



袁建国 叶文伟 编著

光纤通信新技术

光纤通信新技术

袁建国 叶文伟 编 著

电子工业出版社



Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

全书系统地介绍了光纤通信关键技术及国内外关于光纤通信技术的最新科研成果,并总结了作者多年来在光纤通信技术方面的工程实践经验。本书共 11 章,包括光纤通信技术概论、新光纤技术、光纤拉曼放大技术、光纤色散补偿技术、光波长稳定技术、光滤波技术、光功率均衡技术、光纤通信中 FEC 编码技术、光纤通信中调制码型技术、光孤子传输技术与光接入网新技术等内容。

本书内容翔实,系统性强,可作为通信工程、电子工程、光学工程等相关专业高年级本科生和研究生的教学用书,也可作为从事光纤通信产业的工程技术人员和科研人员的参考书。

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

光纤通信新技术 / 袁建国, 叶文伟编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.3

ISBN 978-7-121-22449-2

I. ①光… II. ①袁… ②叶… III. ①光纤通信 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 021683 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16 字数: 410 千字

印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 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。

前言

光纤通信技术自问世以来，一直向着两个目标不断发展：一是向着骨干光网络方向发展，延长中继距离和提高传输速率；二是向着最后“一公里”光通信方向发展，不断提高光接入网技术。光纤的吸收和散射会导致光信号的衰减，光纤的色散将使光脉冲发生畸变，导致误码率增高，信号传输质量降低，限制了通信距离。为了满足长距离传输的需要，必须在光纤线路上加入中继器，以补偿光信号的衰减和畸变，对信号进行整形。在光通信系统中，掺铒光纤放大器（EDFA）的应用大大增加了无电中继的传输距离；密集波分复用（DWDM）技术已成功地应用于光通信系统，极大地增加了光纤中可传输信息的容量，降低了系统的成本。光纤通信技术正向着超高速、超长距离、超大容量发展，并且逐步向下一代光网络演进。但随着波分复用信道数的增加，单通道速率的提高，光纤的非线性效应成为限制系统性能的主要因素，长距离传输必须克服色散和非线性效应的影响。因此如何提高光纤传输系统的容量，增加无电再生中继的传输距离，已经成为光纤通信领域研究的热点。对光纤传输的要求肯定是传输距离越远越好，同时减少再生中继器的数量，降低建设和运行维护成本，提高可靠性。所有研究光纤通信技术的机构都在这方面下了很大的功夫。从技术角度看，光纤放大器的出现，尤其是光纤拉曼放大器的实用化，为增大无再生中继距离创造了条件。同时，采用有利于长距离传送的线路码型（如 RZ 或 CS-RZ 码等）来提高传送距离，采用 FEC、超强 FEC 等技术提高接收灵敏度，用色散补偿和 PMD 补偿技术解决光通道代价和选用合适的光纤及光器件等，已经可以使超过 STM-64 或基于 10Gbit/s 的 DWDM 系统，实现 4000 km 无电再生中继器的超长距离传输。

人们将更高速率和更多信道的信息合波后送入一根光纤并不断试图将信号传输得更远，以求增大单根光纤的传输容量和降低每比特的成本。但是，更高的单信道速率、更小的信道间隔和更远的无电中继传输距离都意味着对光纤的色散、色散斜率、偏振模色散、非线性效应（四波混频交叉相位调制等）等性能提出了新的严格要求。可以说，每一次传输容量和传输距离的大幅度提升，都与市场需求和关键技术的突破这两方面紧密相关。回顾光传输系统的历史发展轨迹可以明显地看出，无电中继传输距离的每一次较大规模提升，总是基于新技术的采用和关键问题的解决而实现的，同时又伴随着对传输距离的新限制因素的出现。这些物理限制因素包括放大自发辐射噪声积累、色度色散、非线性效应和偏振模色散等。在单信道 10Gbit/s 的长距离 DWDM 光传输中，又以前三种物理效应最为明显，

而偏振模色散（PMD）效应主要在更高速率，如 40Gbit/s 及以上传输系统中起着重要的影响作用。为了应对这些技术挑战，增大传输容量和延长无电中继距离，科研人员开发出了多种新技术，包括新型光纤技术、分布式拉曼放大技术、前向纠错（FEC）技术、新型编码调制技术、光孤子传输技术、色散补偿和非线性控制技术。随着信息领域相关技术的发展，特别是互联网对数据业务增长的强大推动，人们对光通信系统的功能提出了新的、更高的要求，要求光通信系统能够实时地、动态地调整网络的逻辑拓扑结构，能够快速、高质量地为用户提供各种带宽服务与应用，实现资源的最佳利用和实时的流量工程。这样，光纤通信技术除了向着骨干光网络技术方向发展之外，光网络在城域网和接入网中的广泛应用，城域光网络和接入光网络面向用户和业务，提供业务的接入、梳理、汇聚和传输功能，也成为近几年光纤通信网建设的重点。

