10
§ 2.1.1 阶跃折射率光纤	11
§ 2.1.2 梯度折射率光纤	12
§ 2.2 阶跃折射率光纤的波动光学分析	13
§ 2.2.1 麦克斯韦方程组	13
§ 2.2.2 光纤中的模式	15
§ 2.2.3 单模光纤	17
§ 2.2.3.1 单模条件	17
§ 2.2.3.2 模折射率	17
§ 2.2.3.3 模场分布	18
§ 2.2.3.4 双折射	18
§ 2.2.3.5 光斑尺寸	18
§ 2.3 单模光纤中的色散	19
§ 2.3.1 群速度色散	19
§ 2.3.2 材料色散	20
§ 2.3.3 波导色散	20
§ 2.4 色散导致的脉冲展宽	22
§ 2.4.1 基本传播方程	23

§ 2.4.2 高斯输入脉冲	24
§ 2.4.2.1 高斯脉冲的脉宽与谱宽	24
§ 2.4.2.2 高斯输入脉冲的展宽	24
§ 2.4.3 光纤色散对码率的限制	25
§ 2.4.4 光纤带宽	28
§ 2.5 光纤的损耗	29
§ 2.5.1 衰减系数	29
§ 2.5.2 材料吸收	30
§ 2.5.3 瑞利散射	30
§ 2.5.4 波导缺陷	31
§ 2.6 光纤中的非线性光学效应	31
§ 2.6.1 受激光散射	32
§ 2.6.2 非线性折射	33
§ 2.6.3 四波混频	34
§ 2.7 光纤的制造	34
§ 2.7.1 设计问题	34
§ 2.7.2 制造方法简介	34
§ 2.8 光缆	36
§ 2.9 光纤和光缆的连接	37
§ 2.9.1 光纤的连接	38
§ 2.9.2 光缆的连接	39

第三章 光源和光检测器

§ 3.1 光电器件的一般工作原理	40
§ 3.1.1 光发射与光吸收	40
§ 3.1.2 p-n 结	43
§ 3.1.3 半导体材料	46
§ 3.2 发光二极管(LED)	48
§ 3.2.1 LED 的结构	48
§ 3.2.2 LED 的工作特性	49
§ 3.2.2.1 $P-I$ 特性	50
§ 3.2.2.2 光谱特性	50
§ 3.2.2.3 调制特性	51
§ 3.3 半导体激光器(LD)	52
§ 3.3.1 LD 激光振荡	52
§ 3.3.1.1 光增益	52
§ 3.3.1.2 光反馈和激光器阈值	53
§ 3.3.2 半导体激光器的结构	54

§ 3.3.2.1 增益导引半导体激光器	55
§ 3.3.2.2 折射率导引半导体激光器	56
§ 3.3.3 LD 的工作特性	56
§ 3.3.3.1 $P-I$ 特性	57
§ 3.3.3.2 调制响应	59
§ 3.3.3.3 激光噪声	62
§ 3.3.3.4 激光模式	65
§ 3.3.4 单纵模半导体激光器	68
§ 3.3.4.1 DFB 和 DBR 半导体激光器	68
§ 3.3.4.2 耦合腔半导体激光器	70
§ 3.4 光电二极管	71
§ 3.4.1 结构原理	72
§ 3.4.1.1 PN 光电二极管	72
§ 3.4.1.2 PIN 光电二极管	73
§ 3.4.1.3 雪崩光电二极管(APD)	74
§ 3.4.2 工作特性和参数	75
§ 3.4.2.1 响应度和量子效率	76
§ 3.4.2.2 APD 的倍增系数及噪声	76
§ 3.4.2.3 响应带宽	78
§ 3.4.3 新型 APD 结构	79

