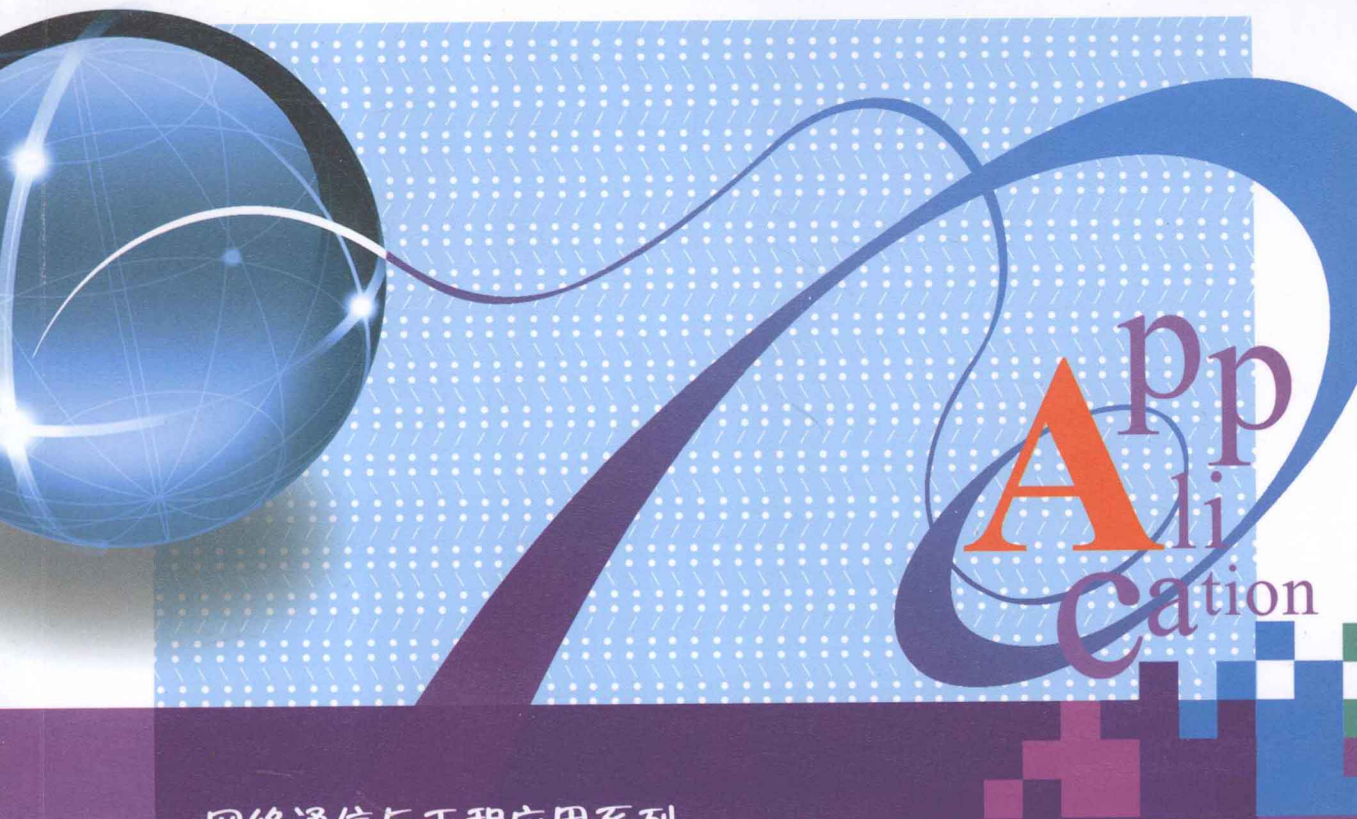


► 21世纪通信网络技术丛书



网络通信与工程应用系列

光纤通信网络

(第2版)



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——网络通信与工程应用系列

光纤通信网络

(第 2 版)

原 荣 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是在作者编著的《光纤通信网络》第1版的基础上,根据光纤通信网络的最新研究进展,重新编写而成的。

全书共分12章,主要内容包括网络的拓扑结构;光纤通信网络的传输媒质——光纤光缆,发射和接收;光无源/有源器件;光正交频分复用(O-OFDM)网络;光交换、光传输网络管理和生存的有关技术;光纤接入网,包括PON、HFC、光正交频分复用(O-OFDM)接入网和射频信号光纤传输(RoF)宽带接入网;光纤通信网络设计的总体考虑、系统设计和功率/带宽预算方法;海底光缆通信网络的发展历程、中继/无中继技术和系统进展、工程设计等。

