



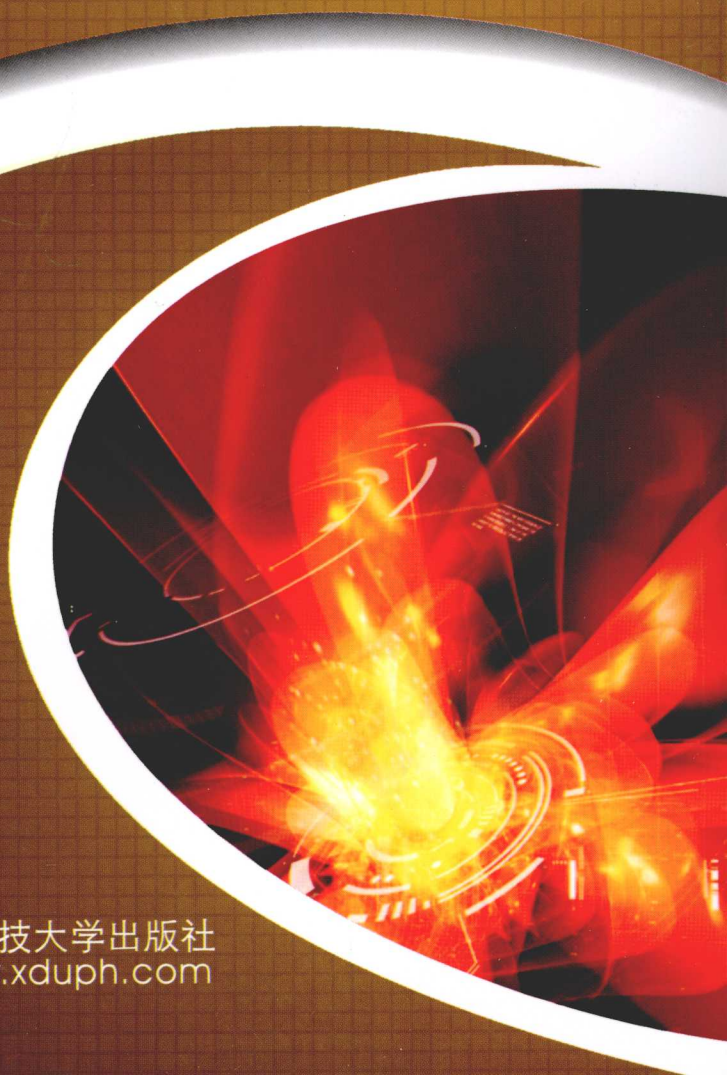
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

光纤通信网

李跃辉 王 纓 沈建华 编著
李齐民 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

光纤通信网

李跃辉 王 纓 沈建华 编著

李齐良 主审

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书紧密结合光通信的发展,全面系统地介绍了光纤通信网络及其主要技术。本书包括两大部分,第一部分是光纤通信系统组成及其主要技术的介绍,包括光纤结构及传输特性、各类有源和无源光器件的工作原理、光纤通信系统的组成以及光链路相关技术;第二部分紧扣光纤通信技术的发展方向,重点讨论了光传送网、光接入网、城域光网络、智能光网络、全光通信网和光互联网等光纤通信网络技术。

本书可作为高等学校电子、通信和信息类专业的教学用书,也可作为相关领域科技人员和管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信网/李跃辉,王纓,沈建华编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.11

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2296-5

I. 光… II. ①李… ②王… ③沈 III. 光纤通信—通信网—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 099870 号

策 划 毛红兵

责任编辑 南 景 毛红兵

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 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 17.5

字 数 409千字

印 数 1~4000册

定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-2296-5/TN·0524

XDUP 2588001-1

*** 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。

西安电子科技大学出版社
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材
编审专家委员会名单

主任: 杨 震 (南京邮电大学校长、教授)

副主任: 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

通信工程组

组 长: 张德民 (兼)

成 员: (成员按姓氏笔画排列)

王 晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜 兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康 健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

电子信息工程组

组 长: 秦会斌 (兼)

成 员: (成员按姓氏笔画排列)

王 荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴 谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张 彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周 杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷 加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

