

高等学校电子信息类教材

光纤通信系统

王秉钧 王少勇 编著

Optical-fiber

System

Communication

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

丨 高等学校电子信息类教材 丨

光纤通信系统

王秉钧 王少勇 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书比较全面系统地讲述了现代光纤通信系统的原理、组成、特点、基本技术、系统设计及未来发展。全书共8章,包括概述、通信光纤和光无源器件、光源和光检测器、光发射机与光接收机、光波复用与放大、数字光纤通信系统、光纤通信网和光纤通信新技术。

本书内容广泛、取材新颖。全书以概念、系统和技術为重点,尽量少用繁杂的数学推导,注重实用性和先进性。写作方法力求深入浅出、循序渐进、便于读者阅读和自学。

本书可作为高等学校工科电子类通信工程、信息工程、电子科学与技术,以及其他电子信息类专业本科生专业课教材,也可供研究生、科技工作者和工程技术人员参考。

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

光纤通信系统/王秉钧,王少勇编著. —北京:电子工业出版社,2004.11

高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-00431-3

I. 光… II. ①王… ②王… III. 光纤通信—通信系统—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第102282号

责任编辑:许 楷

印 刷:北京李史山印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:416千字

印 次:2004年11月第1次印刷

印 数:5000册 定价:22.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077。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。

前 言

本书比较全面、系统地讲述了现代光纤通信系统的基本原理、基本技术和系统设计方法,以及光纤通信的新技术、新发展。全书共 8 章:第 1 章介绍光纤通信系统的组成、特点、类型、发展方向和发展简史。第 2 章介绍通信光纤的结构、类型、导光原理、传输特性、非线性效应和光纤参数的测量,以及光路无源器件的原理和特性。第 3 章介绍光源和光检测器的原理、特性、参数,以及与光纤的耦合方法和特性。第 4 章介绍光发射机和光接收机的组成、电路、指标计算和测量。第 5 章介绍光波复用技术(包括 WDM, OTDM, OFDM, OCDM 等),以及光中继器和放大器的基本原理和特性。第 6 章介绍数字光纤通信系统的组成原理和系统设计方法,内容包括 PDH 和 SDH、光端机、线路码型、系统指标分配和系统设计等。第 7 章介绍光纤通信网的基本组成和原理,包括 SDH 传送网、光纤接入网、高速光纤计算机网。第 8 章介绍光纤通信新技术,包括相干光通信技术、光孤子通信技术、全光网络技术、光交换技术和波长变换技术。

为适应当前高校课程门类多、课时压缩的教学特点,本书力求在概念和原理的讲述上严格、准确、精练,理论适中,注重实用,主要面向工科院校,尽量少用繁杂的数学推导。

本书以概念、具体系统和基本技术为重点,力求体现教学的科学性、系统性、完整性和技术的先进性。写作方法深入浅出、循序渐进,便于读者阅读和自学。

本书可作为高等学校工科通信工程、信息工程、电子科学与技术及其他电子信息类专业本科生教材,也可供研究生、科技工作者和工程技术人员参考。

由于编著者水平所限,书中难免存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

编 著 者
2004 年 6 月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 现代光纤通信发展简史	(1)
1.2 光纤通信系统的组成	(2)
1.3 光纤通信的特点	(2)
1.4 光纤通信的类型	(3)
1.5 光纤通信的发展方向	(5)
习题	(7)
第 2 章 通信光纤和光无源器件	(8)
2.1 光纤结构和类型	(8)
2.1.1 光纤结构	(8)
2.1.2 光纤类型	(8)
2.2 光纤的导光原理	(13)
2.2.1 几何光学方法	(14)
2.2.2 波动光学理论	(16)
2.3 光纤的传输特性	(17)
2.3.1 光纤的衰减特性	(17)
2.3.2 光纤的色散特性	(21)
2.4 光纤的主要参数	(26)
2.5 光纤的非线性效应	(28)
2.6 光缆	(33)
2.6.1 光纤制造工艺简述	(33)
2.6.2 光缆	(34)
2.7 光纤主要参数的测量	(35)
2.7.1 光纤衰减的测量	(36)
2.7.2 光纤带宽的测量	(38)
2.7.3 单模光纤截止波长和色散测量	(40)
2.8 光无源器件	(43)
2.8.1 光纤活动连接器	(43)
2.8.2 光耦合器	(44)
2.8.3 光隔离器与光环行器	(47)
2.8.4 光衰减器	(48)
2.8.5 光开关	(50)
习题	(50)

