



高等院校电子信息科学与工程类

• 通信工程专业教材 •

光纤通信系统

马丽华 李云霞 蒙文 王豆豆 编著

GUANGXIAN TONGXIN XITONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等院校电子信息科学与工程类

• 通信工程专业教材 •

光纤通信系统

马丽华 李云霞 编著
蒙文 王豆豆

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书紧密结合光纤通信的最新发展,全面系统地介绍了光纤通信系统的基本原理、基本技术、系统设计方法,主要内容包括:光纤通信的组成、发展概况、特点以及发展趋势;光纤的传输原理和传输特性、光纤的非线性效应;光源器件的结构与发光机理、光发送机的组成与设计;光检测器件的结构和原理、光接收机的相关理论;光纤连接器、耦合器、光开关等光无源器件的作用、原理与类型;光放大器的一般概念、典型光放大器的原理与应用;色散补偿的概念与一般方法;波分复用系统原理、设计与器件;光纤通信系统性能指标与设计;相干光通信、光孤子通信、光交换技术、全光通信网、量子通信等光纤通信新技术以及应用。

本书内容系统全面,材料充实丰富,可供通信工程专业本科生及相关专业的高年级学生使用,也可作为通信技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/马丽华等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2009

ISBN 978-7-5635-1947-7

I. 光… II. 马… III. 光纤通信—通信系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 105638 号

书 名: 光纤通信系统

作 者: 马丽华 李云霞 蒙 文 王豆豆

责任编辑: 王晓丹 陈岚岚

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 381 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1947-7

定 价: 26.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

光纤通信作为现代通信的主要传输手段,在现代电信网中起着重要作用。光纤通信有巨大的信息传输容量,一条光频通路理论上可同时允许几十亿人通话。光纤通信通过短短几十年的发展,在扩大网络传输容量方面起到了其他方式不可替代的作用。展望未来,光通信仍将一如既往地向前发展,把通信网从电到光推向更高的台阶。不仅在传输,而且在交换;不仅在网络核心,而且在网络边缘,都将引入光通信,最终把光送到千家万户。

本书主要讲述光纤通信原理与技术,包括光纤传输原理、光无源和有源器件原理、光纤通信系统以及近年来发展的各种部件技术和系统技术。内容强调器件和系统的概念,同时也重视介绍它们的应用。

全书共分9章。第1章为导论,主要介绍光纤通信的概念、发展历史、系统组成、特点应用以及发展趋势;第2章主要介绍光纤传输原理与传输特性,包括光纤的结构、类型、导光原理、传输特性及非线性效应,并介绍几种典型的单模光纤与光缆以及光纤接续;第3章为光源与光发送机,讨论半导体光源的原理、结构、特性及由其构成的光发送机的结构、光调制特性以及将光信号注入光纤的耦合方式与技术;第4章为光检测器与光接收机,在介绍光检测器的原理、结构和特性的基础上讨论了接收机主要组成部分的电路与特性,并详细讨论接收机的噪声和灵敏度及降低噪声和提高灵敏度的方法;第5章介绍光纤通信系统常用无源器件,主要包括光纤连接器、光耦合器、光开关、光衰减器等器件的作用、工作原理与种类;第6章为光放大及色散补偿技术,包括光放大器的一般概念、几种典型光放大器的原理与应用以及色散补偿的概念与一般方法;第7章为光波分复用技术,重点介绍波分复用系统原理、设计与器件;第8章为光纤通信系统与性能,介绍了两种数字传输体制、系统性能指标,光纤损耗、色散对系统性能的影响以及光纤通信系统的设计;第9章为光纤通信新技术,分别介绍了相干光通信、光孤子通信、光交换技术、全光通信网、量子通信等光纤通信新技术以及应用。

本书由马丽华、李云霞、蒙文和王豆豆共同编著完成。其中,第1、5、6、8章由马丽华编写,第2章由王豆豆编写,第3、4章由蒙文编写,第7、9章由李云霞编写。全书由马丽华统稿。编写工作得到赵尚弘教授的关心与支持,在此表示诚挚的感谢。