项目策划: 毛红兵

策 划: 曹 昞 寇向宏 杨 英 郭 景

前 言

光纤通信自诞生以来,由于其具有的传输容量大、传输距离远和对业务透明等许多优点,已经成为现代信息社会最为基础的技术之一。随着技术的不断发展,光纤通信正从传统的承载网络向业务网络演进,光纤通信系统的结构也由点到点向网络化发展。本书全面系统地介绍了光纤通信网络的基本原理、主要技术和实际应用。

本书共分为 10 章:第 1 章概述了光纤通信以及光纤通信网络的基本原理、主要技术特点和发展方向;第 2 章介绍通信光纤的结构、传输原理和特性,光源、光检测器以及无源光器件的工作原理和特性;第 3 章介绍光纤通信系统的结构和组成,包括光发送机和光接收机的组成及性能、光中继器的基本原理和特性以及光纤通信系统的性能和设计;第 4 章介绍光系统链路技术,包括光放大器、色散补偿和管理技术、相干光通信、光孤子通信以及光波分复用、光频分复用、光时分复用和光码分复用等各种光复用技术原理;第 5 章介绍光传送网,包括传送网的体系结构、SDH 传送网和光传送网;第 6 章介绍城域光网络的基本概念、主要特点和关键技术;第 7 章介绍光纤接入网的基本概念、关键技术以及各类有源光纤接入网和无源光纤接入网;第 8 章介绍全光网络技术,包括全光网的特性和网络结构、光交换技术、节点技术以及波长变换技术;第 9 章介绍智能光网络,包括自动交换光网络的体系结构、路由和信令技术、生存性和业务实现;第 10 章介绍光互联网技术,包括光互联网的概念、多协议标签交换技术和新型光互联网技术。

本书以基本概念、系统结构和关键技术为阐述重点,力求在概念和原理的讲述上严格、准确,同时注意理论适中,注重实用,尽量少用繁杂的数学推导,内容安排上力求体现教学的科学性、系统性、完整性和技术的先进性,以便于读者阅读和自学。

编者参考、吸取和借鉴了国内外有关著作、教材和科研成果,相关文献已列在书末的参考文献之中,在此一并对有关作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2009 年 5 月

目 录

第 1 章 光纤通信网概述	1	2.4.5 光开关	51
1.1 光纤通信的发展和应用	1	2.4.6 光纤光栅	51
1.1.1 光纤通信的基本概念	1	习题与思考题	53
1.1.2 光纤通信的主要优点	2	第 3 章 数字光纤通信系统	55
1.1.3 光纤通信的发展现状	3	3.1 光纤通信系统的结构	55
1.1.4 光纤通信系统的构成	4	3.1.1 数字光纤通信系统的组成	55
1.1.5 光纤通信系统的应用	6	3.1.2 数字传输体制	56
1.2 光纤通信网络	6	3.1.3 调制信号的格式	57
1.2.1 光纤通信网络的基本概念	6	3.2 光发送机	59
1.2.2 光纤通信网络的技术特点	7	3.2.1 输入电路	59
1.2.3 光纤通信网络的发展方向	8	3.2.2 光发送电路	60
习题与思考题	10	3.2.3 光发送机的性能指标	63
第 2 章 光纤和光器件	11	3.3 光接收机	64
2.1 光纤	11	3.3.1 光接收放大电路	64
2.1.1 光纤的结构和种类	11	3.3.2 定时再生电路	66
2.1.2 光纤的传输原理	12	3.3.3 输出电路	67
2.1.3 光纤中的模式传输	14	3.3.4 光接收机的性能指标	67
2.1.4 光缆的结构和类型	18	3.4 光电混合中继器	69
2.1.5 光纤的传输特性	19	3.5 数字光纤通信系统的性能	71
2.2 光源和光调制器	27	3.5.1 光纤线路系统的传输损伤	71
2.2.1 光电转换器件的工作原理	27	3.5.2 数字传输参考模型	74
2.2.2 半导体光源的工作原理	30	3.5.3 差错(误码)性能规范	75
2.2.3 半导体光源的稳态特性	32	3.5.4 抖动和漂移性能规范	78
2.2.4 光源调制	35	3.5.5 数字光纤线路系统的可靠性	80
2.3 光检测器	39	3.6 光纤线路系统设计	82
2.3.1 半导体光检测器	39	3.6.1 光纤线路系统设计方法	82
2.3.2 本征型和雪崩型光检测器	40	3.6.2 IM-DD 系统最大中继距离 的计算	83
2.3.3 光检测器的工作特性	41	习题与思考题	86
2.4 无源光器件	45	第 4 章 高速率大容量光纤传输技术	89
2.4.1 光纤连接器	46	4.1 光纤通信复用技术	89
2.4.2 光纤耦合器	47	4.1.1 光波分复用技术	89
2.4.3 光衰减器	49		
2.4.4 光隔离器与光环行器	50		