本书不仅在行文表述中力求做到概念清晰、文字通俗,而且还针对电子教学和培训的需要,对各章设计了相应的复习思考题和习题,并对填写了本书后面附上的“教师情况调查表”的教师用户免费提供习题题解。

本书既可作为各类大专院校相关专业的教材,也可供相关企事业单位员工进阶培训使用;同时,对从事光纤通信系统和网络的研究、规划设计、管理和维护的有关人员也有很好的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信网络/原荣编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2012.1

(21世纪通信网络技术丛书. 网络通信与工程应用系列)

ISBN 978-7-121-15478-2

I. ①光… II. ①原… III. ①光纤网 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第259195号

责任编辑:王春宁

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:22.25 字数:560千字

印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:3 000册 定价:59.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

为了促进和推动我国通信产业的发展,符合国家在 21 世纪的中长期信息通信技术的发展规划,电子工业出版社通信出版分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的技术应用层面,又细分为 4 个系列,即《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》、《物联网技术与应用开发系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是以移动通信(3G 技术)的应用现状与发展情况为导向,结合新一代移动宽带系统(4G 技术)的逐步建立,全面介绍当今移动通信领域所涉及的前沿关键技术与热点技术,以理论创新和技术突破为主。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 TD-LTE、WCDMA-LTE、cdma2000-LTE 和 WiMAX-LTE 的新技术与新标准为主攻方向,以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速和资源中的有效管理和实现为主。LTE 作为无线通信技术的一个重要的长期演进计划,代表了国内外无线通信领域的最新发展需求和解决方案,并以新一代移动宽带通信技术为主。

《物联网技术与应用开发系列》是下一代 ICT(信息通信技术)产业的新增长点之一,将物联网技术与应用开发单独列为一个系列,主要是从无处不在的应用宽泛性和无所不能的移动互联网对人们生活和工作的深刻影响而构建的。物联网是互联网的自然延伸,以 IP 技术为核心,是一种架构在基于 IPv4/IPv6 的各种网络上的综合应用和通信能力。根据它的 4 个层面——感知、传输、处理和应用,以物联网技术开发应用为主,通过技术与应用开发的紧密结合去推动物联网工程应用的进一步发展。

《网络通信与工程应用系列》是以构建网络的体系结构、标准和协议为目标所开展的对现代无线、移动及宽带通信网络的规划与优化,并且结合工程应用的成功案例所提出来的,该系列以移动通信网络工程应用为主。

为了提升本套丛书的影响力,我分社依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家和教授,各科研院所的研究员,国内有一定规模和研发实力的科技公司的一线研发人员,以及国外知名研究实验室的专家及学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出;理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员、各高等院校的专业教师和研究生,刚走上工作岗位的大学毕业生,以及与此相关的其他学科的技术人员。

本套丛书从 2008 年上半年已经开始陆续推出,希望广大读者能关注它,并且多对本套丛书提出宝贵意见与建议。欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便我们今后为广大读者奉献更多和更好的优秀通信技术类图书。

前 言

1966 年, 英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文, 指出利用玻璃纤维进行信息传输的可能性和技术途径, 从而奠定了光纤通信的基础。在此后短短的 40 多年中, 光纤通信取得了突飞猛进的发展, 可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟, 光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

进入 21 世纪, 由于多种先进的调制技术、超强前向纠错 (SFEC) 技术、电子色散补偿技术、相干光正交频分复用 (CO-OFDM) 技术和偏振复用相干检测等一系列新技术的突破和成熟, 以及有源和无源器件集成模块的大量问世, 出现了以 40 Gb/s 和 100 Gb/s 为基础的 DWDM 系统的应用。

目前, 无论电信骨干网还是用户接入网, 无论陆地通信网还是海底光缆网, 无论看电视还是打电话, 光纤无处不在, 无时不用, 光纤传输网络技术随时随地都能碰到。所以, 对于从事信息技术的人员来讲, 了解光纤通信网络技术是至关重要的。

自作者主编的《光纤通信网络》第 1 版出版至今, 时间已过去了 10 多年, 在这段时间里, 光纤通信网络技术和标准在光纤通信技术飞快发展的情况下, 也有了许多新的进展, 如出现了多协议标签交换 (MPLS) 和自动光交换 (ASON) 网络技术, 以及各种无源光网络 (PON)、光正交频分复用 (O-OFDM) 网络和射频信号光纤传输 (RoF) 网络技术等。

