

北京市精品教材

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

光纤通信 技术 (第4版)

孙学康 张金菊 编著

普通高等教育“十一五”
国家级规划教材



Optical Fiber

Communications (4th Edition)

国工信出版集团

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



精品系列



普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

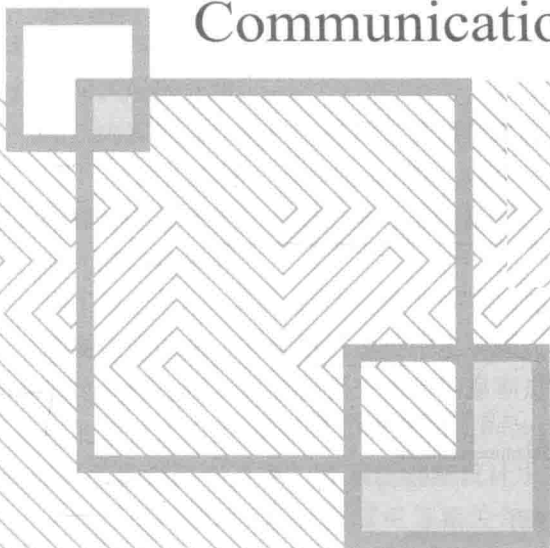
孙学康 张金菊 编著

光纤通信 技术 (第4版)

北京市精品教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Optical Fiber

Communications (4th Edition)



人民邮电出版社

北京



精品系列

图书在版编目 (C I P) 数据

光纤通信技术 / 孙学康, 张金菊编著. -- 4版. --
北京: 人民邮电出版社, 2016. 6
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-42254-5

I. ①光… II. ①孙… ②张… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第103668号

内 容 提 要

本书全面地介绍了光纤通信技术方面的基本概念、原理及实用系统, 基本内容包括光纤通信的基本概念及其特点、光纤的导光原理、光纤通信器件、光纤通信系统、SDH 光同步网、基于 WDM 的光传送网、分组传送网、城域光网络以及智能光网络等。

本书可作为高等院校通信工程、计算机等相关专业本科教材或研究生的教学参考书, 也可供从事通信工程方面的技术人员参考。

-
- ◆ 编 著 孙学康 张金菊
责任编辑 张孟玮
执行编辑 李 召
责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.75 2016年6月第4版
字数: 434千字 2016年6月北京第1次印刷
-

定价: 49.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

随着 IP 业务的迅速增长，特别是各种多媒体应用的实用化，用户对网络服务质量的要求越来越高。光纤通信系统具有低传输损耗和高传输带宽的特点，因此成为高速数据业务的理想传输通道。本书在介绍光纤通信基本概念和工作原理的基础上，重点介绍光纤通信的最新进展。

本教材在内容取材和编写上具有以下特点。

(1) 内容全面。全书包括光纤的导光原理分析、主要光器件的工作原理及性能分析、SDH 光纤通信系统的结构及特性介绍；从应用的角度，详细地介绍了几种常用的光纤通信网络，例如光同步网、基于 SDH 的多业务传送平台、波分复用系统、超长距离光纤通信系统、相干光通信系统、光传送网 OTN、PTN 分组传送网以及城域光网络等。

(2) 循序渐进。部分内容理论性较强，如光纤的导光原理、光器件的工作原理、光纤的非线性分析等，因此本书加入了射线光学基础、电磁场基础、半导体发光原理等内容，使其由浅至深、层次分明。

(3) 内容先进。教材中包括光纤通信新技术以及实用先进技术，如光传送网的概念及结构、PTN 分组传送网、软件定义网络 (SDN) 在光传送网络中的应用、相干光通信技术、超长距离光通信系统中的新技术、ASON 的体系结构及其路径选择策略、IP over WDM 技术、全光网络技术等。

为了便于学习，每一章还提供了内容摘要、小结和习题。

需要说明的是，本次修订过程中主要通过梳理理论知识点之间的衔接关系，从而进一步精炼理论分析过程，同时根据光通信的最新进展，重点补充相干光通信、超长距离光纤通信系统中的新技术应用和 SDN 引入光传送网的应用分析、外调制器等，同时重新编写了 IM-DD 光纤传输链路以及 WDM 系统链路设计中的工程问题，以适应技术和市场的需求。