4.1.2 光频分复用技术	92	6.3.1 MSTP 技术的发展历程	144
4.1.3 光时分复用技术	93	6.3.2 MSTP 关键技术	145
4.1.4 光码分复用技术	93	6.4 弹性分组环 RPR	148
4.2 光放大器	95	6.4.1 弹性分组环原理	148
4.2.1 半导体光放大器	96	6.4.2 RPR 的技术特点	151
4.2.2 掺杂光纤放大器	97	6.4.3 弹性分组环在 MSTP 中的应用	153
4.2.3 非线性光纤放大器	99	习题与思考题	154
4.3 色散补偿和管理技术	102		
4.3.1 降低色散影响的主要措施	102		
4.3.2 色散补偿技术	103		
4.3.3 色散管理	106		
4.4 相干光通信技术	107		
4.5 光孤子通信技术	110		
习题与思考题	112		
第 5 章 光传送网	113	第 7 章 光纤接入网	155
5.1 传送网的体系结构	113	7.1 光纤接入原理	155
5.1.1 传送网的功能结构	113	7.1.1 接入网的基本概念	155
5.1.2 传送网的生存性技术	116	7.1.2 光纤接入网的结构及功能	158
5.1.3 传送网的同步和管理	118	7.1.3 光纤接入网的分类	162
5.2 SDH 传送网	119	7.2 光纤接入网关键技术	163
5.2.1 SDH 传送网的结构	119	7.2.1 突发收发技术	163
5.2.2 SDH 网络的保护	124	7.2.2 突发同步技术	164
5.2.3 SDH 网络的同步和定时	129	7.2.3 测距技术	165
5.2.4 SDH 的网络管理	132	7.2.4 多址接入技术	166
5.3 光传送网	134	7.2.5 服务质量和安全技术	167
5.3.1 光传送网的分层结构	134	7.3 有源光纤接入网 AON	167
5.3.2 光传送网的原子功能模型	135	7.3.1 AON 的基本概念	167
5.3.3 光传送网的节点技术	135	7.3.2 基于 PDH 的 AON	168
5.3.4 光传送网的网络保护、恢复 和管理	137	7.3.3 基于 SDH 的 AON	168
习题与思考题	138	7.4 无源光纤接入网 PON	169
		7.4.1 PON 的基本概念	169
		7.4.2 基于 ATM 的 APON	170
		7.4.3 基于 Ethernet 的 EPON	172
		7.4.4 千兆比特兼容的 GPON	175
		7.5 光纤接入网中的光纤和光器件	184
		7.5.1 光纤接入网中的光纤光缆	184
		7.5.2 光纤接入网中的光器件	185
		习题与思考题	185
第 6 章 城域光网络	139	第 8 章 全光网络技术	186
6.1 城域网概述	139	8.1 全光网的特性与结构	186
6.1.1 城域网的定义	139	8.1.1 全光网的概念	186
6.1.2 城域网的业务需求和技术特点	140	8.1.2 全光网的性能和类型	187
6.2 城域网主要技术	141	8.2 全光网的结构	188
6.2.1 稀疏波分复用技术	141	8.2.1 全光网的构成	188
6.2.2 ATM 技术	142	8.2.2 全光网的拓扑结构	189
6.2.3 城域以太网技术	142	8.3 全光网络交换技术	192
6.2.4 城域多业务传送技术	143	8.3.1 空分光交换	192
6.3 多业务传送平台(MSTP)技术	143		