第 3 章 光源和光检测器	(52)
3.1 对光源的基本要求	(52)
3.2 半导体光源的发光机理	(52)
3.3 光源的分类及特性	(53)
3.4 激光器	(55)
3.4.1 激光器的原理和结构	(55)
3.4.2 半导体激光器的特性	(57)
3.4.3 分布反馈 (DFB) 半导体激光器	(63)
3.4.4 分布布拉格反射 (DBR) 半导体激光器	(64)
3.4.5 MQW 多量子阱激光器	(64)
3.4.6 垂直腔面发光激光器 (VCSEL)	(65)
3.4.7 光纤光栅外腔可调谐半导体激光器	(66)
3.4.8 超短光脉冲激光器	(66)
3.5 发光二极管	(67)
3.6 半导体光源与光纤的耦合	(69)
3.7 对光电检测器的基本要求	(70)
3.8 半导体光电检测器机理	(71)
3.9 半导体光电检测器的特性及参数	(73)
3.9.1 PIN 光电二极管的特性及参数	(73)
3.9.2 雪崩光电二极管 APD 的特性和参数	(76)
3.10 光电检测器与光纤的耦合	(80)
习题	(81)
第 4 章 光发射机与光接收机	(82)
4.1 光发射机的基本组成及要求	(82)
4.2 光发射机的光调制技术	(83)
4.2.1 光源调制方式	(83)
4.2.2 光源直接调制原理	(84)
4.3 数字光发射机的驱动电路	(85)
4.3.1 驱动条件	(85)
4.3.2 驱动电路	(85)
4.4 数字光发射机的辅助电路	(86)
4.4.1 温度变化及器件老化的影响	(86)
4.4.2 控制电路	(87)
4.4.3 激光器保护电路	(89)
4.4.4 告警电路	(89)
4.4.5 LD 组件	(89)
4.5 光发射机指标的测试	(90)
4.5.1 光发射机平均输出光功率的测量	(90)

4.5.2	光发射机消光比的测量	(90)
4.6	光接收机的基本组成及要求	(91)
4.7	光接收机的主要电路	(92)
4.7.1	偏置电路	(92)
4.7.2	前置放大器	(93)
4.7.3	均衡电路	(95)
4.7.4	自动增益控制电路和动态范围	(95)
4.8	光接收机的噪声	(96)
4.8.1	光检测器噪声	(96)
4.8.2	放大器噪声	(97)
4.9	光接收机灵敏度的计算	(100)
4.9.1	PIN 光接收机的灵敏度	(100)
4.9.2	APD 光接收机灵敏度	(101)
4.10	光接收机主要技术指标的测量	(104)
4.10.1	光接收机灵敏度的测量	(104)
4.10.2	光接收机动态范围的测量	(105)
	习题	(106)
	附录 4.1 Personick 参数表	(107)
	附录 4.2 光功率单位换算表	(111)
第 5 章	光波复用与放大	(112)
5.1	光波复用技术概述	(112)
5.1.1	光波分复用 (WDM)	(112)
5.1.2	光频分复用 (OFDM)	(112)
5.1.3	时分复用 (OTDM)	(113)
5.1.4	光码分复用 (OCDM)	(113)
5.1.5	空分复用 (SDM)	(114)
5.1.6	方向分割复用 (DDM)	(114)
5.1.7	副载波复用 (SCM) 技术	(114)
5.2	波分复用 (WDM)	(114)
5.2.1	WDM 基本原理	(114)
5.2.2	波分复用系统的组成	(117)
5.2.3	光波分复用系统结构	(119)
5.2.4	光波分复用的分层模型及功能描述	(120)
5.2.5	光波分复用系统的主要设备	(122)
5.3	光时分复用 (OTDM)	(125)
5.4	光频分复用 (OFDM)	(125)
5.5	光码分多址复用 (OCDMA)	(126)
5.6	光中继器	(128)