面对光纤通信技术日新月异的发展现实，打破以陈旧的科技内容为主体的格局，反映 21 世纪的最新科学成果，培养读者良好的科学素质和科学研究意识，迅速把读者的注意力吸引到科学前沿，是认真筛选、重新组织本书内容的主要目的。本书力求反映光纤通信技术的最新技术和当前的研究水平，是一本理论性、系统性、可读性和时效性较好的图书。

本书共 11 章，第 1 章是光纤通信技术概述，从总体上对光纤通信技术的演进、关键技术和优越性以及光通信系统的基本构成和经典解决方案等方面进行简要介绍；第 2 章为新型光纤技术，介绍了光纤新材料、光纤性能对通信系统的影响、新型光纤技术、骨干网与城域网的光纤选择；第 3 章为光纤拉曼放大技术，主要在光放大技术分析、拉曼放大技术、拉曼放大技术在光通信系统中的应用和拉曼放大技术对光通信系统性能的影响等方面进行介绍；第 4 章为光纤色散补偿技术，介绍了线性色散补偿技术、非线性色散补偿技术和偏振模色散（PMD）补偿技术；第 5 章为光波长稳定技术，介绍了光通信系统对波长中心频率偏差的要求、光通信系统中波长稳定的方法和波长锁定技术；第 6 章为光滤波技术，介绍了光滤波技术的工作原理、可调光滤波技术、光分/合波技术、群组滤波—Interleaver 技术、光滤波器的主要指标及技术比较和光滤波器的应用与选择；第 7 章为光功率均衡技术，介绍了光功率均衡器、EDFA 的增益钳制技术和 EDFA 的增益均衡技术；第 8 章为光通信中 FEC 编码技术，介绍了纠错码的概念及工作原理、前向纠错（FEC）技术、光通信系统中 FEC 码的选择与应用方式、FEC 技术对光通信系统性能的改善、超强 FEC（SFEC）技术、光通信中 FEC 应用的数字封装技术和光通信系统的 OTU 设计中 FEC 技术的实现；第 9 章为光通信中调制码型技术，介绍了光通信中编码信息的调制技术、光通信中常用的调制码型技术、光通信系统中各码型的传输特性和传输参数对不同调制码型系统的影响；第 10 章为光孤子传输技术，介绍了光孤子传输的基本原理、光孤子传输系统、光孤子通信的特点与色散控制方案和色散管理光孤子传输技术；第 11 章为光接入网新技术，主要介绍了 WDM-PON 技术和 OCDMA 技术。

本书系统阐述了目前国内外关于光纤通信技术的最新科研成果和研究资料，并总结了作者多年来在光纤通信技术方面的实际工作经验和研究成果。本书作者曾在大唐电信光通信分公司从事“中国高速信息示范网”等项目的众多光传输设备产品的研发工作，参与过众多光通信设备提供商或其他通信组织、协会举办的技术交流会和专题论坛，而且还多次参与了国内运营商的全国范围内光网络建设设备选型框架谈判、招投标和相关设备的测试工作，因而本书作者不但对光网络理论与技术有较为全面的了解，而且还十分熟悉各厂家

设备及解决方案的特点。本书内容融合了作者在大唐电信光通信分公司（原邮电部第五研究所）工作中的许多光网络实际工程技术与在重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室从事光网络技术方面的科研与教学成果等内容，使得本书更好地做到理论结合实际，使当今本学科前沿技术、最新的科研成果、未来发展方向和最新动态以及实际应用的光网络信息传输技术等有机联系起来，从而突出本书内容的基础性、前沿性、启发性和实用性。尤其是作者在大唐电信光通信分公司参与了多年光通信技术的实际研发工作经验，对本书编写中将实际工程对技术的需求与目前教学上对于技术的介绍有机结合起来起着极其重要的作用，这也是高校专业教材中急需的新内容。

