

COMMUNICATION
&
CONTROL

通信与控制系列教程

张兴周 孟克 编

现代光纤通信技术

哈尔滨工程大学出版社

现代光纤通信技术

张兴周 孟 克 编

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代光纤通信技术/张兴周,孟克编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2003.3
ISBN 7-81073-420-2

I. 现… II. ①张…②孟… III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009583 号

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
哈尔滨工程大学印刷厂印刷

*

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 16 字数 399 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—1 000 册

定价:20.00 元

前 言

以光代电并不仅仅是传输手段和形式上的变化,而是通信史上的一场深刻革命。它不仅为通信系统提供了几乎无限的带宽,而且引发了一系列观念上的重大转变。迄今为止,尽管光纤通信已经为世界带来了巨大变化,但其深刻而长远的影响恐怕还在后面。经过多年大量实际应用,人们发现传统的光纤通信暴露出了一些固有的弱点,如复用结构缺乏灵活性,光路上无法互通,难以组织有效统一的监控网和支持现代网络管理,不便于引进宽带新业务,光纤带宽资源利用率很低等。显然,要想完满地在原有技术体制和技术框架内解决这些问题是事倍功半,得不偿失的。惟一的出路是从体制上、器件技术和系统技术上进行全面革新。经过广大科技工作者的艰苦奋斗和开拓创新,涌现出了一批极具生命力的光纤通信新技术,如光波分复用(WDM)、光放大器、光孤子通信、相干光通信、光同步传输网(SDH/SONET 网)、光纤干涉测量等。本书正是本着与时俱进,为了满足科技发展的需要而编写的教材。

全书共分 8 章。第 1 章主要介绍光纤通信的基本概念和发展,提供背景知识。第 2 章为基础部分,介绍光纤通信的基础知识,循序渐进、由浅入深地介绍了光纤的传输理论、光纤通信系统的结构单元,包括光纤、光信号传输特性、光互连无源器件等知识。既可以作为初学者入门知识,也可以作为后面各章内容的预备知识。第 3 章~第 8 章分别介绍了光波分复用(WDM)技术、光放大器、光孤子通信、相干光通信、光同步传输网(SDH/SONET 网)、光纤干涉测量等现代光纤通信技术的原理、系统特性、关键技术以及实验系统等。

本书中,第 1 章~第 7 章由张兴周编写,第 8 章由孟克编写,全书由张兴周统稿。由于编者水平有限,书中难免还存在一些不足之处,希望批评指正。

编 者

2003 年 3 月

目 录

1 概论	1
1.1 光纤通信发展概述	1
1.2 光纤通信的优点和应用	3
1.2.1 光纤通信的优点	3
1.2.2 光纤通信的应用	6
1.3 光纤通信系统的组成	7
1.3.1 系统组成与传输原理	7
1.3.2 基本光路系统	8
1.4 现代光纤通信技术特征	10
2 光纤通信基础	12
2.1 光纤传光原理	12
2.1.1 多模光纤几何光学分析	12
2.1.2 单模光纤光波导理论分析	15
2.1.3 单模光纤的色散特性	21
2.1.4 光纤的损耗特性分析	26
2.1.5 光纤的非线性特性分析	28
2.2 光纤传输特性分析	32
2.2.1 色散对传输特性的影响	32
2.2.2 色散对通信容量的影响	37
2.2.3 非线性对光信号传输特性的影响	40
2.2.4 非线性光纤系统的自相位调制和频率啁啾问题	43
2.3 光纤通信无源器件	46
2.3.1 光纤接头	46
2.3.2 光纤耦合器	50
2.3.3 波分复用/解复用器	56
2.3.4 光调制器与光开关	61
3 WDM——光波分复用技术	64
3.1 光波分复用技术的一般问题	65
3.1.1 光波分复用原理	65
3.1.2 WDM 系统的基本组成	68
3.1.3 WDM 的主要特点	69
3.1.4 光波分复用器和解复用器	70
3.1.5 光交换技术	79
3.2 WDM 光纤通信系统	82
3.2.1 点到点通信	82

