



普通高等教育“十二五”规划教材

全光通信网技术

(第2版)

QUANGUANG TONGXINWANG JISHU

李维民 康巧燕 编著
黄海清 赵巧霞



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十二五”规划教材

全光通信网技术

(第2版)

李维民 康巧燕 黄海清 赵巧霞 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

21 世纪是光网络取代电网络的时代,全光通信网技术是 21 世纪的新一代通信网络技术。本书系统地介绍了全光通信网的基础理论和关键技术,全书共分 11 章,内容包括:全光通信网概述、光开关技术、光交换技术、光传送网技术、光交叉连接设备、光分插复用器(OADM 与 ROADM)、下一代 OTN 技术(超级通道技术、偏振复用相干光 OFDM 技术、Nyquist-WDM 技术)、全光网络结构与保护技术、光传送网管理、IP over WDM、自动交换光网络。书后附有缩略语及主要参考文献。

本书可作为高等院校通信技术专业学生的教材和参考书,也可供从事信息化建设工作的广大科技工作者和工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

全光通信网技术/李维民等编著. --2 版. --北京:北京邮电大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5635-4118-8

I. ①全… II. ①李… III. ①光纤通信—通信网 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 189772 号

书 名:全光通信网技术(第 2 版)

著作责任者:李维民 康巧燕 黄海清 赵巧霞 编著

责任编辑:张珊珊

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫丰华彩印有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.75

字 数:362 千字

版 次:2009 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 2 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4118-8

定 价:30.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

第 2 版前言

光纤通信技术经过了四十多年的发展,到目前为止,全光通信网络是最活跃的领域之一。从历史上看,光纤通信技术经历了 4 个时期。

第一个时期是 20 世纪 70 年代初期的发展阶段,主要解决了光纤的低损耗,带来了光源和光接收器等光器件以及小容量光纤通信系统的商用化。

第二个时期是 20 世纪 80 年代的准同步数字系列(PDH)设备的大量商用化。这个时期光纤开始代替电缆,数字传输制取代模拟传输制,由于 PDH 系统是点对点系统,没有国际统一的光接口规范,上/下电路不方便,成本高,帧结构中没有足够的管理比特,无法进行网络的运行、管理与维护,于是在 20 世纪 80 年代中期出现了 SDH。

第三个时期是 20 世纪 90 年代的同步数字系列(SDH)设备的大量商用化。SDH 真正实现了网络化的运行、管理与维护,由于实现了大容量传输,传输性能好,在干线上光纤开始全面取代电缆。SDH 中光只是用来实现大容量传输,所有的交换、选路和其他智能都是在电层面上实现的;SDH 技术偏重于业务的电层处理,具有灵活的调度、管理和保护能力,操作、管理和维护(OAM)功能完善。但是,它以 VC4 为基本交叉调度颗粒,采用单通道线路,容量增长和调度颗粒大小受到限制,无法满足业务的快速增长。而光波分复用(WDM)技术以业务的光层处理为主,多波长通道的传输特性决定了它具有提供大容量传输的优势。

第四个时期是 21 世纪以来 WDM 通信系统设备的大量商用化和光传送网(OTN)的发展。这个时期,IP 业务的增长势如破竹,已成为世界瞩目的焦点和推动全球信息业发展的主要力量,并给整个网络的技术模式、整体架构及业务节点的实现方式、组网形态、业务能力等诸多方面带来了深远的影响。WDM 技术的成熟使得以较低成本提供巨大的网络容量成为现实,在此基础上形成了 WDM 光层。特别是密集波分复用(DWDM)技术对网络的升级扩容、发展宽带新业务、充分挖掘和利用光纤带宽能力、提高通信系统的性价比和经济有效性、满足不断增长的电信和因特网业务的需求、实现超高速通信具有十分重要的意义。在越来越多的光传输系统升级为 WDM 或 DWDM 系统,以及在 DWDM 技术逐渐从骨干网向城域网和接入网渗透的过程中,人们发现 DWDM 技术在提高传输能力的同时,还具有无可比拟的联网优势。普通的点到点光波分复用通信系统尽管有巨大的传输容量,但只提供了原始的传输带宽,需要有灵活的节点才能实现高效的灵活组网能力。而全光节点可以彻底消除光/电/光设备产

生的带宽瓶颈,保证网络容量的持续扩展性;可以省去昂贵的光电转换设备,大幅度降低建网和运营维护成本;可以实现网络对客户层信号的透明性,支持不同格式或协议的信号;可以避免光电转换环节及复杂的时隙指配过程,加快高速电路的指配和业务供给速度,以实现在波长级灵活组网的目的;可以实现快速网络恢复,改进网络的生存性和质量。OTN是继PDH、SDH之后的新一代数字光传送技术体制,它能解决传统WDM网络无波长/子波长业务调度能力、组网能力、保护能力弱等问题。OTN以多波长传送、大颗粒调度为基础,综合了SDH的优点及WDM的优点,可在光层及电层实现波长/子波长业务的交叉调度,并实现业务的接入、封装、映射、复用、级联、保护/恢复、管理及维护,形成一个以大颗粒宽带业务传送为特征的大容量传送网络。