第四章 光发射机与光接收机

§ 4.1 光发射机	82
§ 4.1.1 光源与光纤的耦合	82
§ 4.1.2 驱动电路	83
§ 4.1.3 自动功率控制(APC)电路	84
§ 4.1.4 自动温度控制(ATC)电路	85
§ 4.1.5 告警电路与保护电路	86
§ 4.1.6 码型变换	86
§ 4.1.7 光发射机可靠性评估	90
§ 4.2 光接收机的组成	91
§ 4.2.1 前端	91
§ 4.2.2 线性通道	92
§ 4.2.3 数据恢复	94
§ 4.2.4 集成光接收机	95
§ 4.3 光接收机的性能	95
§ 4.3.1 接收噪声与信噪比	96
§ 4.3.1.1 噪声机制	96

§ 4.3.1.2 PIN 接收机的信噪比	97
§ 4.3.1.3 APD 接收机的信噪比	98
§ 4.3.2 接收灵敏度	99
§ 4.3.2.1 误码率	99
§ 4.3.2.2 最小平均接收功率	102
§ 4.3.2.3 光探测的量子极限	103
§ 4.3.3 其它引起光接收机灵敏度下降的因素	103
§ 4.3.3.1 消光比	104
§ 4.3.3.2 强度噪声	104
§ 4.3.3.3 时间抖动	106
§ 4.3.4 光接收机性能评估	107

第五章 光纤通信系统设计和性能

§ 5.1 系统结构	111
§ 5.1.1 点对点的传输	111
§ 5.1.2 光纤分配网	112
§ 5.1.3 局域网(LAN)	113
§ 5.2 工作波长和系统限制	115
§ 5.2.1 损耗限制的系统	115
§ 5.2.2 色散限制的系统	115
§ 5.3 商用化光纤通信系统	116
§ 5.4 系统功率预算和带宽	120
§ 5.4.1 功率预算	120
§ 5.4.2 系统的带宽	121
§ 5.5 系统设计中要考虑的其它因素	123
§ 5.5.1 光纤模式噪声	123
§ 5.5.2 色散导致的脉冲展宽	123
§ 5.5.3 LD 的模分配噪声	125
§ 5.5.4 LD 的频率啁啾	128
§ 5.5.5 反射噪声	131
§ 5.6 光纤通信计算机辅助设计简介	133

第六章 光纤通信系统中的测量

§ 6.1 光源与光检测器的测量	135
§ 6.1.1 光源的测量	135
§ 6.1.1.1 $P-I$ 特性的测量	135
§ 6.1.1.2 发射波长与发射光谱的测量	135
§ 6.1.1.3 调制响应的测量	136

§ 6.1.2 光检测器参数的测量	136
§ 6.1.2.1 响应度和量子效率的测量	137
§ 6.1.2.2 暗电流的测量	137
§ 6.1.2.3 上升及下降时间测量	137
§ 6.1.2.4 APD 反向击穿电压测量	137
§ 6.1.2.5 APD 倍增因子的测量	138
§ 6.1.2.6 APD 附加噪声指数的测量	138
§ 6.2 光纤特性的测量	138
§ 6.2.1 光纤传输特性的测量	139
§ 6.2.1.1 损耗的测量	139
§ 6.2.1.2 色散的测量	141
§ 6.2.2 光纤基本参数的测量	143
§ 6.2.2.1 光纤折射率分布的测量	143
§ 6.2.2.2 数值孔径的测量	143
§ 6.2.2.3 单模光纤截止波长和模场直径的测量	146
§ 6.3 光端机的测量	147
§ 6.3.1 光发射机指标测量	147
§ 6.3.1.1 输出功率的测量	147
§ 6.3.1.2 消光比的测量	148
§ 6.3.2 光接收机指标测量	148
§ 6.4 光纤数字传输系统传输特性的测量	149

