

► 21世纪通信网络技术丛书

App
li
cation

网络通信与工程应用系列

光纤通信

(第3版)

原 荣 编著



电子工业出版社

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

(第 3 版)

原 荣 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是在第 2 版的基础上,根据光纤通信技术的最新进展,为满足广大读者的需求重新编写的。全书共分 9 章,首先讲解了光纤通信技术,内容包括光纤通信基础,光纤和光缆,光无源、有源器件,光接收、发射和放大;接着阐述了几种光纤传输系统,如电频分复用(SCM)系统,电时分复用的典型应用 SDH 系统,光时分、光波分和光码分复用系统,以及近来又受到关注的相干光波系统和光纤孤子通信系统;然后介绍了光纤传输系统设计所必须考虑的几个问题;最后阐明了光纤色散对系统性能的限制和人们对色散补偿管理的方法。

为了教师和工程技术人员电子教学和培训的需要,这次再版将免费提供各章的电子教学课件 Power Point 文件,包括书中所有的插图。

本书可供本科生和研究生使用,也可作为培训教材使用,对于从事光纤通信系统和网络研究、教学、规划、设计、使用、管理和维护的有关人员 also 具有很好的参考价值。

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/原荣编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2010.5

(21 世纪通信网络技术丛书——网络通信与工程应用系列)

ISBN 978-7-121-10778-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 076199 号

责任编辑:王春宁 特约编辑:牛雪峰

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:26.50 字数:678 千字

印 次:2010 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:55.00 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

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不再是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如:软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000;移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX、WiFi、ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如:无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书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、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、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,供他们阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出,希望广大读者能关注它,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,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信分社

前言

早在 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, 光纤的损耗由当时的 3 000 dB/km 已经降低到目前的 0.151 dB/km。在光纤损耗降低的同时, 光纤通信所用的光源、探测器、无源/有源器件等, 无论是分立元件, 还是集成器件都取得了突破性的进展。自 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。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; 又由于高锟在用光学玻璃纤维传输信息方面取得的开创性成就, 瑞典皇家科学院特授予他 2009 年度诺贝尔物理学奖。

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通信网, 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, 了解光纤通信技术是至关重要的。

《光纤通信》(第 2 版) 2006 年出版以来, 由于该书内容全、素材新, 概念解释清楚, 分析深入浅出, 叙述通俗易懂, 简明扼要, 图文并茂, 注重实用, 适合不同层次的读者阅读, 受到了广大读者的厚爱, 现已脱销。值此再版之际, 特对第 2 版中的许多内容, 根据光纤通信的最新进展进行了增删和修订。

在第 1 章中, 删除了比较浅显的三种基本的光纤通信系统、三代网络和接入网的一般介绍。

在第 2 章中, 根据 ITU-T SG15 组光纤标准化的进展情况, 增加了 G.656 全波光纤和 G.657 接入网用光纤的内容, 并对 G.652~G.655 几种光纤指标的最新变化进行了修订。

在第 3 章中, 删除了一些不常用的内容, 如迈克尔逊干涉滤波器、声光滤波器、光纤环路谐振带通滤波器、光纤光栅解复用器、介质薄膜干涉滤波解复用器、熔拉双锥耦合波分复用器、耦合波导调制器和光开关、声光调制器、声光开关。在对阵列波导光栅 (AWG) 复用/解复用器进一步介绍的基础上, 增加了 AWG 滤波器和 AWG 可重构光分插复用器 (ROADM)。对目前常用的 QPSK 光调制器和偏振复用器件进行了介绍, 对现在研究的热门课题将来很有发展前途的磁光波导光隔离器也作了较详细的描述。