本书作者主持并参与了数十个国家级和省部级项目，在高校从事科研与教学工作多年，多次参与业界重要社会活动，发表光纤通信技术方面的国内外核心期刊与国际会议论文 80 余篇。这些为作者把握光纤通信技术的最新科技动态、掌握前沿技术奠定了坚实基础。

在本书的编写过程中，得到了重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室全体科研工作者以及光电工程学院与教学处领导们的悉心帮助与指导；大唐电信光通信分公司和电信科学技术第五研究所的一些专家、高工给本书提供了大量的文献资料，在此感谢他们！

参加本书资料整理及校对工作的还有：刘飞龙、田杨、盛泉良、袁艳涛、黄晓峰、高文春、叶传龙、胡夏、孙思、何昌伟、周光香、杨松、马骏和李璋超等。在出版过程中，电子工业出版社的董亚峰老师也付出了大量的心血，给予了极大帮助，在此一并表示衷心的感谢！

光纤通信技术是一项全新的技术，本书注重选材，内容新颖详尽，系统性强，在叙述时作者力求深入浅出，通俗易懂，然而由于作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

袁建国

2014 年 1 月 16 日

目 录

第 1 章 光纤通信技术概论	1
1.1 光纤通信技术的演进	1
1.2 光纤通信系统的关键技术	3
1.3 光纤通信系统的基本组成	5
1.4 光纤通信技术的优越性	6
1.5 光纤通信系统的经典解决方案	8
第 2 章 新光纤技术	10
2.1 引言	10
2.2 光纤新材料	10
2.3 光纤性能对通信系统的影响	12
2.3.1 色度色散	12
2.3.2 偏振模色散	13
2.3.3 零色散波长与色散斜率	13
2.3.4 有效面积	14
2.3.5 非线性效应	15
2.4 新型光纤技术	15
2.4.1 G.652 型与 G.655 型光纤及其最新发展	16
2.4.2 大有效面积光纤	18
2.4.3 低色散斜率光纤	19
2.4.4 全波光纤	20
2.4.5 最新的 G.656 光纤	20
2.5 骨干网与城域网的光纤选择	21
2.5.1 不同传送网对光纤特性的要求	21
2.5.2 骨干网光纤的选择	22
2.5.3 城域网光纤的选择	23

第3章 光纤拉曼放大技术	24
3.1 引言	24
3.2 光放大技术分析	25
3.2.1 光放大器的发展	25
3.2.2 光放大器的分类	28
3.2.3 光放大器的应用	30
3.3 拉曼放大技术	30
3.3.1 拉曼放大器的基本原理	30
3.3.2 拉曼放大器的技术指标	32
3.3.3 拉曼放大器的分类和应用方式	35
3.3.4 拉曼放大器的特点与技术优势	41
3.4 拉曼放大技术在光纤通信系统中的应用	45
3.5 拉曼放大技术对光纤通信系统性能的影响	51
3.5.1 光信噪比	51
3.5.2 噪声系数	52
3.5.3 Q 因子系数	56
第4章 光纤色散补偿技术	59
4.1 引言	59
4.2 线性色散补偿技术	60
4.2.1 色散光纤补偿	60
4.2.2 色散管理光纤	65
4.2.3 啁啾光纤光栅	67
4.2.4 控制啁啾现象的技术	69
4.2.5 线性预啁啾技术	70
4.2.6 色散支持传输技术	71
4.2.7 高阶色散管理	71
4.2.8 动态色散管理	72
4.3 非线性色散补偿技术	73
4.3.1 色散管理光孤子传输技术	73
4.3.2 中间频谱反转技术	74
4.3.3 非线性管理技术	74
4.3.4 色散管理孤子	76
4.4 偏振模色散补偿技术	77
4.4.1 PMD 的表征参数	78
4.4.2 PMD 对光传输系统的影响	80
4.4.3 PMD 补偿技术	81

