

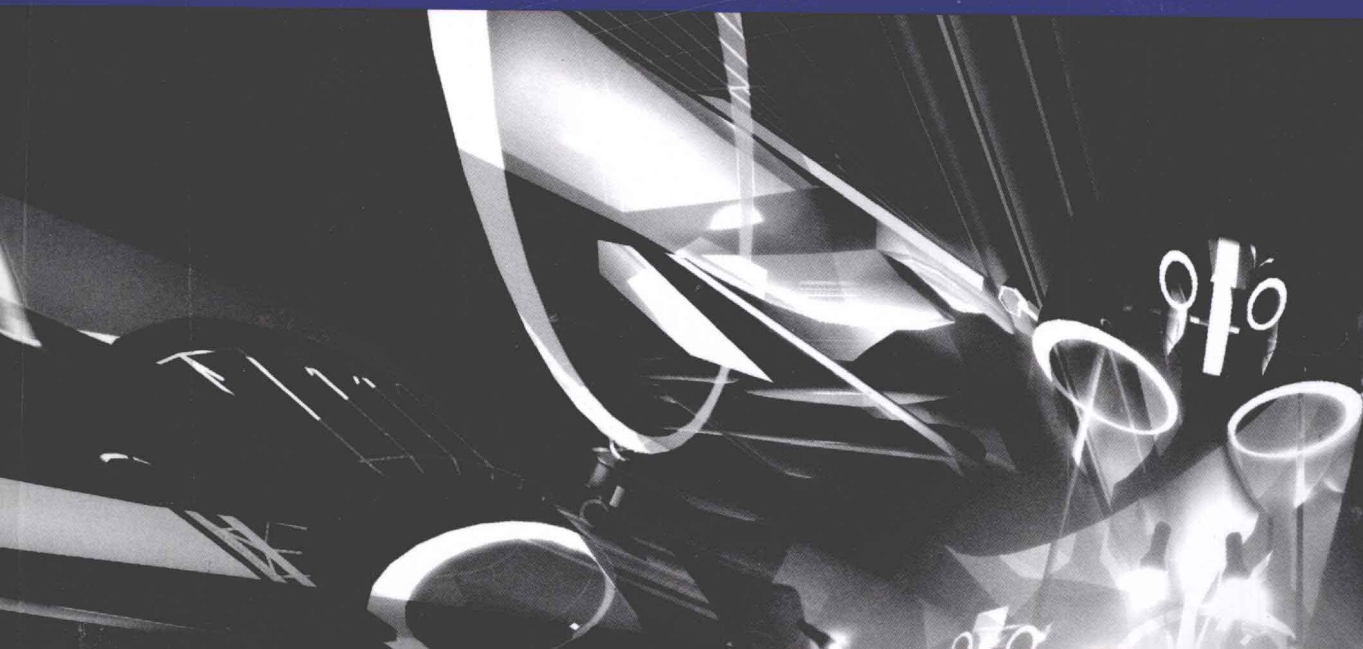
高等学校电子信息类专业
“十二五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

光 网 络 技 术

张新社 于友成 等编著

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



内 容 简 介

本书结合光纤通信及光网络技术的最新发展状况,全面介绍了光网络技术的相关知识和技术。

全书共9章,首先介绍光网络技术在信息网络中的作用,光纤通信网络技术的概念和组成,及其新技术、关键技术、应用和发展趋势等。然后简单介绍光网络中的光纤、光器件和光系统,并重点引入高速光传输技术和几种主要的光网络技术:光传送网技术、光纤接入网技术、城域光网络技术、光交换机及智能光网络技术、全光网络技术等,同时对各种技术的应用,以及相关光网络的网管理论和技术也作了相应的介绍。

本书既可作为高等学校电子信息类专业中与光纤通信相关课程的教材,亦可作为从事光纤通信的科技人员和管理人员的技术参考资料。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

光网络技术/张新社等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2012.5

高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2770-0

I. ① 光… II. ① 张… III. ① 光纤网—高等学校—教材 IV. ① TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 046062 号

策 划 云立实

责任编辑 云立实 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 20

字 数 470千字

印 数 1~3000册

定 价 34.00元

ISBN 978-7-5606-2770-0/TN·0647

XDUP 3062001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

光网络是宽带通信网发展的必然趋势。目前,光网络正从高速、大容量的数据传输方式向智能化方向发展,这要求光网络更灵活、面向用户和成本更低。由于构成光网络的光纤频带宽、容量大,因此光网络技术使宽带通信网的实现成为可能,光网络技术的发展必将极大地支持宽带通信网的发展。通信的宽带化,宽带通信网的光纤化,是通信技术发展历史的、必然的趋势。本书系统地介绍了光网络技术的工作原理、系统组成和应用,具体包括光网络的组成、网络拓扑、光接入网技术、光传送网技术、光交换网技术和全光网络技术等。