8.3.2 时分光交换	193	9.5.3 服务等级约定 SLA	233
8.3.3 波分光交换	193	习题与思考题	233
8.3.4 码分光交换	194		
8.3.5 复合光交换	195	第 10 章 光互联网技术	235
8.4 全光网络节点	195	10.1 概述	235
8.4.1 光交叉连接器 OXC	195	10.1.1 Internet 的高速增长	235
8.4.2 光分插复用器 OADM	201	10.1.2 新型增值服务的涌现	236
8.4.3 全光波长变换器	205	10.1.3 高速宽带组网技术的需要	236
习题与思考题	208	10.1.4 光互联网观念的产生	237
第 9 章 智能光网络	210	10.2 光互联网技术	238
9.1 智能光网络概述	210	10.2.1 光网络数据业务实现技术	238
9.2 自动交换光网络 ASON	211	10.2.2 IP over ATM	239
9.2.1 ASON 网络的基本结构	211	10.2.3 IP over SDH	241
9.2.2 ASON 中的连接	212	10.2.4 IP over WDM	242
9.2.3 ASON 传送平面	213	10.2.5 光互联网发展方向	244
9.2.4 ASON 控制平面	214	10.3 多协议标签交换技术	246
9.2.5 ASON 管理平面	217	10.3.1 多协议标签交换技术的背景	246
9.3 ASON 路由和信令	218	10.3.2 MPLS 体系结构	246
9.3.1 通用多协议标签交换 GMPLS	218	10.3.3 MPLS 流量工程技术	249
9.3.2 ASON 路由技术	221	10.3.4 MPLS 光域扩展	253
9.3.3 ASON 信令技术	223	10.4 新型光互联网技术	254
9.3.4 ASON 链路管理技术	224	10.4.1 Packet over WDM	255
9.4 ASON 生存性	225	10.4.2 多协议波长标签交换技术	257
9.4.1 传送平面生存性	226	10.4.3 光突发标签交换技术	260
9.4.2 控制平面生存性	227	10.4.4 光分组交换技术	262
9.4.3 多层网络生存性	228	10.4.5 全光标签分组交换技术	264
9.5 ASON 业务	230	习题与思考题	266
9.5.1 按需带宽提供 BoD	230		
9.5.2 光虚拟专网	232	参考文献	267

第1章 光纤通信网概述

光纤通信是将要传送的电报、电话、图像和数据等信号调制到光载波上,以光纤作为传输媒介的通信方式。它的诞生和发展给世界通信技术带来了划时代的革命,它使高速率、大容量的通信成为可能。作为现代通信主要传输手段的光纤通信,在现代通信网中起着重要作用。

本章简要介绍光纤通信的发展、特点和系统组成及各部分的作用,分析光纤通信网络的技术特点及其发展趋势。

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(光纤)来进行传输的通信方式。

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很早就已提出,但始终未能实现。这主要有两方面的原因。其一是没有合适的光源,通常的自然光源及电光源光谱很宽,是非相干的,很难按无线电波方式进行调制以实现通信;其二是没有合适的传输媒质,光在大气中传播时受天气影响极为严重,同时光信号在一般的介质材料中传播时损耗极大。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每公里1000 dB以上,在这样的介质中实现光信号的长距离传输显然也是不现实的。

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通信提供了合适的光源。激光器是谱线极窄、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,半导体激光器由于其体积小、寿命长、价格低廉等特点而成为实用化、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,只要将石英玻璃中的金属离子含量大幅度降低,即通过适当的拉丝工艺可制造出损耗低于20 dB/km的玻璃纤维,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,其损耗低于20 dB/km。此后,低损耗光导纤维(简称光纤)的研究及制造技术取得了飞速的进步,到了20世纪70年代末,在1310 nm波长上,石英光纤的损耗已降至0.4 dB/km;而

在 1550 nm 波长上, 损耗已降至 0.2 dB/km 以下, 这已接近石英系光纤损耗的理论极限。

由于半导体激光器和低损耗光纤的制造成功, 20 世纪 70 年代初, 一种崭新的通信方式——光纤通信问世, 并得到了迅速发展。光纤通信的问世是通信史上的一场具有划时代意义的变革。

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, 因此比起其他通信方式有其明显的优越性。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极宽的信号频谱。在光纤中传输的激光属于近红外线范围, 波长在 $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 频率约为 3×10^{14} Hz。若以其十分之一作为传输频带, 则可传约 10^{10} 个电话。因此光纤在单位面积上有极大的信号传输能力, 即单位面积上的信息密度极高, 传输容量极大。

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。根据 SiO_2 光纤的损耗-波长特性曲线, 单模光纤有着极宽的频带宽度。通信中适用的 1310 nm 波长段和 1550 nm 波长段两个低损耗区共有约 200 nm 宽的低损耗区, 理论上可提供相当于 30 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。