为此, 作者重新编写了这本书, 介绍光纤通信网络的新技术。第 1 章回顾了光纤通信网络的发展和演进过程; 第 2 章介绍了网络的拓扑结构; 第 3 章列举了网络用户, 如 SDH、ATM、IP 和光纤信道; 第 4 章简要介绍了光纤通信网络的传输媒质——光纤光缆, 发射和接收; 光无源/有源器件, 其中包括高速波导光探测器、相干光接收机和光频交错 (IL) DWDM 复用/解复用器; 第 5~6 章分别阐述了波分复用光网络和近年来受到人们高度重视的光正交频分复用 (O-OFDM) 网络; 第 7~9 章分别介绍了光交换、光传输网络管理和生存的有关技术, 包括通用多协议标签交换 (GMPLS) 和自动交换光网络 (ASON); 第 10 章阐述了光纤接入网, 包括 PON、HFC、光正交频分复用 (O-OFDM) 接入网和射频信号光纤传输 (RoF) 宽带接入网; 第 11 章给出了光纤通信网络设计的总体考虑、系统设计和功率/带宽预算方法; 第 12 章详细阐述了海底光缆通信网络的发展历程, 中继/无中继最新技术和系统进展、工程设计等问题。

本书选取了光纤通信网络的最新素材, 收录了大量有用的光纤通信网络工程数据和图表, 反映了当前光纤通信网络的发展水平。

本书给出了详尽的名词术语索引, 读者在阅读和实际工作中, 可以根据需要从关键字 (已给出所在章节的位置) 查找到系统设计和工程计算所需的内容、数据、图表和公式。另外, 本书还在附录中给出了系统设计参数和一些常用的数据表格。

本书针对教学和培训的需要, 对各章设计了相应的复习思考题和习题, 并制作了 Power Point 电子教学课件, 其中课件包括主要文字内容和全部插图。有需要的读者可注册并登录华

信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费下载使用。对填写了本书后面附上的“教师情况调查表”的读者免费提供全书各章的习题题解, 有需要的读者可向电子工业出版社通信分社编辑曲昕处免费索取。

联系地址: 北京市万寿路 173 信箱华信大厦 1001 室曲昕收

邮政编码: 100036

联系邮箱: quxin@phei.com.cn

因作者水平所限, 书中可能还会有遗漏及错误之处, 敬请读者指出, 作者联系方式: giocyr@163.com。

原 荣

2011 年 11 月于桂林

中国电子科技集团公司第三十四研究所

目 录

第 1 章 光纤通信网络概述	(1)
1.1 光纤通信网络技术发展过程	(1)
1.1.1 光纤通信史回顾和技术发展现状	(1)
1.1.2 三种基本的光纤通信系统	(4)
1.1.3 三代通信网络介绍	(4)
1.1.4 全光网络——第三代网络介绍	(7)
1.1.5 通信网络的分层结构	(8)
1.2 网络性能	(9)
1.2.1 网络性能参数	(9)
1.2.2 全光网络的出现及应用	(11)
1.3 光纤通信网络分类	(12)
1.3.1 按主要性能分类	(12)
1.3.2 按技术特征分类	(13)
1.4 光传输网技术的演进	(13)
1.4.1 对光传输网的要求和技术路线图	(13)
1.4.2 光传输网标准化进展	(16)
1.4.3 光传输网络技术和功耗的关系	(19)
1.4.4 光通道层技术的演进	(20)
1.4.5 波段节点技术的最新进展	(20)
复习思考题	(22)
参考文献	(23)
第 2 章 光纤通信网络拓扑结构	(24)
2.1 方向耦合器	(24)
2.1.1 2×2 光纤方向耦合器	(24)
2.1.2 基于 2×2 方向耦合器的器件	(26)
2.1.3 单纤双向光耦合器	(26)
2.2 总线拓扑结构	(27)
2.2.1 无源线形总线	(27)
2.2.2 有源线形总线	(29)
2.3 环状拓扑结构	(30)
2.3.1 双环网	(30)
2.3.2 星状环网	(31)
2.3.3 菊花链双环网	(32)