3.2.2	WDM 广播选择网	83
3.2.3	WDM 多路接入 LAN	84
3.3	WDM 光纤通信系统的解复用与串音	86
3.3.1	WDM 解复用器参数和解复能力	86
3.3.2	WDM 系统中的串音	87
3.4	WDM 系统的非线性影响	89
3.4.1	SRS 对 WDM 系统的影响	89
3.4.2	SBS 对 WDM 系统的影响	89
3.4.3	XPM 对 WDM 系统的影响	90
3.4.4	FWM 对 WDM 系统的影响	91
3.5	SCM——副载波技术	91
3.5.1	SCM 光纤通信系统	92
3.5.2	WDM 在 SCM 光纤系统中的应用	95
4	光放大器	97
4.1	光放大器的一般问题	97
4.1.1	光放大器的机理	97
4.1.2	放大器增益频谱与带宽	98
4.1.3	放大器的增益饱和	98
4.1.4	光放大器噪声特性	99
4.1.5	光放大器的应用	101
4.2	SLA——半导体激光放大器	102
4.2.1	SLA 的工作原理	102
4.2.2	SLA 的放大特性	103
4.3	FRA——光纤喇曼放大器	105
4.3.1	光纤喇曼放大器的工作机理	105
4.3.2	光纤喇曼放大器的特性分析	106
4.3.3	光纤喇曼放大器的应用	107
4.4	FBA——光纤布里渊放大器	108
4.4.1	光纤布里渊放大器的工作机理	108
4.4.2	光纤布里渊放大器的特性分析	109
4.4.3	光纤布里渊放大器的应用	110
4.5	EDFA——掺铒光纤放大器	111
4.5.1	EDFA 的工作机理	111
4.5.2	掺铒光纤放大器的小信号分析	112
4.5.3	掺铒光纤放大器的放大特性分析	115
4.5.4	掺铒光纤放大器的应用	117
5	光孤子通信	119
5.1	光孤子特性分析	119
5.1.1	光孤子基本方程	119
5.1.2	方程的解	120

5.2 光纤损耗与能量补偿	122
5.2.1 损耗对光孤子的影响	122
5.2.2 光纤损耗的补偿	123
5.2.3 光孤子损耗补偿实验	124
5.3 系统设计考虑	125
5.3.1 光孤子交互作用问题	125
5.3.2 线性调频(啁啾)问题	127
5.3.3 光孤子系统的放大器间距问题	128
5.3.4 ASE 对系统性能的影响	130
5.3.5 光孤子高阶效应	130
5.4 光孤子通信系统	132
5.4.1 系统的构成及工作原理	132
5.4.2 光孤子源	132
5.4.3 光孤子的测量方法及原理	134
5.4.4 编码与调制	135
5.4.5 光孤子通信实验进展	135
6 相干通信	138
6.1 相干通信原理	138
6.1.1 零差检测原理	139
6.1.2 外差检测原理	139
6.1.3 信噪比分析	140
6.2 数字调制方式	141
6.2.1 ASK 调制方式	141
6.2.2 PSK 调制方式	142
6.2.3 FSK 调制方式	143
6.3 相干通信解调方式	143
6.3.1 相干通信外差解调方式	144
6.3.2 相干通信零差解调方式	145
6.4 系统性能分析	148
6.4.1 同步接收机性能分析	148
6.4.2 异步接收机性能分析	150
6.5 影响灵敏度提高的机理与对策	151
6.5.1 相位噪声的影响与对策	151
6.5.2 强度噪声的影响与对策	152
6.5.3 偏振失配的影响与对策	153
6.5.4 光纤色散的影响	154
6.6 相干通信实验系统概述	155
6.6.1 异步外差实验系统	155
6.6.2 同步外差实验系统	155
6.6.3 零差检测实验系统	156

7 SDH——光同步传输网	157
7.1 SDH产生的背景	157
7.2 PDH传输体制概述	158
7.2.1 PDH的帧结构	158
7.2.2 PDH的信号速率系列	158
7.2.3 PDH的复用技术	160
7.2.4 PDH的码速调整	161
7.2.5 PDH的缺点	162
7.3 SDH光传输网概述	162
7.3.1 SDH基本概念	162
7.3.2 SDH网络节点接口	163
7.3.3 SDH的标准速率	164
7.3.4 ITU-T有关SDH的国际标准	164
7.3.5 SDH的优点	164
7.4 SDH的帧结构	166
7.4.1 SDH的STM-N帧结构及开销	166
7.4.2 SDH复用方法	167
7.4.3 PDH信号到STM-1的映射方法	168
7.5 SDH的复用设备	170
7.5.1 终端设备(TM)	170
7.5.2 分插复用设备(ADM)	173
7.5.3 数字交叉连接设备(DXC)	174
7.6 SDH网的同步和生存性	177
7.6.1 SDH网的同步	177
7.6.2 SDH的生存性	179
8 光纤干涉测量	183
8.1 光纤干涉测量原理	183
8.1.1 光纤传感器	183
8.1.2 干涉型光纤传感器	183
8.2 光纤干涉测量的理论基础	184
8.2.1 光的经典本质是光频电磁波	185
8.2.2 光的量子本质是光子流	186
8.2.3 光的干涉	188
8.2.4 相干光	191
8.2.5 光的非单色性对干涉条纹的影响	193
8.2.6 光源的大小对干涉条纹的影响	194
8.2.7 光程	196
8.2.8 薄膜干涉(一)——等厚条纹	196
8.2.9 薄膜干涉(二)——等倾干涉	198
8.2.10 光学信息处理	200