在一根光缆中可以容纳几百根乃至几千根光纤的带状光缆早已实现, 使线路传输容量成百倍、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、减小光源的谱线宽度、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 nm 波长窗口损耗约为 0.35 dB/km, 1550 nm 窗口损耗约为 0.2 dB/km。而且在相当宽的频带内各频率的损耗几乎一样, 因此用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得得多。波长为 1550 nm 的色散位移单模光纤通信系统, 若传输速率为 2.5 Gb/s, 则中继距离可达 150 km; 若传输速率为 10 Gb/s, 则中继距离可达 100 km; 若采用光纤放大器、色散补偿光纤, 则中继距离还可增加。

(3) 泄漏小, 保密性好。光在光纤中传输时, 向外泄漏的光能很微弱, 难以被窃听, 因此比无线、有线通信有较好的保密性, 信息在光纤中传输非常安全。

(4) 节省大量有色金属。制造通常的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 km 四管中同轴电缆约需 460 kg 铜, 而制造 1 km 光纤, 只需几十克石英即可。同时制造光纤的石英(SiO_2)资源丰富而价格便宜。

(5) 抗电磁干扰性能好。光纤由 SiO_2 材料制成, 它不受各种电磁场的干扰。强电、雷击等也不会影响光纤的传输性能。甚至在核辐射的环境中, 光纤通信仍能正常进行, 这是通常的电缆通信所不能比拟的。因此, 光纤通信在电力输配、电气化铁路、雷击多发地区、核试验等环境中应用更能体现其优越性。

(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, 制成光缆后可充分利用地下管道。有二次套塑的光纤, 即使以几厘米的曲率半径弯曲也不会断, 施工时可以采用与电缆相同的敷设技术进

行敷设。

通信设备的重量轻和体积小,对其在军事、航空和宇宙飞船等方面的应用具有特别重要的意义。

总之,光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性,而且在经济上亦具有巨大的竞争能力,因此在通信领域中将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通信容量上下了很大的功夫。目前,10 Gb/s的系统已经商用化,40 Gb/s的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多个光载波,可成倍地提高通信容量。光纤通信研究的另一个方向则是提高中继距离,采用的技术主要是提高接收机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,而提高入纤光功率的最有效的方法是采用半导体激光放大器或光纤放大器。展望未来的光纤通信系统,仍将在超高速及超长距离无中继传输上下功夫。

纵观光纤通信的发展过程,可以看到今后光纤通信将主要在以下几个方面发展:

(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公里乃至数千公里。

(2) 用户网络的光纤化。光纤通信的另一个重要领域是实现电信网的全光纤化。实现通信网的全光纤化最困难的是光纤用户网,因而光纤用户网是近年来光纤通信领域中的研究热点。在未来的用户网中需要传输多种宽带业务,现在的电缆网可能无法担此重任,向全光纤网过渡是大势所趋。目前,由于光纤用户网成本较高,在价格上难以与电缆网竞争,加之图像压缩技术的进展、电缆网较窄的传输带宽还未成为致命的弱点,因此在用户网中电线仍居于主要地位。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,光纤用户网会取得突破性进展,电信网的全光纤化已为期不远了。

(3) 光交换节点将取代电交换。由于采用波分复用技术使得传输速率极大提高,因此原有电交换节点的速率成了整个网络的瓶颈,将被光交换机取代。所谓光交换是指对光纤传送的光信号直接进行交换。光交换在光域中完成光交换功能,而无需将光信号转换成电信号,输入、输出都是光信号,因而光交换有效地减少了延时,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外差式接收或零差接收,在接收机中增加了本振光源和光混频器,具有混频增益的特性,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谱宽、光源的频率稳定性以及光的偏振(极化)特性,光纤的损耗、色散、偏振状态都提出了十分苛刻的要求,因而目前尚未实用化。随着时间的推移,上述问题必将得到解决。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,即可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则刚好相反,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。如果同时利用上述两种作用,则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,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,实现超长距离、超高速的全光通信,其关键在于光孤子的产生、光孤子的编码调制技术以及光放大技术。目前,虽然距光孤子通信的真正实用化还有待时日,但光孤子通信的诱人前景必将吸引世界各国科学家、工程师不遗余力地去解决实用化过程中的难题。可以预料,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。

