



普通高等教育“十三五”规划教材

国家级特色专业 · 通信工程 · 核心课程规划教材

光纤通信系统与网络

(第4版)

◆ 胡庆 殷茜 张德民 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国家级特色专业 · 通信工程 · 核心课程规划教材

光纤通信系统与网络

(第4版)

胡庆 殷茜 张德民 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了现代光纤通信系统与网络的基本结构、概念、原理、性能指标和关键技术, 主要内容包括典型光纤通信系统的原理、光纤传输原理及传输特性、光纤通信基本器件工作原理及性能指标、光纤通信系统及设计等。同时根据光纤通信网络的最新进展, 配合“全光网、全IP化”大趋势, 介绍了SDH/MSTP光同步网络、WDM/OTN光传送网络、PTN分组传送网络、城域与接入光网络、现代光通信系统及全光网等原理及实用技术。

全书注重理论与实践、设计与工程的结合, 精选了一些当前最新的实例进行分析, 并且以形象直观的图表形式来配合文字叙述, 有助于读者学习。为了配合教学和学习, 每章都精选一定数量的习题。本书可作为各高等院校工科通信与信息工程类专业课教材, 也可供科研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

光纤通信系统与网络 / 胡庆, 殷茜, 张德民编著. —4版. —北京: 电子工业出版社, 2019.8
国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材
ISBN 978-7-121-36880-6

I. ①光… II. ①胡… ②殷… ③张… III. ①光导纤维通信系统—高等学校—教材②光纤通信—通信网—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第120904号

责任编辑: 张京

印刷: 北京捷迅佳彩印刷有限公司

装订: 北京捷迅佳彩印刷有限公司

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: 15.75 字数: 403千字

版次: 2006年9月第1版

2019年8月第4版

印次: 2019年8月第1次印刷

定价: 45.00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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: davidzhu@pei.com.cn。

前 言

信息传输是信息社会的三大标志之一，光纤传输技术的发展，决定着整个通信网络的发展。为了适应光纤通信技术发展的快速性，知识更新强烈的需求性，编著者融合了 30 多年的教学经验、科研成果、工程实践及光纤通信自身发展的多样性，对本教材进行再次修订。在这次修订编写过程中，主编人员重新梳理理论知识点之间的衔接关系，进而缩减部分理论分析的难度和减少传统成熟技术知识的篇幅，同时根据光纤通信的最新进展，重点增补当前光网络的现代实用新技术内容，如基于 SDH 的 MSTP、光传送网 (OTN)、分组传送网 PTN (IP RAN)、城域与接入光网络、现代光通信系统和智能光网络 (ASON) 等应用技术。力求给读者一个比较全面的、系统的、从理论到实际的光纤通信系统与网络的完整框架。

本书比较全面、系统地讲述了现代光纤通信系统与网络的基本原理、基本技术、系统设计等。全书共 10 章：第 1~4 章主要介绍光纤通信系统所包含的基础内容，即光纤通信发展现状、光纤传输原理及传输特性、光纤通信基本器件和光纤通信系统构成原理及设计方法；第 5 章介绍了 SDH/MSTP 光同步网络；第 6 章讨论了 DWDM/OTN 光传送网络；第 7 章介绍了 PTN 分组传送网络；第 8 章介绍了城域与接入光网络，重点是城域、光互连网络和 APON/GPON/EPON 接入技术；第 9 章介绍了现代光通信系统，即相干光通信、光孤子通信、自由空间光通信和光量子通信；第 10 章介绍了现代全光网络，包括全光通信网的结构、智能光网络 (ASON)、光分组交换网路、光突发交换网路等。

本书第 1~6 章、第 9~10 章由胡庆修订，第 7 章由张德民修订，第 8 章由殷茜修订。全书由胡庆统稿，由张德民审核。在本书编写及修订期间，得到了刘鸿、周忠伦、刘文晶、王微昕等同志的大力协助，在此一并表示感谢。

为适应当前高校课程门类多、课时压缩的教学特点，本书在概念和原理的讲述上力求严谨、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。