随着网络业务向动态的IP业务的继续汇聚,一个灵活、动态的光网络是不可或缺的,最新发展趋势是自动交换光网络(ASON),它使光联网从静态光联网走向动态交换光网络。这样带来的主要好处有:简化网络和节点结构,优化网络资源配置,提高带宽利用率,降低建网初始成本;实现规划、业务指配和维护的自动化,从而降低运维成本,并且可以解决实时、准确维护传输网资源的难题,避免资源搁浅;具备网络和业务的快速保护恢复能力。

近年来由于视频业务、移动互联网、云计算等新型业务的兴起,促使互联网的流量需求(近几年调查显示)正以每年约40%~60%的速度在增长,这种快速增长消耗了大量带宽,光网络面临着严峻的挑战,现有的10G/40G/100GWDM系统将不能满足未来骨干网对大量数据传输的需求。为了满足互联网需求的急剧增长,必须找到新的方法来提高现有光纤网络的传输容量,并确保这些新技术既经济高效又操作简单,能使网络供应商在继续扩展网络带宽的同时限制基础设施投资。为了有效解决互联网发展所带来的挑战,近几年出现了几种新的技术:超级通道技术、相干光OFDM(CO-OFDM)技术、奈奎斯特-WDM技术,这些技术将在本书第2版的第7章中讲述。第4章光传送网技术做了较大的修改,因G.709为了适应灵活的WDM栅格以支持下一代光网络的发展在2012年做了较大的修订。最后在第11章增加了软件定义光网络技术的内容。

本书广泛收集了国内外的相关资料,引用了一些专家、学者的研究成果。第1、5、7章由李维民编写,第4、10、11章由康巧燕编写,第6、8、9章由黄海清编写,第2、3章由赵巧霞编写。

