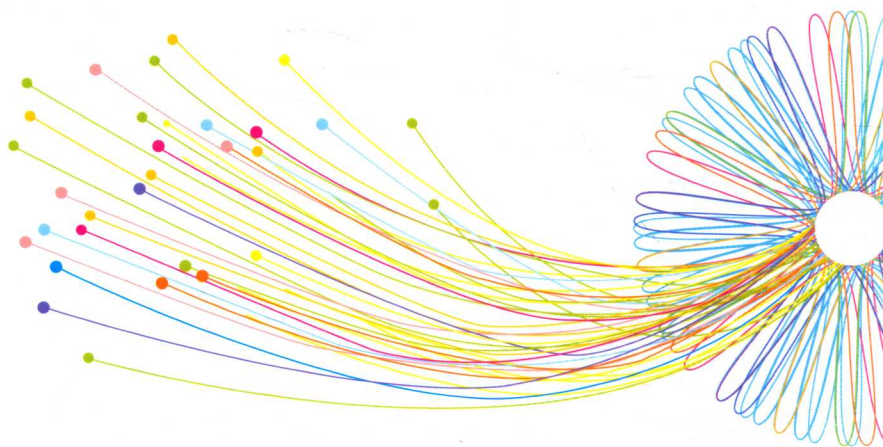


光网络新技术 解析与应用

Optical Network—New Technology and Implementation

张成良 李俊杰 马亦然 荆瑞泉 等编著

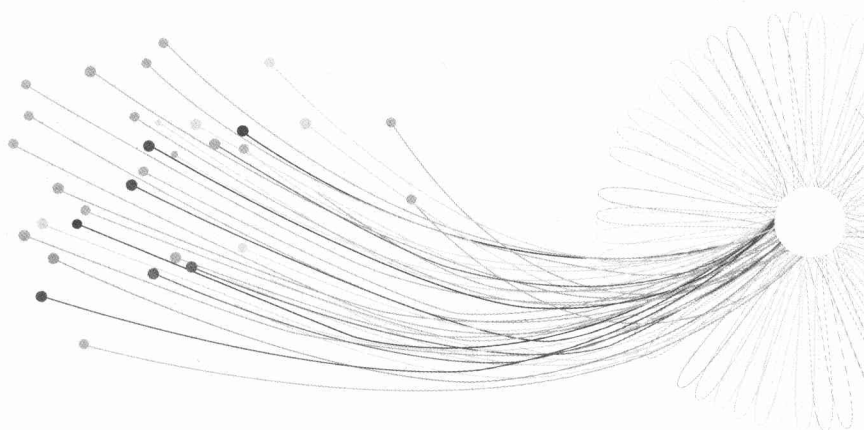


转型时代丛书
中国电信北京研究院专家奉献

光网络新技术 解析与应用

Optical Network—New Technology and Implementation

张成良 李俊杰 马亦然 荆瑞泉 霍晓莉 雷波 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对光网络的三个重要研究方向——高速大容量、组网、管理控制进行详细介绍。从超高速传输系统到光纤新技术,从骨干网到城域接入网,从电层组网到光层组网,从统一网管到传送网 SDN,本书汇集了光网络发展的方方面面。

本书由光网络方面的专家精心编写,代表了业界的权威观点,对新技术和未来发展方向的一些见解非常具有参考性。本书适合光网络领域的所有从业人员阅读,包括在校学生、运营商、设备商、模块商、咨询机构等。

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

光网络新技术解析与应用 / 张成良等编著. —北京:电子工业出版社, 2016.3
(转型时代丛书)
ISBN 978-7-121-27921-8

I. ①光… II. ①张… III. ①光纤网—研究 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 308410 号

策划编辑:刘 皎 郑柳洁

责任编辑:葛 娜

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:720×1000 1/16 印张:23.5 字数:345 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版

印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:69.00 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。

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。

转型时代丛书

指导委员会

主任委员：吴基传

副主任委员：杨杰

委 员：陈俊亮 李未 韦乐平

邬贺铨 张继平（按拼音顺序排序）

编委会

主 任：李志刚

副主任：赵慧玲

委 员：毕奇 朱健 陈运清 张成良

陈自清 王晓平 杨峰义 谭国权



转型时代丛书

推荐序

信息社会已经全面进入互联网时代，在新一代信息网络基础设施中，光网络无疑是最基础，也是最重要的一个层面。光网络承载了互联网产生的海量数据流量，是整个信息世界的高速铁路和高速公路。就像人体离不开血液，信息社会的“血液”就是携带各种信息的数据流，而光网络就是信息社会这个人体中的“血管”。