在第 4 章中, 删除了光发射机常规的驱动电路、保护电路、光频稳定及其控制电路, 同时也删除了没有发展前途的光纤激光器等内容, 增加了平面波导集成 (PLC) 电吸收调制激光器 (EML) 和目前开发出的高速光发射机电路, 如单芯片 40 个信道的 40×40 Gb/s WDM 光发送机, 同时还增加了很有发展前途的 PLC 波长可调半导体激光器 (LD) 方面的内容, 如耦合腔波长可调 LD、衍射光栅波长可调 LD、阵列波导光栅 (AWG) 波长可调 LD 和 AWG 多频激光器等。

在第 5 章中, 增加了为高速系统新近开发的单向载流子探测器 (UTC-PD)、波导探测器 (WD-PD) 和行波探测器 (TW-PD), 以及使用这些探测器的 UTC 光接收机和 107 Gb/s WG-PIN 行波放大 PLC 光接收机, 同时对未来将广泛使用的阵列波导光栅 (AWG) PLC 多信道光接收机也进行了介绍。

在第 6 章中, 删除了没有使用前景的光纤布里渊放大器和掺铒光纤放大器。

在第7章中,删除了光纤线路各种调制方式解调输出信噪比等几个表格、FDM 光纤传输系统中的一部分内容,以及光时分复用(OTDM)光纤传输系统中的高比特率传送关键技术等内容,只保留了对 OTDM 的一般概念介绍。增加了“高速光纤传输系统”一节,对新近开发出来的先进光调制技术,如光双二进制编码(ODB)、差分相移键控(DPSK)、差分正交相移键控(DQPSK)和偏振复用差分正交相移键控(PM-DQPSK)等进行了说明,它们是最有希望将现有的 10 Gb/s 系统提升到 40 Gb/s 甚至 100 Gb/s 的技术。同时对能提高系统性能增大传输距离的超强 FEC 纠错技术作了较详细的阐述。最后介绍了几个高速光纤传输系统,如 10×107 Gb/s WDM NRZ-ODB 调制 1 000 km 传输试验系统,用商用 Lambda Xtreme 10 Gb/s WDM 系统传输 DQPSK 调制的 107 Gb/s 传输试验系统等。

在第9章中,删除了实现比较困难的镜像相位阵列色散补偿,补充了近年来在高速传输系统色散补偿中越来越受到重视的电子色散补偿。其实这种补偿技术在作者编著的《光纤通信》(第2版)中称为“后补偿技术”,即在接收端采用的色散补偿技术,它是相对于在发射端采用的补偿技术而言的。色散补偿光纤(DCF)是目前最广泛使用的技术,新近开发出的用于色散补偿的光子晶体光纤(PCF)有许多突出的优点,双芯 PCF 器件在未来的光传输网络中可能将扮演重要的角色,所以在这次再版时也增加了一节。

为了教师和工程技术人员电子教学的需要,在本书第2版中,曾提供了一张光盘,内有书中各章的所有插图,另外仅提供一套短训班(约一周时间)用的 Power Point 文件。这次再版将为读者提供所有章节的电子教学课件(Power Point 文件,包括书中所有的插图)。如需要可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后进行下载使用,欢迎任课教师及时反馈授课心得和建议。

本书可供本科生和研究生使用,也可作为培训教材使用。教师可根据教学对象和教学时间进行适当的安排。对于研究生,如果时间允许可以全部采用;对于本科生,限于课时可以只讲基础和概念部分,比如,光纤色散和带宽可以只介绍概念;滤波器、波分复用/解复用器、调制器和光开关每一类都包括好多种,在教学时可以只选几种;光纤非线性效应、功率代价因素和相干检测也可以不讲或少讲;对于色散补偿和管理,也可以只介绍目前广泛使用的 DCF 色散补偿和预啁啾补偿技术;如果教学对象已具备光学和磁学方面的基础知识,第1章中的一些预备知识也可以不讲或只作一些承上启下的简单介绍。

对于一般的读者,即使以前没有无线电和通信的背景知识,只要从头读起,也会理解本书的内容,使你对光纤通信有所了解,因为本书是从概念和基础讲起的,前后又有连贯性和条理性。对于已具有光纤通信背景知识的读者,根据各自的情况可以通读,也可以根据实际的需要挑选其中一些内容阅读。