2.4	星状拓扑结构	(33)
2.4.1	传输型星形耦合器网络	(33)
2.4.2	反射型星形耦合器	(34)
2.4.3	分布星状网络	(35)
2.4.4	阵列波导光栅 (AWG) 星形耦合器	(36)
2.4.5	有源星状网络	(36)
2.5	多光纤系统	(38)
2.6	树状拓扑结构	(38)
2.7	多跳光网络拓扑结构	(39)
2.7.1	单跳光网络	(39)
2.7.2	多跳光网络	(40)
2.8	复合网络	(43)
2.8.1	星状/总线拓扑结构	(43)
2.8.2	星状/树状拓扑结构	(44)
2.8.3	环状/星状/总线拓扑结构	(44)
2.8.4	星状/总线/星状拓扑结构	(44)
2.8.5	正在运营的骨干网拓扑结构	(45)
	复习思考题	(45)
	参考文献	(46)

第3章 光纤通信网络用户

3.1	SDH	(47)
3.1.1	SDH 的基本概念	(47)
3.1.2	SDH 帧结构和传输速率	(48)
3.1.3	SDH 复用映射结构	(49)
3.1.4	SDH 设备类型和系统组成	(50)
3.1.5	SDH 接入	(52)
3.1.6	SDH 物理层	(52)
3.1.7	SDH 网同步	(53)
3.2	ATM	(54)
3.2.1	从 STM 到 ATM	(54)
3.2.2	ATM 的基本概念	(55)
3.2.3	ATM 信元结构	(56)
3.2.4	ATM 复用和交换原理	(56)
3.2.5	ATM 物理层	(60)
3.2.6	ATM 层和 ATM 适配层 (AAL)	(61)
3.2.7	流量整形、流量管理和拥塞控制	(62)
3.2.8	ATM 的现状和未来	(63)
3.3	IP	(64)
3.3.1	IP 简述	(64)

3.3.2	以太网	(65)
3.3.3	IP 骨干网技术及其演进	(66)
3.3.4	多协议标签交换 (MPLS)	(69)
3.3.5	通用多协议标签交换 (GMPLS)	(70)
3.4	光纤信道	(71)
	复习思考题	(72)
	参考文献	(73)
第 4 章	光纤通信传输媒质和器件	(74)
4.1	光纤和光缆	(74)
4.1.1	光纤结构和类型	(74)
4.1.2	光纤传光原理	(74)
4.1.3	光纤传输特性	(75)
4.1.4	光纤种类	(80)
4.2	光源和光发射机	(81)
4.2.1	发光机理	(82)
4.2.2	半导体激光器	(82)
4.2.3	波长可调半导体激光器	(83)
4.2.4	高速光发射机	(84)
4.3	光探测器和光接收机	(85)
4.3.1	光探测原理	(85)
4.3.2	PIN 光敏探测器	(86)
4.3.3	波导光敏探测器 (WG-PD)	(86)
4.3.4	光接收机工作原理和性能	(88)
4.3.5	相干光接收机	(90)
4.4	光无源器件	(90)
4.4.1	连接器	(91)
4.4.2	光滤波器	(91)
4.4.3	波分复用/解复用器	(94)
4.4.4	光频交错 (IL) DWDM 复用/解复用器	(97)
4.4.5	光调制器	(98)
4.5	光放大器	(101)
4.5.1	光放大器概述	(101)
4.5.2	掺铒光纤放大器 (EDFA) 的构成	(101)
4.5.3	EDFA 工作原理及其特性	(102)
4.5.4	光纤拉曼放大器	(103)
4.6	波长转换器	(105)
	复习思考题	(105)
	习题	(106)
	参考文献	(107)