随着人们对通信容量、传输速度、通信质量等要求的不断提高，现有的光网络技术越来越不能满足人们的需求。

一方面，网络带宽和需求持续高速增长。以 4K/8K 超高清电视、虚拟现实游戏为代表的未来业务的类型更丰富，带宽需求更大，性能要求更高。随着 FTTH 和 4G 移动宽带业务的规模开展，业务网络对光网络容量和带宽的需求迅猛增加，目前光纤到户（FTTH）家庭宽带已经具备 100Mb/s 接入能力，在可预见的未来将出现 GE 入户的需求，城域网和骨干网将出现几十 Tb/s 的汇聚带宽。而随着移动互联网、物联网等应用的兴起，预计至 2020 年，互联设备的数量可能高达 500 亿。海量的连接需求以及单位连接带宽需求的高速增长相结合，给光网络带来了巨大的带宽压力。

另一方面，网络架构开始发生变化。随着云计算、物联网的兴起，数据中心（Data Center，DC）逐渐成为网络的核心。海量数据在云上汇集和处理，部分数据实时性要求很高，期待光网络灵活高效、减少层级、降低时延。终端用户带宽和流量的高速增长导致网络的带宽瓶颈从网络核心向网络边缘延伸，光网络技术的应用也随之从核心向边缘扩展。总体来讲，超高速、大容量光传输

与全光交换成为未来光网络的发展方向。

纵观光传输发展历史，三十年来其发展速度迅猛，为了实现超大容量光纤传输，系统主要采用多路复用方式，频域复用技术得到了广泛的应用，通常也被人们称为波分复用。单模光纤的可用频谱在 11THz 左右，考虑到传输距离因素，单模光纤系统的极限容量在 100Tb/s 左右。当前学术实验已经达到这个极限，考虑到传输距离和容量的乘积，现网试验距离极限也相差不大。虽然目前的商用系统还有较大的潜力可挖，但是考虑到性价比，扩展的空间已经很小，未来的传输系统一方面需要更优化的介质——新型光纤来降低传输损耗和非线性效应，另一方面可能需要向着空间复用的方向发展。光网络的组网技术也将从纯粹的电层组网演进为大容量电交叉与光层交换统一组网。

管理和互操作性也一直是困扰光网络发展的一大难题，不同厂家设备之间无法互通，造成跨厂家和跨域的带宽提供变得十分复杂和昂贵。实现对多厂商设备和多域网络的统一控制和管理是软件定义光传送网的主要应用场景，采用 Openflow 协议扩展可以实现多厂商传送网设备的统一控制和管理，在光网络跨域统一管控方面是跨时代的突破，为多域网络中的端到端业务快速开通和管理提供了一种可行方案，为传送网络能力开放和业务创新提供了条件。在此基础上，运营商可以对传统的传送网业务进行创新。统一的控制器可以管理各个厂家各个域的多种设备并向上提供北向接口，多种多样的应用可以通过北向接口来调用控制器的能力，从而快速组网、变更业务、调整带宽。SDN 技术为光网络带来了新的生命，有望从根本上解决光网络难以互通、业务建立和修改缓慢、新业务创新困难等问题。

本书将对光网络的三个重要研究方向：高速大容量光传输、光层组网、智能管理控制进行详细介绍。通过本书，读者首先可以认识到互联网已经成为信息社会的核心，而光网络是实现互联网的基础设施中的重中之重。读者既可以对光网络的发展趋势有总体的认识，也可以详细地了解光网络的各项关键技术。从超高速传输系统到光纤新技术，从骨干网到城域接入网，从电层组网到

光层组网，从统一网管到传送网 SDN，本书汇集了当前光网络各个方面的最新技术发展情况，对从事通信网络领域相关工作的技术人员和相关专业学生，都是一本很好的参考书籍。