如果读者想了解更多的细节,可以查找书末列出的文献资料。本书最后给出名词术语索引,在阅读和实际工作中可以根据需要从关键字查找到所需要的内容、数据参数和工程上常用的计算公式及图表。

虽然第3版已对书中个别地方出现的错误作了订正,但书中可能还会有不妥及错误之处,敬请读者指正。联系方式:giocyr@163.com。

原 荣

于桂林中国电子科技集团公司第34研究所

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 光纤通信技术发展	(1)
1.1.1 光纤通信的优点	(3)
1.1.2 光传送网的关键技术	(5)
1.1.3 通信网络的分层结构	(7)
1.2 光波基础	(8)
1.2.1 光的本质	(8)
1.2.2 均匀介质中的光波	(10)
1.2.3 相速度和折射率	(13)
1.2.4 群速度和群折射率	(13)
1.3 光与介质的相互作用	(15)
1.3.1 斯奈尔定律和全反射	(15)
1.3.2 内/外反射、抗反射膜和电介质镜	(16)
1.3.3 光多次干涉和谐振	(22)
1.3.4 古斯-汉森相移和分光镜	(25)
1.3.5 相干	(26)
1.3.6 衍射	(28)
1.3.7 偏振	(31)
1.3.8 双折射——光在各向异性介质中的传输	(33)
1.3.9 非线性光学效应	(36)
1.4 平面介质波导	(37)
1.4.1 波导条件	(37)
1.4.2 单模和多模波导	(39)
复习思考题	(39)
习题	(40)
第 2 章 光纤和光缆	(42)
2.1 光纤结构和类型	(42)
2.1.1 多模光纤	(42)
2.1.2 单模光纤	(45)
2.1.3 光纤制造工艺	(46)
2.2 光纤传输原理	(46)
2.2.1 传输条件	(46)
2.2.2 光纤模式	(48)
2.2.3 单模光纤的基本特性	(54)

2.3	光纤传输特性	(57)
2.3.1	衰减	(57)
2.3.2	色散	(58)
2.3.3	光纤比特率	(65)
2.3.4	光纤带宽	(67)
2.3.5	非线性光学效应	(71)
2.4	单模光纤的进展和应用	(74)
2.4.1	G. 652 标准单模光纤	(74)
2.4.2	G. 653 色散移位光纤	(76)
2.4.3	G. 654 衰减最小光纤	(76)
2.4.4	G. 655 非零色散光纤	(77)
2.4.5	G. 656 宽带全波光纤	(77)
2.4.6	G. 657 接入网用光纤	(78)
2.4.7	色散补偿光纤	(79)
2.5	光纤的选择	(80)
2.6	光缆	(81)
2.6.1	对光缆的基本要求	(81)
2.6.2	光缆结构和类型	(82)
2.6.3	海底光缆	(84)
2.7	光纤传输特性测量	(87)
2.7.1	损耗测量	(87)
2.7.2	带宽测量	(89)
2.7.3	色散测量	(89)
	复习思考题	(90)
	习题	(91)
第3章	光纤通信器件	(92)
3.1	连接器	(92)
3.1.1	连接损耗	(92)
3.1.2	活动连接器结构和特性	(93)
3.1.3	接头	(95)
3.1.4	连接方法的比较	(96)
3.2	耦合器	(96)
3.2.1	T形耦合器	(96)
3.2.2	熔拉双锥星形耦合器	(97)
3.2.3	阵列波导光栅 (AWG) 星形耦合器	(97)
3.3	可调谐光滤波器	(98)
3.3.1	法布里-珀罗 (F-P) 滤波器	(99)
3.3.2	马赫-曾德尔 (M-Z) 滤波器	(102)
3.3.3	布拉格 (Bragg) 光栅滤波器	(104)
3.3.4	阵列波导光栅 (AWG) 滤波器	(105)