第 5 章 光波长稳定技术 87

5.1 引言 87

5.2 光纤通信系统对波长中心频率偏差的要求 88

5.3 光纤通信系统中波长稳定的方法 89

5.4 波长锁定技术 90

5.4.1 采用介质膜滤波片的波长锁定器 90

5.4.2 采用法布里-珀罗标准具的波长锁定器 90

5.4.3 集成式 91

第 6 章 光滤波技术 92

6.1 引言 92

6.2 光滤波技术的工作原理 92

6.3 可调光滤波技术 93

6.4 光分/合波技术 94

6.4.1 光栅型波分复用器 94

6.4.2 介质薄膜滤波器型波分复用器 95

6.4.3 熔锥型波分复用器 95

6.4.4 集成光波导型波分复用器 96

6.5 群组滤波——Interleaver 技术 96

6.6 光滤波器的主要指标以及技术比较 97

6.7 光滤波器的应用与选择 98

第 7 章 光功率均衡技术 99

7.1 引言 99

7.2 光功率均衡器 100

7.2.1 光功率不均衡性的来源 100

7.2.2 光功率均衡器的结构 100

7.3 EDFA 的增益钳制技术 101

7.4 EDFA 的增益均衡技术 103

7.4.1 EDFA 的增益平坦技术 103

7.4.2 动态增益均衡技术 104

第 8 章 光纤通信中 FEC 编码技术 106

8.1 引言 106

8.2 纠错码的概念及工作原理 108

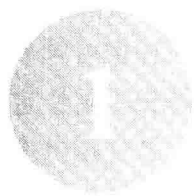
8.2.1 光纤通信中的差错控制编码 109

8.2.2 差错控制的编码种类 110

8.2.3 常用的纠错编码 111

8.3	前向纠错技术	114
8.3.1	前向纠错码	115
8.3.2	净编码增益	117
8.3.3	FEC 码的纠错性能	118
8.3.4	FEC 码型分析	121
8.3.5	FEC 码型的主要构造方法	121
8.3.6	FEC 码的技术优势	122
8.4	光纤通信系统中 FEC 码的选择与应用方式	124
8.4.1	光纤通信系统中 FEC 码型的选择	124
8.4.2	光纤通信中带内外 FEC 的应用方式	127
8.5	FEC 技术对光纤通信系统性能的改善	136
8.5.1	带内 FEC	139
8.5.2	带外 FEC	141
8.5.3	带内 FEC 和带外 FEC 的比较	143
8.6	超强 FEC 技术	144
8.6.1	SFEC 的实现方案	144
8.6.2	SFEC 的纠错性能和技术特点	152
8.7	光纤通信中 FEC 应用的数字包封技术	154
8.7.1	光网络节点接口	155
8.7.2	数字包封器中的信息结构	155
8.7.3	ONNI 信息结构	156
8.7.4	光接口转换单元	157
8.7.5	OTU 中 FEC 子帧结构	159
8.7.6	数字包封技术的硬件实现	160
8.8	光纤通信系统的 OTU 设计中 FEC 技术的实现	161
第 9 章	光纤通信中调制码型技术	164
9.1	引言	164
9.2	光纤通信中编码信息的调制技术	165
9.3	光纤通信中常用的调制码型技术	168
9.3.1	非归零码 NRZ	168
9.3.2	归零码 RZ	171
9.3.3	啁啾归零码 CRZ	174
9.3.4	载波抑制归零码 CSRZ	176
9.3.5	SuperCRZ	180
9.3.6	SuperDRZ	180
9.3.7	ODB	181
9.3.8	DPSK	182

9.3.9	DQPSK	183
9.4	光纤通信系统中各码型的传输特性	183
9.5	传输参数对不同调制码型系统的影响	187
9.5.1	色散对不同码型系统的影响	187
9.5.2	非线性效应对不同码型系统的影响	190
9.5.3	PMD 对不同码型系统的影响	191
第 10 章	光孤子传输技术	196
10.1	引言	196
10.2	光孤子传输的基本原理	197
10.2.1	孤子方程和孤子解	197
10.2.2	暗孤子	199
10.2.3	光孤子传输原理	200
10.3	光孤子传输系统	202
10.3.1	光孤子传输系统的组成	202
10.3.2	光孤子传输系统存在的问题	203
10.3.3	光孤子传输控制技术	206
10.4	光孤子通信的特点与色散控制方案	207
10.5	色散管理光孤子传输技术	209
10.5.1	色散管理光孤子的基本概念	209
10.5.2	色散管理光孤子理论	212
10.5.3	色散管理光孤子的传输性能	215
第 11 章	光接入网新技术	218
11.1	引言	218
11.2	WDM-PON 技术	219
11.2.1	WDM-PON 的关键技术	220
11.2.2	WDM 光接入网的网络结构	221
11.2.3	WDM-PON 技术的发展动态	228
11.3	OCDMA 技术	229
11.3.1	OCDMA 的基本原理	230
11.3.2	OCDMA 系统	230
11.3.3	OCDMA 系统的相关器件	231
11.3.4	OCDMA 的分类与优点	234
11.3.5	OCDMA 技术发展	235
参考文献		237