第七章 多信道复用系统

§ 7.1 信道复用的方式	151
§ 7.2 频分复用系统	152
§ 7.2.1 频分复用光纤通信系统的几种结构	152
§ 7.2.1.1 高容量点对点传输	152
§ 7.2.1.2 广播式分配网络	153
§ 7.2.1.3 多路多址局域网络	154
§ 7.2.2 频分复用系统基本器件	154
§ 7.2.2.1 波分复用/解复用器	155
§ 7.2.2.2 被动星型耦合器	157
§ 7.2.2.3 可调光滤波器	158
§ 7.2.2.4 可调谐半导体激光器	159
§ 7.2.3 系统性能	159
§ 7.2.3.1 线性串扰	159
§ 7.2.3.2 非线性串扰	160
§ 7.2.3.3 其它系统设计和性能问题	162

§ 7.3 副载波复用系统	164
§ 7.3.1 模拟 SCM 系统	165
§ 7.3.2 数字 SCM 系统及混合 SCM 系统	169
§ 7.3.3 波分复用 SCM 系统	172
§ 7.3.4 实用化 SCM—CATV 光纤传输系统	172
§ 7.3.4.1 AM—SCM—CATV 光纤传输系统	173
§ 7.3.4.2 FM—SCM—CATV 光纤传输系统	177

第八章 光放大器

§ 8.1 引言	180
§ 8.1.1 光纤通信中的光电中继器	180
§ 8.1.2 光放大器	181
§ 8.1.3 光放大器的基本性能	181
§ 8.1.3.1 增益和带宽	182
§ 8.1.3.2 增益饱和	182
§ 8.1.3.3 放大器噪声	183
§ 8.1.4 光放大器在光纤通信中的应用形式	184
§ 8.1.5 放大器级联	185
§ 8.2 半导体激光放大器	186
§ 8.2.1 放大器的结构	186
§ 8.2.2 放大器的性能	187
§ 8.2.3 多信道放大	190
§ 8.2.4 脉冲放大	191
§ 8.2.5 系统应用	194
§ 8.3 掺铒光纤放大器	195
§ 8.3.1 EDFA 中 E_2^+ 的能级结构和泵浦	195
§ 8.3.2 增益特性	196
§ 8.3.3 放大器的噪声系数	198
§ 8.3.4 EDFA 实验	199
§ 8.3.5 EDFA 设计	200
§ 8.3.6 多信道放大和脉冲放大	201
§ 8.3.7 系统应用	201

第九章 相干光通信

§ 9.1 相干光通信的基本原理	203
§ 9.1.1 直接检测与相干检测	203
§ 9.1.2 零差检测与外差检测	204
§ 9.1.3 相干光通信的优点	206

§ 9.2 调制方式	207
§ 9.2.1 ASK、FSK、PSK 和 DPSK	207
§ 9.2.2 调制的数学表达式	207
§ 9.2.3 调制的实现	208
§ 9.3 信噪比	210
§ 9.4 各种相干光通信方式比较	211
§ 9.5 影响系统性能的因素及改进措施	212
§ 9.5.1 相位噪声	212
§ 9.5.2 强度噪声	214
§ 9.5.3 偏振噪声	215
§ 9.5.4 光纤色散	216
§ 9.5.5 其它因素	216
§ 9.6 实验系统	216
§ 9.6.1 包络解调外差系统	216
§ 9.6.2 同步解调外差系统	217
§ 9.6.3 零差系统	217
§ 9.6.4 现场实验	217

第十章 孤子通信系统

§ 10.1 光纤中孤子的基本概念	219
§ 10.1.1 非线性薛定谔方程	219
§ 10.1.2 一阶孤子与高阶孤子	220
§ 10.1.3 暗孤子	222
§ 10.2 孤子传输损耗与孤子放大	224
§ 10.2.1 光纤损耗导致的孤子脉冲展宽	224
§ 10.2.2 孤子放大	224
§ 10.3 孤子通信系统设计	227
§ 10.3.1 孤子相互作用	227
§ 10.3.2 初始光脉冲的频率啁啾	229
§ 10.3.3 放大器的间距	231
§ 10.3.4 孤子时间抖动	232
§ 10.3.4.1 放大器自发辐射噪声引起的时间抖动	232
§ 10.3.4.2 自频率移动引起的时间抖动	233
§ 10.3.4.3 两种时间抖动的比较	235
§ 10.4 波分复用孤子通信系统	236
§ 10.5 实验进展	237