5.7	光放大器的分类及特性	(128)
5.7.1	光放大器的分类	(128)
5.7.2	光放大器的特性	(130)
5.8	掺铒光纤放大器 (EDFA)	(132)
5.9	半导体光放大器	(134)
5.10	非线性光纤放大器	(135)
5.10.1	光纤拉曼放大器 (FRA)	(135)
5.10.2	光纤布里渊放大器 (FBA)	(138)
5.11	新型放大器	(139)
5.11.1	掺铒波导放大器	(139)
5.11.2	拉曼连续型放大器	(140)
	习题	(140)
第6章	数字光纤通信系统	(142)
6.1	两种传输体制	(142)
6.1.1	准同步数字系列 PDH	(142)
6.1.2	同步数字系列 SDH	(146)
6.1.3	SDH 帧结构	(150)
6.1.4	SDH 的开销 (OH) 功能	(152)
6.1.5	SDH 系列的复用	(153)
6.1.6	SDH 设备	(159)
6.2	光端机的作用和组成	(160)
6.3	线路码型	(162)
6.3.1	对线路码型的基本要求	(162)
6.3.2	常用线路码型	(162)
6.3.3	编译码电路简介	(165)
6.3.4	误码和误码检测	(166)
6.3.5	线路码型的性能比较	(168)
6.4	系统的主要性能指标	(168)
6.4.1	系统参考模型	(168)
6.4.2	系统的主要电性能指标	(170)
6.4.3	系统的光性能参数	(173)
6.5	中继段传输距离的计算	(177)
6.5.1	中继段传输距离的计算方法	(177)
6.5.2	损耗受限系统中继段长度的计算	(179)
6.5.3	色散 (带宽) 受限系统中继段长度的计算	(180)
6.5.4	光接收机动态范围对中继段长度的要求	(183)
6.5.5	最坏值设计法确定实际中继段长度	(184)
6.5.6	上升时间预算	(184)

习题	(186)
附录 SDH 系统光接口及有关参数	(188)
第 7 章 光纤通信网	(191)
7.1 概述	(191)
7.2 SDH 传送网	(193)
7.2.1 SDH 传送网分层模型	(193)
7.2.2 SDH 网的物理拓扑	(195)
7.2.3 SDH 网络结构	(196)
7.2.4 SDH 自愈网原理	(198)
7.3 光纤接入网	(203)
7.3.1 接入网概述	(203)
7.3.2 光接入网 (OAN)	(205)
7.4 高速光纤计算机网	(212)
7.4.1 计算机网络分类	(212)
7.4.2 局域网/城域网概述	(213)
7.4.3 光纤分布式数据接口 FDDI	(215)
7.4.4 DQDB	(219)
7.4.5 光纤局域网	(223)
习题	(227)
第 8 章 光纤通信新技术	(229)
8.1 相干光通信技术	(229)
8.1.1 相干光通信的工作原理	(229)
8.1.2 相干光通信的特点	(230)
8.1.3 相干光通信的关键技术	(230)
8.2 光孤子通信技术	(231)
8.2.1 光孤子的形成	(231)
8.2.2 光孤子通信系统的基本组成与要求	(232)
8.2.3 光孤子通信的关键技术	(233)
8.3 全光网络技术	(234)
8.3.1 全光网络的基本概念	(234)
8.3.2 全光网络的特点	(235)
8.3.3 全光网络的相关技术	(236)
8.3.4 全光网络的网络元件	(237)
8.4 光交换技术	(240)
8.4.1 波道空分光交换	(240)
8.4.2 自由空间光交换	(241)
8.4.3 时分光交换	(241)
8.4.4 波分光交换	(242)