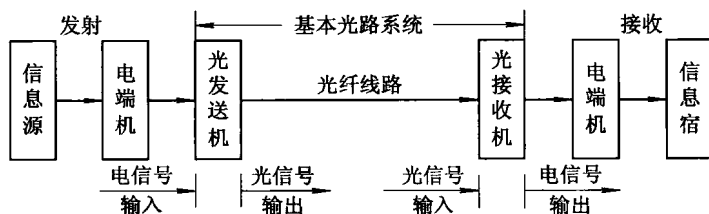


图 1-1 光纤通信系统原理框图(单向传输)

图 1-1 所示的是一个方向的传输,反方向传输的结构是相同的。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,例如模/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,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,对光源的要求是输出功率足够大,调制速率高,光谱线宽度和光束发散角小,输出光功率和光波长要稳定,器件寿命长。目前,最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。一种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,容易实现,但调制速率受激光器特性所限制。外调制是把激光的产生和调制分开,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小,并要有一定的机械特性和环境特性。工程中使用的是由许多根光纤绞合在一起组成的光缆。整个光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器等组成。

目前使用的光纤均为石英光纤。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、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,激光器的发射波长、光检测器的响应波长都与其一致。这三个低损耗区的损耗分别小于 2 dB/km、0.4 dB/km 和 0.2 dB/km。

目前使用的石英光纤有多模光纤和单模光纤。单模光纤的传输性能比多模光纤好,在大容量、长距离的光纤传输系统中都采用单模光纤。

为适合于不同要求的光纤通信系统,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响应度高、噪声低、响应速度快。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,再经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、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很高。目前使用的光纤通信系统中,普遍采用强度调制-直接检测方式。外差检测用在相干光纤通信中,虽然外调制-外差检测的方式技术复杂,但其有着传输速率高、接收灵敏度高等优点,所以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。它表示在一定的误码率条件下,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。

对于长距离的光纤传输系统,中途还需要中继器,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、整形,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、再生后再调制光源,将电信号变

换成光信号重新发出，而不是直接把光放大。但随着光放大器(如掺铒光纤放大器)的开发、成熟、使用，光的直接放大已成为可能，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。

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。光纤在通信网、广播电视、计算机网以及其他数据传输系统中都得到了广泛的应用。

光纤通信的各种应用概括如下：

(1) 通信网，主要用于遍及全球的电信网中作为语音和数据通信，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，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；自动控制系统的数据传输等。

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

1.2 光纤通信网络

1.2.1 光纤通信网络的基本概念

两用户间需要通信时，须利用通信系统来完成，也就是说，欲让 A、B 两地的用户互相通信，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”。

光纤通信网络从承载的通信业务来分，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；按服务区域范围分为长途骨干网、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和相应的信令系统、协议、标准、资费制度与质量标准等软件构成的。

用户终端设备是以用户线为传输信道的终端设备，也称为终端节点。

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、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。

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连接，并控制信号的流量、流向，以达到公用电信设备、提高设备利用率的目的。例如，电话通信中的程控交换机、数据通信中的分组交换机、宽带通信中的 ATM 交换机及全光通信中即将问世的

光交换机等。

信令系统是光纤通信网的神经系统。比如,电话要接通,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,有效完成任何用户之间的通信。

协议是光纤通信网中用户与用户及用户与网络资源间完成通信或服务所必须遵循的原则和约定的共同“语言”。这种语言使通信网能够合理运行,正确控制。而标准则是由权威机构所制定的规范。

1.2.2 光纤通信网络的技术特点

光纤通信技术已渗透到了电信网的接入网、本地网(接入中继网)和长途干线网(骨干网)之中。由于价格和用户所需带宽的问题,短时间内完全实现光纤接入到户还不现实。在这些典型的网络应用中,光纤只用来代替各类电缆,主要用做传输媒质连接业务节点,即实现了节点之间链路传输的光信号格式化,而节点对信号的处理、队列和交换等还是采用电子技术。这类网络称为第一代光网络,即光电混合网。典型的第二代光网络有 SONET(同步光网络)和 SDH(同步数字体系),还有各类企业网如光纤分布数据接口(FDDI)等。