主要参考书目	240
--------------	-----

第一章 绪 论

通信泛指将信息从一处传到另一处,传输距离可以是几米直到跨洋传输。信息通常是被调制到一个载波上,光通信采用较高的载波频率($\sim 100\text{THz}$),载波位于电磁波谱的近红外区域,它们通常被称为光波系统以区别于微波系统(微波系统的载波频率要比光波系统低五个数量级,为 $\sim 1\text{GHz}$)。光纤通信系统是指那些使用了光纤来传送信息的光波系统。在八十年代,光纤通信系统在全球范围内得到了很大的发展,并引起了通信领域的一场变革。

§ 1.1 光纤通信发展简史

以光来传递信息可以追溯到古代,当时很多国家都使用了火烟信号来传递信息,类似的方法如信号灯、信号旗一直沿用到 18 世纪末。1792 年在 C. Chappe 的建议下,通过采用中继站的方法长距离地传送机械码信息,这个概念才得到扩展。19 世纪三十年代发明了电报,用电代替光,通过采用莫尔斯码等新的编码技术,比特率 B 可以增加至 $\sim 10\text{b/s}$,在中继站的支持下,可以达到很长的传输距离($\sim 1000\text{km}$)。1866 年世界上开通了第一条电报电缆,1876 年发明了电话,电话采用连续变化的电流来“模拟”地传递声音信息,此后,模拟电通信技术在通信系统中占统治地位长达一个世纪之久。

在 20 世纪里,全球范围电话网络的发展,导致了电通信系统里不断出现新的设计,用同轴电缆代替双绞线,使系统的容量大大增加。由于通信系统的带宽受限于其载波频率,导致了微波系统的产生,1948 年第一个微波系统投入使用,此后同轴电缆系统和微波系统都得到了较大的发展,到 1970 年,通信系统的容量 BL (速率、距离乘积)达到 $\sim 100(\text{Mb/s}) \cdot \text{km}$,然后电通信系统的容量就基本上被限制在这个水平上。

20 世纪后半期,人们意识到如果采用光波作为载波,通信容量可望有几数量级的提高,但直到五十年代末仍然找不到相干光源和合适的传输介质。1960 年发明了激光器,解决了第一个问题,1966 年光纤被提出可以作为光波系统的最佳传输介质,但当时光纤具有 1000dB/km 的巨大损耗,1970 年光纤损耗得到突破,被降低至 20dB/km ,与此同时,实现了室温连续工作的 GaAs 半导体激光器,由于小型光源和低损耗光纤的同时实现,导致了光纤通信系统的大力发展。图 1.1 给出了自 1974 年以来,五代光纤通信系统的发展情况,在过去二十年的时间里,系统的容量增加了几个数量级。

光纤通信系统的商业应用紧随研究与开发的步伐,工作在 $0.8\mu\text{m}$ 波段的第一代光波系统于 1978 年投入使用,这种系统的速率范围在 $50\sim 100\text{Mb/s}$,中继距离为 10km 。与同轴电缆相比,较大的中继距离对系统设计者来说是一个重大的鼓舞,可以减小对中继站的