8.5 波长变换技术	(243)
8.5.1 概述	(243)
8.5.2 光电光型波长变换技术	(244)
8.5.3 全光型波长变换技术	(244)
习题	(246)
参考文献	(247)

第1章 概 述

1.1 现代光纤通信发展简史

1966年, 英籍华裔学者高锟(C.K.Kao)和霍克哈姆(C.A.Hockham)发表了关于传输介质新概念的论文, 指出了利用光纤(Optical Fiber)进行信息传输的可能性和技术途径, 奠定了现代光通信——光纤通信的基础。当时石英纤维的损耗高达1000dB/km以上, 高锟等人指出: 这样大的损耗不是石英纤维本身固有的特性, 而是由于材料中杂质的吸收产生的。因此有可能通过原材料的提纯制造出适合于远距离通信使用的低损耗光纤。

1970年, 光纤研制取得了重大突破。当年, 美国康宁(Corning)公司就研制成功损耗20dB/km的石英光纤。1972年, 康宁公司高纯石英多模光纤损耗降低到4dB/km。1973年, 美国贝尔(Bell)实验室将光纤损耗降低到2.5dB/km。1974年降低到1.1dB/km。1976年, 日本电报电话(NTT)公司等单位将光纤损耗降低到0.47dB/km(波长1.2 μm)。在以后的10年中, 波长为1.55 μm 的光纤损耗: 1979年为0.20dB/km, 1984年为0.157dB/km, 1986年为0.154dB/km, 接近了光纤最低损耗的理论极限。

1970年, 作为光纤通信的光源也取得了实质性的进展。当年, 美国贝尔实验室、日本电气公司(NEC)和前苏联先后突破了半导体激光器在低温(-200 $^{\circ}\text{C}$)或脉冲激励条件下工作的限制, 研制成功室温下连续振荡的镓铝砷(GaAlAs)双异质结半导体激光器(短波长)。1976年日本电报电话公司研制成功发射波长为1.3 μm 的铟镓砷磷(InGaAsP)激光器, 1979年美国电报电话(AT&T)公司和日本电报电话公司研制成功发射波长为1.55 μm 的连续振荡半导体激光器。

由于在光纤和半导体激光器方面的技术进步, 使1970年成为光纤通信发展中的一个重要里程碑。

1976年, 美国在亚特兰大(Atlanta)进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验, 系统采用GaAlAs激光器做光源, 多模光纤做传输介质, 速率为44.7Mb/s, 传输距离约10km。1980年, 美国标准化FT-3光纤通信系统投入商用, 系统采用渐变型多模光纤, 速率为44.7Mb/s。随后美国很快敷设了东西干线和南北干线, 穿越22个州, 光缆总长达 5×10^4 km。1976年和1978年, 日本先后进行了速率为34Mb/s, 传输距离为64km的突变型多模光纤通信系统, 以及速率为100Mb/s的渐变型多模光纤通信系统的试验。1983年敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线, 全长3400km, 初期传输速率为400Mb/s, 后来扩容到1.6Gb/s。随后, 由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋TAT-8海底光缆通信系统于1988年建成, 全长6400km; 第一条横跨太平洋TPC-3/HAW-4海底光缆通信系统于1989年建成, 全长13200km。从此, 海底光缆通信系统的建设得到了全面展开, 促进了全球通信网的发展。

自从1966年高锟提出光纤作为传输介质的概念以来, 光纤通信从研究到应用, 发展非常迅速。技术上不断更新换代, 通信能力(传输速率和中继距离)不断提高, 应用范围不断扩大。光纤通信的发展可以粗略地分为三个阶段。

第一阶段（1970 年—1979 年）：光纤与半导体激光器的研制成功，使光纤通信进入实用化。1977 年美国亚特兰大的光纤市话局间中继系统是世界上第一个光纤通信系统。

第二阶段（1979 年—1989 年）：光纤技术取得进一步突破，光纤衰耗降至 0.5dB/km 以下。由多模光纤转向单模光纤，由短波长向长波长转移。数字系统的速率不断提高，光纤连接技术与器件寿命问题都得到解决，光传输系统与光缆线路建设逐渐进入高潮。