8.2.11 光的衍射和傅里叶光学·····	204
8.3 干涉型光纤传感器原理 ·····	208
8.4 相位调制传感技术 ·····	209
8.4.1 一般调制原理及方式 ·····	209
8.4.2 光纤相位调制机理 ·····	211
8.5 相位解调技术 ·····	217
8.5.1 主动零差检测(Active Homodyne) ·····	217
8.5.2 外差检测(Heterodyne) ·····	219
8.6 相位压缩原理及微分干涉仪 ·····	220
8.6.1 相位压缩原理 ·····	220
8.6.2 微分干涉仪 ·····	222
8.7 光纤干涉测量的应用 ·····	223
8.7.1 微差温度检测 ·····	223
8.7.2 光纤加速度计 ·····	224
8.7.3 光纤电流计 ·····	226
8.7.4 光纤陀螺仪 ·····	227
8.7.5 光纤水听器 ·····	229
8.7.6 光纤干涉仪用作声探测器 ·····	236
8.7.7 光纤振动传感器 ·····	240
参考文献·····	244

1 概 论

1.1 光纤通信发展概述

光通信技术是当代通信技术发展的最新成就,已成为现代通信的基石。从广义上说,凡使用光作为通信手段的都可称为光通信。光通信的历史可追溯到远古时代,那时许多文明社会已经用烟火信号传递单个的信息。至 18 世纪末,通过信号灯、旗帜和其他信号装置进行通信的类似方法逐渐被新的方法代替。19 世纪 30 年代电报的出现使电取代了光,开始了电信时代。利用新的代码技术(如莫尔斯代码),速率很慢,仅为 $3 \sim 10\text{b/s}$,采用中继站后允许进行长距离(约 1000km)通信。1866 年,第一条越洋电报电缆系统投入运营。电报也基本上使用数字法。1876 年电话的发明引起了本质的变化,信号通过连续变化电流的模拟形式传送。这种模拟电通信技术支配了通信系统达一个世纪左右。

20 世纪全球电话网的发展导致了电通信系统的许多改进,如使用同轴电缆代替双绞线大大提高了系统容量。第一代同轴电缆系统在 1940 年投入使用,是一个 3MHz 的系统,能够传输 300 路音频信号或 1 路视频信号。这种系统的带宽受到电缆损耗的影响,频率超过 10MHz 时,损耗迅速增加。这种限制导致了微波通信系统的发展。在最早的微波系统中,利用 $1 \sim 10\text{GHz}$ 的电磁载波及合适的调制技术传递信号。最早的微波系统工作于 4GHz ,1948 年投入运营。从此以后,同轴和微波系统都得到了很大发展,并都能工作于约 100Mb/s 。最先进的同轴系统于 1975 年投入运营,其速率达 274Mb/s ,但中继距离短(约 1km),系统成本高。微波通信系统速率亦受到载波频率的限制。通信系统的容量通常用比特率和距离乘积 BL 表示(B 为比特率, L 为中继间距)。图 1.1.1 给出了最近一个半世纪来 BL 积随技术进步发生的变化。可见至 20 世纪 70 年代电通信获得的最大 BL 积不超过 $100(\text{Mb/s}) \cdot \text{km}$ 。

到 20 世纪后半叶,研究的结果发现,如果用光波作载波,则 BL 积可能增加几个数量级,然而 50 年代还没有相干光源和合适的传输媒质。1960 年激光器的发明解决了第一个问题,随后人们的注意力集中到寻找用激光进行通信的途径。1966 年英籍华人高锟博士预言光纤可能是最佳选择,因为它能像电缆传导电子那样导光。但当时主要的问题是光纤的高损耗,20 世纪 60 年代可能得到的光纤损耗超过了 1000dB/km 。1970 年出现了突破,在 $1\mu\text{m}$ 附近波长区光纤损耗降低到约 20dB/km 。几乎在同时,室温下运行的 GaAs 半导体激光器研究成功。小型光源和低损耗光纤的同时问世,在全世界范围内掀起了发展光纤通信的高潮。在不到 20 年的时间内, BL 积增加了几个数量级,在技术上经历了各具特点五个发展阶段。图 1.1.2 展示了自 20 世纪 70 年代光波通信系统性能的变化,曲线显示了五代光纤通信系统 BL 积的增长。