安装和维护费用。

如果光波系统的工作波长在光纤损耗小于 1dB/km 的 $1.3\mu\text{m}$ 波段上,则中继距离可

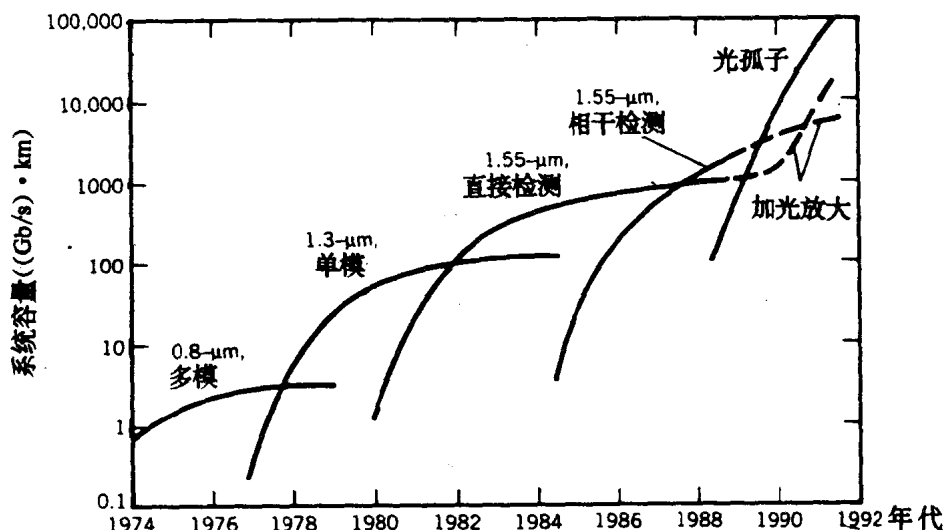


图 1.1 五代光纤通信的发展情况

以大大提高,而且在这个波段上,光纤具有最小的色散,于是人们的发展工作在 $1.3\mu\text{m}$ 附近的 InGaAsP 半导体激光器和探测器上下功夫,1977 年研制出这样的激光器。第二代光纤通信系统出现在八十年代早期,中继距离超过了 20km ,但由于受多模光纤中模式色散的影响,速率被限制在 100Mb/s 以下,1981 年在实验室验证了传输距离为 44km ,速率为 4Gb/s 的单模光纤系统,这些成果很快走向商用,1987 年实现了中继距离为 50km ,速率为 1.7Gb/s 的 $1.3\mu\text{m}$ 波长第二代商用化光纤传输系统。

第三代光纤传输系统的中继距离受限于光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 波长上的损耗(典型值为 0.4dB/km)。光纤的最小损耗位于 $1.55\mu\text{m}$ 波长附近,1979 年实现了在该波长位置上 0.2dB/km 损耗的光纤,但由于在 $1.55\mu\text{m}$ 波长上光纤具有较大的色散,使得第三代光纤通信迟迟实现不了。色散问题可以通过使用在 $1.55\mu\text{m}$ 波长附近具有最小色散的色散位移光纤或控制激光器光谱,使其单纵模工作而获得解决。八十年代里人们按照这两条途径不断地探索着,1985 年在实验室里实现了速率为 4Gb/s ,传输距离超过 100km 的结果,1990 年,工作在 $1.55\mu\text{m}$ 波长,速率为 2.4Gb/s 的第三代光纤通信系统实现商用化。

第四代光纤通信系统以频分复用增加速率和使用光放大器增加中继距离为标志,可以采用或不采用相干接收的方式,采用直接检测方式,已经实现了在 2.5Gb/s 速率上传输 4500km 和 10Gb/s 速率上传输 1500km 的结果,利用环型结构,已经证实在 2.4Gb/s 速率上传输 21000km 和 5Gb/s 速率上传输 14300km 的可能性。从 1990 年开始,光放大器正引起光纤通信领域里发生着一次变革。

目前,人们已经涉足第五代光纤通信系统的研究和开发,这种系统基于一个基本概念

——光孤子,即由于光纤非线性效应与光纤色散相互抵消,使光脉冲在无损耗的光纤中保持其形状不变地传输的现象。尽管这个概念早在1973年就被提出,但直到1988年才在实验室内得到证实。1989年,掺铒光纤放大器开始被用于光孤子放大,从此后许多系统实验都证实了光孤子通信的可能性。

尽管光纤通信从诞生到现在仅仅只二十多年时间,但其发展十分迅速并在一定程度上已经成熟起来。以前已经出版了许多光纤通信方面的书,但由于光纤通信的快速发展,大部分书目已经过时,本书在介绍光纤通信基本内容的基础上力图向读者展示光纤通信领域当今发展的各个方面。