全书共9章,第1章主要介绍光网络技术在信息网络中的作用,光纤通信网络技术的概念和组成,新技术及关键技术、应用及发展趋势;第2章回顾了光纤通信及光网络中用到的光纤、光有源及无源器件、光通信系统的组成及应用等;第3章主要讲解光纤通信的复用技术,重点介绍了密集波分复用光网络的原理、关键技术和特点、光放大器技术及高速光纤技术;第4章介绍光传送网的概念、特点、分层结构及OTN设备等;第5章主要介绍了光纤接入网的概念、参考模型、网络拓扑结构及相关技术,无源光接入网的概念、关键器件、网络组成、拓扑结构、技术及应用,重点讲解了APON、EPON、GPON的工作原理;第6章介绍了城域光网络的概念、技术、网络结构及应用;第7章介绍了光电路交换(光空分交换、光波长交换、光时分交换、光码分交换)、光分组交换及全光交换等的原理和关键技术等;第8章介绍全光网络的原理、功能描述及拓扑结构、相关应用等;第9章主要介绍光网络管理系统的原理,包括网管的特点和管理通道开销的实现方案、分层的 management 要求与功能、管理信息模型、组织模型、MIB库、CMIP管理协议以及管理网的系统结构等。

本书在编写过程中,结合了国内外光网络技术的最新研究成果和相关资料,力图对光网络技术的原理、关键技术及应用作一系统和全面的介绍,尽量减少繁杂的公式推导,用简练的文字、详实的图表、简明的网络结构图等对相关原理和技术进行深入浅出的讲解,以方便读者学习。

参与本书编写工作的有张新社、于友成、刘原华、江帆、战金龙和金蓉,其中张新社负责第1、2、7章的编写,于友成负责第4、9章的编写,刘原华负责第3章的编写,江帆负责第5章的编写,战金龙负责第7章和第5章中EPON和GPON部分内容的编写,金蓉负责第8章和第7章中ASON部分内容的编写。张新社和于友成负责全书的

最后统稿工作。在本书编写过程中，编者参考了大量国内外光通信及光网络方面的相关科研成果、科技书籍及资料，已在参考文献中一一列出，在此表示非常诚挚的感谢。另外，也对为本书的编写工作提供过指导和帮助的同事和朋友表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2012年2月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤通信的发展和应用	1
1.1.1 光纤通信的基本概念	1
1.1.2 光纤通信的主要优点	2
1.1.3 光纤通信的发展现状	3
1.1.4 光纤通信系统的构成	4
1.1.5 光纤通信系统的应用	6
1.2 光纤通信网络	6
1.2.1 光纤通信网络的基本概念	6
1.2.2 光纤通信网络的发展历程	7
1.2.3 光纤通信网络的技术特点	8
1.2.4 光纤通信网络的关键技术	9
1.2.5 光纤通信网络的发展趋势	14
习题与思考题	16
第 2 章 光纤、光器件及光系统	17
2.1 光纤及光缆	17
2.1.1 光纤的结构及分类	17
2.1.2 光纤传输原理	20
2.1.3 光纤传输特性	28
2.1.4 光缆的结构及分类	32
2.2 光源器件	37
2.2.1 发光原理	37
2.2.2 LED 光源	40
2.2.3 半导体激光器	44
2.2.4 新型激光器	47
2.3 光检测器	48
2.3.1 光检测器原理	48
2.3.2 PIN 光电二极管	49
2.3.3 APD 雪崩光电二极管	53
2.4 无源光器件	55
2.4.1 光纤连接器	55
2.4.2 光纤耦合器	58

2.4.3	光衰减器与光开关	61
2.4.4	光隔离器与光环路器	63
2.4.5	光纤光栅	66
2.4.6	光波分复用器件及光放大器	71
2.5	光通信系统	80
2.5.1	光纤通信系统的组成	80
2.5.2	光发射机	81
2.5.3	光接收机	86
2.5.4	光纤通信系统及特性	89
	习题与思考题	108
第3章	高速率大容量光纤传输系统	109
3.1	光纤通信的复用技术	109
3.1.1	波分复用(WDM)技术	109
3.1.2	光频分复用(OFDM)技术	110
3.1.3	副载波复用(SCM)技术	110
3.1.4	时分复用(TDM)技术	111
3.1.5	空分复用(SDM)技术	113
3.1.6	光码分复用(OCDM)技术	114
3.2	WDM/DWDM 波分复用网络	116
3.2.1	WDM/DWDM 的概念	116
3.2.2	DWDM 的组成	117
3.2.3	DWDM 关键技术	120
3.2.4	DWDM 网络特性及保护	124
3.2.5	DWDM 新技术及其发展	126
3.3	光放大技术及光放大器	126
3.4	高速光纤技术	131
	习题与思考题	134
第4章	光传送网	135
4.1	传送网	135
4.1.1	传送网的概念	135
4.1.2	传送网模型的分层结构	136
4.1.3	传送网的生存特性	138
4.2	SDH 传送网	144
4.2.1	SDH 传送网的概念	144
4.2.2	SDH 帧结构	145
4.2.3	SDH 复用映射结构	148
4.2.4	SDH 传送网分层模型	150
4.2.5	SDH 网元设备	151
4.2.6	SDH 网络结构及应用	151
4.3	光传送网	153
4.3.1	光传送网的概念	153