本书可作为高等学校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。

由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，恳请读者批评指正。

编著者
2019 年 6 月

目 录

第 1 章 光纤通信概论	(1)
1.1 光纤通信系统发展现状	(1)
1.1.1 光纤通信特点及发展简史.....	(1)
1.1.2 光纤通信系统及发展现状.....	(4)
1.2 光纤通信网络发展现状	(6)
1.2.1 通信网概念	(6)
1.2.2 光纤通信网络模型	(7)
1.2.3 光纤通信网络现状	(8)
1.3 光纤通信发展与演变趋势	(10)
1.3.1 光纤、光缆发展与演变趋势.....	(10)
1.3.2 光纤通信系统发展与演变趋势.....	(11)
1.3.3 光纤通信网络发展与演变趋势.....	(11)
1.4 现代光通信技术特点与进展	(13)
1.4.1 相干光通信技术特点与进展.....	(13)
1.4.2 光孤子通信技术特点与进展.....	(14)
1.4.3 光时分复用通信技术特点与进展.....	(14)
1.4.4 光码分复用通信技术特点与进展.....	(16)
1.4.5 光量子通信特点与进展.....	(16)
1.4.6 自由空间光通信技术特点与进展.....	(17)
习题 1.....	(18)
第 2 章 光纤传输原理及传输特性	(19)
2.1 光纤和光缆的结构及类型	(19)
2.1.1 光纤结构及类型	(19)
2.1.2 光缆结构及类型	(22)
2.1.3 光缆型号、规格及特性.....	(26)
2.2 光纤传输原理分析	(28)
2.2.1 射线理论分析光纤的传输原理.....	(28)
2.2.2 波动理论分析光纤的传输原理.....	(31)
2.3 光纤的结构参数	(37)
2.3.1 几何参数	(37)
2.3.2 数值孔径	(38)
2.3.3 模场直径	(38)

2.3.4 截止波长	(38)
2.4 光纤的传输特性	(39)
2.4.1 损耗特性	(39)
2.4.2 色散特性	(42)
2.4.3 光纤双折射及偏振特性	(46)
2.4.4 光纤非线性效应	(47)
习题 2	(50)
第 3 章 光纤通信基本器件	(52)
3.1 光源器件	(52)
3.1.1 半导体激光器的结构及原理	(52)
3.1.2 分布反馈式和可调谐式半导体激光器	(58)
3.1.3 半导体激光器的主要特性	(61)
3.1.4 半导体发光二极管 (LED)	(65)
3.1.5 半导体发光二极管的主要特性	(65)
3.2 光检测器件	(66)
3.2.1 PD 光电二极管	(66)
3.2.2 PIN 光电二极管	(67)
3.2.3 APD 雪崩光电二极管	(68)
3.2.4 光电二极管的主要特性	(68)
3.3 光纤放大器	(71)
3.3.1 EDFA 的结构及原理	(71)
3.3.2 EDFA 的主要特性	(73)
3.4 光纤连接器	(75)
3.4.1 光纤连接器的结构与种类	(75)
3.4.2 光纤连接器的主要性能指标	(76)
3.5 光分路耦合器和波分复用器	(77)
3.5.1 光分路耦合器	(77)
3.5.2 波分复用器	(79)
3.6 光隔离器与光环行器	(84)
3.6.1 光隔离器	(84)
3.6.2 光环行器	(85)
3.7 光衰减器和光开关	(86)
3.7.1 光衰减器	(86)
3.7.2 光开关	(87)
3.8 偏振控制器	(88)
习题 3	(89)

第 4 章 光纤通信系统及设计	(90)
4.1 两种数字传输体制	(90)
4.1.1 准同步数字传输体制 (PDH)	(90)
4.1.2 同步数字传输体制 (SDH)	(91)
4.2 光发射机	(91)
4.2.1 光源调制	(91)
4.2.2 光发射机的结构及原理	(94)
4.2.3 光发射机的主要技术指标	(100)
4.3 光接收机	(100)
4.3.1 光接收机的结构及原理	(100)
4.3.2 光接收机的噪声分析	(103)
4.3.3 光接收机的主要技术指标	(106)
4.4 光中继器	(108)
4.5 光模块	(108)
4.5.1 光模块常用种类	(108)
4.5.2 光模块功能及组成原理	(108)
4.5.3 光收发模块型号及参数	(109)
4.6 系统的性能指标	(110)
4.6.1 误码性能	(110)
4.6.2 抖动和滑动性能	(112)
4.6.3 可靠性	(114)
4.7 光纤通信系统的设计	(115)
4.7.1 系统总体设计考虑	(115)
4.7.2 系统中继距离设计预算	(116)
习题 4	(120)
第 5 章 SDH/MSTP 光同步网络	(122)
5.1 SDH 的基本概念	(122)
5.1.1 光传输网络发展与演变	(122)
5.1.2 基本概念与帧结构	(123)
5.1.3 SDH 的复用映射结构	(125)
5.2 SDH 的基本网络单元设备	(126)
5.2.1 终端复用器 (TM) 和分插复用器 (ADM)	(127)
5.2.2 再生中继器 (REG)	(128)
5.2.3 数字交叉连接器 (DXC)	(128)
5.3 SDH 传送网	(128)
5.3.1 传送网分层与分割	(128)
5.3.2 SDH 网络结构	(130)