§ 1.2 光纤通信系统

§ 1.2.1 概述

光纤通信系统与其它通信系统的区别从原理上讲只是载波频率的不同,光载波的频率在 $\sim 100\text{THz}$ 的数量级,而微波载频的范围在 $1\sim 10\text{GHz}$,由于光载波频率与微波频率之间的差别,光通信的信息容量可以比微波系统高出10000倍,调制带宽可以达到 $\sim 1\text{Tb/s}$ 的量级,正由于光通信系统具有如此巨大的带宽潜力,才使得人们不断地研究和开发光通信系统。

图1.2给出了光通信系统的示意图,它由发射机、通信信道和接收机三个部分组成,这三个部分也是所有通信系统的必要组成部分。光纤通信系统采用光纤作为通信信道。从

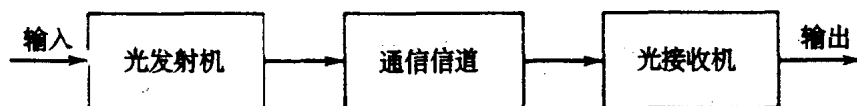


图 1.2 光通信的结构

原理上讲,在任何需要传递信息的两地之间都可以使用光纤通信,但促进光纤通信发展的主要原因是其在电讯领域的应用。光纤通信的电讯应用大致可以分为两类,即长途和短途通信,在长途通信系统中,干线上要求具有很高的容量,光纤通信系统正好满足这个要求,事实上,光纤通信的发展,也得益于长途通信应用的促进。在长途系统的中继站上,目前大多数仍然需要光信号的再生过程,但与同轴电缆系统相比,中继距离和码速成量级的提高使得光纤通信在长途应用方面具有特别的吸引力,并且正如第八章将要讨论的一样,采用光放大器后,可以实现无光电转换的长距离传输。

短途通信应用包括城域和局域网络系统,这类系统通常具有较低的速率,传输距离小于 10km 。在这种应用中,采用单信道光波系统的形式是不经济的,应该采用多信道和多种服务的结构,宽带综合业务数字网(B-ISDN)这个概念,就需要一种高比特率的光纤通信系统,它能提供电话、计算机数据、多频道电视等多种服务。

§ 1.2.2 光纤通信系统的基本构成

由图 1.2 可知,光纤通信系统由光发射机、光纤和光接收机三个部分组成。本小节对这三个部分进行简要的描述,目的是使读者得到一般的认识,详细的内容将在以后各章节中作具体介绍。

§ 1.2.2.1 光纤

在光纤通信系统中,利用光纤作为通信信道,它的作用是将光信号从发射机不失真地传送到接收机。光纤的两个重要参数是损耗和色散,它们都影响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,如果脉冲展宽严重,就会对邻近码产生影响,形成码间干扰。在多模光纤的情况下,色散尤其严重,因为光纤中不同模式具有不同的速率,所以脉冲展宽很快(典型值为 $\sim 10\text{ns/km}$),因此大多数光纤中,由于材料色散,仍然会有脉冲展宽存在(典型值 $< 0.1\text{ns/km}$),但对大多数应用来说,这个展宽可以被接受,并且通过控制光源的光谱,可以进一步减小这种展宽效应的影响。尽管这样,材料色散仍然是光纤通信系统中限制码速和传输距离的因素。

§ 1.2.2.2 光发射机

光发射机的作用就是将电信号转变成光信号,并将光信号耦合进入传输光纤中,图 1.3 是发射机的示意图,它主要由光源、调制器和信道耦合器组成,其中光源是光发射机的“心脏”,在光纤通信中,普遍采用半导体激光器或发光二极管作为光源。光信号通过对光载波的调制而获得,在大多数情况下采用直接对半导体光源的注入电流进行调制的方法,也可以使用外调制器。在直接调制下,输入信号直接被加到光源的驱动电路上,与使用外调制器相比,直接调制能使系统结构简化,成本降低。信道耦合器通常是一个微透镜,它最大可能地将光信号耦合进入光纤中。