本书可用作通信工程、计算机等相关专业本科教材或研究生的教学参考书，也可供从事通信工程方面的技术人员参考。

本书的第 1 章由张金菊、孙学康编写，第 2、3 章由张金菊编写，第 4、5、6、7、8、9 章由孙学康编写。

在本书的编写过程中，编者得到北京邮电大学李文海、段炳毅、张政等教授和马牧燕、王晓勤、段玫、宋立老师的热心指导，在此表示衷心的感谢，同时还要感谢周日康、吴宏

星、苏坤、张诺亚、赵金城等对本书编写所提供的帮助。

由于时间紧迫，编者学识有限，书中难免存在不足之处，请读者不吝指正。

编者

2016.5

目 录

| | | | |
|----------------------------|----|--------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 | 2.4 单模光纤 | 33 |
| 1.1 光纤通信的基本概念 | 1 | 2.4.1 单模光纤的特性参数 | 33 |
| 1.1.1 引言 | 1 | 2.4.2 单模光纤的双折射 | 34 |
| 1.1.2 光纤通信系统的基本组成 | 1 | 2.4.3 其他常用单模光纤 | 36 |
| 1.1.3 光纤通信的优越性 | 2 | 2.5 光纤的传输特性 | 37 |
| 1.2 光纤通信网络的发展现状 | 3 | 2.5.1 光纤的损耗特性 | 38 |
| 1.2.1 光网络的基本概念 | 3 | 2.5.2 光纤的色散特性 | 39 |
| 1.2.2 光网络的组网技术现状 | 4 | 2.6 光纤的非线性效应 | 40 |
| 1.3 光纤通信网络的发展趋势 | 5 | 2.6.1 受激光散射效应 | 40 |
| 1.3.1 新一代光网络技术发展中 的新技术 | 5 | 2.6.2 光纤折射率随光强度变化而 引起的非线性效应 | 41 |
| 1.3.2 光网络推动下的软件定义 网络架构 | 7 | 2.6.3 光孤子通信 | 43 |
| 1.3.3 新一代光网络传送技术的 发展趋势 | 7 | 小结 | 46 |
| 第 2 章 光纤 | 9 | 习题 | 47 |
| 2.1 光纤的结构和分类 | 9 | 第 3 章 光纤通信器件 | 48 |
| 2.1.1 光纤的结构 | 9 | 3.1 半导体光源 | 48 |
| 2.1.2 光纤的分类 | 9 | 3.1.1 激光器的物理基础 | 48 |
| 2.2 用射线理论分析光纤的导光 原理 | 11 | 3.1.2 激光器的工作原理 | 51 |
| 2.2.1 平面波在两介质交界面的 反射与折射 | 11 | 3.1.3 半导体激光器的结构、工作 原理及工作特性 | 54 |
| 2.2.2 阶跃型光纤的导光原理 | 15 | 3.1.4 分布反馈半导体激光器 | 60 |
| 2.2.3 渐变型光纤的导光原理 | 17 | 3.1.5 量子阱半导体激光器 | 61 |
| 2.3 用波动理论分析光纤的 导光原理 | 22 | 3.2 半导体光电检测器 | 61 |
| 2.3.1 麦克斯韦方程及波动 方程 | 22 | 3.2.1 半导体的光电效应 | 61 |
| 2.3.2 阶跃型光纤的标量近似 解法 | 24 | 3.2.2 光纤通信中常用的半导体 光电检测器 | 62 |
| 2.3.3 渐变型光纤的标量近似 解法 | 32 | 3.2.3 光电检测器的特性 | 64 |
| | | 3.3 光放大器 | 67 |
| | | 3.3.1 掺铒光纤放大器 | 67 |
| | | 3.3.2 光纤拉曼放大器 | 72 |
| | | 3.4 外调制器 | 75 |
| | | 3.4.1 电折射调制器 | 75 |
| | | 3.4.2 M-Z 型调制器 | 75 |
| | | 3.4.3 电吸收 MQW 调制器 | 76 |

| | | | |
|--------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 3.5 无源光器件 | 77 | | 119 |
| 3.5.1 光定向耦合器 | 77 | 5.2.1 SDH 复用结构 | 119 |
| 3.5.2 光隔离器与光环行器 | 78 | 5.2.2 映射方法 | 122 |
| 3.5.3 光滤波器 | 79 | 5.3 SDH 光传输系统 | 122 |
| 3.5.4 光开关 | 79 | 5.3.1 系统结构 | 122 |
| 3.5.5 波长转换器 | 80 | 5.3.2 SDH 网元 | 123 |
| 3.5.6 波分复用器 | 81 | 5.4 SDH 传送网 | 126 |
| 3.5.7 光纤光栅 | 83 | 5.4.1 传送网的分层结构 | 126 |
| 小结 | 84 | 5.4.2 传送网的节点和节点设备 | 127 |
| 习题 | 84 | 5.4.3 SDH 传送网 | 128 |
| 第4章 光纤通信系统 | 86 | 5.5 SDH 网络中的安全性问题—— 保护与同步 | 131 |
| 4.1 光纤通信中的调制技术 | 86 | 5.5.1 SDH 网络的保护 | 131 |
| 4.2 IM-DD 光纤通信系统 | 88 | 5.5.2 SDH 的网同步 | 138 |
| 4.2.1 传输线路码型 | 88 | 5.6 SDH 网络性能 | 140 |
| 4.2.2 IM-DD 光通信系统结构 | 89 | 5.6.1 光接口、电接口的界定 | 140 |
| 4.2.3 IM-DD 光纤传输链路设计 中的工程问题 | 97 | 5.6.2 误码性能 | 141 |
| 4.3 超长距离高速光通信系统 | 103 | 5.6.3 抖动性能 | 142 |
| 4.3.1 传输通道特性 | 103 | 小结 | 143 |
| 4.3.2 高速光传输系统中的关键 技术 | 104 | 习题 | 144 |
| 4.3.3 超长距离光纤通信系统中 的光放大技术 | 107 | 第6章 基于 WDM 的光传送网 | 145 |
| 4.4 相干光通信 | 110 | 6.1 光传送网的基本概念及特点 | 145 |
| 4.4.1 相干光通信的基本概念 及特点 | 110 | 6.2 波分复用系统 | 146 |
| 4.4.2 相干光通信的基本原理 | 111 | 6.2.1 光波分复用的基本概念 | 146 |
| 4.4.3 相干光通信系统 | 112 | 6.2.2 波分复用系统 | 150 |
| 4.4.4 相干光通信中的关键技术 | 112 | 6.2.3 WDM 网络的关键设备 | 152 |
| 小结 | 113 | 6.2.4 WDM 系统设计中的工程 问题 | 156 |
| 习题 | 114 | 6.3 光传送网 (OTN) | 159 |
| 第5章 SDH 光同步网 | 116 | 6.3.1 WDM 光传送网的体系 结构 | 159 |
| 5.1 SDH 的基本概念 | 116 | 6.3.2 OTN 帧结构和开销 | 160 |
| 5.1.1 SDH 的网络节点接口、 速率和帧结构 | 116 | 6.3.3 客户信号的映射和复用 | 161 |
| 5.1.2 SDH 网的特点 | 118 | 6.3.4 光通道网络 | 163 |
| 5.2 SDH 中的基本复用、映射结构 | | 6.3.5 OTN 关键设备 | 166 |
| | | 6.3.6 OTN 网络的保护方式 | 168 |
| | | 6.4 SDN (软件定义网络) 在光 传送网的引入与应用分析 | 172 |