当数据速率越来越高时,采用电子技术处理交换节点的数据速率是相当困难的。考虑到节点处理的数据不仅有到达自身的,还有通过该节点到达其他节点的,如果到达其他节点的数据能在光域选路,则电子技术处理的数据速率就下降了,其负担就小得多了,这使得第二代光网络即全光网络诞生了。第二代光网络以在光域完成节点数据的选路与交换为标志,实现了节点的部分光化。第二代光网络中的代表技术包括波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)和光码分复用(OCDMA)等。下面简单介绍一下第二代光网络的主要特点。

1. 新型业务提供

为了更好地理解第二代光网络,了解它提供给用户的服务类型是很重要的。任一网络可看成由许多层构成,每一层完成相应的功能。第二代光网络可看成是一个光层,借助于低层(如物理层)为其高层(如 SDH 层、ATM 层、IP 层等)提供服务,服务类型包括:

(1) 光通道服务。光通道是网络中任意两节点之间的连接,通过给其通道上的每一个链路分配一个特定波长来建立。

(2) 虚电路服务。光层提供网络两节点之间的电路连接,但连接的带宽可以小于链路或波长上的总带宽,如用户需 1 Mb/s 的带宽连接,而网络链路可工作于 10 Gb/s,则网络必须采用复用技术(如时分复用)来复用许多虚电路到单个波长上去。

(3) 数据报业务。允许两个节点之间传送短的分组或消息,而无须建立希望连接的额外开销(如占用信息带宽)。

2. 信息的透明性

第二代光网络的又一主要特点是光通道一旦建立起来,提供的电路交换业务对所传数据是透明的,除了最大的数据速率或带宽是规定的外,对数据采用的格式是没有要求的,甚至可以是模拟数据信号。

第二代光网络的透明程度取决于其物理层的参数,如带宽和信噪比等。如果信号从源节点到达其目的节点的通信过程全在光域,则透明程度最高。在这种情况下,模拟信号比

数据需更高的光信噪比。然而在某些情况下,两点之间的信号不能一直在光域,需要中继,这意味着信号需由光域变换到电域,然后再反过来由电域变换到光域。在光通道上使用中继器降低了网络的透明程度。

3. 电分组与光分组交换

考虑到第一代光网络在实际通信网络中的保有量非常大,因此在第二代光网络快速发展的同时第一代光网络仍然在继续开发之中,这意味着要进一步增加光纤中的传输容量以及提高电子交换开关的处理能力和端口数目。尽管电子交换技术是最成熟的技术且易于集成,但是当传输速率增加到数十吉比特每秒乃至更高时,采用电子技术完成所有的交换和处理功能是相当困难的。另一方面,光交换和选路技术还不是非常成熟,在网络中光开关只能实现电路交换或交叉连接功能,还不能提供像电分组交换那样实现完全意义的分组交换,因此第二代光网络一开始只能提供电路交换型光通道业务。随着技术的不断改进,可以预见未来的分组交换网络提供越来越多的虚电路业务和数据报业务将会变成现实。

4. 光层

光层这一术语现在普遍用来表示第二代 WDM 光网络层的功能,它能够为其光层的用户提供光通道。光层位于现存的网络层,如 SDH 的下层。光通道代替了 SDH 网络节点之间的光纤。现存的 SDH 网络有许多功能,这些功能包括点到点连接以及分插功能。分插功能意味着节点不但可以分出业务,同时也可以让业务直接通过该节点。由于每个节点只能终结经过它们的业务总量的一小部分,因而这个功能是很重要的。SDH 网络同样包括交叉连接功能,它可以完成多业务流之间的交换。SDH 网络还能在不中断业务的情况下处理设备和链路故障。

光层可以执行与 SDH 层相同的功能,它可以支持点到点 WDM 链路以及分插功能,即节点可以分出某些波长,也能让某些波长直接通过。

1.2.3 光纤通信网络的发展方向

光纤通信从一开始就是为传输基于电路交换的信息的,客户信号一般是 TDM 的连续码流,如 PDH 和 SDH 等。随着计算机网络特别是互联网的发展,数据信息的传输量越来越大,客户信号中基于分组交换的具有随机性、突发性的分组信号码流的比例逐步增加,通过光纤通信网络承载的数据信号的种类和数量也越来越多。