由于作者水平有限,书中错误难免,疏漏不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 光纤通信的发展 | 1 |
| 1.2 WDM 技术的优点 | 2 |
| 1.2.1 光波分复用技术的产生 | 2 |
| 1.2.2 光波分复用系统结构 | 2 |
| 1.2.3 光波分复用技术特点 | 4 |
| 1.3 光通信网络的发展和演变 | 5 |
| 1.4 IP over WDM | 8 |
| 1.5 IP over OTN 是未来组网的主要形式 | 10 |
| 1.6 自动交换光网络 | 11 |
| 思考与练习题 | 12 |
| 第 2 章 光开关技术 | 13 |
| 2.1 光开关的应用范围 | 13 |
| 2.2 光开关的分类和主要性能参数 | 14 |
| 2.3 MEMS 光开关 | 16 |
| 2.3.1 传统的机械式光开关 | 16 |
| 2.3.2 微电子机械系统光开关 | 17 |
| 2.4 波导型光开关 | 19 |
| 2.4.1 磁光开关 | 19 |
| 2.4.2 声光开关 | 19 |
| 2.4.3 热光开关 | 20 |
| 2.4.4 电光开关 | 21 |
| 2.5 喷墨气泡光开关 | 22 |
| 2.6 液晶光开关 | 23 |
| 2.7 全息光开关 | 24 |
| 2.8 液体光栅开关 | 24 |
| 2.9 半导体光放大器开关 | 25 |
| 思考与练习题 | 27 |
| 第 3 章 光交换技术 | 28 |
| 3.1 光交换技术概述 | 28 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.1.1 | 光交换的必要性 | 28 |
| 3.1.2 | 光交换技术分类 | 29 |
| 3.2 | 空分光交换 | 31 |
| 3.3 | 时分光交换 | 33 |
| 3.4 | 波分光交换 | 34 |
| 3.5 | 光分组交换技术 | 36 |
| 3.5.1 | 光分组的格式 | 36 |
| 3.5.2 | OPS 节点结构 | 37 |
| 3.5.3 | 光分组交换关键技术 | 39 |
| 3.5.4 | OPS 网络结构 | 43 |
| 3.6 | 光突发交换技术 | 44 |
| 3.6.1 | 光突发交换的概念 | 44 |
| 3.6.2 | 光突发交换分组格式 | 46 |
| 3.6.3 | 光突发交换的关键技术 | 47 |
| 3.6.4 | OBS 的体系结构 | 49 |
| 3.6.5 | OBS 与 OCS 及 OPS 技术的比较 | 51 |
| 3.7 | 光标签交换技术 | 53 |
| 3.7.1 | 光标签交换的产生 | 53 |
| 3.7.2 | MPλS 技术 | 55 |
| | 思考与练习题 | 56 |
| 第 4 章 | 光传送网技术 | 57 |
| 4.1 | 光传送网的特点 | 57 |
| 4.2 | 光传送网的分层结构 | 58 |
| 4.3 | 光传送网的接口结构 | 60 |
| 4.3.1 | 基本信号结构 | 61 |
| 4.3.2 | OTN 接口的信息结构 | 62 |
| 4.4 | 光传送网的复用/映射原则 | 64 |
| 4.4.1 | OTM 的复用/映射结构 | 64 |
| 4.4.2 | ODU _k 时分复用 | 68 |
| 4.5 | 光传送模块及其帧结构 | 74 |
| 4.5.1 | 简化功能的 OTM(OTM-nr, m, OTM-0, m, OTM-0, mvn) | 74 |
| 4.5.2 | 全功能的 OTM(OTM-n, m) | 76 |
| 4.5.3 | 光传送模块的帧结构 | 77 |
| 4.5.4 | OTM 各种信息结构的比特速率 | 82 |
| | 思考与练习题 | 85 |
| 第 5 章 | 光交叉连接设备 | 86 |
| 5.1 | OXC 的主要功能 | 86 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 5.2 | OXC 的基本结构和工作原理 | 87 |
| 5.3 | OXC 的主要性能 | 88 |
| 5.4 | 几种主要的 OXC 结构 | 89 |
| 5.4.1 | 具有多层多粒度的 OXC 结构 | 89 |
| 5.4.2 | 基于空间光交换型的 OXC 结构 | 90 |
| 5.4.3 | 基于可调谐滤波器的 OXC 结构 | 92 |
| | 思考与练习题 | 94 |
| 第 6 章 | 光分插复用器 | 95 |
| 6.1 | OADM | 95 |
| 6.1.1 | OADM 的基本功能和主要性能 | 95 |
| 6.1.2 | 几种常用的 OADM 结构 | 96 |
| 6.2 | ROADM | 98 |
| 6.2.1 | 第一代 ROADM | 99 |
| 6.2.2 | 第二代 ROADM | 101 |
| 6.2.3 | 第三代 ROADM | 105 |
| | 思考与练习题 | 106 |
| 第 7 章 | 下一代 OTN 技术 | 107 |
| 7.1 | 超级通道(superchannels)技术 | 107 |
| 7.1.1 | 超级通道 | 107 |
| 7.1.2 | 光调制编码 | 109 |
| 7.1.3 | 光子集成 | 113 |
| 7.1.4 | 超级通道的灵活性 | 113 |
| 7.2 | 偏振复用相干光正交频分复用(PDM-CO-OFDM)技术 | 116 |
| 7.2.1 | OFDM 技术的基本原理 | 116 |
| 7.2.2 | CO-OFDM 的系统结构 | 119 |
| 7.2.3 | PDM-CO-OFDM 系统 | 120 |
| 7.2.4 | 全光 OFDM | 120 |
| 7.3 | Nyquist-WDM 技术 | 122 |
| 7.3.1 | Nyquist-WDM 基本原理 | 123 |
| 7.3.2 | Nyquist-WDM 系统结构 | 123 |
| 7.4 | 典型的超高速率超大容量光传输系统 | 126 |
| 7.4.1 | 超高速率超大容量光传输系统概况 | 126 |
| 7.4.2 | 8×216.4 Gbit/s PDM-CSRZ-QPSK 1 750 km Nyquist-WDM 传输现 场实验系统 | 127 |
| 7.4.3 | 102.3 Tbit/s PDM-64QAM FDM 240 km C 和 L ⁺ 波段全拉曼放大传 输实验系统 | 129 |
| 7.4.4 | 30.7 Tbit/s 相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 传输实验系统 | 130 |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 思考与练习题 | 134 |
| 第 8 章 全光网络结构与保护技术 | 135 |
| 8.1 全光网络的拓扑结构 | 135 |
| 8.2 保护与恢复技术 | 136 |
| 8.2.1 OTN 链形网的保护 | 138 |
| 8.2.2 环形网络的保护 | 139 |
| 8.3 复杂网络的拓扑结构 | 143 |
| 思考与练习题 | 145 |
| 第 9 章 光传送网管理 | 146 |
| 9.1 电信管理网 | 146 |
| 9.1.1 TMN 的结构 | 147 |
| 9.1.2 TMN 的功能 | 150 |
| 9.2 OTN 管理网 | 152 |
| 9.2.1 OTN 的管理要求 | 153 |
| 9.2.2 OTN 管理信息的通道——开销通道 | 154 |
| 思考与练习题 | 157 |
| 第 10 章 IP over WDM | 158 |
| 10.1 IP over SDH | 158 |
| 10.1.1 IP over SDH 基本原理 | 158 |
| 10.1.2 IP over SDH 网络结构 | 160 |
| 10.1.3 IP over SDH 技术特点及面临的问题 | 160 |
| 10.2 IP over WDM | 162 |
| 10.2.1 IP over WDM 基本原理 | 162 |
| 10.2.2 IP over WDM 网络结构 | 163 |
| 10.2.3 IP over WDM 帧结构 | 168 |
| 10.2.4 IP over WDM 路由技术 | 169 |
| 10.2.5 IP over WDM 生存性技术 | 171 |
| 10.2.6 IP over WDM 技术特点及面临的问题 | 174 |
| 10.2.7 IP over WDM 的应用 | 175 |
| 10.3 IP over 灵活组网的 OTN/ROADM | 175 |
| 10.3.1 IP over OTN 概述 | 175 |
| 10.3.2 IP over OTN 联合组网 | 176 |
| 思考与练习题 | 178 |
| 第 11 章 智能光网络 | 179 |
| 11.1 ASON | 179 |