| | | | |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 6.4.1 SDN 体系结构 | 172 | 习题 | 204 |
| 6.4.2 软件定义传送平面 | 174 | 第 8 章 城域光网络 | 205 |
| 6.4.3 软件定义控制平面 | 175 | 8.1 城域光网络的结构 | 205 |
| 6.4.4 SDN 在光传送网中的应用 | 175 | 8.1.1 城域网的分层结构 | 205 |
| 6.4.5 SDN 在 IP 层与光融合中的 应用 | 176 | 8.1.2 城域网的网络架构与功能 | 207 |
| 小结 | 179 | 8.2 IP over WDM | 208 |
| 习题 | 180 | 8.3 无源 EPON/GPON 光接入网络 | 209 |
| 第 7 章 分组传送网 | 181 | 8.3.1 光接入网的概念 | 209 |
| 7.1 PTN 的基本概念及特点 | 181 | 8.3.2 无源光网络的传输原理及 其应用 | 211 |
| 7.1.1 PTN 的基本概念 | 181 | 8.3.3 以太网无源光网络 | 213 |
| 7.1.2 PTN 标准 | 181 | 8.3.4 GPON 与 EPON 的比较 | 218 |
| 7.1.3 PTN 的特点 | 182 | 8.4 基于 SDH 的多业务传送平台 | 220 |
| 7.2 PTN 网络的体系结构 | 182 | 8.4.1 MSTP 的基本概念及特点 | 220 |
| 7.2.1 分层结构 | 182 | 8.4.2 MSTP 中的关键技术 | 221 |
| 7.2.2 PTN 的功能平面 | 184 | 8.4.3 多业务传送平台 | 226 |
| 7.2.3 PTN 网元结构与分类 | 185 | 8.5 城域传送网的组网策略 | 227 |
| 7.3 T-MPLS 的业务承载与数据 转发 | 186 | 8.5.1 全业务运营对城域传送网 的要求 | 227 |
| 7.3.1 T-MPLS 与 MPLS 的区别 | 186 | 8.5.2 城域传送网的组网策略 | 229 |
| 7.3.2 T-MPLS 帧格式 | 188 | 小结 | 232 |
| 7.3.3 T-MPLS 各层的适配过程 | 189 | 习题 | 234 |
| 7.3.4 T-MPLS 的数据转发原理 | 190 | 第 9 章 智能光网络 | 235 |
| 7.4 T-MPLS 的 OAM 技术 | 190 | 9.1 智能光网络 | 235 |
| 7.5 T-MPLS 网络中的安全性问题 ——保护与同步 | 192 | 9.1.1 智能光网络的概念、特点 及功能 | 235 |
| 7.5.1 网络保护 | 192 | 9.1.2 ASON 的网络体系结构 | 236 |
| 7.5.2 同步技术 | 196 | 9.1.3 ASON 控制平面及其核心 技术 | 237 |
| 7.6 PTN 在 3G 传输承载网络中的 应用 | 199 | 9.2 全光网 | 251 |
| 7.6.1 3G 网络对传输承载的要求 | 199 | 9.2.1 全光网的概念、结构及其 特点 | 251 |
| 7.6.2 PTN 应用定位 | 199 | | |
| 7.6.3 3G 传输承载网络应用 | 201 | | |
| 小结 | 203 | | |

| | |
|--|-----|
| 9.2.2 全光网中的关键技术 | 252 |
| 小结 | 257 |
| 习题 | 258 |
| 附录 A 双曲正割型折射指数分布光纤 可以获得自聚焦的证明 | 259 |
| 附录 B 标量场方程解的推导 | 261 |

| | |
|----------------------------|-----|
| 附录 C 标量亥姆霍兹方程解的推导 | 265 |
| 附录 D 缩略语英汉对照表 | 268 |
| 参考文献 | 276 |