第三阶段（1989 年至今）：光纤数字系统由 PDH 向 SDH 过渡，传输速率进一步提高。1989 年掺铒光纤放大器（EDFA）的问世给光纤通信技术带来巨大变革。EDFA 的应用不仅解决了长途光纤传输衰耗的放大问题，而且为光源的外调制、波分复用器件、色散补偿元件等提供了能量补偿，这些网络元件的应用，又使得光传输系统的调制速率迅速提高，并促成了光波分复用技术的实用化。

光纤传输性能的改进，光放大技术、传输色散补偿技术的应用，使光纤通信的优越性进一步显现，系统传输速率与总容量大幅度提高。可以展望，随着各种新技术、新器件、新工艺的深入研究，光纤传输将进入光放大、光集成、光分插复用、光交叉连接和光交换的全光网时代。

1.2 光纤通信系统的组成

光纤通信又叫光缆通信，是以光纤作为传输介质，光波作为信息载体进行的通信。由于光纤必须在构成光缆之后才能在实际工作中使用，所以有时采用光缆通信这个名称。这种通信方式所组成的光纤通信系统工作原理如图 1.1 所示。系统主要包括三大部分，即光发送设备、光接收设备和光传输设备。光发送设备主要有驱动器和光源，其作用是把电端机输入的电信号对光源进行调制，使光源产生与电信号相对应的光信号进入光纤。光接收设备主要有光检测器和放大器。当光信号通过光纤到达光接收设备时，光检测器把光信号转换为相应的电信号，经放大后进入电端机。在没有中继器的短距离通信系统中，传输设备是指光缆。在远距离通信系统中，为了补偿光纤的损耗并消除信号失真与噪声的影响，光缆经过一定距离需加装中继器。中继器由光检测器、电信号放大器、判决再生电路、驱动器和光源等组成，其作用是将光信号变成电信号，经放大和再生，然后再转换成光信号送入下一段光纤中。

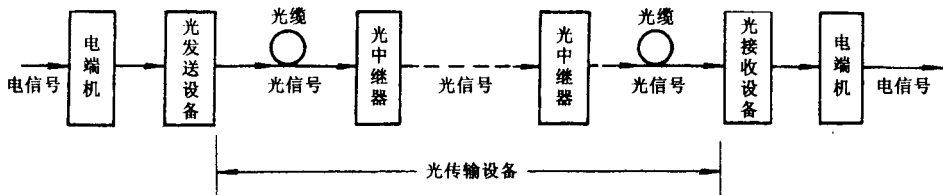


图 1.1 光纤通信系统的组成

1.3 光纤通信的特点

光纤通信具有以下优点。

(1) 传输频带宽，通信容量大。目前使用的光波频率比微波高 $10^3 \sim 10^4$ 倍，通信容量可增加约 $10^3 \sim 10^4$ 倍。理论上两根光纤可传送上百万个电话和上百套电视节目。

(2) 中继距离远。光纤通信无中继的直通距离可以比金属线缆远得多。目前可达 100km

以上，比同轴电缆大几十倍。

(3) 抗电磁干扰能力强，无串话。光纤是非金属的光导纤维，即使工作在强电磁场附近或处于核爆炸后强大的电磁干扰的环境中，光纤也不会产生感应电压、电流。这有利于传送动态图像（如可视电话和电视节目），靠近高压输电线或与电气化铁道平行敷设，通信也不受干扰，适合在工厂内部的自动控制和监视系统中应用，也有利于在多雷地区、飞机上以及保密性要求强的军政单位使用。由于光纤信息限制在光纤内传输，不会溢出光纤，所以光缆的光纤之间不会“串话”，即没有纤间串扰，不易被窃听。

(4) 光纤细，光缆轻。光纤直径一般只有几微米到几十微米，相同容量的话路光缆，要比电缆轻 90%~95%（光缆的重量仅为电缆的 1/10~1/20），直径不到电缆的 1/5。故运输和敷设均比铜线电缆方便，并有利于在军用战斗机上用做信号控制。