第 1 章

光纤通信技术概论

人们往往为了生存和发展，会在日常生活中把需要的信息从一个地方传送到另一个地方，这种信息的传递就是通信。通信必须依靠通信系统来完成。一个通信系统包括了 3 个主要组成部分：发送、传输和接收。光纤通信也不例外，需要传送的信息在发送端输入发送机，将信息调制到载波上，然后将已调制的载波通过传输媒介传送到接收端，由接收机解调出原来的信息。通常，射频波、微波、毫米波等都作为信息的载波，金属导线、电缆等作为传输媒介。但以光波为载波，光纤作为传输媒介的光纤通信迅速发展，已成为现代通信产业的支柱，是通信历史上重要的革命。

本章将讲述光纤通信的发展史、光通信系统中的主要技术和基本组成，以及这种技术的优越性和经典的解决方案等。

1.1 光纤通信技术的演进

早在我国古代就开始利用光进行通信了，比如烽火台、手旗、灯光以及后来的交通红绿灯等，但可惜它们所能传递的距离和信息量都是十分有限的。

1880 年 Bell 发明的光电话是近代光通信的雏形，他用阳光作为光源、硒晶体作为光接收检测器件，通过 200m 的大气空间成功地传送了语音信号。但是这样的光电话需要合适的光源以及比较严格的大气环境，所以在如今的社会环境中，这种大气通信光电话未能像其他电通信方式那样得到发展。

激光器和光纤的诞生刺激了近代光通信的真正发展。1960 年 Maiman 发明了红宝

石激光器，激光器产生的强相干光可以作为可靠的光源服务于现代光通信。这种单波长的激光具有普通无线电波一样的特性，可对其调制而携带信息。利用激光的早期光通信也只能作为短距离通信使用，这是因为其传输媒介为大气。人们很快发现，许多因素如雾、雨、云，甚至一队偶然飞过的鸟，都会干扰光波的传播。显然，需要一种像射频或微波通信的电缆或波导那样的光波通信传输线，以克服这些影响，实现信息的长距离稳定传输。

1965 年，E.Miller 报道了由金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导可避免大气传输的缺点，但其结构太复杂且精度要求太高而不能实用。另外，光导纤维的研究正在扎实进行。早在 1951 年就发明了医疗用玻璃纤维，但这种早期的光导纤维损耗太大（大于 1000dB/km ），也不能作为光通信的传输媒质。1966 年，C.K.Kao 和 G.A.Hockman 在其论文中分析了造成光纤传输损耗高的主要原因，然后指出，如能完全除去玻璃中的杂质，损耗就可降到 20dB/km ，相当于同轴电缆的水平，那么，光纤就可用来进行光通信。在这种预想的鼓舞下，Coming 公司终于在 1970 年制出了 20dB/km 损耗的光纤，从而为光纤通信的发展铺平了道路。之后，光纤损耗随着新的制造方法的出现以及工艺水平的不断提高而降低。到了 1979 年，单模光纤在 1550nm 波长上的损耗已经降到 0.2dB/km ，接近石英光纤的理论损耗极限。从此光通信技术得到了飞速的发展，通信容量也惊人增长。

在光纤损耗不断降低的同时，光源的发展也十分迅速。1962 年，GaAs 半导体激光二极管（LD）问世意味着现代光通信有了小体积的高速光源。GaAs-LD 的发射波长为 870nm ，在掺杂铝后移到了光纤的短波长低损耗窗口（ 850nm ），又实现了在室温下长时间工作。但是 LD 价格昂贵，所以适合光纤通信的发光二极管（LED）便应运而生，也促进了光通信的实用化和大发展。

在光接收机的研究方面，APD、PIN 等高效率高速率半导体光电转换器件也陆续问世。1973 年，在对 PCM 数字接收机分析的论文中，研究人员解决了现代光通信系统中光接收机的设计问题。数字接收机的灵敏度很高，所以就损耗而言的传输距离得到了一定的增加。

另外，为了满足系统应用的需求，各种无源光器件（如光衰减器、光波分复用器、隔离器等）以及专用的仪器设备（如光纤熔接机、光功率计等）也陆续配套商用。

从 20 世纪 80 年代起，光纤通信进入了高速发展时期。从短波长（ 850nm ）到长波长（ 1300nm 、 1550nm ），从多模光纤到单模光纤，从低速率到高速率。至今，商用光纤通信系统的发展已经历 4 代，即 850nm 波长的多模光纤（第一代系统，1980 年）、 1300nm 波长的单模光纤（第二代系统，1983 年）、 1550nm 波长的单模光纤单频激光器（第三代系统，1991 年）以及光放大器（第四代系统，1995 年）。现在，传输速率为 2.5Gbit/s 的系统已经实用化并大量应用，形成了遍布全国、全世界的陆地与海底光纤网。