光纤通信作为现代通信的主要传输手段，在现代通信网中起着重要的作用。自 20 世纪 70 年代初光纤通信问世以来，整个通信领域发生了革命性的变革，使高速率、大容量的通信成为现实。

为了使读者在深入学习之前对光纤通信有一个基本的了解，本章将对光纤通信的基本概念、光纤通信发展现状及其发展趋势作一概括介绍。

1.1 光纤通信的基本概念

1.1.1 引言

利用光导纤维传输光波信号的通信方式称为光纤通信。

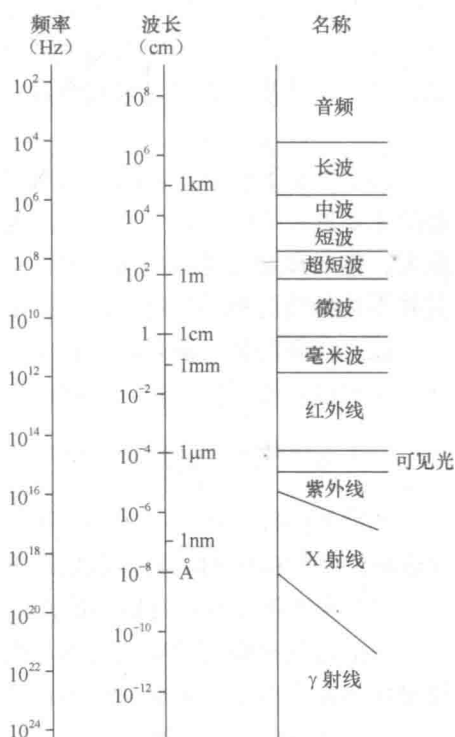
光波属于电磁波的范畴，按照波长的不同（或频率的不同），电磁波的种类不同，可分为若干种，具体名称如图 1-1 所示。其中，属于光波范畴之内的电磁波主要包括紫外线、可见光和红外线。

目前光纤通信的实用工作波长在近红外区，即 $0.8 \sim 1.8\mu\text{m}$ 的波长区，对应的频率为 $167 \sim 375\text{THz}$ 。

光导纤维（简称为光纤）本身是一种介质，目前实用通信光纤的基础材料是 SiO_2 ，因此它属于介质光波导的范畴。对于 SiO_2 光纤，在上述波长区内的 3 个低损耗窗口，是目前光纤通信的使用工作波长，即 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 及 $1.55\mu\text{m}$ 。

1.1.2 光纤通信系统的基本组成

根据不同的用户要求、不同的业务种类以及不同阶段的技术水平，光纤通信系统的形式可多种



注: $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm} = 10^{-10}\text{m}$

图 1-1 电磁波的种类和名称

多样。

目前采用比较多的系统形式是强度调制/直接检波 (IM/DD) 的光纤数字通信系统。该系统主要由光发射机、光纤、光接收机以及长途干线上必须设置的光中继器组成, 如图 1-2 所示。

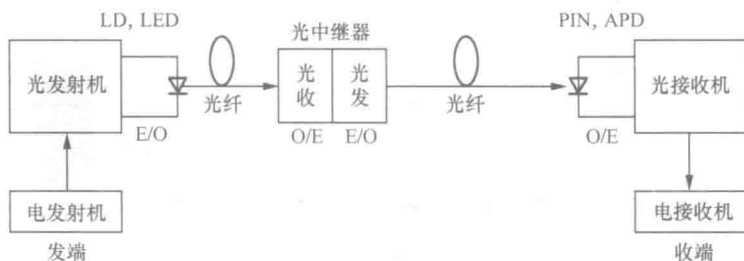


图 1-2 光纤数字通信系统示意图

在点对点的光纤通信系统中, 信号的传输过程如下。

由电发射机输出的脉冲调制信号送入光发射机, 光发射机的主要作用是将电信号转换成光信号耦合进光纤, 因此光发射机中的重要器件是能够完成电—光转换功能的半导体光源。目前主要采用单色性、方向性和相干性极强的半导体激光器 (LD)。

通信系统的线路目前主要采用由单模光纤制成的不同结构形式的光缆, 这是因为其具有较好的传输特性。

光接收机的主要作用是将通过光纤传送过来的光信号转换成电信号, 然后经过对电信号的处理, 使其恢复为原来的脉冲调制信号送入电接收机。可见光接收机中的重要器件是能够完成光—电转换功能的光电检测器。目前主要采用光—电二极管 (PIN) 和雪崩光电二极管 (APD)。

为了保证通信质量, 在收发端机之间适当距离上必须设有光中继器。光纤通信中光中继器的主要形式有两种, 一种是采用光—电—光转换形式的中继器, 其可提供电层面上的信号放大、整形和定时提取功能; 另外一种是可在光层面上直接进行光信号放大的光放大器, 但其并不具备波形整形和定时信号提取功能。