第 5 章 波分复用光纤通信网络	(108)
5.1 波分复用网络的概念和进展	(108)
5.1.1 WDM 概念	(108)
5.1.2 WDM 系统	(109)
5.1.3 高速 WDM 光纤传输系统	(111)
5.1.4 相干光密集波分复用 (CoDWDM) 系统	(113)
5.1.5 相干光正交频分复用 (CO-OFDM) WDM 系统	(115)
5.2 WDM 网络单元	(117)
5.2.1 光线路终端 (OLT)	(117)
5.2.2 光分插复用器 (OADM)	(118)
5.2.3 阵列波导光栅 (AWG) 光分插复用器	(119)
5.2.4 可重构光分插复用器 (ROADM)	(121)
5.2.5 光交叉连接器 (OXC)	(122)
5.2.6 光线路放大器 (OLA)	(123)
5.3 DWDM 系统工程设计	(123)
5.3.1 中心频率、信道间隔和带宽	(123)
5.3.2 光收发模块和复用/解复用器规范	(125)
5.3.3 光放大器系统设计	(125)
5.3.4 光功率预算及其代价	(128)
复习思考题	(129)
习题	(130)
参考文献	(130)
第 6 章 光正交频分复用 (O-OFDM) 网络	(131)
6.1 OFDM 介绍	(131)
6.1.1 OFDM 系统发展概况	(131)
6.1.2 OFDM 的基本原理	(132)
6.1.3 傅里叶变换在 OFDM 中的应用	(135)
6.2 O-OFDM 技术的发展	(137)
6.2.1 O-OFDM 技术的发展状况	(137)
6.2.2 O-OFDM 的基本思想	(138)
6.2.3 O-OFDM 实现的基本原理	(138)
6.2.4 O-OFDM 的优点和应用	(140)
6.2.5 O-OFDM 的缺点和未来前景	(141)
6.3 O-OFDM 技术综述	(142)
6.3.1 光 I/Q 调制器	(142)
6.3.2 O-OFDM 系统的相干探测和直接探测	(143)
6.3.3 相干光 OFDM 的通用结构	(144)
6.3.4 偏振复用 CO-OFDM 光纤传输系统	(144)

6.3.5	MIMO-OFDM 系统	(146)
6.3.6	正交带宽复用 O-OFDM 的频谱组成及系统实现	(148)
6.3.7	副载波调制 CO-OFDM 技术	(149)
6.4	OFDM 光纤通信系统	(153)
6.4.1	OFDM 多模光纤通信系统	(153)
6.4.2	OFDM 单模光纤传输系统	(154)
6.4.3	相干光 OFDM 用于每信道 1 Tb/s 传输	(156)
6.4.4	副载波调制 O-OFDM 系统	(158)
	复习思考题	(159)
	参考文献	(160)

第 7 章 光交换 (162)

7.1	光交换概述	(162)
7.1.1	通信交换技术的发展史	(162)
7.1.2	光交换分类	(163)
7.1.3	光交换技术的研究现状和发展方向	(164)
7.2	光交换器件	(165)
7.2.1	MEMS (微机电系统) 光开关	(166)
7.2.2	半导体光放大器 (SOA) 开关	(168)
7.2.3	耦合波导光开关	(168)
7.2.4	热光波导开关	(169)
7.3	光交换技术	(170)
7.3.1	时分光交换	(170)
7.3.2	波分光交换	(171)
7.3.3	空分光交换	(172)
7.3.4	多协议波长标签交换 (MP λ LS)	(174)
7.3.5	光分组交换	(175)
7.3.6	波分/空分混合交换系统	(176)
7.3.7	多维交换系统	(176)
	复习思考题	(179)
	参考文献	(179)

第 8 章 光传输网络管理 (181)

8.1	网络管理概述	(181)
8.1.1	网络管理协议和体系结构	(181)
8.1.2	对网络管理体系的要求	(181)
8.1.3	光网络的分级管理	(182)
8.2	光学层管理	(183)
8.2.1	对光学层的要求	(183)
8.2.2	设备的互操作性	(183)

8.2.3	光监控信道	(184)
8.2.4	光学安全管理	(184)
8.3	性能和故障管理	(185)
8.3.1	误码率测量	(186)
8.3.2	报警管理	(186)
8.3.3	控制	(186)
8.4	配置管理	(187)
8.4.1	设备管理	(187)
8.4.2	波长管理	(187)
8.4.3	连接管理	(188)
8.4.4	带宽和协议管理	(188)
8.4.5	适应性管理	(189)
8.5	自动交换光网络 (ASON)	(189)
8.5.1	ASON 概述	(189)
8.5.2	ASON 的体系结构	(190)
8.5.3	ASON 提供的 3 种连接	(192)
8.5.4	ASON 网络结构模型	(192)
8.5.5	ASON 请求建立过程	(193)
8.5.6	ASON 网络管理	(194)
	复习思考题	(195)
	参考文献	(195)

第 9 章 光纤通信网络的生存性 (197)