5.3.3	SDH 自愈环网原理	(131)
5.3.4	SDH 网络管理	(133)
5.4	基于 SDH 的 MSTP	(134)
5.4.1	MSTP 的概念	(134)
5.4.2	MSTP 的功能块模型及实现	(135)
5.4.3	MSTP 技术应用	(139)
	习题 5	(140)
第 6 章	DWDM/OTN 光传送网络	(141)
6.1	DWDM 的基本概念	(141)
6.1.1	波分复用定义及在传输网中的位置	(141)
6.1.2	DWDM 系统模型	(143)
6.1.3	实用 DWDM 系统的构成	(144)
6.2	DWDM 的基本网络单元设备	(146)
6.2.1	光终端复用设备 (OTM)	(146)
6.2.2	光线路放大设备 (OLA)	(152)
6.2.3	光分插复用设备 (OADM)	(153)
6.2.4	光交叉连接设备 (OXC)	(154)
6.3	DWDM 网络结构与保护	(155)
6.3.1	DWDM 网络结构	(155)
6.3.2	DWDM 自愈环网原理	(156)
6.3.3	DWDM 网络管理	(158)
6.3.4	DWDM 光网络在长途干线的应用	(160)
6.4	OTN 光传送网	(161)
6.4.1	基本概念与分层结构	(161)
6.4.2	OTN 的帧结构与开销	(165)
6.4.3	OTN 的复用映射结构	(167)
6.5	OTN 的基本网元和组网保护	(170)
6.5.1	OTN 新增网元	(170)
6.5.2	OTN 组网保护	(172)
	习题 6	(173)
第 7 章	PTN 分组传送网络	(175)
7.1	PTN 的基本概念	(175)
7.1.1	PTN 的基本概念及特点	(175)
7.1.2	PTN 的标准	(177)
7.1.3	PTN 与 MSTP、以太网和 IP/MPLS 的性能比较	(177)
7.2	PTN 网络体系结构	(179)
7.2.1	PTN 的分层结构	(179)

7.2.2	PTN 的功能平面	(180)
7.3	PTN 网元结构	(181)
7.3.1	PTN 网元分类	(181)
7.3.2	PTN 网元的功能结构	(182)
7.3.3	PTN 的业务承载与数据转发	(183)
7.4	PTN 组网应用及保护机制	(184)
7.4.1	PTN 组网应用	(185)
7.4.2	PTN 网络保护机制	(187)
	习题 7	(189)
第 8 章	城域与接入光网络	(190)
8.1	城域光网络	(190)
8.1.1	城域光网络的结构	(190)
8.1.2	城域光网络的特点	(191)
8.2	光互联网络	(192)
8.2.1	光互联网的概念	(192)
8.2.2	光互联网的体系结构	(194)
8.3	接入光网络	(195)
8.3.1	光纤接入网的界定	(195)
8.3.2	光纤接入网基本网元设备	(197)
8.3.3	光纤接入网的拓扑结构	(199)
8.4	无源光网络 (PON) 接入网	(200)
8.4.1	PON 的技术种类	(200)
8.4.2	APON、GPON、EPON 接入技术比较	(202)
8.5	EPON 系统结构及原理	(203)
8.5.1	EPON 系统结构	(203)
8.5.2	EPON 系统的工作原理	(204)
8.5.3	EPON 帧结构	(205)
8.5.4	EPON 关键技术	(207)
8.5.5	EPON 基本网络单元设备	(208)
8.6	光纤接入网的应用	(210)
8.6.1	xPON 接入网应用	(210)
8.6.2	TDD+TDM+TDMA 的 PON 的 OAN	(211)
	习题 8	(213)
第 9 章	现代光通信系统	(214)
9.1	相干光通信系统	(214)
9.1.1	相干光通信系统的基本原理	(214)
9.1.2	相干光通信系统的关键技术	(216)