为保证理论部分的系统性,本书参考了相关领域出版的部分著作和教材,

同时引用了一些文献中发表的内容,它们使得本书能够反映光纤通信技术发展的当前水平。在此,对这些成果的作者表示深深的感谢。

由于经验不足,加之编者水平有限和时间仓促,书中的疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 光纤通信的基本概念	1
1.2 光纤通信发展历史	2
1.2.1 光纤的发展	2
1.2.2 光纤通信系统的发展	3
1.3 光纤通信系统的基本组成	4
1.4 我国光纤通信的发展	7
1.4.1 我国光通信的历程	7
1.4.2 我国光纤通信现状	8
1.5 光纤通信的特点与应用	9
1.5.1 光纤通信的特点	9
1.5.2 光纤通信的应用	10
1.6 光纤通信发展趋势	11
1.6.1 光纤、光缆发展趋势	11
1.6.2 光纤通信系统高速化发展趋势	12
1.6.3 光纤通信网络发展趋势	12
小结	13
思考与练习	13
第 2 章 光纤与光缆	14
2.1 光纤的结构与分类	14
2.1.1 光纤的结构	14
2.1.2 光纤的分类	15
2.1.3 光纤的制造工艺	17
2.2 光纤的传输原理	17
2.2.1 射线理论分析光纤的传输原理	18
2.2.2 波动理论分析光纤的传输原理	21
2.3 光纤的传输特性	28
2.3.1 光纤的损耗特性	28
2.3.2 光纤的色散特性	31
2.3.3 光纤的非线性效应	33
2.4 单模光纤的种类及性能参数	35
2.4.1 光纤的主要性能参数	35
2.4.2 单模光纤种类	35

2.5 光纤接续	37
2.6 光缆	38
2.6.1 光缆的基本结构	38
2.6.2 光缆的分类	39
小结	40
思考与练习	41
第3章 光源和光发送机	42
3.1 光纤通信用光源	42
3.1.1 半导体光源的发光机理	42
3.1.2 半导体发光二极管	53
3.1.3 半导体激光二极管	59
3.2 光发送机	87
3.2.1 光发送机的基本组成	87
3.2.2 光发送机的主要技术要求	88
3.2.3 光发送机设计	89
3.3 光源与光纤的耦合	95
3.3.1 光源与光纤耦合效率的计算	96
3.3.2 影响光源与光纤耦合效率的主要因素及提高耦合效率的方法	99
小结	100
思考与练习	101
第4章 光检测器与光接收机	103
4.1 光检测器	103
4.1.1 光电探测原理	103
4.1.2 PD 和 PIN 光电二极管	105
4.1.3 雪崩光电二极管	108
4.1.4 响应带宽	109
4.1.5 新型 APD 结构	111
4.1.6 MSM 光电探测器	113
4.2 光接收机	113
4.2.1 光接收机的组成	114
4.2.2 光接收机的性能指标	117
4.2.3 光接收机的噪声和信噪比	118
4.2.4 光接收机误码率和灵敏度	121
4.2.5 光接收机性能	126
4.3 光中继器	126
小结	127
思考与练习	128

第 5 章 光无源器件	130
5.1 光纤连接器	130
5.1.1 光纤连接器的性能	130
5.1.2 光纤连接器的一般结构	131
5.1.3 影响单模光纤连接损耗的因素	133
5.1.4 光纤连接器分类	134
5.1.5 光纤固定连接方式	137
5.2 光耦合器	137
5.2.1 光耦合器的性能参数	138
5.2.2 各种光耦合器	139
5.3 光开关	141
5.3.1 光开关的作用	141
5.3.2 光开关的种类	142
5.4 光调制器	146
5.5 光隔离器	147
5.6 光衰减器	148
5.6.1 光衰减器的分类及性能指标	148
5.6.2 光衰减器的工作原理	149
小结	152
思考与练习	153
第 6 章 光放大及色散补偿技术	154
6.1 光放大器的作用与一般特性	154
6.1.1 光放大器的作用	154
6.1.2 光放大器的工作性能	155
6.2 光放大器的分类	157
6.2.1 半导体光放大器	157
6.2.2 非线性光纤放大器	157
6.2.3 掺铒光纤放大器	157
6.3 掺铒光纤放大器	157
6.3.1 EDFA 的结构与工作原理	158
6.3.2 EDFA 的主要特性参数	160
6.3.3 EDFA 的主要优缺点	161
6.3.4 EDFA 在光纤通信系统中的应用	162
6.4 拉曼光纤放大器	164
6.4.1 拉曼光纤放大器的工作机理	164
6.4.2 拉曼光纤放大器的优缺点	164
6.4.3 拉曼光纤放大器的种类	165