4.3.2 OTN 分层结构	155
4.3.3 OTN 帧结构	156
4.3.4 OTN 复用	158
4.3.5 OTN 网络结构及应用	158
4.3.6 OTN 关键技术及发展趋势	161
习题与思考题	163
第 5 章 光纤接入网技术	165
5.1 光纤接入网的概念	165
5.2 光纤接入网的参考模型	166
5.2.1 系统接入方式	166
5.2.2 参考配置	166
5.2.3 应用类型	168
5.2.4 业务支持能力	170
5.2.5 配置结构的选择	171
5.3 光纤接入网的拓扑结构	172
5.3.1 接入网的拓扑结构	172
5.3.2 光纤接入网的网络拓扑结构	173
5.4 光纤接入网的网络性能和生存性	176
5.4.1 光纤接入网中点到点结构的保护	176
5.4.2 光纤接入网中自愈环结构的保护	178
5.5 PON 的基本概念和结构	180
5.5.1 基本概念和特点	180
5.5.2 PON 的构成	183
5.5.3 PON 的功能结构	184
5.5.4 PON 的传输复用技术	186
5.6 APON 的关键技术	188
5.6.1 APON 的产生及优点	188
5.6.2 APON 系统结构	189
5.6.3 APON 系统的技术难点	190
5.6.4 APON 的接入控制方案及帧结构	192
5.6.5 APON 系统的发展趋势	194
5.7 EPON 技术	197
5.7.1 EPON 技术的概念	197
5.7.2 EPON 的基本结构	197
5.7.3 EPON 的传输原理	198
5.7.4 EPON 对各种业务的支持	199
5.7.5 EPON 层次模型及其功能	200
5.7.6 EPON 关键技术	200
5.8 GPON 技术	201
5.8.1 GPON 技术的概念	201
5.8.2 GPON 的系统结构	202
5.8.3 GPON 帧结构	202

5.8.4 GPON 对各种业务的支持	204
5.8.5 GPON 关键技术	204
5.8.6 GPON 与 EPON 的比较	206
习题与思考题	206
第 6 章 城域光网络	208
6.1 城域网概述	208
6.1.1 城域网的概念	208
6.1.2 城域网的业务及特点	208
6.1.3 城域网的层次结构	208
6.2 光城域网技术	209
6.2.1 多业务传送平台技术	209
6.2.2 弹性分组环技术	211
6.2.3 DWDM/CWDM 技术	213
习题与思考题	216
第 7 章 光交换及智能光网络	217
7.1 光交换技术概述	217
7.1.1 光交换的必要性	217
7.1.2 光交换的定义与特点	218
7.1.3 光交换技术的分类	218
7.2 空分光交换	223
7.3 时分光交换	224
7.4 波分光交换	225
7.5 结合型光交换	226
7.6 光分组交换技术	228
7.6.1 光分组交换的概念	228
7.6.2 通用的光分组格式	228
7.6.3 OPS 节点结构	229
7.6.4 OPS 关键技术	231
7.6.5 光分组交换网络结构	233
7.6.6 基于分组传送的全业务交换传送的体系架构	236
7.7 光突发交换技术	239
7.7.1 光突发交换的概念	239
7.7.2 光突发交换的关键技术	241
7.7.3 OBS 的体系结构	245
7.7.4 OBS 与 OCS 及 OPS 技术的比较	247
7.8 光标签交换技术	248
7.8.1 光标签交换的产生	248
7.8.2 MPLS 技术	248
7.8.3 从 MPLS 演进到 GMPLS	250
7.9 ASON 智能光网络	252
7.9.1 ASON 的概念	252