1.2 光纤通信系统的关键技术

为了充分发挥光纤的带宽潜力,克服光纤损耗以及色散的影响、延长中继距离、扩大传输容量、降低成本一直都是光通信发展目标。系统的码速距离积一再提高,几乎每4年增加一个数量级,极大满足了人们对于信息传递速度、质量以及容量的要求。在光通信的发展过程中,各种技术不断涌现,推动着光通信技术不断地前进。

① 研制新型光纤,有源以及无源光器件、系统端机的集成化与模块化,提高速率与性能,简化结构降低成本,是系统发展的技术基础。实现“光电子器件集成化”是器件研发工作者的追求目标,为新一代的光通信系统与网络提供新的功能器件。

② 波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术,使单根光纤上能同时传输几十个、几百个甚至上千个波长,实现超高速、超大容量的传输。WDM技术使得网络容量提高了两个数量级以上,为当今数据业务、互联网的超速发展提供了海量的带宽。WDM在光网络中的作用犹如IC在电子学革命中的作用。

③ 光放大器技术,尤其是掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)、光纤拉曼放大器(Fiber Raman Amplifier, FRA)及应用。没有EDFA,就没有当今WDM技术的辉煌与成功。目前比较引人注目的光纤拉曼放大器(FRA),利用了光纤中的SRS效应,使信号与一个强泵浦波同时传输,并且其频率差位于泵浦波的拉曼增益谱宽之内,则此信号可被光纤放大。拉曼放大器的一个特性是有很宽的带宽,可以在任何波长处提供增益,只要能得到所需的泵浦波长,并且增益介质是光纤,可以制成分立式或分布式的放大器,另外一个显著优点是噪声低,可以满足在小信号放大时对OSNR的要求。但受激拉曼效应的泵浦阈值较高,实现拉曼放大器的关键是高功率泵浦,例如,泵浦波长为1450nm,要获得20dB的峰值增益,泵浦功率需要400mW(G.655光纤)或620mW(G.652光纤)。所以一般建议在超过2000km的超长距系统或单跨段距离超过100km时,为满足OSNR的要求,才使用拉曼放大器,当然为满足L波段放大的要求,也可以使用拉曼放大器,但一般长距系统应尽量避免使用。

④ 高速大容量光网络技术。光网络已经从电子交换和路由的第一代,发展到今天采用可重构光分插复用(ROADM)或可重构光交叉连接(ROXC)以及自动交换光网络(ASON)的第二代,并正向采用突发或分组交换的第三代演进,以提供更大的容量以及灵活性、可靠性。为此,必须在关键技术、系统技术及网络控制、管理与规划等方面不断创新。

⑤ 光接入网技术。“接入”是指连接用户和网络运营商边缘交换局之间“最后一公里”网络。现在的接入网90%以上仍然采用的是双绞线的模拟系统,制约了全光网络的发展。光接入网技术能很好地解决这一难题。

⑥ 光纤孤子通信技术。光孤子是在无损耗光纤中传输时能始终保持其形状不变的一

种光脉冲。利用光孤子技术可实现高速信号的长距离传输。近几年来,随着色散补偿和色散管理的实施,色散管理孤子(Dispersion Management Soliton)的出现,大大克服了传统光孤子传输系统中的主要问题,简化了系统,使其向实用化又迈进了一大步。色散管理孤子是一种非严格意义上的光孤子,它使用归零码技术,通过对光脉冲的精心设计,利用传输光纤的周期性色散补偿,使脉冲的时域波形和频谱形状沿着链路获得周期性恢复。理论上讲,色散管理孤子比 NRZ 码有 8dB 的性能提升,但由于实际操作中每一跨段的精确色散补偿有很大的难度,对性能有了一定限制。

⑦ 色散补偿技术。在 10Gb/s 以上的高速系统中,必须考虑色散补偿问题。最常用的色散补偿的方法是使用色散补偿光纤(DCF),它在 1550nm 波段有很大的负色散,可以补偿常规光纤的色散,但 DCF 的色散斜率与常规光纤不能完全匹配,导致不能在多个波长上同时精确地补偿色散效应,有残余的色散,尤其对于 G.655 光纤,色散斜率的补偿比较困难。目前比较先进的方法是针对光谱优化的色散补偿,可以通过子波带的精细补偿,来补偿色散斜率。另外一种色散补偿的方法是使用啁啾光纤光栅,这种方法器件紧凑、插入损耗小,其色散斜率可以控制为与传输光纤相同,但目前制作的啁啾光纤光栅相位特性还不是很平滑,技术还不成熟。