6.5 色散补偿技术	167
6.5.1 色散补偿原理	167
6.5.2 无源色散补偿	168
6.5.3 前补偿技术	169
6.5.4 偏振模色散及其补偿技术	171
6.5.5 SPM 及其补偿技术	173
小结	174
思考与练习	175
第7章 光波分复用技术	176
7.1 波分复用原理	176
7.1.1 光波分复用技术定义	176
7.1.2 光波分复用系统的基本形式	180
7.1.3 光波分复用技术特点	181
7.1.4 光波长区的分配	183
7.2 光波分复用器	185
7.2.1 光波分复用器的主要性能参数	185
7.2.2 光波分复用器的要求	186
7.2.3 光波分复用器的类型	186
小结	191
思考与练习	192
第8章 光纤通信系统性能与设计	193
8.1 两种数字传输体系	193
8.1.1 准同步数字体系	193
8.1.2 同步数字体系	194
8.2 系统的性能指标	195
8.2.1 误码性能	195
8.2.2 抖动性能	196
8.3 系统结构	197
8.3.1 点到点连接	197
8.3.2 广播和分配网	198
8.3.3 局域网	198
8.4 光纤损耗和色散对系统性能的影响	199
8.4.1 损耗限制系统	199
8.4.2 色散限制系统	200
8.5 光纤通信系统的设计	201
8.5.1 功率预算	201
8.5.2 上升时间预算	202

8.5.3 色散预算	203
8.5.4 系统功率代价	204
小结	207
思考与练习	208
第9章 光纤通信新技术	209
9.1 相干光通信技术	209
9.1.1 相干光通信的基本工作原理	209
9.1.2 相干光通信系统的组成	210
9.1.3 相干光通信的优点	211
9.1.4 相干光通信的关键技术	212
9.2 光孤子通信技术	213
9.2.1 光孤立子产生的机理	214
9.2.2 光孤子通信	215
9.2.3 光孤子通信优点及关键技术	216
9.2.4 光孤子通信应用前景	217
9.3 光交换技术	218
9.3.1 光交换技术的特点	218
9.3.2 空分光交换	219
9.3.3 时分光交换	219
9.3.4 波分光交换	220
9.4 全光通信网	221
9.4.1 全光通信网的概念	221
9.4.2 全光通信网的结构与特点	223
9.4.3 全光通信网的相关技术	224
9.4.4 OADM 在中国高速信息示范网中的应用	225
9.5 量子通信	228
9.5.1 量子纠缠和量子隐形传态	228
9.5.2 量子密码术	229
9.5.3 量子密钥分配协议	229
9.5.4 量子通信的优点及应用前景	230
9.5.5 国内外量子通信研究现状及发展方向	232
小结	233
思考与练习	234
参考文献	235

光纤通信作为现代通信的主要传输手段,在现代电信网中起着重要作用。光纤通信有巨大的信息传输容量,一条光频通路理论上是可同时允许几十亿人通话。本章对光纤通信的发展历史进行了简单回顾,介绍了光纤通信系统的基本组成、特点、应用以及光纤通信的发展趋势等。

1.1 光纤通信的基本概念

光纤通信是指以光波为载频,以光导纤维(光纤)为传输媒介的通信方式。

光波是一种电磁波,电磁波按照波长或频率不同可分为如图 1.1.1 所示的种类。其中,紫外光、可见光、红外光都属于光波,光纤通信是工作在近红外区,即波长是 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$,对应的频率为 $167 \sim 375 \text{ THz}$ 。