3.3.5	调谐滤波器性能比较	(107)
3.4	波分复用/解复用器	(108)
3.4.1	棱镜复用/解复用器	(108)
3.4.2	衍射光栅解复用器	(109)
3.4.3	阵列波导光栅 (AWG) 复用/解复用器	(110)
3.4.4	马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉滤波器复用/解复用器	(111)
3.5	调制器	(112)
3.5.1	电光调制器 (MZM)	(113)
3.5.2	电吸收波导调制器 (EAM)	(117)
3.5.3	QPSK 光调制器	(118)
3.6	光开关	(120)
3.6.1	MEMS 微机械光开关	(120)
3.6.2	电光开关	(121)
3.6.3	热光开关 (TOS)	(122)
3.6.4	磁光开关	(122)
3.7	光隔离器	(124)
3.7.1	磁光块状光隔离器	(124)
3.7.2	磁光波导光隔离器	(126)
3.8	光环行器	(129)
3.9	光分插复用器 (OADM)	(130)
3.9.1	一般概念	(130)
3.9.2	阵列波导光栅 (AWG) 光分插复用器	(130)
3.9.3	可重构光分插复用器 (ROADM)	(132)
3.9.4	波长选择交换 (WSS) ROADM	(134)
3.10	波长转换器	(135)
3.11	偏振复用器件	(137)
	复习思考题	(138)
	习题	(138)
第 4 章	光源和光发射机	(139)
4.1	概述	(139)
4.2	发光机理	(140)
4.2.1	原理	(140)
4.2.2	受激发射条件	(142)
4.2.3	光增益	(144)
4.2.4	激光器起振的阈值条件	(145)
4.2.5	激光器起振的相位条件	(147)
4.3	半导体激光器	(149)
4.3.1	异质结半导体激光器	(149)
4.3.2	量子限制激光器	(150)
4.3.3	分布反馈激光器	(152)

4.4	波长可调半导体激光器	(155)
4.4.1	耦合腔波长可调半导体激光器	(155)
4.4.2	衍射光栅 PIC 波长可调激光器	(159)
4.4.3	阵列波导光栅 (AWG) PIC 波长可调激光器	(160)
4.5	垂直腔表面发射激光器	(163)
4.6	半导体激光器的特性	(164)
4.6.1	半导体激光器的基本特性	(164)
4.6.2	模式特性	(169)
4.6.3	调制响应	(169)
4.6.4	噪声	(173)
4.7	高速光发射机	(174)
	复习思考题	(175)
	习题	(176)
第 5 章	光探测和光接收机	(177)
5.1	光探测原理	(177)
5.2	光电探测器	(178)
5.2.1	PIN 光电二极管	(178)
5.2.2	雪崩光电二极管	(181)
5.2.3	响应带宽	(182)
5.2.4	新型 APD 结构	(184)
5.2.5	MSM 光电探测器	(186)
5.2.6	单行载流子光电探测器 (UTC-PD)	(187)
5.2.7	波导光电探测器 (WG-PD)	(189)
5.2.8	行波探测器 (TW-PD)	(190)
5.3	数字光接收机	(192)
5.3.1	光电转换和前置放大器	(193)
5.3.2	线性放大器	(194)
5.3.3	数据恢复	(195)
5.4	接收机信噪比 (SNR)	(196)
5.4.1	噪声机理	(196)
5.4.2	PIN 光接收机	(197)
5.4.3	APD 接收机	(198)
5.4.4	光信噪比 (OSNR) 和信噪比 (SNR) 的关系	(201)
5.5	接收机误码率和灵敏度	(202)
5.5.1	比特误码率	(202)
5.5.2	最小平均接收光功率	(205)
5.5.3	光电探测器的量子限制	(207)
5.6	灵敏度下降机理	(207)
5.7	光接收机	(209)
5.7.1	光接收机性能	(209)