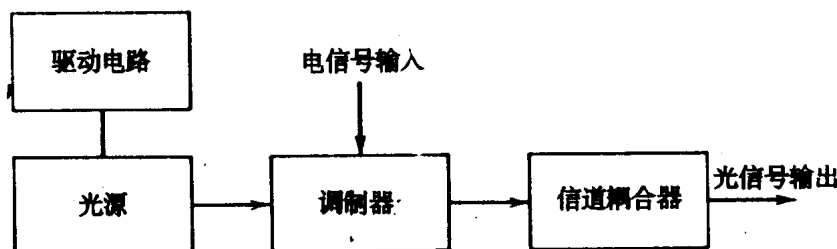


图 1.3 光发射机结构

光发射机的一个重要参数是发射光功率,它意味着在传输过程中可以容忍的传输损耗。发射光功率通常以 1mW 为基准而用 dBm 来表示,定义为

$$\text{功率}(\text{dBm}) = 10\log_{10}\left(\frac{\text{功率}(\text{mW})}{1\text{mW}}\right) \quad (1.2-1)$$

发光二极管的发射功率较低(一般 $< 10\text{dBm}$),而半导体激光器的发射功率可以达到 $0\sim 10\text{dBm}$,并且由于发光二极管的调制能力有限,所以大多数高性能的光纤通信系统都

采用半导体激光器作为光源。光发射机的速率一般是受限于电子电路而不是半导体激光器本身,如果设计得好的话,光发射机的速率可以达到 $10\sim 15\text{Gb/s}$ 。

§ 1.2.2.3 光接收机

光接收机在光纤的末端将接收到的光信号恢复成原来的电信号,图 1.4 给出了光接收机的示意图。它主要由耦合器、光电二极管和解调电路构成。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,它能将光纤传来的已调光信号转变成相应的电信号,经放大后送入解调电路进行处理。解调器的设计依赖于系统的调制方式,它的作用就是将光电二极管送来的信号进行判决,恢复出原来的电信号信息。

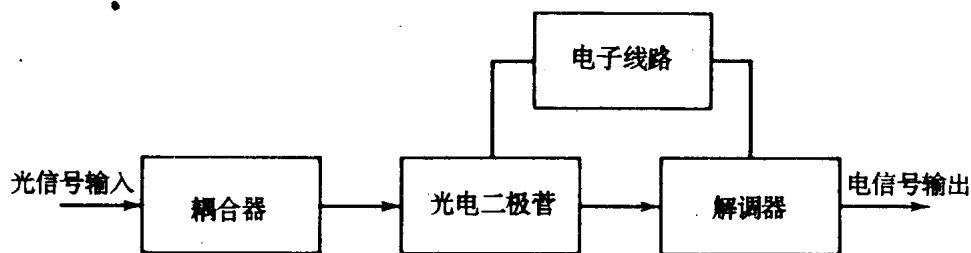


图 1.4 光接收机结构

数字光纤传输系统的性能由误码率来表征,它定义为在接收机上出现误码的几率,这样 10^{-6} 的误码率就相当于 10^6 个码中平均说来会有一个误码。许多系统都将 $\leq 10^{-9}$ 的误码率作为对系统的要求,有些系统要求误码率小至 10^{-14} 。

接收灵敏度是光接收机的一个重要参数,定义为在一定误码率下的最小平均接收光功率,它与系统的信噪比有关,而信噪比又与使接收信号劣化的各种噪声源的大小有关,噪声包括由接收机内部产生的噪声(如热噪声和放大器噪声)、光发射机的噪声(如相对强度噪声)以及光信号在光纤内传输过程中引入的噪声等等。接收灵敏度由在判决电路上引起信噪比降低的所有可能的噪声的累加效应决定,它一般与码速有关,因为某些噪声(如点噪声)是与信号的带宽有关的。