9.1.3	相干光通信系统的优点及前景	(216)
9.2	光孤子通信系统	(217)
9.2.1	光孤子通信系统的基本原理	(217)
9.2.2	光孤子通信系统的关键技术	(218)
9.2.3	光孤子通信系统的优点及前景	(218)
9.3	自由空间光通信系统	(219)
9.3.1	FSO 通信系统的基本原理	(219)
9.3.2	FSO 通信系统的关键技术	(220)
9.3.3	FSO 通信系统的优点及前景	(221)
9.4	光量子通信系统	(221)
9.4.1	光量子通信系统的基本原理	(222)
9.4.2	光量子通信系统的关键技术	(223)
9.4.3	光量子通信系统的优点及前景	(225)
	习题 9	(226)
第 10 章	现代全光网络	(227)
10.1	全光网络概述	(227)
10.1.1	全光网络的基本概念及特点	(227)
10.1.2	全光网络中的关键技术	(228)
10.1.3	全光网络的结构	(229)
10.2	智能光网络 (ASON)	(230)
10.2.1	ASON 的概念及体系结构	(230)
10.2.2	ASON 的特点及连接类型	(231)
10.2.3	ASON 的结构	(232)
10.3	光分组交换网络	(233)
10.3.1	光分组交换的概念	(235)
10.3.2	光分组交换技术的原理	(235)
10.3.3	光分组交换网络的结构	(236)
10.4	光突发交换网络	(237)
10.4.1	光突发交换的概念	(237)
10.4.2	光突发交换技术的原理	(237)
10.4.3	光突发交换网络的结构	(238)
	习题 10	(239)
参考文献		(240)

第 1 章 光纤通信概论

从诞生光纤通信以来，一场持续的革命一直改变着整个世界的通信领域。人们所需的高清晰、高可靠、远距离、大容量通信成为了现实。今天的光纤通信已渗透到电信网络、数据网络、有线电视（CATV）网络、光互联网络和物联网等信息网络中，可以说，目前光纤通信已成为信息传输最重要的方式之一。

现如今，只有对光纤通信系统与网络的传输性能和工作原理有足够的理解才能以较少的投入获得高质量的通信。信息的高速传输使人们“决策帷幄中，致胜千里外”已不再是幻想。

1.1 光纤通信系统发展现状

1.1.1 光纤通信特点及发展简史

光纤通信是利用光导纤维（简称光纤）传输光波信号的通信方式。由于光纤的传光性能优异，传输带宽极宽，现在已形成了以光纤通信为主，微波、卫星和电缆通信为辅的信息传输网络格局。

通信发展始终在追求两大目标，一是远距离传输，二是大容量通信。众所周知，无论是无线电通信，还是有线电通信都是以电磁波为载体进行的，而电磁波的频谱很宽，其分布情况如图 1-1 所示。由图可见，无线电通信所用载波波段在波长为几厘米至几千米范围内。由通信原理可知，信道容量与载波频率的百分之十成正比例增大，所以人们一直在探索将更高频率的电磁波作为载波用于通信技术。光纤通信中所用的光载波属于电磁波的范畴，主要包括紫外线、可见光和红外线，光波与无线电波相似，其波长在微米（ μm ）级，频率非常高，约为 10^{14} Hz 量级，其频率比传统的“微波”段还高 $10^4 \sim 10^5$ 倍。光纤通信中所用的光纤属于介质光波导的范畴，其基础材料是 SiO_2 的一种介质。目前光纤通信使用的工作波长为 $0.85 \sim 2.00 \mu\text{m}$ ，采用的典型中心波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.625 \mu\text{m}$ 。

光纤通信与电缆或微波等通信方式相比，主要区别有二，一是用很高频率的光波作载波；二是用光纤作为传输介质。光纤具有传输容量大、传输损耗小、质量轻、不怕电磁干扰等一系列优点。基于此，光纤通信有以下明显的优势。

(1) 由于光波频率高，可供利用的频带极宽，尤其适合高速宽带信息的传输，在高速通信干线、宽带综合业务通信网络中，发挥着越来越大的作用。

(2) 由于光纤的传输损耗很低，现已做到 0.2 dB/km 以下，因而可以大大增加通信无中继距离，这对于长途干线和海底传输十分有利。在采用了先进的相干光通信、光放大器和光孤子通信技术之后，无中继通信距离可提高到几百千米，甚至上千千米。