(5) 资源丰富，节约有色金属和能源。光纤的纤芯和包层的主要原料是二氧化硅，资源丰富且价格便宜，取之不尽。而电缆所需的铜、铝矿产则是有限的，采用光纤后可节省大量的铜材。制造 10000km 光纤比 10000km 单管同轴铜线可节约能源 $2.64 \times 10^{11} \text{J}$ ，折合标准煤为 $9 \times 10^5 \text{kg}$ 。

(6) 均衡容易。在工作频带内，光纤对每一频率成分的损耗几乎是相等的，一般不需要中继站和接收端采取幅度均衡措施。若需要均衡，一般也容易达到要求。

(7) 经济效益好。由于其通信容量大、中继距离长、节约有色金属和敷设方便等优点，因此，经济效益十分明显。34Mb/s 以上光纤通信系统的价格比同轴电缆便宜 30% 以上。

(8) 抗腐蚀、不怕潮湿。即使光纤的外保护层有小孔、裂缝而进水或受潮，也不会影响光的传递，但进水和受潮对金属导线则意味着接地和短路。光纤系统也不存在发生火花的危险，安全性好。

1.4 光纤通信的类型

光纤通信系统可以根据系统所使用的光波长、传输信号形式、传输光纤、信号的调制方式、光接收方式的不同和光纤中传送的是单波长通道还是多波长通道的信号，而分成各种光纤通信系统。这些系统的特点参见表 1.1。

表 1.1 光纤通信的分类

	类 别	特 点
按光波长 (光通道) 个数	单波长 (通道)	技术难度小, 相对成熟的技术
	多波长 (DWDM)	一根光纤传输多个波长, 容量大
按信号形式	数字光纤通信	传数字信号, 抗干扰能力强
	模拟光纤通信	传模拟信号, 适合图像传输
按调制方式	直接强度调制 IM	技术成熟, 成本低
	间接调制	高速传送, 成本高
按接收方式	直接检测 DD	目前使用的方法
	相干检测 CD	灵敏度高, 传输容量大, 距离远
按工作波长	短波长 MMF	采用 0.85 μm 波长, 距离短, 10km 以内
	长波长 SMF	采用 1.30/1.55 μm 波长, 距离长, 达 100km
按光纤特性	多模光纤 (MMF)	现主要应用于局域网
	单模光纤 (SMF)	广泛使用于大容量、长距离传输

1. 按传输信道数目划分

(1) 单信道（波长）系统

在一根光纤中只传送一个光波长，采用时分复用的方式（TDM）提高系统传输容量。

(2) 粗波分复用系统（CWDM）

在一根光纤中同时传送少量不同光波长（信道间隔大于 20nm）。粗波分复用系统在业务类型繁杂、传输容量多变的城域网中广泛采用。

(3) 密集波分复用系统（DWDM）

在一根光纤中同时传送多个不同波长的光信号（信道间隔小于 8nm），同时采用时分复用提高每一个波长的传输速率，使系统容量得到数百倍提高。

DWDM 技术将是光传输系统扩容的发展方向。高速 DWDM 系统对光纤器件的性能有特殊要求，推动了光纤、器件及光放大技术的快速发展。

2. 按传输信号的类型划分

(1) 模拟光纤通信系统

模拟光纤通信系统传送的是模拟信号，常用于广播节目、彩色电视节目、工业监视信号、交通监控信号等的传输。

(2) 数字光纤通信系统

数字光纤通信系统用于传输电的 PCM 数字信号。它的设备较复杂，但传输质量高，通信距离长，是广泛采用的系统。

3. 按光调制的方式划分

(1) 直接强度调制 IM

采用电信号对光源进行强度调制，在接收端用光检测器直接检测，称为 IM-DD 系统。目前应用的模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统均属此类型。其优点是简单、经济，但通信容量受到限制。