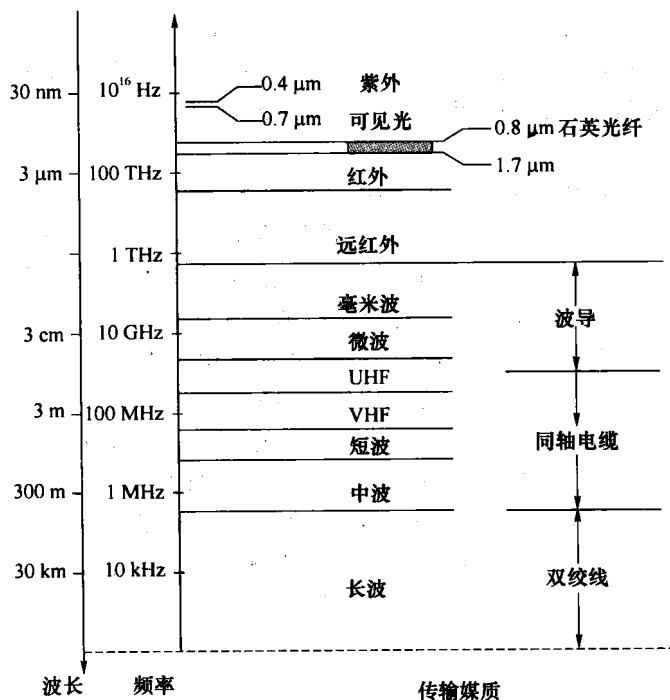


图 1.1.1 电磁波谱

1.2 光纤通信发展历史

1838年 Samuel F. B. Morse 发明了电报,标志着人类进入了电通信时代。1876年贝尔(Bell)发明电话,一对线通一路话,从此开创了模拟电话通信。1918年采用明线传输的三路载波机问世。此后,为了扩大通信容量,载波频率不断增加,主要的通信手段有电缆载波通信和微波载波通信。在理论上载频频率越高,所能携带的信号带宽就越大,系统容量就大。通信的发展就是要进一步地使用更高频率的波段,以便得到更大的带宽来提高信息容量,降低通信成本。因此,电通信系统总是倾向于采用更高的频率。

光通信可追溯到远古时代。中国古代烽火台的烟火、美洲印第安人利用烟火传递信息等都属于原始性的一种光通信。由烽火台或山顶放出的断断续续的青烟就可以认为是一种信号,光是信息的载体,空气是传输媒质,人的眼睛就是光检测器。17世纪以来沿用的灯光传送信号及手旗通信至今仍在船舶上使用。1880年,贝尔制作了一台叫做“光电话”的装置,利用太阳光做光源,用硒晶体作为接收光信号的器件,进行了实验,达到了能与最远相距213m的人通话。无论是古代的“烽火台”还是贝尔的“光电话”都与现今的光通信有很大的区别。太阳光、灯光等普通的光源,都不适合作为现代光通信的光源,因为这些光都是带有“噪声”的光。也就是说,这些光的频率不稳定,光的性质是复杂的。因此,真要用光来通信,必须要解决两个根本性的问题:一是必须有能稳定传送光的介质;二是必须要找到理想的光源。长期以来,由于这两项关键技术没有得到解决,因此光通信一直裹足不前。

1960年7月8日,美国科学家梅曼(Maiman)发明了红宝石激光器,使人们获得性质和电磁波相似而频率稳定的光源,研究现代光通信的时代也从此开始。

开始研究的光通信都是在大气中进行。但是光在大气中的传送受到气候的影响很大,大气湍流会造成信号抖动,遇到雨、雪、阴天、雾等情况,使信号传输受到很大衰减,无法满足长距离通信。

为使光波不受大气层中各种因素的干扰,人们将光波的传输转入了地下,进行了光波地下传输的各种试验,这就是透镜波导和反射镜波导的光波传输系统。透镜波导是在金属或水泥管道内,每隔一定距离安装一个玻璃透镜,通过透镜的作用将光波限制在管道内传输,以达到光波通信的目的。这种传输方式完全可以消除大气对光波传输的各种干扰。从理论上说,这两种波导都是可行的,但是,在人们的大量研究和实践以后发现,在实际应用时,这种传输方式将遇到许多不可克服的困难。例如,现场施工对每个透镜或反射镜要进行严格的校准和牢固的安装;为了防止地面震动的影响,要尽可能将波导深埋,或选择人、车稀少的地区;在波导路由转弯时,需要增加透镜或反射镜,弯度越大,增加的透镜或反射镜数也越多,光能的损耗也就越大。由于系统造价昂贵,并且调整、测试、维修都很困难,因此光波地下通信无实用意义。在“天空”和“地下”都不能理想地传输光波的情况下,1965年左右,光波通信的研究进入低潮,成了不为人们所重视的“冷门”。