5.7.2 电子载流子（UTC）光接收机.....（210）

5.7.3 阵列波导光栅（AWG）PIC 多信道光接收机.....（210）

5.7.4 107 Gb/s WG-PIN 行波放大 PIC 光接收机.....（211）

复习思考题.....（213）

习题.....（213）

第 6 章 光放大器.....（215）

6.1 一般概念.....（215）

6.1.1 增益频谱和带宽.....（216）

6.1.2 增益饱和.....（217）

6.1.3 放大器噪声.....（217）

6.1.4 光放大器应用.....（219）

6.2 半导体光放大器.....（220）

6.2.1 放大器设计.....（220）

6.2.2 行波光放大器特性.....（222）

6.2.3 半导体光放大器的应用.....（225）

6.3 光纤拉曼放大器.....（226）

6.3.1 分布式光纤拉曼放大器的工作原理和特性.....（227）

6.3.2 光纤拉曼放大器对系统性能的影响.....（232）

6.3.3 光纤拉曼放大技术应用.....（232）

6.4 掺铒光纤放大器.....（233）

6.4.1 掺铒光纤结构.....（234）

6.4.2 工作原理及其特性.....（235）

6.4.3 掺铒光纤放大器的优点.....（240）

6.4.4 EDFA 的应用.....（240）

6.4.5 实用 EDFA 构成.....（241）

6.5 光放大器系统应用.....（242）

6.5.1 前置放大器.....（242）

6.5.2 放大器级联.....（244）

复习思考题.....（247）

习题.....（248）

第 7 章 光纤传输系统.....（249）

7.1 概述.....（249）

7.1.1 调制.....（249）

7.1.2 编码.....（254）

7.1.3 复用.....（257）

7.2 光调制.....（257）

7.2.1 模拟强度光调制.....（257）

7.2.2 数字强度光调制.....（258）

7.3 电复用光纤传输系统.....（259）

7.3.1 频分复用光纤传输系统.....（259）

7.3.2	微波副载波复用 (SCM) 光纤传输系统	(261)
7.3.3	电时分复用的典型应用——SDH 光纤传输系统	(265)
7.4	光复用光纤传输系统	(270)
7.4.1	波分复用 (WDM) 光纤传输系统	(271)
7.4.2	光时分复用 (OTDMA) 光纤传输系统	(272)
7.4.3	光码分复用 (OCDM) 光纤传输系统	(275)
7.5	相干光波通信系统	(277)
7.5.1	相干检测	(277)
7.5.2	信噪比 (SNR)	(279)
7.5.3	相干解调方式	(280)
7.5.4	相干系统光调制	(282)
7.5.5	相位噪声和相位分集接收	(285)
7.5.6	强度噪声和平衡混频接收	(287)
7.5.7	极化匹配和极化控制	(288)
7.5.8	相干实验系统	(289)
7.6	光孤子通信实验系统	(290)
7.6.1	基本概念	(290)
7.6.2	通信实验系统	(291)
7.7	高速光纤传输系统	(292)
7.7.1	先进光调制制式	(293)
7.7.2	超强 FEC 纠错	(297)
7.7.3	高速光纤传输系统	(302)
	复习思考题	(305)
	习题	(306)
第 8 章	系统设计	(308)
8.1	系统结构和限制	(308)
8.1.1	系统结构	(308)
8.1.2	损耗限制系统	(312)
8.1.3	色散限制系统	(312)
8.2	功率预算	(313)
8.2.1	陆地系统功率预算	(313)
8.2.2	海底光缆系统功率预算	(315)
8.3	功率代价因素	(317)
8.3.1	光纤模式噪声	(317)
8.3.2	色散引起的脉冲展宽	(318)
8.3.3	激光器模式分配噪声	(319)
8.3.4	LD 的频率啁啾	(322)
8.3.5	反射噪声	(324)
8.4	带宽设计	(326)
8.5	单信道光纤通信系统设计	(328)