(2) 间接调制

利用晶体的电光效应、磁光效应和声光效应等性质对光辐射进行调制，既适用于半导体光源，也适用于其他类型的光源。间接调制最常用的是外调制，即在激光形成后加载调制信号。在高速长距离光纤系统中，采用间接调制有利于提高系统性能。在 PSK 相干光纤通信系统的发射机中，一般要用外调制。

4. 按接收方式划分

(1) 直接检测 DD

直接检测是用检测器直接把光信号转换为电信号。这种检测方式具有设备简单、经济实用的特点，是当前光纤通信系统普遍采用的方式。

(2) 相干检测 CD

在发送端用电信号对光源发出的单频光载波进行调制。用单模光纤传输到接收端，收到信号后与接收机内部产生的本振光源混频，再用光检测器检出光载波和本振光之差频的中频

电信号, 然后再解调出电信号。这种检测方式类似于无线通信中的外差接收技术。

5. 按光波长划分

(1) 短波长光纤通信系统

光纤通信早期多采用多模光纤系统, 工作在 800~900nm 波长范围, 其中继间距较短。目前主要用于计算机局域网、用户接入网等传输速率较低、传输距离较短的系统。

(2) 长波长光纤通信系统

长波长光纤通信系统工作在 1000~1600nm 波长范围。通常采用 1310nm 和 1550nm 两种波长。采用 1310nm 波长时, 可以选用石英多模光纤, 也可选用石英单模光纤, 目前多选用单模光纤。在 1550nm 波长上只用单模光纤, 由于此波段上石英光纤有最低的衰耗, 因而这类系统的中继距离较长。

(3) 超长波长光纤通信系统

当采用非石英系光纤, 如卤化物光纤, 工作波长大于 2000nm 时, 衰耗值可低至 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ dB/km, 可望实现 1000km 无中继传输。这种光纤尚在研制阶段。

6. 按光纤的传输特性划分

(1) 多模光纤通信系统

这种系统采用石英多模梯度光纤作为传输媒质。传输带宽受到限制, 一般应用于 140Mb/s 以下的系统。20 世纪 80 年代中期以前的系统大多为多模光纤通信系统。目前, 多模光纤系统主要应用于数据网络及某些专用网络。

(2) 单模光纤通信系统

采用石英单模光纤作为传输媒质。传输容量大, 无中继传输距离长。目前建设的长途干线网及本地网光纤通信系统基本上都是这一类型的系统。

7. 按应用的范围划分

(1) 公用光纤通信系统

通常把电信、广电部门应用的光纤通信系统称为公用光纤通信系统。其中又可分为光纤市话中继通信系统、光纤长途传输系统、光纤用户环路系统及有线电视系统等。

(2) 专用光纤通信系统

通常把各部门、各行业, 如电力、铁道、石油、公路交通、大型厂矿企业、军事等部门应用的光纤通信系统称为专用光纤通信系统。

但是目前电信运营的格局已有所变化, 国家政策已允许某些具备条件的专用网络进入公用电信服务。

1.5 光纤通信的发展方向

1. 光纤向保偏光纤方向发展

随着光纤通信系统容量不断增大、中继距离不断增长, 不仅要求光纤的损耗越来越低,

而且要求光纤的色散也要越来越小。

光纤的色散主要分为模间色散、材料色散和波导色散。模间色散是多模光纤中产生色散的主要因素。采用单模光纤一般就不需要考虑模间色散的问题。对于单模光纤来说，特别有意义的是由于材料色散和波导色散可能相互抵消，因而在 1310nm 附近将出现所谓光纤的“零色散点”。另外，在 1550nm 附近光纤的损耗比 1310nm 附近还要低，因此又出现了将“零色散点”从 1310nm 向 1550nm 方向移动的所谓色散位移型光纤，以及兼顾色散和损耗两者的色散平坦型光纤。由于波长越短，散射损耗越大，因此，为了减小瑞利散射所产生的固有损耗，光纤有可能向 2~10 μm 的超长波段方向发展。对于这种超长波长的光纤，光纤的连接耦合问题也较容易解决。再有，随着相干光纤通信的发展，要求光纤能保持光的偏振方向，以保证相干探测效率，因此，保偏光纤是一个重要研究方向。