7.9.2 ASON 关键技术	254
7.9.3 ASON 网络结构	254
习题与思考题	257
第 8 章 全光网络	258
8.1 全光网络的概念及特点	258
8.2 全光网络的关键技术	260
8.2.1 全光传输	260
8.2.2 光波分复用技术	265
8.2.3 全光交换	266
8.3 全光网络结构	268
8.3.1 全光网络的拓扑结构	268
8.3.2 全光网络的基本结构	270
8.4 全光网络的节点设备	271
8.4.1 光交叉连接设备	271
8.4.2 光分插复用器	273
习题与思考题	275
第 9 章 光网络的管理	276
9.1 电信管理网 TMN	276
9.1.1 TMN 概论	276
9.1.2 TMN 功能结构	278
9.1.3 TMN 信息结构	280
9.1.4 TMN 物理结构	282
9.1.5 TMN 网络结构和设备配置	283
9.2 简单网络管理协议 SNMP	284
9.2.1 SNMP 网管模型	284
9.2.2 SNMP 协议结构	285
9.2.3 SNMP 管理消息	286
9.2.4 SMI	287
9.2.5 MIB	288
9.3 SDH 网络管理	289
9.3.1 SDH 网络管理系统	289
9.3.2 SDH 网管的分层结构	290
9.3.3 SDH 网络管理功能	291
9.3.4 SDH 管理信息模型	293
9.3.5 SDH 的 ECC 协议栈	294
9.3.6 管理接口	295
9.4 OTN 网络管理	296
9.4.1 OTN 管理结构	296
9.4.2 OTN 管理功能	300
9.5 全光网络管理	301
9.5.1 全光网分层结构	302

9.5.2 全光网网管的特点和难点	302
9.5.3 全光网网管的功能	303
9.5.4 全光网网管系统的设计	303
9.5.5 全光网网管基于 SNMP 的具体实现	306
习题与思考题	307
参考文献	308

第1章 绪 论

本章主要介绍光纤通信及其网络的基本概念、主要技术、发展历程及未来发展的展望等，以期给读者一个关于光纤通信系统及网络技术的概况描述。

1.1 光纤通信的发展和应用

1.1.1 光纤通信的基本概念

光纤通信是指利用相干性和方向性极好的激光作为载波(也称光载波)来携带信息,并利用光导纤维(简称光纤)来进行传输的通信方式。

人们很早就提出了将需要传输的信息以某种方式调制在光载波上进行远距离传输的思想,但始终未能实现。这主要有两个原因:一是没有合适的光源,通常的自然光源及电光源的光谱很宽,且是非相干的,很难按无线电波的方式进行调制以实现通信;二是没有合适的传输媒质,光在大气中传播时受天气因素的影响极为严重,另外光信号在一般的介质材料中传播时的损耗极大。在20世纪60年代以前,即便在最好的光学玻璃中传播时,光信号的传输损耗也在1000 dB/km以上,显然在这样的介质中实现光信号的长距离传输是不现实的。

20世纪50年代末60年代初,激光的出现为实现现代意义上的光纤通信提供了合适的光源。激光器是光谱线极窄、方向性极好的相干光源,可以对其进行类似于无线电波那样的调制。在各种类型的激光器中,半导体激光器因其体积小、寿命长且价格低廉等特点而成为实用的和商品化的通信光源。

20世纪70年代初,低损耗光导纤维的问世为光通信提供了合适的传输媒质。1966年,英籍华裔科学家高锟博士指出,只要将石英玻璃中金属离子的含量大幅度降低,即可通过适当的拉丝工艺制造出传输损耗低于20 dB/km的玻璃纤维,这样的玻璃纤维就可以用于长距离的信号传输。1970年,美国康宁玻璃公司率先根据这种思路制造了世界上第一根低损耗光导纤维,其传输损耗低于20 dB/km。此后,低损耗光导纤维的研究及制造技术取得了飞速的发展,到了20世纪70年代末,在1310 nm波长上,石英光纤的传输损耗已降至0.4 dB/km;而在1550 nm波长上,传输损耗降至0.2 dB/km以下,这已接近了石英系光纤传输损耗的理论极限。

1.1.2 光纤通信的主要优点

由于光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的,因此与其他的通信方式相比有着明显的优越性。光纤具有传输容量大、传输损耗小、重量轻、不怕电磁干扰等许多其他传输媒质所不具有的优点。

(1) 传输容量大。光是频率极高的电磁波,以它作为信号的载体就可传输具有极宽频谱的信号。例如,在光纤中传输的激光属于近红外线范围,其波长在 $0.75\ \mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 之间,频率约为 $3\times 10^{14}\ \text{Hz}$,若以其频率的 $1/10$ 作为传输频带,则可传输约 10^{10} 个电话信号。因此光纤在其单位面积上具有极大的信号传输能力,即单位面积上的信息密度极高,所传输信息的容量极大。

光纤通信系统的传输容量取决于光纤特性、光源特性和调制特性。目前,光纤通信系统中使用的是以 SiO_2 为主要材料的光纤,而单模光纤有着极宽的频带宽度。例如,在光纤通信中适用的 $1310\ \text{nm}$ 波长段和 $1550\ \text{nm}$ 波长段,这两个传输低损耗区之间约有 $200\ \text{nm}$ 的宽度,在理论上可提供相当于 $30\ \text{THz}$ 的频段宽度。

光纤的色散特性是决定光纤通信系统带宽的因素之一。由于石英单模光纤在 $\lambda=1310\ \text{nm}$ 或 $\lambda=1550\ \text{nm}$ 处具有零色散特性,因此单模光纤都具有几十吉赫兹·千米的带宽。