以上介绍的是目前采用比较多的一种系统构建形式, 随着光通信技术的不断发展, 一些新的光通信系统不断涌现, 例如波分复用光通信系统、光孤子光通信系统等。

1.1.3 光纤通信的优越性

光纤通信技术从 20 世纪 70 年代初到现在, 之所以能够得到迅速的发展, 主要是由其无比优越的特性决定的, 具体包括以下几点。

(1) 传输频带宽, 通信容量大

通信容量和载波频率成正比, 通过提高载波频率可以达到扩大通信容量的目的。光波的频率要比无线通信的频率高很多, 因此其通信容量也要增大很多。

光纤通信的工作频率为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz, 如设一个话路的频带为 4kHz, 则在—对光纤上可传输 10 亿路以上的电话。目前采用的单模光纤的带宽极宽, 因此用单模光纤传输光载频信号可获得极大的通信容量。

(2) 传输损耗小, 中继距离长。

传输距离和线路上的传输损耗成反比, 即传输损耗越小, 则中继距离就越长。目前, SiO_2 光纤线路如工作在 $1.55\mu\text{m}$ 波长时, 传输损耗可低于 0.2dB/km , 系统最大中继距离可达 200km , 在采用光放大器实现中继放大的系统中, 无电再生最大中继距离可达 600km 以上。这样在保证传输质量的条件下, 长途干线上无电中继的距离就越长, 则中继站的数目就可以越少, 这对于提高通信的可靠性和稳定性具有特别重要的意义。

(3) 抗电磁干扰的能力强

由于光纤通信采用介质波导来传输信号, 而且光信号又是集中在纤芯中传输的, 因此光纤通信具有很强的抗干扰能力, 而且保密性也好。

另外, 光纤线径细、重量轻, 而且制作光纤的资源丰富。

光纤通信由于具有以上优越性, 因此发展速度非常快, 在 21 世纪的信息社会中, 占有非常重要的地位。

1.2 光纤通信网络的发展现状

光纤通信的发展依赖于光纤通信技术的进步, 为了适应网络发展和传输容量不断提高的需求, 人们在传输系统的技术开发上做出了不懈的努力。据资料显示, 单信道的最高传输速率可达 640Gbit/s , 即使采用光时分复用 (OTDM) 和波分复用 (WDM) 技术来提高光纤通信系统容量, 其程度仍然有限, 就现有 WDM 系统传输容量的试验水平来看, 1.6Tbit/s [$160(10\text{Gbit/s})$] WDM 系统已经成功商用。后来北电随即推出 $80(80\text{Gbit/s})$ 的 WDM 系统, 总容量达到 6.4Tbit/s 。此外, 朗讯公司采用 80nm 谱宽的光放大器创造了波长数高达 1022 的世界纪录。由于 WDM 只是一种在光域上的复用技术, 形成一个光层的网络即“全光网”, 将是光通信的最高阶段。即建立一个以 WDM 和 OXC (光交叉连接) 为基础的光网络层, 实现用户端到端的全光网连接, 用一个纯粹的“全光网”消除光电转换的瓶颈, 将是未来的发展趋势。

1.2.1 光网络的基本概念

光网络是光纤通信网络的简称, 它是指以光纤为基础传输链路所组成的一种通信体系结构。换句话说, 光网络就是一种基于光纤的电信网。它兼顾“光”和“网络”两层含义, 即可通过光纤提供大容量、长距离、高可靠的链路传输手段; 同时在上述媒质基础上, 可利用先进的电子或光子交换技术, 并引入控制和管理机制, 实现多节点间的联网以及基于资源和业务需求的灵活配置功能。

一般来说, 光网络是由光传输系统和在光域内进行交换/选路的光节点构成, 并且光传输系统的传输容量和光节点的处理能力非常强大, 电层面的处理通常是在边缘网络中进行的, 边缘节点通过光通道实现与光网络的直接连通。图 1-3 所示为基于 WDM 的多波长光网络总体结构图。光网络常使用的设备有 OTM (光终端复用器)、OADM (光分插复用器) 和 OXC (光交叉连接器)。

光网络节点 (ONN) 是用户终端与光网络的接口界面, 可提供交叉连接和选路等功能, 用于控制、分配光信号的路径, 从而实现源节点和目的节点之间的光连接。网络中的光电转