| | | |
|--------|----------------------------|-----|
| 11.1.1 | ASON 概述 | 179 |
| 11.1.2 | ASON 体系结构 | 181 |
| 11.1.3 | ASON 网络结构 | 184 |
| 11.1.4 | ASON 智能光传送节点技术 | 185 |
| 11.1.5 | ASON 路由与生存性技术 | 188 |
| 11.1.6 | ASON 演进策略 | 191 |
| 11.1.7 | ASON 在传输网中的应用 | 192 |
| 11.2 | GMPLS | 194 |
| 11.2.1 | GMPLS 概述 | 194 |
| 11.2.2 | GMPLS 节点结构 | 195 |
| 11.2.3 | GMPLS 关键技术 | 196 |
| 11.3 | PCE | 199 |
| 11.3.1 | PCE 概述 | 199 |
| 11.3.2 | PCE 的结构模型 | 199 |
| 11.3.3 | PCE 的通信协议 | 201 |
| 11.3.4 | GMPLS/PCE 的结构模型 | 202 |
| 11.4 | SDN/OpenFlow | 204 |
| 11.4.1 | SDN/OpenFlow 概述 | 204 |
| 11.4.2 | 基于 SDN/OpenFlow 的光网络 | 207 |
| 11.4.3 | 软件定义光网络的关键技术 | 212 |
| | 思考与练习题 | 214 |
| | 缩略语 | 215 |
| | 参考文献 | 220 |

概 述

第 1 章

光纤通信重大的变革是由点到点的光波分复用(WDM)系统向全光网络的发展和演变。随着传输系统容量的快速增长,节点交换系统的压力越来越大,再用传统的电交换系统已无法满足快速增长的节点吞吐量,促使人们对光交换系统的研究产生了兴趣。光波分复用技术不仅具有巨大的传输容量,而且具有良好的联网能力,从而引发了全光通信网的发展。本章主要介绍全光通信网的基本概念。

1.1 光纤通信的发展

1966年7月,高锟博士和他的同事霍克曼(G. A. Hckman)发表了题为《介质纤维表面光频波导》的著名论文,认为可以用石英基玻璃纤维进行长距离传输,并指出当光纤损耗由目前的1000 dB/km下降到20 dB/km之日,便是光纤通信成功之时。高锟提出的光纤,是用高纯度的玻璃纤维制成,光进入到其中,就像进入了一个周围全是镜子的管线,在全反射的作用下,只能从另一端出来。这种与头发差不多粗细的导体,具有频带宽、尺寸小、重量轻的优点,如果再加上低损耗,必将给人类通信带来一场革命,把人类带入信息无限丰富的时代。

1970年,美国康宁公司马勒博士等三人的研究小组首次成功研制出损耗为20 dB/km的光纤。1974年,贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法,称为改进的化学气相沉积法(MCVD),使光纤损耗下降到1 dB/km。1976年,日本电话电报公司研制出更低损耗光纤,损耗下降到0.5 dB/km。1979年,日本电报电话公司研制出损耗为0.2 dB/km的光纤(1.55 μm)。

1976年,美国在亚特兰大成功地进行了速率为44.7 Mbit/s的光纤通信系统试验;1981年,日本F-100 M光纤通信系统投入商用;1987年,英国南安普顿大学研制出掺铒光纤放大器(EDFA);1992年,美国朗讯公司研制出实用化的光波分复用系统;1996年,光波分复用系统开始商用;1999年,美国朗讯推出1 Tbit/s(100 \times 10 Gbit/s) WDM系统,该系统有100个波长通道,每通道10 Gbit/s;2000年,日本NEC光波分复用系统试验达到3.2 Tbit/s(160 \times 20 Gbit/s);2001年3月,在OFC2001年年会上,日本NEC公司发布了当时世界上最高纪录,该系统速率为10.92 Tbit/s(273 \times 40 Gbit/s),采用S、C、L三个波段,传输距离117 km(纯硅芯大有效面积光纤PSCF两段),采用了分布拉曼放大与集中光纤放大。

2010年10月,武汉邮电科学研究院的光纤通信技术和网络国家重点实验室在全球率先实现了单通道1.08 Tbit/s相干光OFDM(正交频分复用)系统,在普通标准单模光纤中传输了1040 km,达到了国际领先水平。2011年7月,又实现了单个C波段WDM总容量30.7 Tbit/s的世界新纪录。NEC在2011年的OFC会议上宣布了C+L波段上实现了 $370 \times 294 \text{ Gbit/s} = 108.78 \text{ Tbit/s}$ 信号传输165 km的新纪录,频谱效率达到 $11 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。在2012年的OFC会议上,NTT宣布在C波段+扩展的L波段上实现了 $224 \times 548 \text{ Gbit/s} = 122.752 \text{ Tbit/s}$ 信号传输240 km(PDPSC-3),这是迄今为止在单根单芯光纤上传输的最大容量的最高纪录。在多芯光纤传输技术方面,我国远远落后,目前国际上的最高纪录是NTT网络创新实验室在2012年的ECOC会议上发布的,在12芯光纤上实现的1.01 Pbit/s(12空分复用/222WDM/456 Gbit/s)信号传送52 km的实验。在超长距离传输方面,在2010年的OFC会议上Tyco公司发布了10.7 Tbit/s($96 \times 112 \text{ Gbit/s}$)PDM-RZ-QPSK信号传输10608 km的纪录(PDPB10)。