(3) 光纤传输是限制在光纤纤芯内的，光能几乎不会向外辐射，因此不存在光缆中各

光纤之间信号串扰, 很难被窃听, 信号传输质量高, 保密性好。

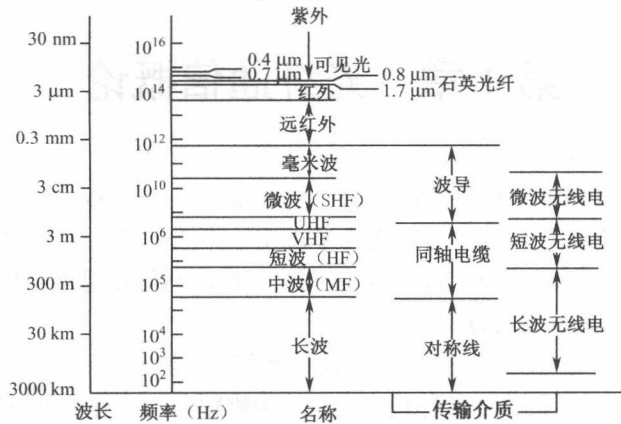


图 1-1 电磁波谱与传输媒质的关系

(4) 光纤抗电磁干扰能力很强, 这对于电气铁路和高压电力线附近的通信极为有利, 也不怕雷击和其他工业设备的电磁干扰, 因此在一些要求防爆的场合使用光纤通信是十分安全的。

(5) 光纤几何尺寸小, 细如发丝, 可绕性好, 可多根成缆, 便于敷设。光纤质量轻, 特别适用于飞机、轮船、卫星和宇宙飞船。

(6) 光纤的化学性能稳定, 耐化学侵蚀、抗高温、不打火花, 适用于特殊环境。

(7) 光纤是石英玻璃拉制成形的, 原料资源丰富, 节约有色金属。

应该指出, 光纤通信也有一些缺点, 如光纤的连接操作技术要求高、需专用设备等, 现已在一定程度上得到克服, 它不影响光纤通信的实用。表 1.1 和表 1.2 分别列出了光纤与电缆、波导这几种传输介质的特性比较和光纤的特点及应用场合。

表 1.1 光纤与电缆、波导的特性比较

传输介质	频率带宽	衰减系数/(dB/km)	一般传输距离/km	敷设安装	接续
市话对称电缆	4 kHz	1.64 (线径 0.4mm)	1~5	方便	方便
5 类双绞线	100 MHz	24 (dB/100m)	(90~100) m	方便	方便
细同轴电缆	30 MHz	4.1 (dB/100m)	180 m.	方便	较方便
粗同轴电缆	800 MHz	7.1 (dB/100m)	500 m	方便	较方便
微波波导	2~24 GHz	0.015~0.3 (dB/m)	<100 m	特殊	特殊
单模光纤	≥10~100 GHz	0.2 (注 1)~0.36 (注 2)	>50	方便	特殊

注 1: 当光波波长为 1.55 μm 时的值。

注 2: 当光波波长为 1.31 μm 时的值。

表 1.2 光纤的特点及其应用场合

光纤特点	应用场合
低衰减、宽频带	公用通信、计算机通信、有线电视图像传输
尺寸小、质量轻	飞机、导弹、航空航天、舰船内的通信控制
抗电磁干扰	电力及铁道通信, 交通控制信号, 核电站通信
耐化学侵蚀	油田、炼油厂、矿井等区域的通信
应变传感特性	光纤桥梁工程结构实时监测

众所周知,光早已用于远距离通信,如烽火台、信号灯等,但早期所用光通信方法是原始的、落后的和不太可靠的。现代光通信概念是1880年提出的,A.G 贝尔研究出一个可以在可见光束上,两百多米距离内传送话音的光电话机装置,其原理是用振动的话音声波调制太阳光源,将已调光波通过镜面反射入大气传输至终端,终端接收机将连续话音光信号通过光电池还原,这个想法是真正意义上的光通信。但遗憾的是,此技术不能实用,究其原因有二:一是没有可靠的、高强度的光源;二是没有稳定的、低损耗的传输介质,所以无法得到高质量的、大容量的光通信。

1960年,美国人梅曼(T.H.Maiman)发明了第一台相干振荡光源——红宝石激光器。激光(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Laser)是基于物质原子、分子内能的变化而构成的光波振荡器。激光的频率成分单纯、方向性好、光束发散角小,几乎是一束平行的光束。之后出现的气体和固体激光器,因体积大、效率低,不适宜在通信中使用。

1962年半导体激光器出现,为光通信光源实用化带来了希望。1970年,首次研制出在室温下连续工作的双异质结半导体激光器,为实用化通信光源奠定了基础。

1966年,英籍华裔科学家高锟(C.K.Kao)发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,开创性地提出光导纤维在通信上应用的基本原理,由此高锟教授荣获2009年诺贝尔物理学奖。