换和电子处理器件主要集中在边缘节点,用于业务上路和下路操作。由此可见,这种光网络不是一种纯光的光网络,它的控制、管理以及处理仍然是由电层来完成的。

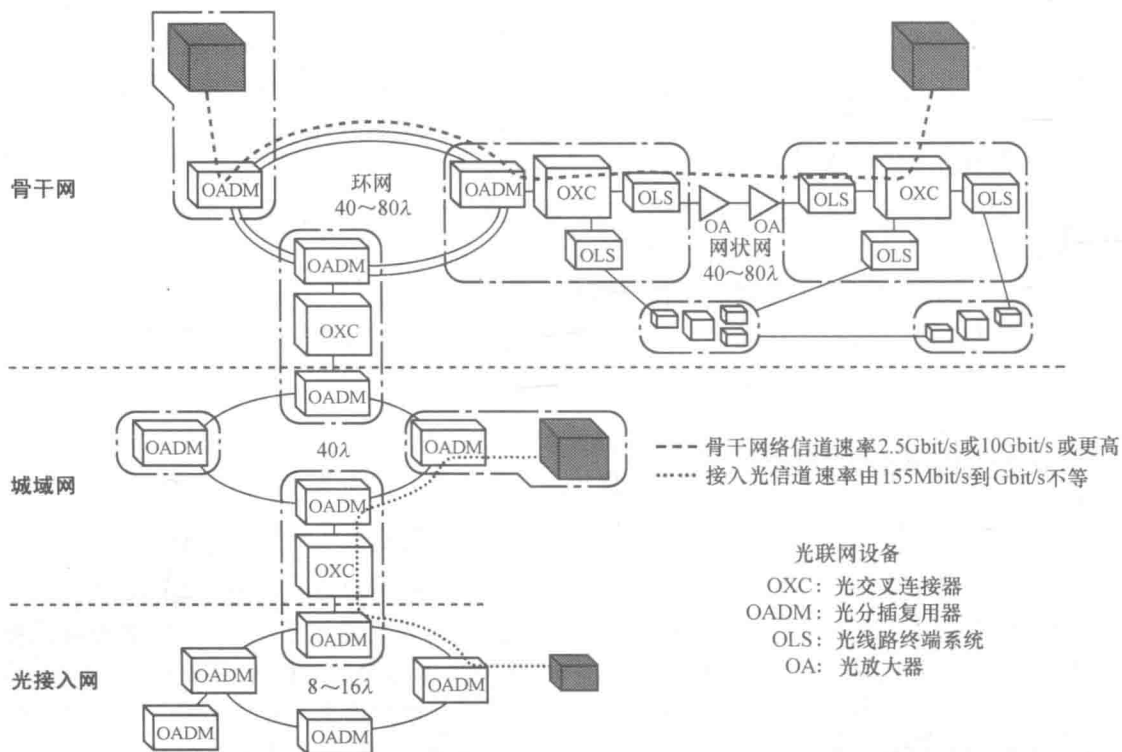


图 1-3 基于 WDM 的多波长光网络总体结构示意图

1.2.2 光网络的组网技术现状

我国的光纤网是从 1985 年开始建设的,由于其具有信息传输容量大、传输距离长的特点,当时 34Mbit/s、140Mbit/s PDH (准同步数字系列) 系统迅速得到商用。20 世纪 90 年代初 SDH (同步数字体系) 系统得到商用后,大多数干线部署 2.5Gbit/s 或 10Gbit/s SDH 系统。

目前我国核心网光传输系统主要采用 2.5Gbit/s 以上的系统,部分干线采用 $32 \times 10\text{Gbit/s}$ 密集波分复用 (DWDM) 系统,其结构基本上是点到点,部分考虑了 SDH 层面上的保护。而新建的 DWDM 系统大多采用 OADM 环网方案。接入网中已大量采用光纤接入方式,包括采用有源光接入数字环路载波系统 (DLC) 和无源光网络 (PON) 的光纤接入方式,实现 FTTC (光纤到路边)、FTTB (光纤到大楼)、FTTH (光纤到户) 接入,以满足大数据背景下对网络带宽增长的需求。

2012 年,网络技术已经从 10Gbit/s 速率技术发展状态直接进入 100Gbit/s 速率技术全面应用时期,100Gbit/s 速率系统产品已经取代了 40Gbit/s 的产品,并得到运营商的高度认可。2013 年,中国移动首先建设成功当时全球最大的 100Gbit/s 干线网络,并在此基础上引入自动交换光网络 (ASON) 技术,以提高传送网的资源保护效率和资源利用率。

从广义的角度看,光网络应该覆盖城域网和接入网,由于这两种网络在网络中位置不

同,各自的技术特征也不同,因此可根据需求选择不同的技术。通常城域骨干网中可供选择的技术有SDH、DWDM、OTN(光传送网)、MSTP(多业务传送平台)、ASON等,接入网中常使用的技术包括SDH、CWDM(粗波分复用)、MSTP、EPON(以太网无源光网络)、GPON(千兆位无源光网络)、PTN等,这些技术将在后面的各章节进行相应的介绍。

1.3 光纤通信网络的发展趋势

1.3.1 新一代光网络技术发展中的新技术

对光纤通信网络而言,超高速率、超大容量和超长距离一直是人们追求的目标。全光网络则是人们不断追求的方向。

1. 大容量、超长距离传输技术

单信道传输速率的提升,光纤本身的损耗、非线性、色散等因素,使光信号在传输过程中发生畸变,制约了系统性能,因此在技术上给网络传输与交换带来了很多要求。

从调制格式和复用方式来看,可采用基于偏振复用结合多相位调制的调制方式,如偏振复用四相相移键控(PDM-QPSK)、8/16相相移键控(8PSK/16PSK)以及基于低速子波复用的正交频分复用(OFDM),也可采用密集波分复用、光时分复用等技术。

从调制编码解调来看,目前主要可采用直接解调和相干解调两种方式,其中相干解调主要采用数字信号处理(DSP)技术来实现,显著降低了相干通信中对于激光器特性的要求。但由于目前受到模/数转换器(ADC)和DSP芯片等处理能力的限制,因此基于100Gbit/s信号的实时相干接收处理是亟待解决的技术难题之一,将直接影响其商用的步伐。