在一根带状光缆中可以容纳几百根乃至几千根光纤,从而使通信线路的传输容量成百倍、千倍地增加。就单根光纤而言,采用波分复用技术或频分复用技术,或减小光源的光谱线宽度,或采用外调制方式等都是增加光纤通信系统传输容量的有效办法。

(2) 传输损耗小,中继距离长。目前单模光纤在 $1310\ \text{nm}$ 波长的窗口损耗约为 $0.35\ \text{dB/km}$, $1550\ \text{nm}$ 的窗口损耗约为 $0.2\ \text{dB/km}$,而且在相当宽的频带内各频率的传输损耗几乎一样,因此用光纤比用同轴电缆或波导管达到的中继距离要长得多。例如,在波长为 $1550\ \text{nm}$ 的色散位移单模光纤通信系统中,若传输速率为 $2.5\ \text{Gb/s}$,则中继距离可达 $150\ \text{km}$;若传输速率为 $10\ \text{Gb/s}$,则中继距离可达 $100\ \text{km}$ 。若在该系统中采用了光纤放大器和色散补偿光纤,则其中继距离还可以再增加。

(3) 泄漏小,保密性好。光信号在光纤中传输时,向外泄漏的光能量是很微弱的,难以被窃听,与无线通信和有线通信相比,具有较好的保密性,因此信息在光纤中传输是非常安全的。

(4) 节省了大量的有色金属。通常制造电缆需要消耗大量的铜和铅等有色金属,以四管中同轴电缆为例, $1\ \text{km}$ 四管中同轴电缆约需 $460\ \text{kg}$ 的铜,而制造 $1\ \text{km}$ 的光纤,只需几十克的石英即可,而且制造光纤的石英(SiO_2)材料资源丰富,价格便宜。

(5) 抗电磁干扰性能好。光纤由 SiO_2 材料制成,它不会受到各种电磁场的干扰,强电、雷击等也不会对光纤的传输性能产生影响,甚至在核辐射的环境中,光纤通信仍能正常进行。因此,光纤通信在电力输配、电气化铁路、雷击多发地区、核试验等环境中的应用就更能体现其优越性。

(6) 重量轻,可挠性好,敷设方便。在传输同一信息量时,光缆的重量比其他通信电缆的重量要轻得多,每根光纤的直径很小,制成光缆后可充分地利用地下管道进行敷设。例如二次套塑的光纤,即使将它以几厘米的曲率半径弯曲也不会折断,在施工时就可以采用与电缆相同的敷设技术进行敷设。

总之, 光纤通信不仅在技术上具有较大的优越性, 而且在经济上亦具有巨大的竞争能力, 因此在通信领域中将会发挥越来越重要的作用。

1.1.3 光纤通信的发展现状

20 世纪 70 年代以来, 光纤通信已经取得了突飞猛进的发展。回顾光纤通信的发展历程, 可以看到光纤通信在提高传输速率和增加通信容量上下了很大的功夫。目前, 10 Gb/s 的光纤通信系统已经商用化, 而 40 Gb/s 的光纤通信系统也即将投入使用。采用波分复用技术, 即在一根光纤上同时传输多个光载波, 可成倍地增加通信容量。另外, 提高中继距离也是光纤通信研究的方向, 其采用的技术主要是提高接收机的灵敏度和入纤光功率。提高接收机灵敏度的最有效的方法是采用相干光通信方式, 而提高入纤光功率最有效的方法是采用半导体激光放大器或光纤放大器。展望未来, 光纤通信系统仍将在超高速及超长距离无中继的传输上下功夫。

纵观光纤通信的发展过程, 可以看到光纤通信的发展主要表现在以下几个方面:

(1) 由单波长通道向多波长通道过渡。下一代光纤通信系统将普遍地采用波分复用 WDM 技术, 使得系统传输的总容量提高到几百吉比特每秒及以上, 而中继距离也达数百千米乃至数千千米。

(2) 用户网络的光纤化。光纤通信的重要领域之一是实现电信网络的全光纤化, 而实现通信网络的全光纤化所面临的困难是光纤用户网络, 这使得光纤用户网络的研究成为近年来光纤通信领域中的研究热点。目前, 由于光纤用户网络的成本较高, 在价格上难以与电缆网络竞争, 加之图像压缩技术的发展, 电缆网络较窄的传输带宽还未成为其致命的弱点, 因此在用户网络中电缆仍居于主要地位。随着光纤及光器件成本的降低以及用户对多种宽带业务需求的增长, 光纤用户网络会取得突破性的进展, 电信网络的全光纤化已为期不远了。