8.5.1	模拟系统设计	(328)
8.5.2	数字系统设计	(331)
8.6	DWDM 系统工程设计	(333)
8.6.1	中心频率和信道间隔	(334)
8.6.2	线性串话	(334)
8.6.3	非线性串话	(337)
8.6.4	光放大器系统设计	(340)
8.6.5	光功率预算	(342)
8.6.6	网络管理	(343)
8.6.7	网络保护和生存对策	(344)
8.6.8	网络互连	(344)
8.6.9	DWDM 网络信道数计算	(345)
	复习思考题	(346)
	习题	(346)
第 9 章	色散限制、补偿和管理	(348)
9.1	色散引起脉冲展宽	(348)
9.1.1	基本传输方程	(349)
9.1.2	高斯脉冲输入	(349)
9.2	色散对系统性能的限制	(352)
9.2.1	对系统比特速率的限制	(352)
9.2.2	对系统传输距离的限制	(354)
9.3	电子色散补偿	(355)
9.4	前补偿技术	(357)
9.4.1	预啁啾补偿	(357)
9.4.2	FSK 调制补偿	(358)
9.4.3	双二进制编码	(359)
9.4.4	半导体光放大器产生啁啾补偿	(359)
9.4.5	光纤引入啁啾	(360)
9.5	负色散光纤补偿	(360)
9.5.1	传统负色散光纤 (DCF) 补偿	(360)
9.5.2	光子晶体光纤 (PCF) 补偿	(362)
9.6	光滤波器补偿	(363)
9.6.1	法布里-玻罗干涉滤波器	(363)
9.6.2	马赫-曾德尔干涉滤波器	(364)
9.6.3	光纤光栅滤波器	(364)
9.7	相位共轭补偿	(368)
9.8	宽带系统色散补偿	(369)
9.8.1	光时分复用系统色散补偿	(369)
9.8.2	波分复用系统色散补偿	(370)
9.9	色散管理	(372)

9.9.1 长距离系统色散管理	(372)
9.9.2 动态色散管理	(373)
复习思考题	(375)
习题	(375)
附录 A 部分习题答案	(376)
附录 B 电磁波频率与波长的换算	(379)
附录 C dBm 与 mW 换算表	(379)
附录 D dB 值和功率比($\text{dB}=10\lg(P_2/P_1)$)	(380)
附录 E 百分损耗(%)与分贝(dB)损耗换算表	(380)
附录 F PDH 与 SDH 速率等级	(380)
附录 G $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\nu$ 的关系	(382)
附录 H 物理常数	(382)
附录 I ITU-T 关于 WDM 系统波长安排	(383)
附录 J 名词术语索引	(385)
附录 K 例题目录	(405)
参考文献	(407)

第1章 概述

- 👉 光纤通信技术发展
- 👉 光波基础
- 👉 光与介质的相互作用
- 👉 平面介质波导

1.1 光纤通信技术发展

光通信是利用光波作为载波来传递信息的。广义地说，用光传递信息并不是什么新鲜事。早在公元前两千多年以前，我们的祖先就在都城和边境堆起一些高高的土丘，遇到敌人入侵，就在这些土丘上燃起烟火传递受到入侵的信息，各地诸侯看见烟火就立刻领兵来救援，其中还有著名的“周幽王烽火戏诸侯”的故事，这种土丘叫做烽火台，如图 1.1.1 所示，它就是一种古老的光通信设备。