后来,经过许多科学实验,1978 年工作于 $0.85\mu\text{m}$ 的第一代光纤通信系统正式投入商用,其比特率在 $20 \sim 100\text{Mb/s}$ 之间,最大中继间距约 10km ,最大通信容量(BL)约 $500(\text{Mb/s}) \cdot \text{km}$ 。与同轴系统相比,中继间距长,投资和维护费用也低。

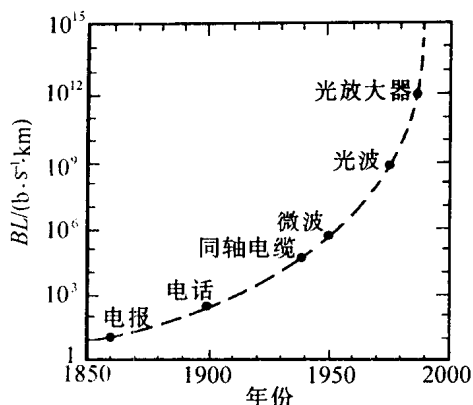


图 1.1.1 传输容量的变化

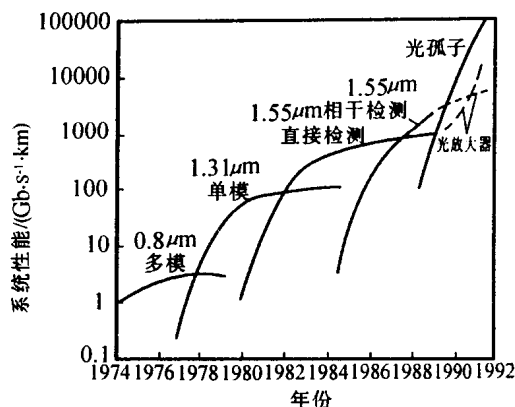


图 1.1.2 光纤通信系统性能的进展

20 世纪 70 年代初的研究表明,使光纤通信系统工作于 $1.31\mu m$ 时,光纤损耗能够小于 $1dB/km$,且具有最低的色散,可大大增加中继距离。这推动了世界范围内对 $1.31\mu m$ 的 InGaAs 半导体激光器和检测器的研究,并于 1977 年研制成功了这种激光器。接着在 20 世纪 80 年代初,早期采用多模光纤的第二代光纤通信系统问世,其中继距离超过了 20km,但由于多模光纤的模间色散影响,系统的比特率限制在 $100Mb/s$ 以下。采用单模光纤能克服这种限制。1981 年实现了比特率为 $2Gb/s$,传输距离为 44km 的单模光纤通信系统实验,并很快引入商业系统。至 1987 年 $1.31\mu m$ 单模第二代光纤通信系统开始商用化,其比特率高达 $1.7Gb/s$,中继距离约 50km。

理论研究进一步表明,石英光纤最低损耗在 $1.55\mu m$ 附近,实验技术上于 1979 年就达到了 $0.2dB/km$ 的低损耗($1.31\mu m$ 附近光纤损耗典型值为 $0.35dB/km$)。然而由于 $1.55\mu m$ 处具有高的光纤色散,且当时多纵模同时振荡的常规 InGaAsP 半导体激光器的谱展宽问题尚未解决。这两个因素,推迟了第三代光纤通信系统的问世。后来的研究发现,色散问题可以通过使用设计在 $1.55\mu m$ 附近,具有最小色散的色散位移光纤(DSF)与采用单纵模激光器来克服。在 20 世纪 80 年代这两种技术都得到了发展。1985 年的传输实验显示,其比特率达到 $4Gb/s$,中继距离超过 100km。至 1990 年,工作于 $2.4Gb/s$, $1.55\mu m$ 的第三代光纤通信系统已经能够提供通信商业业务。这样的第三代光纤通信系统,通过精心设计激光器和光接收机,其比特率能超过 $10Gb/s$ 。

以采用光放大器(OA)增加中继距离和采用波分复用(WDM)增加比特率为特征的系统为第四代光纤通信系统。这种系统有时采用零差或外差检测方案,称为相干光纤通信系统,20 世纪 80 年代在全世界得到了发展。在此期间,实验中利用星形耦合器实现了 100 路 $622Mb/s$ 数据复用,传输距离 50km,其信道间串音可以忽略。在另一次实验中,单信道速率 $2.5Gb/s$,不用再生器,光纤损耗用光纤放大器(EDFA)补偿,放大器间距为 80km,传输距离达 2223km。光纤通信系统采用相干检测技术并不是使用 EDFA 的先决条件。有的实验室曾使用常规非相干技术,实现了 $2.5Gb/s$,455km 和 $10Gb/s$,1500km 的数据传输。另一实验曾使用循环回路实现了 $2.4Gb/s$,21 000km 和 $5Gb/s$,14 000km 的数据传输。20 世纪 90 年代初期光纤放大器的问世引起了光纤通信领域的重大变革。目前,WDM/EDFA 技术已经商用化,并得到了广泛应用。