(3) 光交换节点将取代电交换节点。由于采用波分复用技术使得传输速率得到了极大的提高, 因此电交换节点的速率成了影响整个网络传输速率的瓶颈, 电交换机将被光交换机所取代。所谓光交换是指对光纤传送的光信号直接进行交换。光交换是在光域中完成光交换功能的, 而无需将光信号转换成电信号。由于输入信号和输出信号都是光信号, 因而光交换有效地减少了信号的时延, 增大了系统的吞吐量。

(4) 相干光通信是未来的光纤通信方式。它与传统的强度调制-直接检测(IM-DD)系统相比, 主要差别在于其接收机采用的是外差式接收或零差式接收, 同时在接收机中增加了本振光源和光混频器, 具有了混频增益的特性, 从而使得系统的接收灵敏度极高, 而且具有出色的波长选择性。这些优点使得相干光通信必将在波分复用系统, 尤其是密集波分复用系统中发挥巨大的作用。相干光通信对光源的光谱宽度、光源的频率稳定性以及光的偏振(极化)特性, 光纤的传输损耗、色散、偏振状态都提出了十分苛刻的要求, 因而其目前尚未实用化。随着时间的推移, 上述问题必将得到解决。在不久的将来, 人们就可以像现在调节无线电接收机那样, 通过调节光接收机的本振光源波长, 从众多的信息通道中极为方便地调出所需要的任何信息。

(5) 孤子通信与全光系统。光脉冲在光纤中传输时, 光纤的色散效应会导致光脉冲展宽, 从而限制了传输速率和中继距离。而光纤的非线性作用恰好相反, 它使脉冲在传输过

程中变窄,并最终导致脉冲破裂,从而限制了入纤光功率。如果同时利用上述的两种作用,那么在一定条件下可以使光纤的非线性效应与色散效应相互抵消,从而保持光脉冲在传播过程中不变形而形成所谓的孤子。利用光孤子通信时,其传输速率可高达 1 Tb/s 。将光孤子传输技术与光放大技术相结合即可抛弃传统的光—电—光再生中继方式,以实现超长距离、超高速的全光通信,而其实现的关键就在于光孤子的产生、光孤子的编码调制技术以及光放大技术。目前,虽然光孤子通信的真正实用化还有待时日,但是光孤子通信的诱人前景必将吸引各国的科学家、工程师不遗余力地去解决在其实用化过程中遇到的难题。可以预见,以光孤子通信为标志的全光通信时代必将到来。

1.1.4 光纤通信系统的构成

目前实用的光纤通信系统较多采用的是数字编码、强度调制-直接检测的通信系统(IM-DD系统),这种系统的框图如图1-1所示。

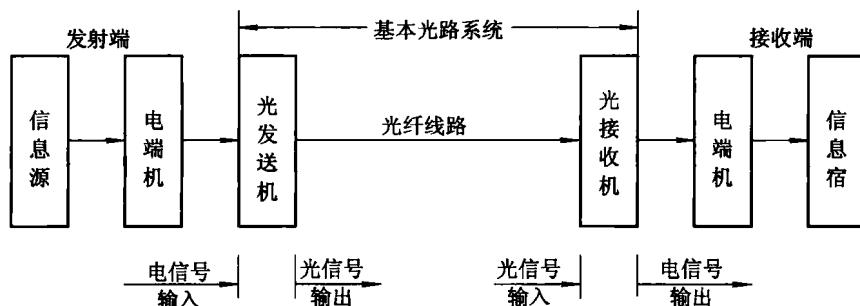


图 1-1 光纤通信系统的框图

图1-1所示的光纤通信系统是一个单方向传输的示意图,其反方向传输的结构也是相同的。在图1-1中,电端机即为复用设备(准同步复用或同步复用),其作用是对来自信息源的信号进行处理,如模/数变换、多路复用等。光发送机、光纤线路和光接收机构成了可作为独立的“光信道”单元的基本光路系统。如果给其配置适当的接口设备,那么就可以将其接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)的发射端与接收端之间;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,在光纤线路中接入光纤放大器组成的光中继长途系统;配置波分复用器和解复用器组成的大容量波分复用系统;使用耦合器或光开关组成的无源光网络等。下面简要介绍基本光路系统的三个组成部分。

(1) 光发送机。光发送机的作用是把输入的电信号转换成光信号,并将光信号最大限度地注入光纤线路。光发送机由光源、驱动器和调制器组成。光发送机的核心是光源,对光源的要求是其输出功率要足够大,调制速率要高,光谱线宽度和光束发散角要小,输出光功率和光波长要稳定,器件的寿命要长。目前,广泛使用的光源有半导体激光器(或称激光二极管,LD)和半导体发光二极管(LED)。普通的激光器光谱线宽度较宽,是多纵模激光器,在高速率调制下激光器的输出频谱较宽,从而限制了传输的码速和中继距离。因此,一种光谱线宽度很窄的单纵模分布反馈(DFB)激光器已经逐渐被广泛应用。