9.1	网络生存性基本概念	(197)
9.1.1	生存性定义和措施	(197)
9.1.2	工作路径和保护路径	(198)
9.1.3	单向保护切换和双向保护切换	(198)
9.2	SDH 网络的保护	(199)
9.2.1	路径保护	(199)
9.2.2	环路保护	(200)
9.2.3	路由保护	(202)
9.2.4	保护切换准则	(202)
9.3	IP 网络的生存性	(202)
9.3.1	IP/MPLS 备用通道恢复	(203)
9.3.2	IP/MPLS 的 LSP 通道保护	(203)
9.4	光学层保护	(204)
9.4.1	光学层保护技术	(204)
9.4.2	1+1 光信道专用保护	(205)
9.4.3	格状网的保护	(206)
9.4.4	WDM 网络保护、生存和互连	(206)

9.5 ASON 网络的生存性	(207)
9.5.1 ASON 网络生存性新特点	(207)
9.5.2 基于控制平面的保护	(208)
9.5.3 基于传输平面的保护	(208)
9.5.4 ASON 网络的恢复	(209)
复习思考题	(209)
参考文献	(209)

第 10 章 光纤接入网 (210)

10.1 接入网在网络建设中的作用及发展趋势	(210)
10.1.1 接入网在网络建设中的作用	(210)
10.1.2 光接入网技术演进	(210)
10.1.3 三网融合——接入网的发展趋势	(212)
10.2 网络结构	(213)
10.2.1 网络结构	(213)
10.2.2 光线路终端 (OLT)	(215)
10.2.3 光网络单元 (ONU)	(216)
10.2.4 光分配网络 (ODN)	(218)
10.3 无源光网络 (PON) 基础	(220)
10.3.1 分光比	(220)
10.3.2 结构和要求	(220)
10.3.3 下行复用技术	(221)
10.3.4 上行接入技术	(221)
10.3.5 安全性和私密性	(223)
10.4 PON 接入系统	(224)
10.4.1 EPON 系统	(224)
10.4.2 GPON 系统	(226)
10.4.3 WDM-PON 系统	(230)
10.4.4 WDM/TDM 混合无源光网络	(234)
10.5 光正交频分复用 (O-OFDM) 接入网	(235)
10.5.1 OFDM 在射频信号光纤传输 (RoF) 无线通信网络中的应用	(235)
10.5.2 混合使用 OFDM 和 TDM 的 10 Gb/s PON	(236)
10.5.3 偏振复用直接探测 40 Gb/s MIMO OFDM-PON	(238)
10.5.4 OFDM-PON 的优点	(239)
10.6 光纤/电缆混合 (HFC) 网络	(240)
10.6.1 HFC 网络的结构和功能	(241)
10.6.2 HFC 网络的频谱安排	(242)
10.6.3 HFC 网络的调制和复用	(242)
10.7 射频信号光纤传输 (RoF) 宽带接入网	(243)
10.7.1 光频间插 (IL) DWDM 毫米波 RoF 系统光谱图	(244)

10.7.2 微波信号的光学产生	(245)
10.7.3 单边带光调制	(247)
10.7.4 光纤传输宽带无线接入网	(247)
复习思考题	(249)
习题	(250)
参考文献	(251)
第 11 章 光纤通信网络设计	(252)
11.1 网络设计的总体考虑	(252)
11.1.1 系统结构	(253)
11.1.2 光纤损耗限制系统	(255)
11.1.3 光纤色散限制系统	(256)
11.2 传输层设计	(257)
11.2.1 空分复用	(257)
11.2.2 时分复用	(257)
11.2.3 波分复用	(258)
11.3 功率预算	(258)
11.3.1 系统功率预算	(258)
11.3.2 功率代价因素	(259)
11.4 带宽设计	(261)
11.4.1 上升时间带宽设计	(261)
11.4.2 电带宽和光带宽	(263)
11.5 单信道光纤通信系统设计	(263)
11.5.1 模拟系统设计	(264)
11.5.2 数字系统设计	(266)
复习思考题	(268)
习题	(269)
参考文献	(269)
第 12 章 海底光缆通信网络	(270)
12.1 海底光缆网络概述	(270)
12.1.1 海底光缆通信网络的发展历程	(270)
12.1.2 海底光缆网络分类	(272)
12.1.3 ITU-T 海底光缆系统标准研究进展	(274)
12.1.4 海底光缆网络的拓扑结构	(274)
12.2 海底光缆系统技术	(276)
12.2.1 全光放大中继技术	(277)
12.2.2 光调制技术	(278)
12.2.3 前向纠错技术	(278)
12.2.4 光纤技术	(280)