经历了近二十年的历程,第五代光纤通信系统的研究与发展也已取得突破性进展。它基

于光纤非线性压缩抵消光纤色散展宽的新概念来产生光孤子,实现光脉冲信号保形传输。虽然这种基本思想 1973 年就已提出,但直到 1988 年才由贝尔(Bell)实验室采用受激喇曼散射增益补偿光纤损耗,将数据传输了 4000km,次年又将传输距离延长到 6000km。EDFA 用于光孤子放大开始于 1989 年,在工程实际中有更大的优点。自那以后,国际上一些著名实验室纷纷开始验证光孤子通信作为高速长距离通信的巨大潜力。1990 ~ 1992 年在美国与英国的实验室,采用循环回路曾将 2.5Gb/s 与 5Gb/s 的数据传输 10 000km 以上。日本的实验室则将 10Gb/s 的数据传输 10^6 km。1995 年,法国的实验室则将 20Gb/s 的数据传输 10^6 km,中继距离达 140km。1995 年线形实验也将 20Gb/s 的数据传输 8100km,40Gb/s 传输 5000km。线形光孤子系统的现场实验也在日本东京周围的城域网中进行,分别将 10Gb/s 与 20Gb/s 的数据传输了 2500km 与 1000km。1994 年和 1995 年 80Gb/s 和 160Gb/s 的高速数据也分别传输 500km 和 200km。

自 20 世纪 60 年代末至今,在仅仅三十多年的时间里,光纤通信技术得到巨大发展,现在世界通信业务的 80% 以上都需经光纤传输。随着光纤通信技术的发展,光纤系统在通信网中的应用也得到了相应的发展。现在世界上许多国家都将光纤系统引入了公用电信网、中继网和接入网中。在目前的通信网中,光纤通信技术应用尚属于一种经典应用,在通信网的发展中属于第二代通信网(第一代纯为纯电信网)。进入 20 世纪 90 年代后,随着光纤与光波电子技术的发展,光子开关、光逻辑门、光互连、变频、路由器等许多新型光纤与半导体功能光器件相继问世,在全世界范围内掀起了发展第三代通信网——全光通信网的潮流。在这种通信网中,不仅用光纤系统传输信号,且交换、复用、控制与路由选择等亦全部在光域完成,并由此构建真正的光纤通信网。光纤通信对通信技术的影响之大,是始所未料的。目前大量新的理论与技术研究和发展工作正在继续进行,相信以光纤通信为代表的光子载体的通信模式在 21 世纪必将以强大的生命力给世界带来深刻而长远的影响。

1.2 光纤通信的优点和应用

1.2.1 光纤通信的优点

通信系统追求的最终技术目标是要可靠地实现最大可能的信息传输容量和传输距离。通信系统的传输容量取决于对载波调制的频带宽度,载波频率越高,频带宽度越宽。通信技术发展的历史实际上是一个不断提高载波频率和增加传输容量的历史。电缆通信和微波通信的载波是电波,光纤通信的载波是光波。虽然光波和电波都是电磁波,但是频率差别很大。光纤通信用的近红外光(波长约 $1\mu\text{m}$) 的频率(约 300THz) 比微波(波长 $0.1\text{m} \sim 1\text{nm}$) 的频率($3 \sim 300\text{GHz}$) 高三个数量级以上。图 1.2.1 给出了相关部分的电磁波频谱。光纤通信用的近红外光(波长 $0.7 \sim 1.7\mu\text{m}$) 的频带宽度约为 200THz,在常用的 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 两个波长窗口的频带宽度也在 20THz 以上。由于光源和光纤特性的限制,目前,光强度调制的带宽一般只有 20GHz,因此还有三个数量级以上的带宽潜力可以挖掘。

微波通信的传输介质是由金属导体制成的同轴电缆和波导。同轴电缆的损耗随信号频率的平方根而增大,要减小损耗,必须增大结构尺寸,但要保持单模传输,又不允许增大结构尺寸。波导具有比同轴电缆更低的损耗,但随着工作频率的提高,要减小波导结构的尺寸以