1.2.1 光纤的发展

1966年7月,英籍华人高锟博士在PIEE杂志上发表了一篇十分著名的文章《用于光频

的光纤表面波导》，该文从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性；设计了通信用光纤的波导结构；更重要的是科学地预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性，即加强原材料提纯，加入适当的掺杂剂，可把光纤的衰减系数从当时的1 000 dB/km降低到 20 dB/km 以下，以实现通信。这一近乎神话的预言，在 4 年后获得证实。图 1.2.1 为光纤通信发明家高锟(左)1998 年在英国接受 IEE 授予的奖章。



图 1.2.1 光纤通信发明家高锟(左)1998 年在英国接受 IEE 授予的奖章

1970 年被称为光纤通信的元年，这一年，一是美国康宁公司成功地拉制出了世界上第一根衰减水平为 20 dB/km 的光纤；二是美国贝尔实验室制作出可在室温下连续工作的铝镓砷(AlGaAs)半导体激光器。这两项科学成就揭开了光纤通信蓬勃发展的历史。

自康宁公司之后，世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力与物力，光纤衰减不断下降。

- 1970 年，美国康宁公司马勒博士等三人的研究小组首次研制成功损耗为 20 dB/km 的光纤。
- 1974 年，贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法，称为改进的化学汽相沉积法(MCVD)，光纤损耗下降到 1 dB/km。
- 1976 年，日本电报电话公司使光纤损耗下降到 0.5 dB/km。
- 1979 年，日本电报电话公司研制出 0.2 dB/km 的光纤。
- 目前，通信光纤最低损耗为 0.17 dB/km。

1.2.2 光纤通信系统的发展

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。

- 1976 年，美国在亚特兰大开通了世界上第一个实用化光纤通信系统，传输速率为 45 Mbit/s，中继距离为 10 km。
- 1978 年，日本开始了速率为 100 Mbit/s 多模光纤通信系统的现场试验。
- 1981 年，日本 F-100M 光纤通信系统 100 Mbit/s 商用。
- 1985 年，多模光纤通信系统(140 Mbit/s)商用化，并着手单模光纤通信系统的现场试验工作。
- 1990 年，单模光纤通信系统进入商用化阶段(565 Mbit/s)，并着手进行零色散位移光纤和波分复用及相干光通信的现场试验。
- 1993 年，SDH 产品开始商用化(622 Mbit/s 以下)。SDH 设备等级如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 SDH 设备等级

SDH 设备	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
速率	155.520 Mbit/s	622.08 Mbit/s	2.5 Gbit/s	10 Gbit/s	40 Gbit/s
话路数	1 890 路 (63 个 2 M 口)	7 560 路	30 240 路	120 960 路	48.384 万路

- 1995 年, Lucent 的 8×2.5 Gbit/s 密集波分复用系统正式投入商用。
- 1998 年, 10 Gbit/s 的 SDH 产品开始进入商用化阶段。
- 1999 年, 美国朗讯 1 Tbit/s (100×10 Gbit/s) 产品试验, 话路数相当于 1 200 万路。
- 2000 年, 日本 NEC 3.2 Tbit/s (160×20 Gbit/s) 产品试验。
- 2001 年, 日本 NEC 10.92 Tbit/s (273×40 Gbit/s) 试验 (话路数相当于 1.32 亿路)。

光纤通信进展确实很快, 在不到 20 年的时间里, 衡量通信容量的比特率-距离积 BL (B 为比特率, L 为中继距离) 增加了几个数量级。光纤通信系统在技术上经历了以下各具特点的 5 个阶段 (或五代光波通信系统)。

第一代: 工作于 $0.85 \mu\text{m}$ 波段, 使用多模光纤, 其比特率在 $20 \sim 100$ Mbit/s 之间, 最大中继间距 10 km, 最大通信容量 $500 (\text{Mbit/s}) \cdot \text{km}$ 。与同轴电缆通信系统相比, 中继间距长, 投资和维护费用低, 是工程和商业运营追求的目标。