1970年,美国康宁公司的Maurer等人首次研制出阶跃折射率多模光纤,其在波长为630 nm处的衰减系数小于20 dB/km;同年美国贝尔实验室的Hayashi等人研制出室温下连续工作的GaALAs双异质结注入式激光器。正是光纤和激光器这两个科研成果的同时问世,拉开了光纤通信的序幕。到20世纪70年代末,在1310 nm波长上,光纤衰减系数已降至4 dB/km;在1550 nm波长上,降至0.20 dB/km,已接近理论值。与此同时,为促进光纤通信系统的实用化,人们又及时地开发出适用于长波长的光源(激光器、发光二极管)和光检测器。应运而生的光纤成缆、光无源器件和性能测试及工程应用仪表等技术的日趋成熟,都为光纤通信作为新的通信方式奠定了坚实的基础。

1976年,美国西屋电气公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个传输距离为110 km的44.736 Mbit/s光纤通信系统的现场实验,使光纤通信向实用化迈出了第一步。

我国自20世纪70年代初就已开始了光纤通信技术的研究,1977年,武汉邮电科学研究院(现烽火公司)研制成功中国第一根阶跃折射率分布的、波长为850 nm、衰减系数为3 dB/km的多模光纤。后来又研制成功单模光纤、特殊光纤及光通信设备。

1987年年底,建成第一个国产的长途光通信系统,由武汉至荆州,全长约250 km,传输34 Mbit/s信号,光缆采用架空方式。

1988年起,国内光纤通信系统的应用由多模光纤转为单模光纤。

1993年,我国与日本、美国三方投资建设的第一条大容量海底光缆正式开通,全长1250 km,传输速率560 Mbit/s,可提供7560条电路,相当于原有的中日海底同轴电缆的15倍。

1999年我国完成了“八纵八横”通信光缆工程,全长约80000 km。它作为整个国家南北东西的主干通信网,使我国光纤通信水平迈上了新台阶。

近年,着力解决全网瓶颈——将光纤接入网作为通信接入网的一部分,直接面向用户。提出“光进铜退”策略,即将光纤引入到千家万户,保证亿万用户的多媒体信息畅通无阻。

地进入信息高速公路。在网络传输的高速化方面,目前商用系统的速率已从 155.520 Mbit/s 增加到 10 Gbit/s,不少已达到 40 Gbit/s,另外,速率达 160 Gbit/s 和 640 Gbit/s 的传输试验也获得成功。

光纤通信技术的问世与发展给世界通信业带来了一场变革。特别是近 40 年,光纤通信的研究和开发非常迅速: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。到目前为止光纤通信的发展可以粗略地分为四个阶段:

第一阶段(1966—1976年),从基础研究到商业应用的开发时期。在这个时期,实现了短波长(0.85 μm)低速率(34 Mbit/s 或 45 Mbit/s)多模光纤通信系统,无中继传输距离约 10 km。

第二阶段(1976—1986年),以提高传输速率和增加传输距离为研究目标,大力推广应用的大发展时期。在这个时期,实现了工作波长为 1 310 nm、传输速率为 140~565 Mbit/s 的单模光纤通信系统,无中继传输距离为 50~100 km。

第三阶段(1986—1996年),以超大容量和超长距离为目标、全面深入开展新技术研究的时期。在这个时期,实现了 1 550 nm 色散移位单模光纤通信系统。采用外调制技术,传输速率可达 2.5~10 Gbit/s,无中继传输距离可达 100~150 km。

第四阶段(1996—近年),主要研究光纤通信新技术,例如,超大容量的密集波分复用技术使最高速率达到 256×40 Gbit/s=10 Tbit/s 和超长距离的光孤子通信技术等。

目前人们正涉足第五阶段光纤通信系统的研究和开发,至少具有四大特征:超宽带——单根光纤传输容量 Tbit/s 以上;超长距离——光放大距离可达数千千米;光交换——克服电交换瓶颈;智能化——智能光网络技术。光通信发展史如表 1.3 所示。

表 1.3 光通信发展史

古代光通信	烽火台、夜间信号灯、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,接收器为硒管,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 1 000 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 公司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,密集波分复用(DWDM)系统实用化
21 世纪	先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术、偏振复用相干检测技术,以及有源和无源器件集成模块大量问世,出现了以 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 为基础的 DWDM 系统应用