1.2 WDM技术的优点

1.2.1 光波分复用技术的产生

从准同步数字系列(PDH)及同步数字系列(SDH)通信技术可以看到:(1)要实现A、B两点间的通信,需要两根光纤,工作波长通常为 $1.31 \mu\text{m}$ 或 $1.55 \mu\text{m}$,且收发同一波长;(2)为了增加传输容量,提高光纤带宽的利用率,从而降低每一通路的成本,采用的是电时分复用(ETDM)方式。这是一种传统和成熟的复用方案,广泛用于PDH及SDH设备中。但是,随着现代电信网对传输容量要求的急剧提高,利用ETDM方式已日益接近硅和镓砷技术的极限:当系统的传输速率超过10 Gbit/s时,由于受到电子迁移速率的限制即所谓的“电子瓶颈”问题,ETDM方式实现起来非常困难,并且传输设备的价格也很高,光纤色度色散和极化模色散的影响也日益加重。因此,如何充分利用光纤的频带资源,提高系统的通信容量,从而降低每一通路的成本,成了光纤通信理论和设计上的重要问题。

回顾光纤的损耗特性曲线(如图1-1所示)可以发现:单模光纤并不仅仅是在 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 两个独立波长上是低损耗的,而是存在两个低损耗窗口,其总宽度约200 nm,所提供的带宽达27 THz。因此人们设想:如果在这两个窗口上以适当的波长间隔 $\Delta\lambda$ 选取多个波长做载波,然后通过一个器件把它们合在一起传输,到达接收端后,再通过另一个器件将它们分离开来,这样,就可以在不提高单信道速率的情况下,使光纤中的传输容量成倍增加,从而降低每一通路的成本,避免电子瓶颈的限制。这就是光波分复用技术。

1.2.2 光波分复用系统结构

所谓光波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术就是为充分利用单模光纤低损耗区的巨大带宽资源,采用光波分复用器(合波器),在发送端将多个不同波长的光载波合并起来并送入一根光纤进行传输,在接收端,再由光解复用器(分波器)将这些不同波长承载不同信号的光载波分开的复用方式。

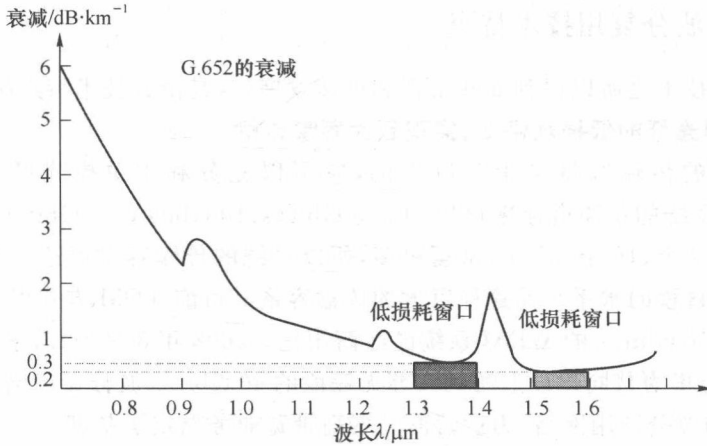


图 1-1 普通单模光纤的衰减随波长变化示意图

光波分复用系统工作原理如图 1-2 所示。从图中可以看出,在发送端由光发送机 $TX_1 \cdots TX_n$ 分别发出标称波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 的光信号,每个光通道可分别承载不同类型或速率的信号,如 2.5 Gbit/s 或 10 Gbit/s 的 SDH 信号或其他业务信号,然后由光波分复用器把这些复用光信号合并为一束光波输入到光纤中进行传输;在接收端用光解复用器把不同光信号分解开,分别输入到相应的光接收机 $RX_1 \cdots RX_n$ 中。

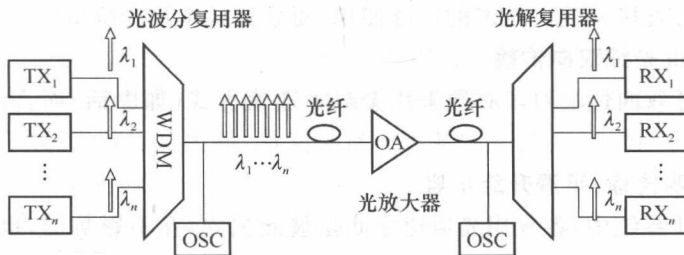


图 1-2 WDM 系统原理方框图

光波分复用系统的关键组成有 3 部分:合/分波器、光放大器和光源器件。合/分波器的作用是合波与分波,对它的要求是:插入损耗低,具有良好的带通特性(通带平坦、过渡带陡峭、阻带防卫度高),温度稳定性好(中心工作波长随环境温度变化小),复用通道数多,具有较高的分辨率和几何尺寸小等。光放大器的作用是对合波后的光信号进行放大,以便增加传输距离,对它的要求是高增益、宽带宽、低噪声。WDM 系统的光源一般采用外调制方式,对它的要求是:能发射稳定的标称光波长、高色散容限、低啁啾。图 1-2 中的 OSC 为光监控通道,其作用就是在一个新波长(1510 nm 波长光源的光监控通道)上传送有关 WDM 系统的网元管理和监控信息,使网络管理系统能有效地对 WDM 系统进行管理。