光发送机把电信号转换成光信号的过程是通过电信号对光源进行调制而实现的。光调

制有直接调制和间接调制(也称外调制)两种。直接调制是利用电信号注入半导体激光器或发光二极管从而获得相应的光信号的,其输出功率的大小随信号电流的大小而变化,这种方式较简单且容易实现,但其调制速率会受到激光器特性的限制。外调制是把激光的产生和调制分开来进行的,在激光形成后再加载调制信号,是用独立的调制器对激光器输出的激光进行调制的。外调制方法在相干光通信中得到了应用。

(2) 光纤线路。光纤线路是光信号的传输媒质,可把来自发送机的光信号以尽可能小的衰减和脉冲展宽传送到接收机。对光纤的要求是其基本传输参数衰减和色散要尽可能地小,并要有一定的机械特性和环境特性,如工程中使用的光缆是由许多根光纤绞合在一起组成的。整个光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器等组成。

目前光纤线路中使用的光纤均为石英光纤,在石英光纤的损耗-波长特性中有三个低损耗的波长区,即波长分别为 850 nm、1310 nm 和 1550 nm 的三个低损耗区,因此光纤通信系统的工作波长只能选择在这三个波长区,而激光器的发射波长、光检测器的响应波长都应与其一致。这三个低损耗区相对应的损耗分别小于 2 dB/km、0.4 dB/km 和 0.2 dB/km。

石英光纤有多模光纤和单模光纤两种,单模光纤的传输性能比多模光纤的好,因此在大容量、长距离的光纤传输系统中都采用单模光纤作为传输线路。针对不同要求的光纤通信系统,所使用的光纤类型有 G.651 光纤(多模光纤)、G.652 光纤(常规单模光纤)、G.653 光纤(色散位移光纤)、G.654 光纤(低损耗光纤)和 G.655 光纤(非零色散位移光纤)等。

(3) 光接收机。光接收机的功能是把由发送机发送的、经光纤线路传输后输出的已产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号,并经放大、再生恢复为原来的电信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成。对光检测器的要求是其响应度要高、噪声要低、响应速度要快。目前广泛使用的光检测器有光电二极管(PIN)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是通过光检测器实现的。光检测器检测的方式有直接检测和外差检测两种。直接检测是由光检测器直接把光信号转换为电信号。外差检测是在接收机中设置一个本地振荡器和一个混频器,使本地振荡光和光纤输出的光进行混频产生差拍而输出中频信号,再由光检测器把中频信号转换成电信号。在外差检测方式中,对本地激光器的要求很高,要求光源是频率非常稳定、光谱线宽度很窄、相位和偏振方向可控制的单模激光器,其优点是接收灵敏度高。目前光纤通信系统中普遍采用强度调制-直接检测方式,而外差检测方式用在相干光纤通信中,虽然外调制-外差检测方式的技术较复杂,但其具有传输速率高、接收灵敏度高等优点,是一种有应用前途的通信方式。

衡量接收机质量的主要指标是接收灵敏度,它表示在一定误码率的条件下,接收机调整到最佳状态时接收微弱信号的能力。接收机的噪声是影响接收灵敏度的主要因素。

对于长距离传输的光纤传输系统,在传输途中还需要接入光中继器,其作用是将经过光纤长距离衰减和畸变后的微弱光信号放大和整形,并再生成具有一定强度的光信号继续送向前方,以保证良好的通信质量。以往光纤通信系统中的光中继器都是采用光—电—光信号的形式,即将接收到的光信号用光电检测器变换成电信号,经放大、整形、再生后再对光源进行调制才能将电信号变换成光信号重新发出,而不是直接把光信号放大。但随着光放大器(如掺铒光纤放大器)的开发以及技术日趋成熟,将光信号直接放大传输已成为可能,也就是说采用光放大器的全光中继和全光网络已为期不远了。

1.1.5 光纤通信系统的应用

光纤可以传输数字信号,也可以传输模拟信号,在通信网络、广播电视网络、计算机网络以及其他的数据传输系统中都得到了广泛的应用。

光纤通信系统的各种应用概括如下:

(1) 通信网络。通信网络主要用于遍及全球的电信网中语音和数据的通信,包括全球通信网(国家和国家间的光缆干线)、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、省级干线及县以下的支线和市话中继通信系统)、专用网(如电力、铁道、国防通信等的光缆系统)和特殊的通信网络(如石油、化工、煤矿等易燃易爆环境下使用的光缆通信系统)。