1.1.2 光纤通信系统及发展现状

1. 光纤通信系统模型

光纤通信系统可以传输数字信号,也可以传输模拟信号,还可以承载话音、图像、数据和多媒体业务等各类信息。目前实用的光纤通信系统,采用的是强度调制(IM)-直接检

波 (DD) 的实现方式, 由光发射机、光纤传输线路、光接收机和各种光器件等构成, 如图 1-2 所示, 现主要用于长途骨干网、本地网及光纤接入网。

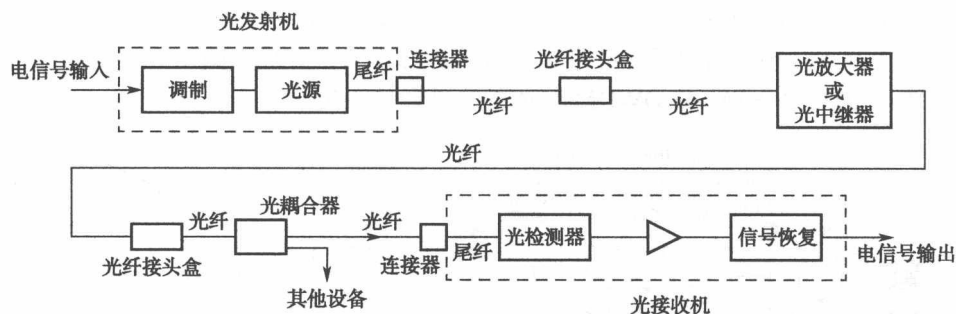


图 1-2 光纤通信系统构成示意图

图 1-2 中所示的是一个方向的传输系统, 反方向传输系统的结构与之相同。光纤通信系统可分为三个基本单元, 即光发射机、光纤线路和光接收机。光发射机由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成。光源是其核心部件, 由激光器 (Laser Diode, LD) 或发光二极管 (Light Emission Diode, LED) 构成。光纤在实际应用中一般以光缆形式存在, 完成光信号传送。光接收机由光检测器 (如光电二极管 PIN 或 APD)、放大电路和信号恢复电路组成。光接收机的作用是实现光/电转换, 即把来自光纤的光信号还原成电信号, 经放大、整形、再生恢复原形。

对于长距离的光纤线路, 除了光纤作为传输线传送光信号, 中途还需要设置光放大器或光中继器, 光放大器起光波信号放大的作用, 弥补长距离传输光信号的衰减; 光中继器是将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, 以保证良好的传输质量。在光纤线路中还包括大量的有源、无源光器件、连接器件、光耦合器件, 它们分别起着各种设备与光纤之间的连接作用和用于需要将传输的光分路或合路的场合等功能。

2. 光纤通信系统的现状

(1) 模拟光纤通信系统的现状

传输模拟信号的光纤通信系统称为模拟光纤通信系统, 模拟光纤通信系统的典型应用场景是工业控制的单路电视系统和光纤有线电视 (CATV) 的多路传输系统。此外, 模拟光纤传输还应用于光纤测量、光纤传感等领域, 而且随着光无线通信技术的日益成熟, 模拟光纤传输技术应用逐步趋于萎缩。

(2) 数字光纤通信系统的现状

传输数字信号的光纤通信系统称为数字光纤通信系统, 数字光纤通信系统有 PDH 和 SDH 两种传输体制。我国采用的 PDH 传输体制的速率分四级, 即基群速率为 2.048 Mbit/s, 2 次群速率为 8.448 Mbit/s, 3 次群速率为 34.368 Mbit/s, 4 次群速率为 139.264 Mbit/s。SDH 传输体制的速率, 是按同步传输模块 STM-N 系列来分的, 即 STM-N ($N=1, 4, 16, 64$) 的速率为 $155.520 \times N$ Mbit/s, 亦即 STM-1 速率是 155.520 Mbit/s, STM-4 速率是 622.080 Mbit/s。根据所需传输容量选择同步数字传输系列等级, 一般大中城市市内中继光纤通信系统选用 STM-64; 小城市 (镇) 和乡村中继光纤通信系统既可选用 STM-4 或 STM-16, 也可选用 PDH

传输体制的2次群或3次群；长途干线光纤通信系统常用掺铒光纤放大器（EDFA）为光中继器，单一光波长的数字光纤通信系统，长途传输可用光中继器，如图1-3所示。还可以采用多波长复用的密集波分复用（DWDM）系统，该系统是在一根光纤上传输多个光波长信道的光纤通信方式，充分利用了光纤带宽，有效扩展了通信容量，图1-4给出了一个32波分复用系统，即由32×STM-64 DWDM组成的光纤通信系统。