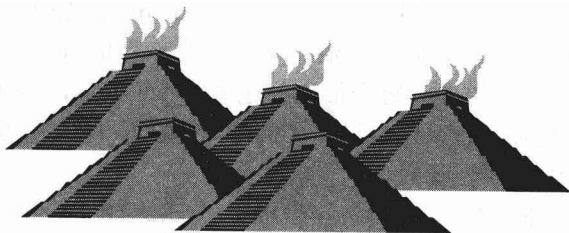


图 1.1.1 古老的光通信设备——烽火台

由于人们无法解决光向四面八方散射时，光强减弱和不能通过障碍物的问题，因此，直到 20 世纪 60 年代初，光通信都没有什么重大的进展，它仅仅作为一种信号灯使用，如马路上的红绿灯、机场上的跑道标志灯和航标灯等。

但是到了 20 世纪 60 年代中期，情况发生了根本性的变化，而且这种变化还是由于一位华人引起的，他就是高锟！早在 1966 年，英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文。当时他还是一个在英国 Harlow ITT 实验室工作的年轻工程师，他指出利用光导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。在高锟早期的实验中，光纤的损耗约为 3 000 dB/km，他指出这么大的损耗不是石英纤维本身的固有特性，而是由于材料中的杂质离子的吸收产生的，如果把材料中金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下，光纤损耗就可以减小到 10 dB/km，再通过改进制造工艺，提高材料的均匀性，可进一步把光纤的损耗减小到几 dB/km。这种想法很快就变成了现实。1970 年光纤研制取得了重大突破，美国康宁公司按照高锟的思路生产出了损耗为 20 dB/km 的石英光纤，1972 年该公司生产的高纯石英多模

光纤的损耗已下降到 4 dB/km。1973 年美国贝尔 (Bell) 实验室生产的光纤损耗为 2.5 dB/km, 1974 年为 1.1 dB/km。1976 年日本电报电话 (NTT) 公司在波长 1 200 nm 生产的光纤损耗已减小到 0.47 dB/km。到了 20 世纪 80 年代初, 单模光纤在波长 1.55 μm 的损耗已降到 0.2 dB/km, 目前 G.654 光纤在 1.55 μm 波长附近仅为 0.151 dB/km, 接近了石英光纤的理论损耗极限。

在光纤损耗降低的同时, 作为光纤通信的光源, 半导体激光器也发明了, 并取得了实质性的进展。1973 年半导体激光器的寿命是 7 000 小时, 1977 年贝尔实验室研究的激光器的寿命已达到 10 万小时, 完全满足实用化的要求。1979 年美国 ATT 公司和日本 NTT 公司又研制成功了长波长 (1 550 nm) 连续振荡半导体激光器。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。

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。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 1.1.2 所示。在 2009 年 10 月 6 日高锟又获得了诺贝尔物理学奖。瑞典皇家科学院说, 高锟在有关光在玻璃纤维中的传输可用于光学通信方面取得了突破性成就, 特授予他 2009 年度诺贝尔物理学奖。

目前, 随着数据业务爆炸式地增长, 通信道路越来越拥挤, 光通信是唯一的出路, 所以世界上所有新建的干线通信系统均采用光纤。波分复用 (WDM) 系统也在海底光缆系统上使用, Tyco 全球网大西洋部分有 4 对光纤, 目标容量为每对光纤传输 64 个 10 Gb/s WDM 信道, 它可以提供跨大西洋近 2.56 Tb/s 全保护的容量。2002 年阿尔卡特在 C 波段和 L 波段成功地进行了 10.2 Tb/s (256 $\times$ 42.7 Gb/s) 距离为 3 $\times$ 100 km 的传输试验。

根据 OFC 2009 年报道, NTT 2007 年演示了一个线路容量为 10 Tb/s 的系统[NThB1], 该系统采用 DWDM 和 DQPSK 调制, 每个信道的速率为 111 Gb/s, 实现了 48 pb/s $\cdot$ km (pb/s, 拍比特/秒, 10¹⁵ b/s) 的传输。该系统经过 3 600 km 传输后, 所有信道的 Q 参数大于 9.2 dB, 比 BER 为 10⁻¹² 要求的 9.1 dB 还要好。