韦乐平

中国电信集团公司科技委主任

2015 年 11 月 30 日

目录

第 1 章	概述	1
1.1	互联网对通信网络的影响	2
1.1.1	互联网成为信息时代的基础	3
1.1.2	互联网的发展离不开光网络的支撑	7
1.2	光网络技术发展趋势	10
1.2.1	超高速传输系统的发展	10
1.2.2	新型光纤技术助推传输性能的提升	15
1.2.3	软件定义光网络带来新的机遇	15
1.3	本书组织架构	16
	本章小结	17
	缩略语	18
	参考文献	19
第 2 章	WDM 技术发展与应用	21
2.1	高速大容量 WDM 传输的技术挑战	22
2.1.1	WDM 传输技术概述	22
2.1.2	WDM 传输技术在我国的应用	24
2.2	$N \times 40\text{Gb/s}$ WDM 传输关键技术与应用	25
2.2.1	40Gb/s 调制与检测技术	25
2.2.2	色散补偿技术	35
2.2.3	偏振模色散 (PMD) 补偿技术	40

2.2.4	40Gb/s WDM 传输技术的应用	41
2.3	100Gb/s WDM 传输关键技术与应用	43
2.3.1	100Gb/s WDM 传输技术的优势	43
2.3.2	100Gb/s 相关标准化情况	44
2.3.3	相干光通信技术	48
2.4	前向纠错 (FEC) 技术的发展与应用	57
2.4.1	FEC 技术概述	57
2.4.2	软判决与硬判决比较	60
2.4.3	FEC 性能评估方式	64
2.5	“数字-模拟协同” WDM 系统性能评测体系	66
2.5.1	传统的 WDM 系统性能评测体系	67
2.5.2	创新的“数字—模拟协同”评测体系	71
	本章小结	75
	缩略语	76
	参考文献	78

第 3 章 超 100Gb/s 超高速 WDM 传输..... 80

3.1	$N \times 400\text{Gb/s}$ WDM 应用需求分析	82
3.1.1	概述	82
3.1.2	400Gb/s 的挑战	83
3.1.3	400Gb/s 传输的需求	85
3.2	$N \times 400\text{Gb/s}$ WDM 技术国际化现状	87
3.2.1	ITU-T	87
3.2.2	IEEE	90
3.2.3	OIF	91
3.3	$N \times 400\text{Gb/s}$ WDM 新技术研究	92
3.3.1	$N \times 400\text{Gb/s}$ WDM 的研究现状	92
3.3.2	$N \times 400\text{Gb/s}$ WDM 核心技术	93

3.3.3	N×400Gb/s WDM 技术方案.....	105
3.4	灵活栅格 (Flex-Grid) WDM 技术应用分析	114
3.4.1	灵活栅格 WDM 技术引入背景分析.....	114
3.4.2	引入灵活栅格对 WDM 系统的影响.....	116
3.4.3	灵活栅格在 400Gb/s WDM 系统中的应用分析	117
3.4.4	灵活栅格 WDM 技术应用研究小结.....	120
	本章小结	121
	缩略语	122
	参考文献	124

第 4 章 新型光纤技术与应用 128

4.1	单模光纤技术的发展与应用	129
4.1.1	低损耗/超低损耗 G.652 光纤.....	133
4.1.2	大有效面积光纤.....	142
4.1.3	低损耗和大面积光纤对传输系统性能的影响	146
4.2	新型光纤技术	154
4.2.1	少模光纤	155
4.2.2	多芯光纤	156
	本章小结	158
	缩略语	159
	参考文献	160

第 5 章 城域 WDM 技术发展与应..... 163

5.1	城域 WDM 技术发展概述.....	164
5.1.1	城域 WDM 传输技术的应用需求.....	164
5.1.2	城域 WDM 传输系统的发展历程.....	165
5.1.3	城域 WDM 系统的组网模式	166
5.1.4	城域 WDM 系统的保护恢复功能.....	169

5.1.5 小结	171
5.2 城域 100Gb/s WDM 传输关键技术与应用	172
5.2.1 城域 100Gb/s WDM 传输技术路线	172
5.2.2 城域 100Gb/s 线路可插拔光模块技术	174
5.2.3 城域 100Gb/s/200Gb/s 灵活光传输技术	177
5.2.4 城域 100Gb/s WDM 传输技术的应用	178
5.3 接入 WDM 传输关键技术与应用	179
5.3.1 接入段 WDM 需求分析	179
5.3.2 传统 WDM 技术	183
5.3.3 波分复用无源光网络 (WDM-PON)	186
本章小结	191
缩略语	192
参考文献	193