在发送端, $TX_1 \sim TX_n$ 共 n 个光发送机分别送出波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 的已调光信号,通过 WDM 器组合在一起,然后在—根光纤中传输。到达接收端后,通过解复用器将不同光波长的信号分开并送入相应的接收机内,完成多路信号单芯传输的任务。由于各信号是通过不同光波长携带的,所以彼此之间不会串扰。

1.2.3 光波分复用技术特点

光波分复用技术之所以得到如此重视和迅速发展,这是由其技术特点决定的。

1. 充分利用光纤的低损耗带宽,实现超大容量传输

WDM 系统的传输容量是十分巨大的,它可以充分利用单模光纤的巨大带宽(约 27 THz)。因为系统的单通道速率可以为 2.5 Gbit/s、10 Gbit/s、40 Gbit/s 等,而复用光通道的数量可以是 8 个、16 个、32 个,甚至更多,所以系统的传输容量可达到数百吉比特每秒甚至几十太比特每秒的水平。而这样巨大的传输容量是目前 TDM 方式根本无法做到的。

目前,160×10 Gbit/s 的 WDM 系统已经商用化。2008 年 8 月 5 日,华为技术有限公司宣布,中国电信与华为共同建设上海到江苏无锡段的 40 Gbit/s 波分传送网。这是中国首个 80×40 Gbit/s 的波分商用网络,为运营商开展高带宽业务奠定了基础。

2. 节约光纤资源,降低成本

节约光纤资源、降低成本这个特点是显而易见的。对单波长系统而言,1 个 SDH 系统就需要一对光纤;而对 WDM 系统来讲,不管有多少个 SDH 分系统,整个 WDM 系统只需要一对光纤就够了。如对于 32 个 2.5 Gbit/s 系统来说,单波长系统需要 64 根光纤,而 WDM 系统仅需要 2 根光纤。节约光纤资源这一点也许对于市话中继网络并非十分重要,但对于系统扩容或长途干线,尤其是对于早期安装的芯数不多的光缆来说就显得非常难能可贵了,可以不必对原有系统做较大改动,而使通信容量扩大几十倍至几百倍,随着复用路数的成倍增加以及直接光放大技术的广泛使用,每话路成本迅速降低。

3. 可实现单根光纤双向传输

实现单根光纤双向传输对于必须采用全双工通信方式(如电话)而言,可节省大量的线路投资。

4. 各通道透明传输、平滑升级扩容

由于在 WDM 系统中,各复用光通道之间是彼此独立、互不影响的,也就是说波分复用通道对数据格式是透明的,与信号速率及电调制方式无关,因此就可以用不同的波长携带不同类型的信号,如波长 λ_1 携带音频,波长 λ_2 携带视频,波长 λ_3 携带数据……从而实现多媒体信号的混合传输,从而给使用者带来了极大的方便。

另外,只要增加复用光通道数量与相应设备,就可以增加系统的传输容量以实现扩容,而且扩容时对其他复用光通道不会产生不良影响。所以 WDM 系统的升级扩容是平滑的,而且方便易行,从而最大限度地保护了建设初期的投资。

5. 可利用 EDFA 实现超长距离传输

掺铒光纤放大器(EDFA)具有高增益、宽带宽、低噪声等优点,在光纤通信中得到了广泛的应用。EDFA 的光放大范围为 1 530~1 565 nm,经过适当的技术处理也可能为 1 570~1 605 nm,因此它可以覆盖整个 1 550 nm 波长的 C 波段或 L 波段。所以用一个带宽很宽的 EDFA 就可以对 WDM 系统各复用光通道信号同时进行放大,以实现超长距离传输,避免了每个光传输系统都需要一个光放大器的弊病,减少了设备数量,降低了投资。

WDM 系统的传输距离可达数百公里,可节省大量的电中继设备,大大降低成本。

6. 对光纤的色散并无过高要求

对 WDM 系统来讲,不管系统的传输速率有多高、传输容量有多大,它对光纤色度色散

系数的要求,基本上就是单个复用通道速率信号对光纤色度色散系数的要求。如 80 Gbit/s 的 WDM 系统(32×2.5 Gbit/s),对光纤色度色散系数的要求就是单个 2.5 Gbit/s 系统对光纤色度色散系数的要求,一般的 G.652 光纤都能满足。