2. 光纤通信系统的中继距离越来越长

光纤通信系统的中继距离受光纤损耗和带宽两个因素的限制，因此，光纤通信系统分为受损耗限制的光纤通信系统和受带宽限制的光纤通信系统。由于光纤损耗不断降低，光纤带宽不断增宽，使得光纤通信系统的中继距离越来越长，从近十公里有一个中继站发展到几百公里有一个中继站。有人估计，若采用超长波长相干光纤通信系统，可实现越洋无中继通信。

3. 光纤通信系统向波分复用系统方向发展

波分复用是光纤通信系统中的一种特殊的复用方式，采用波分复用可以充分利用光纤宽阔的低损耗区域，在不改变现有的已安装好的光纤通信线路的基础上，可以很容易地实现成倍提高光纤通信系统的容量。现在 EDFA+WDM 已成为高速光纤通信网发展的主流，代表新一代的光纤通信技术。

4. 光纤通信系统向相干光纤通信方向发展

目前大多数光纤通信系统采用的都是直接探测方式，在相干光纤通信中将采用相干检测方式。相干检测方式的最大优点是能提高光纤通信系统接收机的检测灵敏度。相干检测可分为自差法和外差法两种。为了实现相干光纤通信，要求光源是相干性很好、谱线很纯、频率很稳定的单频激光器；光纤应是单模单偏振的保偏光纤；还需要性能很好的光隔离器、偏振控制器等。

5. 光孤子传输

在增大传输中继距离方面，光纤的传光损耗和光接收机灵敏度不是惟一的障碍，而光纤的色散使脉冲展宽也成为重要的限制因素。对于光纤孤子脉冲传输，其原理是利用光纤在大功率注入时的非线性作用与光纤中的色散作用达到平衡，使光脉冲在传输中无展宽。具体地说就是在大功率光源注入光纤的非线性作用下，产生一种“自相位调制”，使脉冲波前沿速度变慢，而后沿速度变快，从而使脉冲不发生展宽。类似于流水中一个不变形的旋涡孤子，故称孤子传输。

自从光纤放大器在补偿光纤损耗延长通信距离方面起了巨大作用之后，有人认为孤子传输的研究更应加速赶上。

6. 光纤通信系统向全光通信方向发展

全光通信是指所有的信号都是用光学的方法进行处理，而不需要把它们变成电信号来进行处理。随着光纤放大器的出现，中继方式由光-电-光方式变为光-光方式，即在中继器中不需要先用光电检测器将光信号解调成电信号来进行处理。

7. 量子光通信系统

众所周知，在光通信中所使用的光具有量子光学的波粒二象性，因此利用光的量子性进行通信就成为人们日益关注的课题。目前，光通信技术如相干光通信、孤子光通信等经典通信，所应用的都是光的波动性，而应用光的量子性进行通信则被称为量子通信。

量子通信技术是光通信技术的一种，是利用光在微观世界中的粒子特性，让一个个光子传输“0”和“1”的数字信息。从理论上讲，量子通信可以传输无限量的信息，但由于光子在传输过程中会发生衰减，传输的速度会降低，因而传输的信息量不会达到理论值。但尽管如此，量子通信的速度也会比目前光通信的速度高出1000万倍，这是量子通信技术的优势之一。量子通信技术的另一个优势就是能够用于开发无法破译的密码。因此，如能把光的量子性成功地应用于通信，就会使人类的通信史发生根本性的变革。

量子通信以量子态作为信息载体，信息的传送和处理均要遵从量子力学规律，为信息科学的发展提供了新的理论和方法。目前，经理论研究和实验证实，量子通信在提高运算速度、确保信息安全、增大信息容量等方面可以突破现有信息系统的极限，因而引起了学术界、各国政府和产业界的高度重视。尽管量子通信作为新生学科在国际上的兴起是在1994年之后，时间很短，但已取得了一系列重要的突破。

习 题

- 1.1 简述光纤通信系统的组成、特点和类型。
- 1.2 简述光纤通信的发展趋势。