烽火通信科技股份有限公司于 2005 年也进行了 3.2 Tb/s (80 $\times$ 40 Gb/s) DWDM 系统 800 km 的传输实验。由于光电技术的发展和逐渐成熟, 世界光纤市场和光电器件市场大幅增长, 而市场价格却急剧下降。光纤通信产业方兴未艾, 其旺盛的生命力令人振奋。

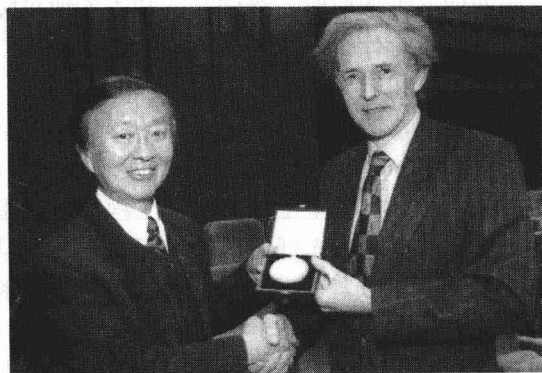


图 1.1.2 光纤通信发明家高锟 (左) 1998 年在英国接受 IEE 授予的奖章

1.1.1 光纤通信的优点

在光纤通信系统中，作为载波的光波频率比电波频率高得多，而作为传输介质的光纤又比同轴电缆损耗低得多，因此相对于电缆或微波通信，光纤通信具有许多独特的优点。

1. 频带宽、传输容量大

电缆和光纤的损耗和频带比较如表 1.1.1 所示，由表可见，电缆基本上只适用于数据速率较低的 LAN，高速局域网 ($\geq 100\text{ Mb/s}$) 和城域网 (MAN) 必须采用光纤。在零色散波长窗口，单模光纤具有几百 $\text{Gb/s} \cdot \text{km}$ 。

表 1.1.1 电缆和光纤的损耗和频带比较

类 型		频带 (或频率)	损耗 (dB/km)	传输容量 (话路/线)	
微波				960	
对称电缆		4 kHz	2.06		
细同轴电缆 ($\phi 1.2/4.4$)		1 MHz	5.24	960	
		30 MHz	28.70		
粗同轴电缆 ($\phi 2.4/9.4$)		1 MHz	2.42	1 800	
		60 MHz	18.77		
渐变折射率	0.85 μm	200~1 000 MHz·km	≤ 3	1 920 (140 Mb/s)	
多模光纤	1.31 μm	$\geq 1\,000\text{ MHz}\cdot\text{km}$	≤ 1.0		
单模	1.31 μm	$>100\text{ GHz}$	0.36	32 000	491 520
光纤	1.55 μm	10~100 GHz	0.2	(2.5 Gb/s)	(40 Gb/s)

另外可以采用多种复用技术来增加传输容量。光多路传输技术是充分挖掘光纤带宽潜力、扩大通信容量的技术之一，采用多路传输技术可以充分利用光纤带宽，给通信带来巨大的经济效益。目前研究开发的光复用技术有波分复用 (WDM)、光时分复用 (OTDM) 和光码分复用 (OCDM)，其中密集波分复用 (DWDM) 技术现已商业应用，而光时分复用与光码分复用技术均不成熟。

2. 损耗小、中继距离长

表 1.1.1 给出了电缆和光纤的每千米传输损耗。由表可见，电缆的损耗通常在几分贝到十几分贝，而 1.55 μm 光纤的损耗通常只有 0.2 dB，显然，电缆的损耗明显大于光纤，有的甚至大几个数量级。因此，电缆只能用于网径不大的 LAN，网径较大的 LAN 以及 MAN 只能使用光纤。例如，采用分布式拉曼放大技术已使 32×40 Gb/s WDM 系统的无中继距离达到 250 km。

3. 重量轻、体积小

由于电缆体积和重量较大，安装时还必须慎重处理接地和屏蔽问题，在空间狭小的场合，如舰船和飞机中，这个弱点更显突出。