⑧ 编码调制技术。新型的编码方式主要有 RZ 码、CS-RZ 码、Super NRZ 码等。RZ 码的优点是平均功率低,非线性容限能力有了提高,相对于 NRZ 码,接收端的 OSNR 可以提高 1~2dB。且随着调制技术的成熟,成本不会增加很多。新型的 CS-RZ 码,其频谱宽度介于 RZ 和 NRZ 之间,可在增加功率的同时,保持其非线性容限性能,但其成本相对较高,目前还处于实验阶段。Super NRZ 码是在 NRZ 码上发展的又一种新的编码技术,它一方面展宽了 NRZ 码的频谱,降低了谱功率密度,另一方面还补偿了非线性效应产生的相位变化,从而抵消了非线性带来的信号幅度波形的变化,而且时域脉冲的变窄也增强了抗码间干扰的能力,相对于 NRZ 码,接收端的 OSNR 可以提高 3dB 以上,技术成熟以后,在高速超长距离光信号的传输中将是一种很有竞争力的编码方式。

⑨ 前向纠错技术。对于高速率长距离系统,除了在光域上提高 OSNR,还可以在电域上进行编码纠错。目前比较流行的办法是采用前向纠错 FEC,能在接收端光信噪比 OSNR 较低的情况下依然获得较佳的误码性能指标。ITU-T G.707 建议中利用 SDH 的段开销 SOH 中空余字节以 BCH-3 码方式增加了 FEC 选项,应用到高速 SDH 系统上预期可获得 2~3dB 的误码性能改善。如希望得到更多的改善,则可使用带外 FEC。例如,利用超强 FEC(SFEC)可以获得高达 10dB 以上净编码增益的误码性能改善。

⑩ 动态均衡技术。动态均衡技术主要指动态功率调整。目前,比较完善的动态增益均衡可以通过放大器内部增加增益均衡滤波器和系统周期性增加自动增益均衡器来实现。前者通过优化中间级衰减,控制放大器输入功率,维持增益平坦度,属于单板级别。后者是通过软硬件结合实现的,沿光纤线路周期性地设置增益平坦滤波器,减少增益波动,属于系统级别。通过两者共同配合,可对系统功率进行调节,保证线路功率基本一致,降低由于线路或系统性能劣化对线路造成的影响。

发展新技术的根本目的在于更好地满足光纤通信系统日益增长的信息需求。其中，WDM 技术与光放大器技术的完美结合，极大地提高了光纤通信系统的性能与通信容量，成为现代光纤通信系统最为重要的技术，是通向全光网络的桥梁。

1.3 光纤通信系统的基本组成

光通信系统可以分为两大类：导波光波系统和非导波光波系统。人们常说的光纤通信系统实际上就是导波光波系统，光信号在空间上的传输受到限制，只能在光纤中传输。而另一种非导波光波系统就是自由空间光通信（FSO）系统。比如烽火台就是最早的 FSO 的典型代表。FSO 有比较大的带宽，架设也比较简单，因此在卫星通信、宽带接入等领域上有着重要的作用。

一般人们常说的光波系统指的是光纤通信，虽然它还应该包括非导波光波系统。本章将介绍光纤通信系统的基本组成。

一个典型的点-点光通信系统如图 1.1 所示，主要包括了收发信电端机、光发送端机、传输信道、光接收端机等几部分。从光发送机到光接收机是光信息的传输通道，称为光信道，其主要功能是把信息可靠有效地从始端传送到终端。各部分的作用简述如下。