但时分复用(TDM)方式的高速率信号却不同,其传输速率越高,传输同样的距离要求光纤的色度色散系数越小。以目前铺设量最大的 G.652 光纤为例,用它直接传输 2.5 Gbit/s 速率的光信号是没有多大问题的;但若传输 TDM 方式 10 Gbit/s 速率的光信号则会遇到麻烦。首先对系统的色度色散诸参数提出了更高的要求,主要是对光纤的色度色散系数或光源器件的谱宽提出了更苛刻要求。因为色散受限的传输距离与码速率成反比例关系。其次出现了偏振模色散(PMD)受限问题,这是过去所没有遇到过的。偏振模色散是指因在光纤的制造过程中由于工艺方面的原因使光纤的结构偏离圆柱形,材料存在各向异性,以及在实际使用中由于受扭曲力、侧压力等外部应力的作用,使光缆中的光纤出现双折射现象,导致不同相位的光信号呈现不同的群速度,使接收端出现脉冲展宽。

光纤的偏振模色散是客观存在的,但对不同的传输速率有着不同的影响,而且差别颇大。对于传输速率在 10 Gbit/s 以上的单波长系统或基群为 10 Gbit/s 以上的 WDM 系统,必须考虑偏振模色散受限的问题。

7. 可组成全光网络

全光网络(AON)是未来光纤传送网的发展方向。在全光网络中,各种业务的上下、交叉连接等都是在光路上通过对光信号进行调度来实现的。例如,在某个局站可根据需求用光分插复用器(OADM)直接上、下几个波长的光信号,或者用光交叉连接设备(OXC)对光信号直接进行交叉连接。而不必像现在这样,首先进行光-电转换,然后对电信号进行上下或交叉连接处理,最后再进行电-光转换,把转换后的光信号输入到光纤中传输。

WDM 系统可以与光分插复用器、光交叉连接设备混合使用,以组成具有高度灵活性、高可靠性、高生存性的全光网络。

近年来,密集波分复用(DWDM)一直向更高的单波长比特率(已达到 100 Gbit/s)、更密集的波分复用(最多路数已达 1022)、更宽的可用波长范围(C、L 和 S 波带)、更长的光放大段(单跨距 468 km)、更长的无电再生传输距离(实验室中环路循环传输距离达到 7380 km)、更大容量(最大容量达到 122.752 Tbit/s)的方向迅速发展着,并在全球干线网中扮演重要角色。

1.3 光通信网络的发展和演变

通信网络的发展历史悠久,经历了现在已开始逐渐淘汰的电通信网络、目前正在广泛使用的光电混合网络,正朝着全光网络迈进。

1. 电网络

电网络采用电缆将网络节点互连在一起,网络节点采用电子交换节点,是 20 世纪 80 年代以前广泛使用的网络,如图 1-3(a)所示。承载电信号的信道有同轴电缆和对称电缆,是一种损耗较大、带宽较窄的传输信道,主要采用了频分复用(FDM)方式来提高传输的容量。电网络具有如下特点:(1)信息以模拟信号为主;(2)信息在网络节点的时延较大;(3)节点的

信息吞吐量小;(4)信道的容量受限,传输距离较短。由于电网络完全是在电领域完成信息的传输、交换、存储和处理等功能,因此,受到了器件本身的物理极限的限制。

2. 光电混合网

光电混合网在网络节点之间用光纤取代了传统的电缆,实现了节点之间的全光化。这是目前广泛采用的通信网络,如图 1-3(b)所示。这是一个数字化的网络,采用了时分复用来充分挖掘光纤的宽带资源,从而进行信息的大容量传输,采用时分(结合空分)交换网络实现信息在网络节点上的交换。TDM 有两种复接体系,即基于点到点准同步数字体系(PDH)和基于点到多点、与网络同步的同步数字体系(SDH),由于 SDH 优于 PDH,因而目前广泛用 SDH 取代 PDH。

目前,在全球几乎 90% 以上的信息量是通过光纤网络来传输的。随着传输系统容量的快速增长,交换节点的压力越来越大,在交换系统中引入光子技术的需求日渐迫切。

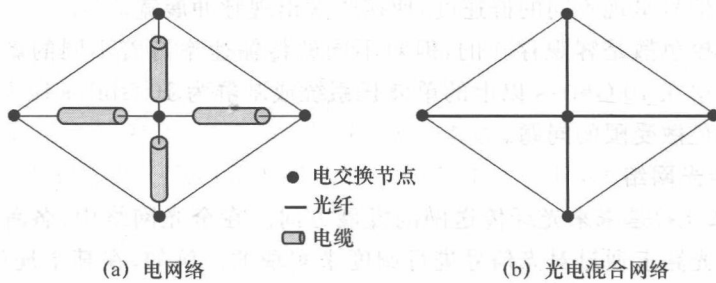


图 1-3 通信网络

3. 全光网络

全光网络(ALL Optical Network, AON)是指信号以光的形式穿过整个网络,直接在光域内进行信号的传输、再生、光交叉连接、光分插复用和交换/选路,中间不需经过光电、电光转换,因此它不受检测器、调制器等光电器件响应速度的限制,对比特速率和调制方式透明,可以大大提高整个网络的传输容量和交换节点的吞吐量。它强调网络的全光特性,严格地说在此网内不应该有光电转换,所有对信号的处理全在光域内进行。