(1) 正交频分复用

鉴于OFDM的技术优势,将其引入到光纤通信系统中是近年来的一个研究热点。实验表明在不采用任何补偿的情况下,采用OFDM技术的单模光纤通信系统可以将10Gbit/s信号传输1000km以上,可见OFDM技术的引入可明显改善光纤通信系统性能。

(2) 光时分复用

OTDM能够克服因放大器级联而带来的增益不平坦和光纤非线性的限制,在未来采用全光交换和全光路由的网络中,OTDM技术的一些特点使其作为全光网络关键技术之一更具吸引力,例如上下话路方便,可适用于本地网和骨干网。目前基于OTDM的传输速率已经达到太比特每秒。但OTDM必须采用归零码超短脉冲,占用频带宽,而且色散和色散斜率影响较为显著。OTDM传输系统的关键技术包括超短光脉冲发生技术、全光时分复用/解复用技术和超高速定时提取技术等。因此人们在研制全光控制的各种超高速逻辑单元,例如速度在皮秒(ps)级的超高速全光开关等。

(3) 偏振复用

利用光在单模光纤中传输的偏振特性,将传输波长的两个独立且相互正交的偏振态作为独立信道分别用于传输两路信号,这样可成倍提高系统容量和频谱利用率。两束偏振光信号偏振复用后,经过长距离的光纤传输,会受到光纤应力、偏振模色散(PMD)、偏振相关损耗(PDL)等因素的影响,偏振状态会发生变化,使得到达接收端的光信号的偏振态随时间发生快速变化。这就要求解复用器具有自动调整功能,进而能够分辨出彼此正交的两个偏振

通道。目前偏振复用技术所面临的关键挑战正是在于如何进行信号的解复用,这是一直困扰和阻碍偏振复用技术进入实际应用的难题。

2. 光孤子通信

光孤子是一种特殊的 ps 数量级的超短光脉冲。由于它在光纤反常色散区,群速度色散和非线性效应相互平衡,因此经过光纤长距离传输后,波形和速度都保持不变。光孤子通信就是利用光孤子作为载体实现长距无畸变的通信,在零误码的条件下,信息传输距离可达上万公里。尽管光孤子通信仍然存在许多技术难题,但目前所取得的技术突破使人们坚信在不久的将来可以实现超长距离、高速、大容量的全光通信。

3. 相干光通信

在接收机中,相干光通信增加了光混频器和本振光源,具有混频增益特性,使得系统的接收灵敏度提高,并且具有极强的波长选择能力,因此相干光通信可以在波分复用系统以及光频分复用系统中发挥巨大的作用。可以想象,未来人们可以像调节无线电接收机一样,通过调节接收机本振波长,便可以根据需要从众多信道中接收所需的信息。

4. 量子通信

光量子通信主要基于量子纠缠态的理论。与经典通信相比,具有高效率 and 绝对安全的特点。这是由于光量子通信所使用的加密密钥是随机获得的,且利用量子隐形传态(传输)来进行信息传递。根据量子纠缠理论,具有纠缠态的 2 个粒子,其中一个粒子的量子态发生变化,另外一个的量子态就会随之立刻变化,因此宏观的任何观察和干扰,都会立刻改变量子态,引起其坍塌,因此窃取者由于干扰而得到的信息已非原有信息,从而确保信息传递的安全性。高效是指被传输的未知量子态在被测量之前会处于纠缠态,即同时具有 n 个状态,每个量子态又可以同时表示 0 和 1 两个数字,这样光量子通信的传输,就相当于经典通信方式的 $2n$ 次,可见其传输效率惊人。但量子存储实验实现却一直存在很大的困难,相信随着量子通信技术的发展,其在网络密钥和大容量通信方面将会带来重大突破,使之成为未来研究的热点。

5. 全光缓存器

光子具有一定的能量,如果没有将其转换成其他形式的能量,理论上讲光子是不可能停下来的。因而能够在光域内实现对数据包缓存的全光缓存器,是全光包交换网络中的关键器件。目前“光缓存”可以分为两类:一类是通过减慢光的传播速度所制作的慢光型全光缓存器;另一类是通过延长光传输路径构建的,包括光纤延迟线或光纤环型全光缓存器。随着光器件研究进展,已研究出基于复合调制长周期光栅的新型缓存器,其在降低成本、提高器件集成度方面具有明显的优势,可应用于存储单元和脉冲重新定时,但目前仅限于实验室研究。

6. 光层调度技术

作为实现(光传送网) OTN 光层调度的核心设备(可重构光分插复用器) ROADMs,

与传统的非可重构 OADM 相比, ROADM 采用可配置的光器件, 从而实现 OTN 节点中任意波长、波长组的上下、阻断和直通配置。这样通过引入 ROADM 设备, 可组建大规模的 PXC (光子交叉) 网络, 以实现 OTN 光层波长交叉调度功能。由于交叉过程全部是在光层完成的, 无需经过 O/E/O 转换, 因此设备成本降低。目前实现光层调度的主要器件包括波长阻断器 (WB)、平面光波回路 (PLC) 和波长选择开关 (WSS)。因为 WSS 能够支持多个方向间的波长调度, 这是 WB 与 PLC 所无法实现的功能, 即便 WSS 不能支持广播组播功能, 且成本较高, 但 WSS 仍成为 ROADM 的主流技术, 用于实现波长业务的重路由, 以提高业务的保护能力和网络的可靠性。