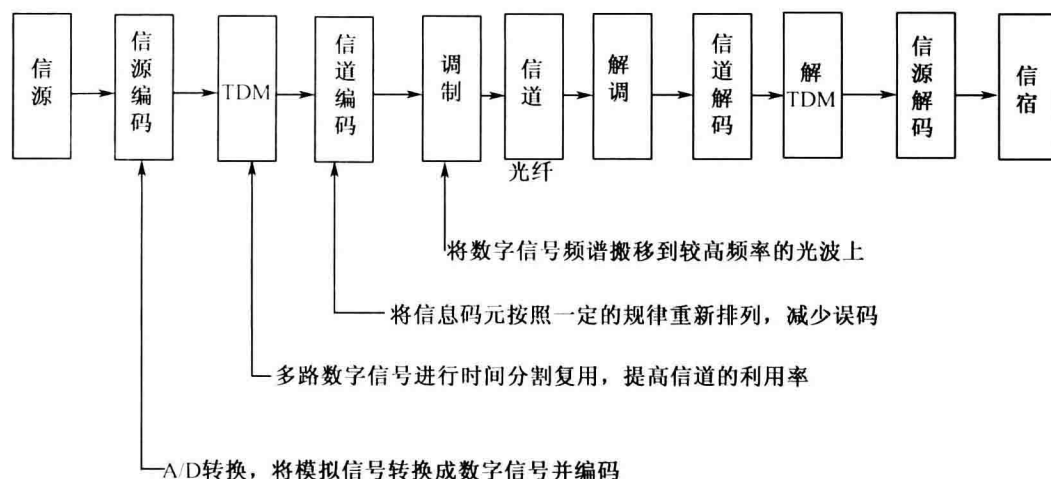


图 1.1 点-点光通信系统构成框图

① PCM 电端机包含了信源编码与 TDM，同时，解 TDM 与信源解码也称 PCM 电端机。PCM 电端机是常规电通信中的载波机、图像设备以及计算机等终端设备，需要传输的信息信号包括语音、图像、数据等。对于数字通信来说，信号在电端机内要进行 A/D 以及 D/A 转换，变换成数字信号。

② 光发送机包括光源、驱动电路以及调制器等，它将电端机来的电信号经编码后调制光源（直接调制）或驱动调制器调制光源输出的光波（外调制）产生载有信息的光信

号，以完成电-光转换。光纤通信系统使用的光源主要有两种：激光二极管（LD）和发光二极管（LED）。光源的发射功率越大，传输距离越长。LD 的发射功率约为 0~10dBm，而 LED 发射功率要小很多，大约小于-10dBm。同时，由于 LED 调制速率比较低，所以大多数光通信系统所采用的光源是 LD。

③ 光信道是将光源发射的光信号传送到远处的接收端，它可以是光纤（导波光波系统），可以是大气（非导波光波系统）。

④ 光接收机用于完成光-电转换。接收的光信号由光检测器检测转换成电信号，然后放大解调、判决再生，送入电端机恢复成原信号。光通信用的半导体检测器主要是 PIN 光电二极管和 APD 光电倍增管。

由于大多数的光通信采用的是直接检测的方式，数字信号的解调由判决电路来决定。按电信号的幅值判定为 1 或 0。判决的精度决定于光检测器电信号的信噪比（SNR），即信号与噪声的比值。性能可用误码率（BER）来衡量，它定义为发现误码的平均概率。

接收机的一个主要性能参数是接收灵敏度。它是 $BER=10^{-9}$ 的最小平均接受光功率。光信号以及接收机中的各种噪声源都能影响灵敏度。接收机的灵敏度与码速成反比，码速越高，灵敏度越低。

中继器是长途光纤数字通信系统中比较重要的装置，它能把经过长途传输后变得衰落的光信号进行光检测，转换成电信号，经过定时、整形和再生（3R, Retiming、Reshaping、Regenerating）后输入通信系统。在长途光纤数字通信系统中使用中继器的一个最大优点是经过 3R 后的输出脉冲消除了附加的噪声和畸变。也就是说，即使使用多个中继器组成的系统也不会积累噪声和畸变。传统的采用光-电-光中继器的长距离光纤传输系统，中继距离一般为 40~80km，然而 EDFA 的成熟发展，其增益高、输出功率大、噪声低等优点也逐渐代替传统的中继器，或者和传统的中继器混合，大大简化了系统的结构，它成为了光纤通信技术上的一个重要的改革。

对于当今通信信息量的巨大需求，传统的网络已经无法满足。采用光纤通信技术是大势所趋。

1.4 光纤通信技术的优越性

光纤通信与电通信相比有两点不同：一是以很高频率的光波作为载波频率，二是以光纤作为传输介质。基于以上两点，光纤通信的优越性体现在以下方面。

1. 传输频带宽，通信容量大

随着科学技术的迅速发展，人们对通信的要求越来越多。为了扩大通信容量，有线通信从明线发展到电缆，无线通信从短波发展到微波和毫米波，它们都是通过提高载波