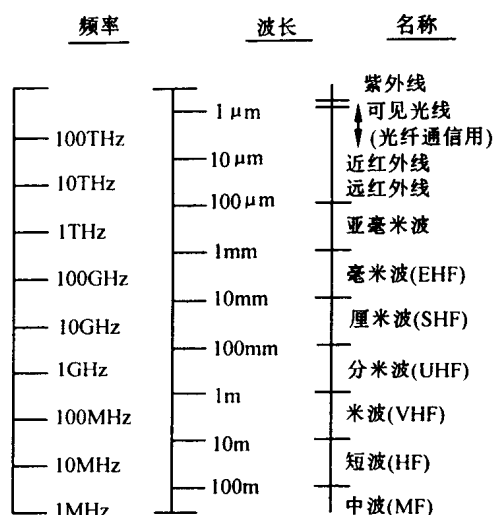


图 1.2.1 部分电磁波频谱

保持单模传输,损耗仍然要增大。光纤是由绝缘的石英(SiO_2)材料制成的,通过提高材料纯度和改进制造工艺,可以在宽波长范围内获得很小的损耗。图 1.2.2 给出各种传输线路的损耗特性。

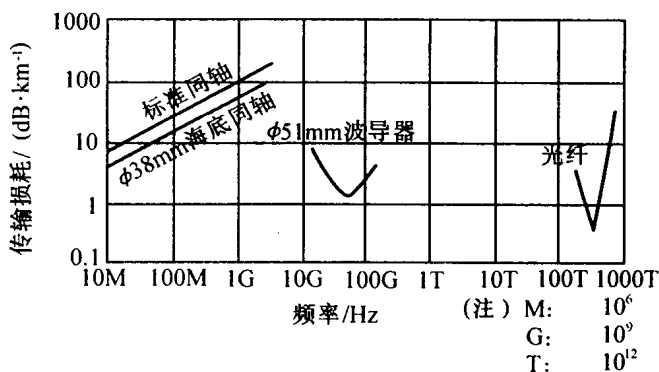


图 1.2.2 不同传输介质的损耗

光纤通信的优点归纳如下：

(1) 巨大的带宽资源和传输容量

表 1.2.1 不同通信方式传输能力的比较

通信手段	传输容量(话路)/条	中继距离/km	1000km 内中继器个数
微波无线电	960	50	20
小同轴	960	4	250

中同轴	1800	6	166
光缆	1920	30	33
光缆	14 000(1Gb/s)	84	11
光缆	6000(445Mb/s)	134	7

光纤通信系统的允许频带(带宽)取决于光源的调制特性、调制方式和光纤的色散特性。石英单模光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 波长上具有零色散特性。通过光纤的设计,还可以把零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$ 。在零色散波长窗口,单模光纤都具有几十吉赫千米的带宽。一方面,可以采用多种复用技术来增加传输容量。最简单的是空分复用。因为光纤很细,直径只有 $125\mu\text{m}$,一根光缆可以容纳几百根光纤, $12 \times 12 = 144$ 根光纤的带状光缆早已实现。这种方法使线路传输容量数十成百倍地增加。就单根光纤而言,采用波分复用(WDM)或光频分复用(OFDM)是增加光纤通信系统传输容量最有效的方法。另一方面,减小光源谱线宽度和采用外调制方式,也是增加传输容量的有效方法。

表 1.2.1 列出了单波长光纤通信系统的传输容量和中继距离,并与同轴电缆通信及微波无线电通信进行了比较。目前,光纤通信系统的传输速率一般为 2.5Gb/s 和 10Gb/s 。采用外调制技术,传输速率可以达到 40Gb/s 。波分复用(WDM)和时分复用(TDM)更是极大地增加了传输容量,见表 1.2.2。WDM 最高水平为 132 个信道,传输容量为 $20\text{Gb/s} \times 132 = 2640\text{Gb/s}$,相当于 120km 的距离传输了 3.3×10^8 条话路。

(2) 传输损耗小,中继距离长

目前的光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长上,传输损耗的典型值分别为 0.35dB/km 和 0.2dB/km ,甚至更低。因此,用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多(见表 1.2.1)。目前,采用外调制技术,波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的色散移位单模光纤通信系统,若其传输速率为 2.5Gb/s ,则中继距离可达 150km ;若其传输速率为 10Gb/s ,则中继距离可达 100km 。采用光纤放大器、色散补偿光纤,中继距离还可增加(见表 1.2.2)。传输容量大、中继距离长的优点,使光纤通信系统不仅适合于长途干线网而且适合于接入网的使用,这也是降低每公里话路系统造价的主要原因。

表 1.2.2 WDM 和 TDM 传输能力比较

复用技术	传输容量 / $\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}$	传输距离 / km	距离 / km	研制单位	备注
WDM	20×17	150	50	AT&T	
	20×132	120		NEC	
TDM	160	200	50	NTT	单通道 环测
	20	10^3		NTT	
	20	10^6		法 Telecom	