我们可以预期, 随着数字信号处理 (DSP) 技术和各种功能的光器件在技术成熟和成本上达到预期目标, 将使目前呆板的光网络向下一代具有鲁棒性且可实现“即插即用”的光网络转变, 同时通过引入光层自动调度功能, 使网络具有可重构性, 进一步降低运营和维护成本。

1.3.2 光网络推动下的软件定义网络架构

随着 100Gbit/s 系统的商用推广, 骨干网将全面转入 100Gbit/s 速率时代。100Gbit/s OTN 中需要引入 ASON 技术来实现网络资源的共享, 提高网络承载能力和可靠性。而与 ASON 目标一致的 SDN (软件定义网络), 也是为了满足控制和传送分离、网络可编程等需求而设计的, 两者均着重于在逻辑层面实现对物理层资源的调度。SDN 的目标是通过软硬件来实现网络虚拟化、IT 化和软件化, 光传送网中引入 SDN 架构将可以全面掌控全网信息, 有效利用全网带宽资源, 加快搜索速度, 降低通信链路时延, 实现通信系统的路由和性能预测。现已有一些厂商在其产品中引入 SDN, 以实现对网络的可管可控。

目前 SDN 主要采用光模块速率/码型可调、灵活栅格以及物理层可动态配置, 实现软件、硬件分离。光传送网引入 SDN 可以较为显著地提高资源利用、运维管理等能力, 在基站业务、集客业务、家宽带业务、光缆网络等应用场景中, 可通过软件定义网络管理器掌握全网信息 (如拓扑结构、网络状态、收敛时间、时延、抖动等), 以保障系统路由和性能的可预测性。为了满足电信级运营商的大型组网需求, 可采用 SDN 技术与 PTN (分组传送网) 技术相结合的方式, 即 SPTN 方案。该方案采用层次化架构, 通过网管集中式控制实现存量设备的 SDN 演进, 而对新建设备, 则采用新增控制器, 使用标准接口进行集中控制。在此基础上, 通过协同器进行协同。从而实现 PTN 整网的 SDN 演进。

随着网络的 IP 化趋势加速, 用户在线比提高, 收敛比降低, 汇聚级数在减少, 汇聚层将逐渐淡出, 使得整个网络架构逐步趋于扁平化, 而现有的网络架构已经越来越无法满足网络演进的需求, 因此网络架构的进一步优化势在必行。为此提出了网络功能虚拟化 (NFV) 架构, 使用该架构可进一步简化底层网络设施的运维管理, 同时提升对于网络的管控能力。例如, IP RAN 技术, 目前很多功能都基于基站侧, 而通过 NFV 技术则可将 IP RAN 三层功能向上迁移致汇聚层进行统一管理, 从而降低了设备运营管理的复杂度。

1.3.3 新一代光网络传送技术的发展趋势

在传统的光网络中, 一些节点仍然采用电器件, 大大限制了光网络的传输带宽, 因此实现全光节点的部署, 构建全光网络已成为技术发展的必然趋势。

随着互联网和数据业务的飞速发展,新一代网络传送技术还将具备可动态分配全光链路的功能。采用全光链路,可以突破传统光传送网的固定波长带宽限制,这样通过灵活带宽适配、动态带宽分配等技术实现全光交换和全光组网功能,极大地提高了光传送网的带宽资源的利用效率。目前国内外针对支持灵活谱利用的超大容量全光网体系结构下的新一代全光网络体系结构进行了技术与实验研究,其中以美国国防部高级研究计划署(DARPA)为了满足未来军事和商业对高速全光网络技术的需求,而开展的动态多太比特核心光网络计划(CORONET)项目最为典型。

该项目内容涵盖了体系结构、协议、控制和管理等。CORONET网络采用了100个节点组成动态多太比特核心光网络拓扑,其中的75个位于美国本土,其余分布在全球各地,构成约140条网络连接链路。该网络采用IP层和光层两层结构,IP层主要由多台路由器组成,光层则采用可实现全光交换的动态可重构光分插多路复用器(ROADM)构成。CORONET业务主要有IP业务和波长业务两部分,其中,波长业务包括单波长业务、双波长业务、四波长业务和八波长业务。需要说明的是,CORONET网络无需人为操作,就可以进行远程配置和升级,可以快速建立链路,防止由于网络故障而带来的业务中断,因此该网络具有高度的健壮性和安全性。

互联网和大数据时代的到来,推动了新一代信息网络的迅猛发展,也进一步促进SDN和NFV架构等新技术的演进发展,为网络传送技术的发展奠定良好的基础。相信通过使光层具有动态化和智能化功能,能够使全光网络技术向着低功耗、大容量、高动态的方向演进。