12.2.5	色散管理和补偿技术	(281)
12.2.6	波分复用技术	(282)
12.2.7	偏振复用/相干接收技术	(283)
12.2.8	性能和可靠性保证技术	(284)
12.3	海底光缆系统光放大中继技术	(286)
12.3.1	海底中继器	(286)
12.3.2	分支单元	(287)
12.3.3	终端传输设备	(289)
12.3.4	线路监视	(292)
12.3.5	供电设备	(293)
12.4	海底光缆系统无中继技术	(294)
12.4.1	传输终端	(294)
12.4.2	无中继系统的设计	(297)
12.4.3	无中继系统维护设备	(298)
12.4.4	无中继系统的发展	(299)
12.5	海底光缆系统	(300)
12.5.1	中继海底光缆系统	(300)
12.5.2	无中继海底光缆系统	(302)
12.5.3	WDM 无中继传输试验系统	(303)
12.5.4	偏振复用相干接收无中继传输试验系统	(305)
12.6	海底光缆通信系统工程设计	(306)
12.6.1	工程设计应考虑的问题	(306)
12.6.2	系统路由选择原则	(309)
12.6.3	选择海底光缆的注意事项	(309)
12.6.4	损耗和功率预算	(310)
	复习思考题	(314)
	参考文献	(314)
附录 A	电磁波频率与波长的换算	(316)
附录 B	dBm 与 mW、 μ W 的换算	(316)
附录 C	dB 值和功率比	(317)
附录 D	百分损耗 (%) 与分贝 (dB) 损耗换算表	(318)
附录 E	PDH 与 SDH 速率等级	(318)
附录 F	WDM 信道 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\nu$ 的关系	(319)
附录 G	物理常数	(319)
附录 H	系统设计参数	(320)
附录 I	电磁波频谱表	(321)
附录 J	名词术语索引	(322)

第 1 章 光纤通信网络概述

1.1 光纤通信网络技术发展过程

1.1.1 光纤通信史回顾和技术发展现状

古代希腊的一位吹玻璃工匠观察到，光可以从玻璃棒的一端传输到另一端。1930 年，有人拉出了石英细丝，人们就把它称为光导纤维，简称光纤或光波导，并论述了它传光的原理。接着，这种玻璃丝在一些光学机械设备和医疗设备（如胃镜）中得到应用。

光纤是现代通信网中传输信息的主要媒质。光纤通信作为一项新兴的通信技术，从一开始就显示出无比的优越性，引起人们的极大兴趣和关注；在短短的四十年中，获得了迅速的发展。光纤通信之所以能够成功，主要得益于超纯石英玻璃纤维和半导体激光器的研制成功。早在 1966 年，英籍华人高锟还是一个在英国 Harlow ITT 实验室工作的年轻工程师，他大胆地提出了人们应该能够发送高速信息光脉冲到一根纤细的玻璃中的概念，并且做了一系列实验，证明这是可以实现的。接着，1970 年美国康宁公司生产出了低损耗光纤，光纤损耗从当时的每千米几千 dB 下降到 20 dB，GaAlAs 半导体激光器也在同年实现了室温下连续工作，从而揭开了光纤通信的序幕。

在高锟早期的实验中，光纤的损耗约为 3 000 dB/km，而光源也是性能并不优良的发光二极管。今天，小于 0.4 dB/km 的光纤已被广泛安装使用，而调制速率超过每秒上千兆比特的近红外半导体激光器也已商品化。

低损耗光纤和连续振荡半导体激光器的研制成功，是光纤通信发展的重要里程碑。

20 世纪 90 年代，掺铒光纤放大器（EDFA）的应用迅速得到了普及，用它可替代光-电-光再生中继器，同时可对多个 1.55 μm 波段的光信号进行放大，从而使波分复用（WDM）系统得到普及。光通信发展简史如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 光通信发展简史

古代光通信	烽火台，夜间的信号灯，水面上的航标灯
1880 年	美国人贝尔发明了光电话（光源为阳光，接收器为硅光电池，传输介质为大气）
20 世纪 60 年代	1960 年，美国发明了第一台红宝石激光器，并进行了透镜阵列传输光的实验 1961 年，制成氦-氖（He-Ne）气体激光器 1962 年，制成砷化镓半导体激光器 1966 年，英籍华人高锟就光缆传输的前景发表了具有历史意义的论文，此时光纤损耗约为 3 000 dB/km
20 世纪 70 年代	1970 年，美国康宁公司研制成功损耗为 20 dB/km 的石英光纤 1970 年，美国贝尔实验室和日本 NEC 先后研制成功室温下连续振荡的 GaAlAs 双异质结半导体激光器
20 世纪 80 年代	提高传输速率，增加传输距离，大力推广应用，光纤通信在海底通信获得应用
20 世纪 90 年代	掺铒光纤放大器（EDFA）的应用迅速得到了普及，WDM 系统实用化