从现有的光同步数字体系(SDH)网迈向新一代全光网,将是一个分阶段演化的过程,网络的构成和技术功能在不断地变化,光网络的发展进程如图 1-2 所示。首先采用 WDM 技术和光放大技术,进行点到点通信扩容,实现光域上的全光传输;在光传输路径上设置光分插复用器(OADM),可实现本地光信号在光路上的上路和下路功能;传输链路采用波分复用技术,节点也采用光分插复用器作为光节点进行组网,实现网络的光域传输;进而利用光交叉连接(OXC),使网络节点具有光交换功能,构成光传送网到自动交换光网络,最终形成基于全光传输和光分组交换的全光网络或光子网络,实现光域上的传输和交换。全光网络采用光层保护,并具有好的存活性,可进行灵活的带宽分配、波长转换、波长路由和交换,实现光域上端到端的多粒度波长服务。

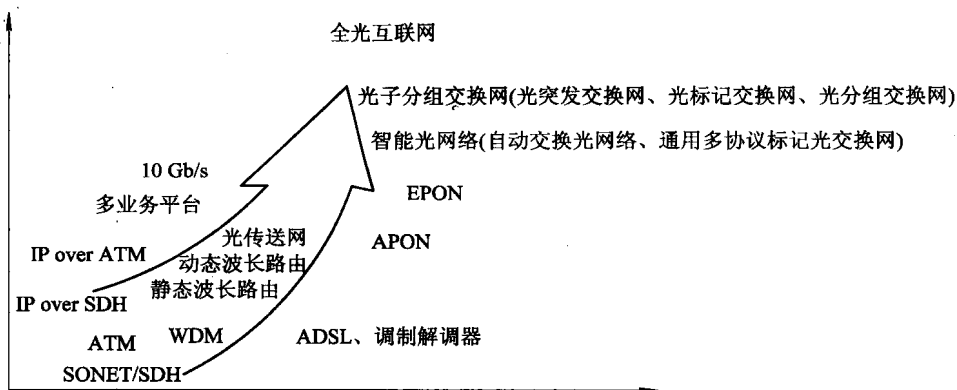


图 1-2 光网络的发展进程

由此可见，随着网络化时代的到来，网络的不断演进和巨大的信息传输需求对光纤通信提出了更高的要求，同时也促进了光纤通信技术的发展。就光纤通信网络技术而言，其发展方向有以下几点。

1. 传输容量不断增加

目前，实用化的单通道速率已由 155 Mb/s 到 10 Gb/s 乃至 40 Gb/s， 160×10 Gb/s 的密集波分复用 DWDM 系统也已投入商用。在实验室中，NEC 实现了 274×40 Gb/s 系统，阿尔卡特实现了 256×40 Gb/s 系统，西门子实现了 176×40 Gb/s 系统，而朗讯则将系统总容量提升至约 20 Tb/s。从发展趋势来看，未来实现传输容量增加的主要技术手段仍然是 TDM+WDM。

2. 超长距离传输

目前，实用化的距离传输已由 40 km 到 160 km。拉曼光纤放大器的出现，为进一步增大无中继距离创造了条件。在实验室，无电中继的传输距离已从 600 km 增加到 4000 km。采用光孤子传输系统、色散管理、在线放大和超级前向纠错等技术，有望将系统的无电中继距离进一步延长。

3. 光传输与交换技术融合

实用化的点到点通信的 WDM 系统具有巨大的传输容量，但其灵活性和可靠性不够理想。采用光分插复用器(OADM)和光交叉连接设备(OXC)可实现光联网，并引入智能化分布式控制平面技术可发展成自动交换光网络(ASON)。预计在未来 10 年内，采用原来 DXC 设备的网络将逐步采用 OXC 设备组建光传输网。而智能化的控制平面可以实现光通道连接的动态建立和拆除，这样会改变光传送网长期以来只能作为业务承载网的局面，形成兼具传输和交换技术的新型光网络。

4. 多业务承载

随着对光通信的需求由骨干网逐步向城域网转移，光纤传输在逐渐靠近业务节点。对于数据业务的用户，希望光通信既能提供传输功能，又能提供多种业务接入功能，这就是目前已广泛使用的基于 SDH 的多业务传输平台(简称 MSTP)。同时，实现 TDM、ATM、Ethernet 及 FR、FDDI、Fiber Channel、FICON 和 ESCON 等业务的接入处理和传输，提