§ 1.3 几个基本概念

本节介绍通信系统中普遍使用的几个基本概念,从描述模拟和数字信号开始,给出将模拟信号转换成数字信号的方法,然后讨论输入信号的时分复用和频分复用,最后描述各种调制方式和信道容量。

§ 1.3.1 模拟信号与数字信号

在通信系统中,要传送的信号为模拟或者数字形式的电信号。对模拟信号来说,其信号电流随时间作连续的变化,最熟知的例子就是通过麦克风和摄像机将声音和图像信息转变成连续变化的电信号的音频和视频信号,相反,数字信号只取一些分离值,在二进制

情况下,只存在两种可能的值,在电流开启或关闭下分别对应两种状态,称为“1”码或“0”码,每一个码有一定的持续时间 T_B ,叫做比特时间。描述数字信号的另一个量叫比特率 B ,它被定义为每秒钟的比特数,即 $B=1/T_B$ 。最熟知的数字信号就是计算机的数据信号。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付里叶变换下所包含的频率范围。

模拟信号可以以一定的时间间隔进行取样后转变成数字信号,图 1.5 表示出了这种变换方法。取样速率由模拟信号的带宽 Δf 决定,根据取样原理,带宽受限的信号可以完全由一系列分离取样值来表示而不丢失任何信息。只要取样频率 f_s 满足耐奎斯特准则: $f_s \geq 2\Delta f$ 。

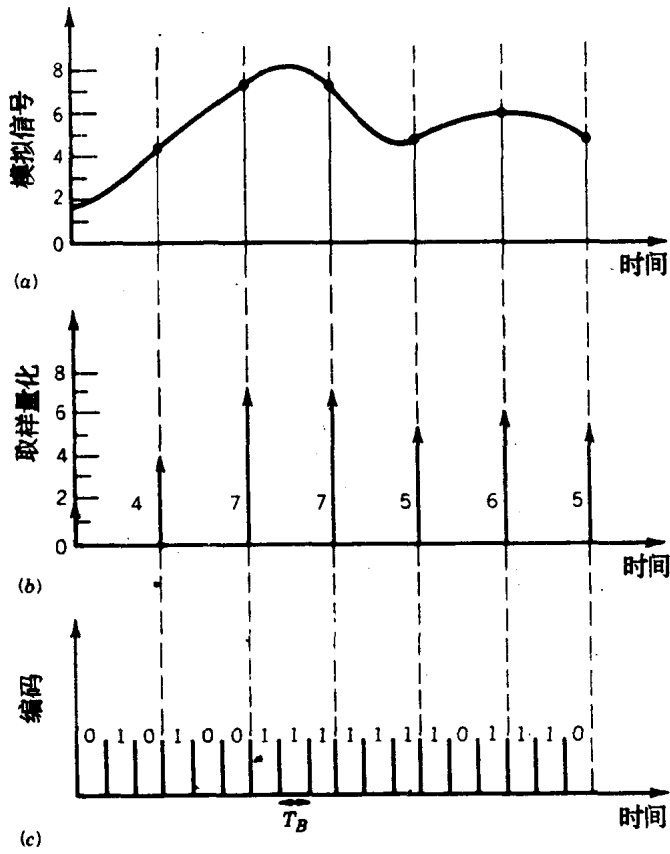


图 1.5 模拟信号转变成数字信号

2 Δf 。取样后,需要对取样值进行量化,从原理上讲,量化的结果可以是 $0 \leq A \leq A_{max}$ 范围内的任何值,这里 A_{max} 是给定模拟信号的最大幅值。如果 A_{max} 被划分成 M 个分离值(并不一定要求等分),则每个取样值就会被量化到某一个分离值上,当然这种量化过程会增加噪声,叫做量化噪声,它会叠加在模拟信号的其它噪声上。

量化噪声可以通过选择划分数目,使其满足 $M > A_{max}/A_N$ 来降低到最小值,这里 A_N 是模拟信号的均方根噪声幅度,比值 A_{max}/A_N 叫做动态范围,它与信噪比 SNR 具有下述关系