(3) 体积小,质量小

光纤直径很小(一般外径典型值为 $125\mu\text{m}$),质量很小,即使做成光缆,在芯数相同的条件下,其质量还是比电缆小得多,体积也小得多。表 1.2.3 给出了铝/聚乙烯粘结护套(LAP)单元结构光缆和标准同轴电缆的质量和截面积的比较。

表 1.2.3 光缆和电缆的质量和截面积比较

项 目	8 芯		18 芯	
	光 缆	电 缆	光 缆	电 缆
质量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.42	6.3	0.42	11
质量比	1	15	1	26
直径 / mm	21	47	21	65
截面积比	1	5	1	9.6

光纤体积小和质量小的特点在许多领域特别是军事、航空和宇宙飞船等方面的应用,具有特别重要的意义。它可以大大提高这些应用场合极其珍贵的空间利用率和载荷效率。在飞机上用光纤代替电缆,不仅降低了通信设备的成本,而且降低了飞机的制造成本。例如,在美国 A-7 飞机上,用光纤通信代替电缆通信,使飞机质量减少 27 磅(约 12.247kg),相当于飞机制造成本减少 27 万美元。

(4) 优良的抗电磁干扰性能

由于光纤是由电绝缘的石英材料制成的,能够不受各种电磁场的干扰和闪电雷击的损坏。无金属光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围和油田、煤矿等易燃易爆环境中使用。光纤(复合)架空地线(Optical Fiber Overhead Ground Wire, OPGW)是光纤与电力输送系统的地线组合而成的通信光缆,已在电力系统的通信中发挥重要作用。

(5) 良好的保密性能

在光纤中传输的光泄漏非常微弱,即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具,光纤不能分接,因此信息在光纤中传输非常安全。保密性能好的这一特点,对军事、政治和经济都有重要的意义。

(6) 制造光纤的材料丰富

制造光纤的石英(SiO_2)在地球上基本上是取之不尽的材料,而制造同轴电缆和波导管的铜、铝、铅等有色金属材料,在地球上的储量是有限的。因此,推广光纤通信,有利于地球资源的合理使用。

总之,光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性,而且在经济上具有巨大的竞争能力,因此其在信息社会中将发挥越来越重要的作用。图 1.2.3 给出各种通信系统相对造价与传输容量(话路数)的关系。由图 1.2.3 可见,随着传输容量的增加,由于采用了新的传输媒质,使得相对造价直线下降。

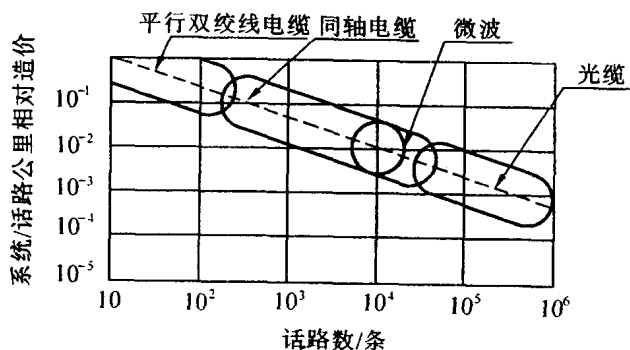


图 1.2.3 各种通信系统相对造价与传输容量的比较

1.2.2 光纤通信的应用

光纤可以传输数字信号,也可

以传输模拟信号。光纤在通信网、广播电视网与计算机网,以及其他数据传输系统中,都得到了广泛应用。光纤宽带干线传送网和接入网发展迅速,是当前研究开发应用的主要目标。

光纤通信的各种应用可概括如下:

① 通信网,包括全球通信网(如横跨大西洋和太平洋的海底光缆和跨越欧亚大陆的洲际光缆干线)、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、各省二级干线和县以下的支线)、各种专用通信网(如电力、铁道、国防等部门通信、指挥、调度、监控的光缆系统)、特殊通信手段(如石油、化工、煤矿等部门易燃易爆环境下使用的光缆,以及飞机、军舰、潜艇、导弹和宇宙飞船内部的光缆系统)。

② 构成因特网的计算机局域网和广域网,如光纤以太网、路由器之间的光纤高速传输链路。

③ 有线电视网的干线;工业电视系统,如工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控系统;自动控制系统的数据传输。