第二代: 工作于损耗更低的 $1.31 \mu\text{m}$ 波段, 采用能克服模间色散限制的单模光纤, 最大通信容量为 $85 (\text{Gbit/s}) \cdot \text{km}$ 。

第三代: 工作于石英光纤最低损耗波长区 $1.55 \mu\text{m}$ 波段, 色散问题通过使用设计在 $1.55 \mu\text{m}$ 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。最大通信容量 $1\,000 (\text{Gbit/s}) \cdot \text{km}$ 。

第四代: 采用波分复用 (WDM) 和光放大 (OA) 技术, 在单信道比特率一定的条件下, 通过增加复用信道数和延长中继距离的方法达到提高通信容量的目的。特别是 20 世纪 90 年代初期光纤放大器的问世引起光纤通信领域的重大变革。

第五代: 以光孤子脉冲为通信载体, 采用光时分复用技术 (OTDM) 和波分复用技术 (WDM) 联合复用为通信手段, 以超大容量、超高速率为特征的通信方式。

光波通信技术得到巨大发展, 现在世界通信业务的 90% 需经光纤传输, 光纤通信的业务量以每年 40% 的速度上升。随着光波通信系统技术的发展, 光波系统在通信网中的应用得到了相应的发展。现在世界上许多国家都将光波系统引入了公用电信网、中继网和接入网中, 光纤通信的应用范围越来越广。

1.3 光纤通信系统的基本组成

典型的光纤通信系统方框图如图 1.3.1 所示。图中仅表示了一个方向的传输, 反方向的传输结构是相同的。从图 1.3.1 可以看出, 光纤通信系统由电端机、光发送机、光纤光缆、光中继器与光接收机 5 部分组成。

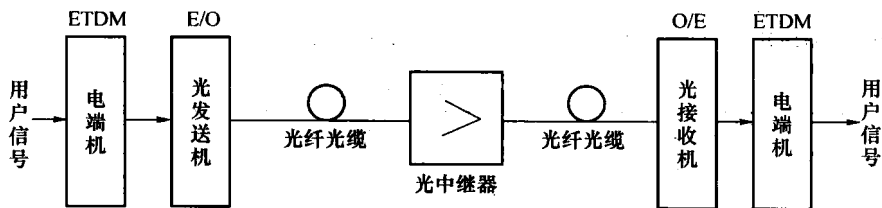


图 1.3.1 光纤通信系统方框图

1. 电端机

电端机的作用是对来自信源的信号进行处理,如模/数(A/D)变换、多路复用处理。它是一般的电通信设备。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。电端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0.3~3.4 kHz的模拟基带信号,电端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64 kbit/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1.544 Mbit/s或2.048 Mbit/s的一次群甚至高次群的数字系列,然后输入光发射机。对于模拟电视传输,则用摄像机把图像转换为6 MHz的模拟基带信号,直接输入光发送机。

2. 光发送机

光发送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,如大功率的掺铒钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器。

光发送机把电信号转换为光信号的过程(常简称为电/光或E/O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。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,因此只有在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。

3. 光纤光缆

光纤光缆作为线路,其功能是把来自光发送机的光信号以尽可能小的畸变(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容纳许多根光纤的光缆。

光纤线路的性能主要由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都尽可能小,而且有足够好的机械特性和环境特性。例如,在不可避免的应力作用下和环境温度改变时,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传输系统,而小容量短距离光纤传输系统用多模光纤配合半导体发光二极管更加合适。为适应不同通信系统的需要,已经设计了多种结构不同、特性优良的单模光纤,并成功地投入实际应用。

石英光纤在近红外波段,除杂质吸收峰外,其损耗随波长的增加而减小,在 $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 有三个损耗很小的波长“窗口”。在这三个波长窗口损耗分别小于 $2\ \text{dB/km}$ 、 $0.4\ \text{dB/km}$ 和 $0.2\ \text{dB/km}$ 。石英光纤在波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 色散为零,带宽极大值高达几十 $\text{GHz} \cdot \text{km}$ 。通过光纤设计,可以使零色散波长移到 $1.55\ \mu\text{m}$,实现损耗和色散都最小的色散移位单模光纤,或者设计在 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 之间色散变化不大的色散平坦单模光纤等。根据光纤传输特性,光纤通信系统的工作波长都选择在 $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $1.31\ \mu\text{m}$ 或 $1.55\ \mu\text{m}$,特别是 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 应用更加广泛。