(2) 计算机网络中的局域网和广域网,如光纤以太网、路由器之间的高速传输链路等。

(3) 有线电视网络,如有线电视的干线和分配网;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等。

(4) 综合业务的光纤接入网络。它分为有源接入网和无源接入网,可实现电话、数据、视频及多媒体业务的接入,还可提供各种各样的社区服务等。

1.2 光纤通信网络

1.2.1 光纤通信网络的基本概念

两个用户之间需要通信时,须利用通信系统来完成。也就是说,若让 A、B 两地的用户互相通信,则必须在他们之间建立一个通信系统。对于离散分布的 n 个用户,若要让其中任意两个用户能互相通信,最简单的方法是用通信系统把各用户分别一一连接起来,这就需要建立 $n(n-1)/2$ 个通信系统,从而形成了一个连接多个用户的网状结构,即通信网络,简称通信网,如图 1-2 所示。

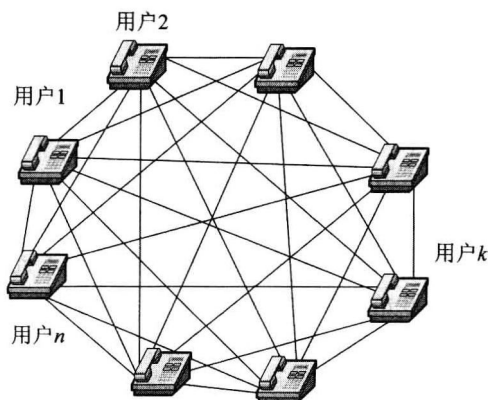


图 1-2 n 个用户相互通信无集中交换的网状结构

对于光纤通信网络,若从其所承载的通信业务来分,则有电话网、电报网、传真通信网、计算机数据网、图像通信网及有线电视网等;若按其所服务区域的范围来分,可分为

长途骨干网、本地网以及用户接入网。

光纤通信网络实质上是由用户终端设备、传输设备、交换设备等硬件系统以及相应的信令系统、协议、标准、资费制度与质量标准等软件系统构成的，其主要组成部分介绍如下：

(1) 用户终端设备是以用户线路为传输信道的终端设备，也称为终端节点。

(2) 传输设备是为用户终端和业务网提供传输服务的电信终端，主要包括光收信机和发信机设备，PDH 准同步数字系列中的 PCM 复接设备，SDH 同步数字系列中的终端复用器等各种复用设备。

(3) 交换设备用于对用户群内各用户终端按需求提供相应的临时传输信道的连接，并控制传输信号的流量和流向，以达到共用电信设备、提高设备利用率的目的。例如，电话通信系统中的程控交换机，数据通信中的分组交换机，宽带通信系统中的 ATM(异步传输模式)交换机及全光通信系统中即将问世的光交换机等。

(4) 信令系统是光纤通信网络的神经系统。比如，电话要接通，就必须传递和交换必要的信令以完成各种呼叫处理、接续、控制与维护管理等功能。信令系统可使网络作为一个整体而正常运行，有效地完成任何用户之间的通信。

(5) 协议是光纤通信网中用户与用户及用户与网络资源之间完成通信或服务所必须遵循的原则和约定的共同“语言”。这种语言使通信网络能够合理地运行，可正确地控制。

(6) 标准是由权威机构所制定的规范。

1.2.2 光纤通信网络的发展历程

在 20 世纪 70 年代，随着低损耗石英光纤的研制，光纤的传输带宽不断地增加、光源和光/电检测的性能不断地改善，光纤通信系统已由起步逐渐地走向成熟。到了 1976 年，第一个传输速率为 44.7 Mb/s 的光纤通信系统在美国亚特兰大市进入了商业化运作。

20 世纪 80 年代是光纤通信迅速发展的时代。随着光纤通信从 0.85 μm 波段转向 1.3 μm 波段，由多模光纤转向单模光纤，各种传输速率的光纤通信系统在世界各地建立起来，光缆很快取代了电缆而成为电信网中重要的组成部分。

在 20 世纪 90 年代，随着人类信息化时代的到来，人们对通信的需求量迅猛增长。然而，由于受到电子信息处理的瓶颈限制，单信道速率要达到数 10 Gb/s 已经非常困难，因此光纤通信系统出现了负载能力接近饱和的情况。随着掺铒光纤放大器(EDFA)的发明，波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)技术在 90 年代中期以后逐渐成熟并进入商业化运作，并且采用多通道复用传输技术，使 WDM 为大容量光纤通信的发展奠定了基础。

光网络的发展不仅仅是简单的光纤传输链路，它是在光纤提供的大容量、长距离、高可靠性的传输媒质的基础上，利用光和电子控制技术实现多节点网络的互联和灵活调度。从光网络的发展历史来看，光网络可以分为三代：

第一代光网络以 SDH/SONET 为代表，它在历史上第一次实现了全球统一的光网络互联技术，规范了光接口，而且定义了对光信号质量的监控、故障定位和配置等重要网络管理功能。SDH/SONET 采用光传输系统和电子节点的组合，光技术用于实现大容量的信息传输，光信号在电子节点中转换为电信号，在电层上实现交换、选路和其他智能。由于