全光网络最重要的优点是它的开放性。全光网络本质上是完全透明的,即对不同速率、协议、调制频率和制式的信号同时兼容。全光网络是人们所追求的,是未来将要实现的网络。

4. 光传送网

在早期,WDM 仅作为点到点的传输系统来使用,以提高传输线路的速率。与 TDM 系统对照,WDM 技术在从简单的点对点系统向基于波长的多点网络演变的过程中具有相当明显的优势。WDM 点对点网络系统提供了巨大的传输容量。普通的点到点波分复用通信系统尽管有巨大的传输容量,但只提供了原始的传输带宽,需要有灵活的节点才能实现高效的灵活组网能力。于是业界的注意力开始转向光交换节点。

光交换技术在其从点到点传输系统向光联网网络演进过程中所发挥的作用也是至关重要的。随着可用波长数的不断增加、光放大和光交换等技术的发展以及越来越多的光传输系统升级为 WDM 或 DWDM 系统,下层的光传输网不断向多功能型、可重构、灵活性、高性价比和支持多种多样保护恢复能力等方面发展。人们发现,光波分复用技术不仅可以充分

利用光纤中的带宽,而且其多波长特性还具有无可比拟的光通道直接联网的优势,这为进一步组成以光子交换为交换体的多波长光交换网络提供了基础。随着波长/光分插复用器(WADM/OADM)和波长/光交叉连接器(WXC/OXC)技术的成熟,当与 WDM 技术相结合后,不但能够从任意一条线路中任意上下一路或几路波长,而且可以灵活地使一个节点与其他节点形成连接,从而形成 WDM 光交换网络。

由于光信号固有的模拟特性和光器件的水平,人们暂时放下了全光网的追求,转而用“光传送网”来代替,即子网内全光透明,而在子网边界处采用光/电/光技术。全光网已被 ITU-T 定义为光传送网(Optical Transport Network, OTN)。光传送网是在现有的传送网中加入光层,提供光交叉连接和分插复用功能,提供有关客户层信号的传送、复用、选路、管理、监控和生存性功能。

光传送网是在 SDH 光传送网和 WDM 光纤系统的基础上发展起来的,图 1-4 形象直观地给出了光传送网的演变。WDM 技术在光纤网中的应用正在经历一个从“线”到“面”的发展过程,即从点对点的 DWDM 系统到环形网,再向网状网的方向发展。点对点的 DWDM 传输技术目前已比较成熟,现在关于 WDM 技术的研究方向主要有两个:一个是朝着更多波长、单波长更高速率的方向发展;另一个是朝着 WDM 联网方向发展,联网更能体现 WDM 技术的优越性。

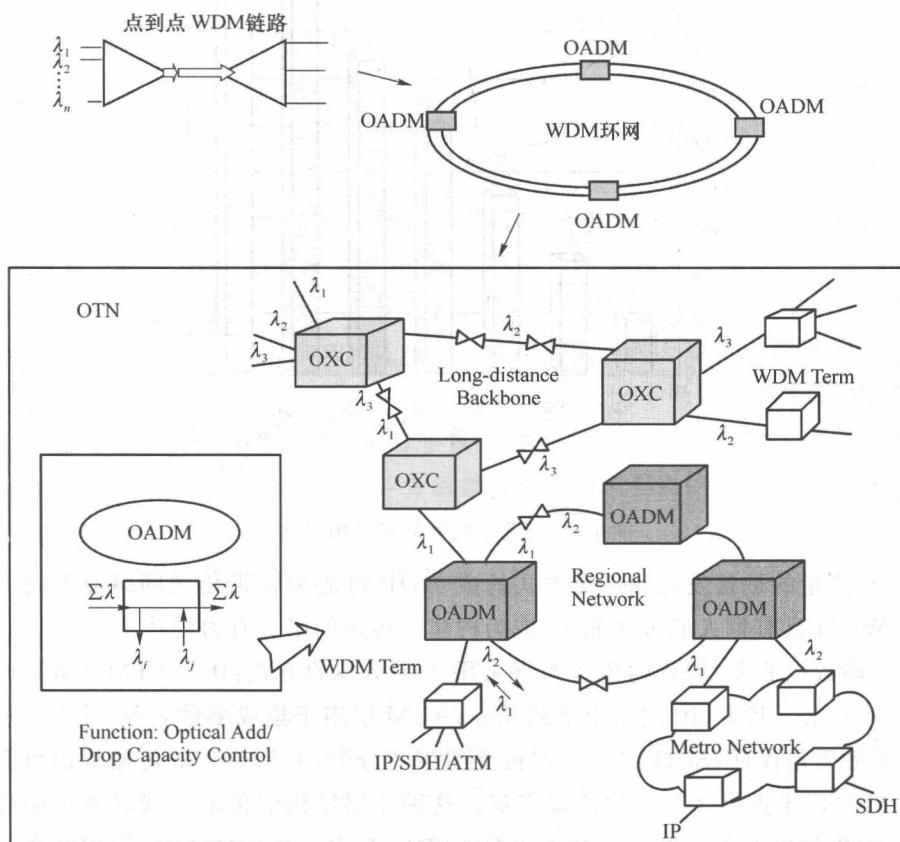


图 1-4 光传送网的演变