④ 综合业务光纤接入网,分为有源接入网和无源接入网,可实现电话、数据、视频(会议电视、可视电话等)及多媒体业务综合接入核心网,提供各种各样的社区服务。

1.3 光纤通信系统的组成

1.3.1 系统组成与传输原理

图 1.3.1 示出单向传输的光纤通信系统,包括发射、接收和作为广义信道的基本光纤传输系统。

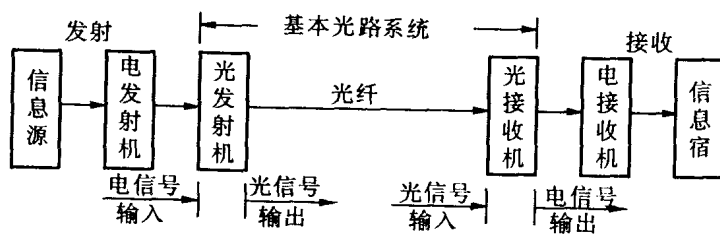


图 1.3.1 光纤通信系统的组成

在该系统中,信息源把用户信息转换为原始电信号,这种信号称为基带信号。电发射机把基带信号转换为适合信道传输的信号,这个转换如果需要调制,则其输出信号称为已调信号。对于数字电话传输,电话机把话音转换为频率范围为 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ 的模拟基带信号,电发射机把这种模拟信号转换为数字信号,并把多路数字信号组合在一起。模/数转换目前普遍采用脉冲编码调制(PCM)方式。这种方式是通过模拟信号进行抽样、量化和编码而实现的。一路话音转换成传输速率为 64kb/s 的数字信号,然后用数字复接器把 24 路或 30 路 PCM 信号组合成 1.544Mb/s 或 2.048Mb/s 的一次群甚至高次群的数字系列,最后输入光发射机。对于模拟电视传输,则用摄像机把图像转换为 6MHz 的模拟基带信号,直接输入光发射机。为提高传输质量,通常把这种模拟基带信号转换为频率调制(FM)、脉冲频率调制

(PFM) 或脉冲宽度调制(PWM) 信号,最后把这种已调信号输入光发射机。还可以采用频分复用(FDM) 技术,用来自不同信息源的视频模拟基带信号(或数字基带信号) 分别调制指定的不同频率的射频(RF) 电波,然后把多个这种带有信息的 RF 信号组合成多路宽带信号,最后输入光发射机,由光载波进行传输。在这个过程中,受调制的 RF 电波称为副载波,这种采用频分复用的多路电视传输技术,称为副载波复用(SCM)。

不管是数字系统,还是模拟系统,输入到光发射机带有信息的电信号,都通过调制转换为光信号。光载波经过光纤线路传输到接收端,再由光接收机把光信号转换为电信号。电接收机的功能和电发射机的功能相反,它把接收的电信号转换为基带信号,最后由信息终端恢复用户信息。在整个通信系统中,在光发射机之前和光接收机之后的电信号段,光纤通信所用的技术和设备与电缆通信相同,不同的只是由光发射机、光纤线路和光接收机所组成的基本光路系统代替了电缆传输。

1.3.2 基本光路系统

基本光路系统是指包括光发射机、光纤线路和光接收机构成的可作为独立的“光信道”单元。若配置适当的接口设备,则可以插入现有的数字通信系统或模拟通信系统,或者有线通信系统或无线通信系统的发射与接收之间。此外,若配置适当的光器件,还可以组成传输能力更强、功能更完善的光纤通信系统。例如,在光纤线路中插入光纤放大器组成光中继长途系统;配置波分复用器和解复用器,组成大容量波分复用系统;使用耦合器或光开关组成无源光网络等。下面简要介绍基本光路系统的三个组成部分。

(1) 光发射机

光发射机的功能是把输入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,光发射机的性能基本上取决于光源的特性。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) 和半导体激光二极管(或称激光器 LD),以及谱线宽度很小的动态单纵模分布反馈(DFB) 激光器。有些场合也使用固体激光器,如大功率的掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG) 激光器。

光发射机把电信号转换为光信号的过程(常简称为电/光转换),是通过电信号对光的调制而实现的。目前有直接调制和间接调制(或称外调制) 两种调制方案,如图 1.3.2 所示。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,容易实现,但调制速率受激光器的频率特性所限制。外调制是把激光的产生和调制分开,用独立的调制器调制激光器的输出光而实现的。目前有多种调制器可供选择,最常用的是电光调制器。这种调制器是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调制的。外调制的优点是调制速率高,缺点是技术复杂,成本较高,因此只在大容量的波分复用和相干光通信系统中使用。

对光参数的调制,原理上可以是光强(功率)、幅度、频率或相位调制,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,相位和偏振方向可以控制,谱线宽度很窄的单模激光源,并采用外调制方案,所以这些调制方式只在新技术系统中使用。

(2) 光纤线路