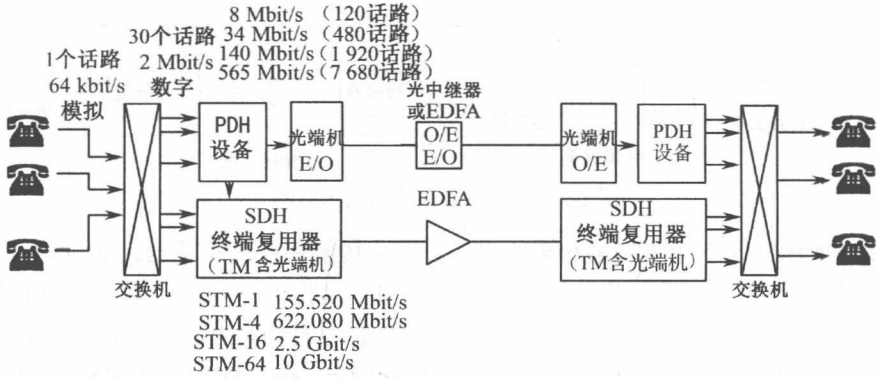


图 1-3 数字光纤通信系统原理图

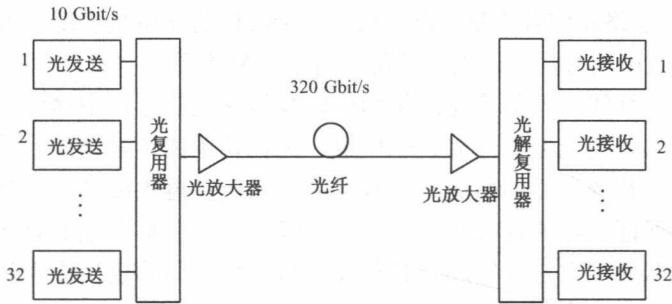


图 1-4 32×STM-64 DWDM 光纤通信系统原理图

1.2 光纤通信网络发展现状

1.2.1 通信网概念

两用户间需要通信时，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，若要让他们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。此时，若自高空向地面俯视，可以看到有很多传输设备与传输线路纵横交错地分布在大地上，犹如罩着一个鱼网，故称为“通信网”。通信网的基本结构如图1-5所示，图中圆点代表网络上的节点，节点既可以是终端节点，如电话机、电视机和计算机等，也可以是网络节点，如交换机、传输设备、路由器和中继器等。节点之间由传输线连接在一起。通信网的基本结构主要有网孔形、星形、复合形、环形和总线形等，如图1-5所

示。将各类网型结合起来，网络的结构就会合理得多。

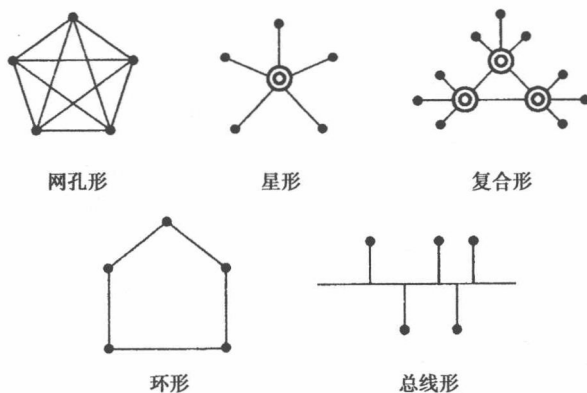


图 1-5 通信网的基本结构图

1.2.2 光纤通信网络模型

光纤通信网从电信的业务来分，有电话网、电报网、传真网、图像通信网、广播电视网及计算机数据网（局域网、城域网和广域网）等；按服务区域范围分为：长途骨干网、国际长途网、本地网、用户接入网，以及局域网、城域网和广域网等。

一个完整的光纤通信网络由用户终端设备、光传输设备、在电路域内或光路域内交换/选路的节点设备和相应的信令、协议、标准、资费制度与质量标准等软件构成。

用户终端设备是以用户线为传输信道将各种话音、图像、数据等媒体信息变成电信号的终端设备，也称为终端节点。

光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，主要包括数字复用、解复用设备和光收、发信机设备。

交换/选路的节点设备用于完成用户群内的各个用户终端之间通信线路的汇聚、转接和交换，并控制信号的流向。交换设备的种类有：源于电话通信的程控电话交换机、源于数据通信的分组交换机、源于下一代网络（NGN）宽带通信的软交换机、IP 多媒体子系统 IMS 及全光通信中的光交换机等。

信令系统是通信网的神经系统。比如，电话要接通，必须传递和交换必要的信令，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。

协议是通信网中用户与用户、用户与网络资源、用户与交换中心间完成通信或服务所必须遵循的预先约定的规则和共同“语言”。这种语言能使通信网正确控制、合理运行。

标准是由权威机构建议的协议，是通信网应遵守的条款。

光纤通信网络的基本结构拓扑图如图 1-6 所示。