进入 21 世纪以来，由于多种先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术和偏振复用相干检测等一系列新技术的突破和成熟，以及有源和无源器件集成模块的大量问世，出现了以 40 Gb/s 和 100 Gb/s 为基础的 WDM 系统的应用。下一代高速相干光通信系统的目标是每信道的传输速率超过 100 Gb/s。

在现已安装使用的光纤通信系统中，光纤长度有的很短，只有几米长（计算机内部或机房内）；有的又很长，如连接洲与洲之间的海底光缆。20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可与之相比拟。光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。由于高锟在开创光纤通信历史上的卓越贡献，1998 年 IEE 授予他荣誉奖章，如图 1.1.1 所示；2009 年 10 月 6 日，瑞典皇家科学院又授予高锟 2009 年度诺贝尔物理学奖。



图 1.1.1 诺贝尔物理学奖获得者高锟

有人使用大有效芯径面积 ($150\text{ }\mu\text{m}^2$) 光纤和偏振复用 (PDM) 归零码 QPSK 技术，实验研究了相干光 40 Gb/s 高频谱效率的跨洋距离传输，当传输距离为 10 000 km 时，频谱效率可以达到 $3.2\text{ b}\cdot\text{s}^{-1}/\text{Hz}$ ，实验中没有对光纤的色散进行补偿，最后只用 DSP 进行了色散补偿 [OFC 2011, OMI4]。

图 1.1.2 (a) 所示频谱效率 (Spectral Efficiency, SE) 随先进的复用/调制技术逐年提高的情况，近来除采用偏振复用外，还在偏振复用的基础上进一步采用偏振间插技术 (见 12.5.4 节)，来进一步提高频谱利用率。图 1.1.2 (b) 所示目前常用到的先进调制技术的星座图，单偏振的调制方式有通断键控 (OOK)、二进制相移键控 (BPSK) 和正交相移键控 (QPSK)，双偏振 (x 和 y 偏振) 复用的调制方式有 QPSK、16QAM 和 64QAM。此外，利用没有干扰的频谱重叠相干光正交频分复用 (Coherent Optical OFDM, CO-OFDM) 技术也可以提高频谱效率 (见 5.1.5 节、6.3 节和 6.4.3 节)。未来也有可能利用多模光纤来提高频谱效率。

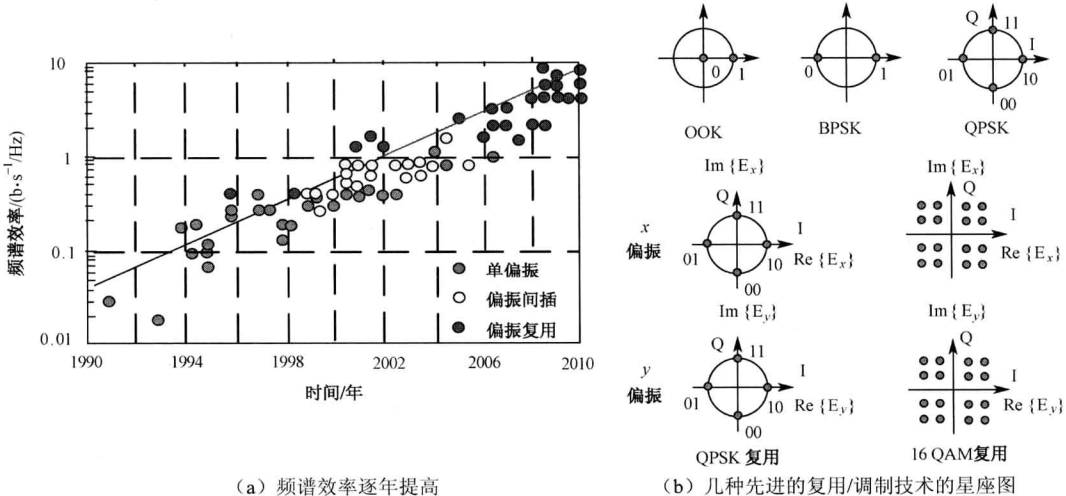


图1.1.2 频谱效率随先进的复用/调制技术逐年提高