因此,作为光源的激光器的发射波长和作为光检测器的光电二极管的波长响应,都要和光纤这三个波长窗口相一致。目前在实验室条件下, $1.55\ \mu\text{m}$ 的损耗已达到 $0.154\ \text{dB/km}$,接近石英光纤损耗的理论极限,因此人们开始研究新的光纤材料。光纤是光纤通信的基础,光纤的技术进步,有力地推动着光纤通信向前发展。

4. 光中继器

在长距离光纤通信系统中,延长通信距离的方法是采用中继器。中继器将经过长距离光纤衰减和畸变后的微弱光信号经放大、整形、再生成一定强度的光信号,继续送向前方以保证良好的通信质量。

目前大量应用的是光电光中继器,首先要将光信号转化为电信号,在电信号上进行放大、再生、重定时等信息处理后,再将信号转化为光信号,经光纤传送出去。这样通过加入级联的电再生中继器可以建成很长的光纤传输系统。但是,这样的光电光中继需要光接收机和光发送机来进行光/电和电/光转换,设备复杂,成本昂贵,维护运转不方便。

近几年迅速发展起来的光放大器,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier),在光纤通信技术上引发了一场革命。在长途干线通信中,它可以使光信号直接在光域进行放大而无须转换成电信号进行信号处理,即用全光中继来代替光电光中继。这使成本降低、设备简化,维护、运转方便。EDFA 的出现,对光纤通信的发展影响重大,促进和推动了光纤通信领域中重大新技术的发展,使光纤通信的整体水平上了一个新的台阶。它已经对光纤通信的发展产生了深远的影响。

5. 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、噪声低和响应速度快。目前广泛使用的光检测器有两种类型:在半导体 PN 结中加入本征层的 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(常简称为光/电或 O/E 转换)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

在混频器中产生差拍而输出中频光信号,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。外调制-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。

光接收机最重要的特性参数是灵敏度。灵敏度是衡量光接收机质量的综合指标,它反映接收机调整到最佳状态时接收微弱光信号的能力。灵敏度主要取决于组成光接收机的光电二极管和放大器的噪声,并受传输速率、光发射机参数和光纤线路色散的影响,还与系统要求的误码率或信噪比有密切关系。所以灵敏度也是反映光纤通信系统质量的重要指标。

基本光纤传输系统作为独立的“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;若配置适当的光器件,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,等等。

1.4 我国光纤通信的发展

1.4.1 我国光通信的历程

我国光通信起步较早,20世纪70年代初就开始了大气传输光通信的研究,随之又进行光纤和光电器件的研究,自1977年初,从研制出第一根石英光纤起,跨过一道道难关,取得了一个又一个零的突破。

1977年,第一根短波长($0.85\text{ }\mu\text{m}$)阶跃型石英光纤问世,长度为17 m,衰减系数为300 dB/km;研制出Si-APD。

1978年,阶跃光纤的衰减降至5 dB/km;研制出短波长多模梯度光纤,即G.651光纤;研制出GaAs-LD。

1979年,研制出多模长波长光纤,衰减为1 dB/km;建成5.7 km、8 Mbit/s光通信系统试验段。

1980年,1300 nm窗口衰减降至0.48 dB/km,1550 nm窗口衰减为0.29 dB/km;研制出短波长用的GaAlAs-LD。

1981年,研制出长波长用的InGaAsP-LD和PIN探测器;多模光纤活动连接器进入实用;研制出三次群34 Mbit/s(480路)光传输设备。

1982年,研制出四次群140 Mbit/s(1920路)光传输设备;研制成功长波长用的激光器组件和探测器组件(PIN-FET)。

1984年,武汉、天津34 Mbit/s市话中继光传输系统工程建成(多模)。

1985年,研制出1300 nm单模光纤,衰减达0.40 dB/km。

1986年,研制出动态单纵模激光器。