第 6 章 面向分组业务的新一代 OTN..... 195

6.1 OTN 发展概述及分组业务的挑战	196
6.1.1 OTN 技术发展概述	196
6.1.2 面向分组业务的新一代 OTN 的产生	203
6.2 分组增强型 OTN 的关键技术	206
6.2.1 客户业务的标准封装[3]	206
6.2.2 以太网业务的故障处理	215
6.2.3 分组交换技术	220
6.3 分组增强型 OTN 设备的发展与应用	225
6.3.1 分组增强型 OTN 设备研发进展情况	225
6.3.2 分组增强型 OTN 应用场景分析	227
本章小结	239
缩略语	240
参考文献	242

第 7 章 光交换技术及系统	243
7.1 光交换技术概况	244
7.2 ROADM 技术原理及设备形态	245
7.2.1 ROADM 技术概况	245
7.2.2 基于 WSS 的 ROADM 设备的基本结构	249
7.2.3 ROADM 设备的上下路端口灵活性 (CDCG ROADM)	250
7.2.4 ROADM 设备发展情况	256
7.3 城域传送网 ROADM 设备应用策略	259
7.3.1 城域传送网的拓扑结构及 ROADM 位置	260
7.3.2 城域传送网 ROADM 设备形态建议	261
7.3.3 ROADM 光层与 OTN 电层协同模式探讨	265
7.3.4 ROADM 网络的波长规划	267
7.3.5 小结	268
7.4 骨干传送网 ROADM 设备应用策略	269
7.4.1 骨干传送网 ROADM 应用特点	269
7.4.2 骨干传送网 ROADM 设备应用模式	270
7.4.3 骨干传送网 ROADM 的再生方式	271
7.4.4 骨干传送网 ROADM 的组网结构	272
本章小结	273
缩略语	274
参考文献	274
第 8 章 光网络智能管理	276
8.1 光网络网管现状	277
8.1.1 TMN 架构	277
8.1.2 厂家网管与综合网管	279

8.1.3	网管功能.....	281
8.1.4	网管接口.....	287
8.1.5	压力与难题.....	288
8.2	智能管理的压力	290
8.2.1	“哑”的光网络设备	290
8.2.2	维护集约化的压力	292
8.2.3	面向客户的主动监控	294
8.2.4	核心难题：数据准确性与关联操作	295
8.3	智能管理的助力	296
8.3.1	IT 与互联网技术	297
8.3.2	新型接口规范	303
8.4	未来光网络智能管理方案	307
8.4.1	统一网管方案.....	307
8.4.2	分层网管方案.....	309
8.4.3	智能网关网元方案	312
8.4.4	方案分析与对比	315
	本章小结	318
	缩略语.....	318
	参考文献.....	320

第 9 章 软件定义光网络（SDON） 322

9.1	SDON 的概念和渊源	323
9.2	SDON 的标准化.....	325
9.2.1	ONF	325
9.2.2	ITU-T	326
9.2.3	OIF	327
9.2.4	IETF	327
9.3	SDON 体系架构.....	328

- 9.3.1 SDN 体系架构 328
 - 9.3.2 SDON 体系架构的特点 341
 - 9.3.3 SDN 与网管系统的关系 344
- 9.4 SDON 的应用场景..... 348
 - 9.4.1 多厂商、多域组网环境下的统一控制 348
 - 9.4.2 多层网络的统一控制和管理 350
 - 9.4.3 传送网能力开放和提供新型传送业务 351
 - 9.4.4 IP+光协同组网..... 352
 - 9.4.5 运维自动化 353
- 本章小结 358
- 缩略语 359
- 参考文献 361

第 1 章 概述

- ▮ 1.1 互联网对通信网络的影响
- ▮ 1.2 光网络技术发展趋势
- ▮ 1.3 本书组织架构

本章目标：信息社会已经进入互联网时代，互联网的蓬勃发展对光网络提出新的要求。超高速传送网、新型光纤技术和软件定义光网络成为光网络领域最热门的议题。本章将带领读者熟悉互联网的发展，以及光网络的现状和发展趋势，并按顺序介绍后续的内容。在阅读本章后，读者应重点掌握以下几点。

- 互联网已经成为信息时代的基础设施
- 互联网的发展离不开大带宽的支撑
- 光网络发展趋势
- 本书组织架构

1.1 互联网对通信网络的影响

过去 10 年，互联网的颠覆式发展让整个信息界变革一新。人类社会的方方面面都在加速向互联网移动，互联网已经开始成为部分人生活中的必需产品、生活的刚性需求。伴随着互联网的普及，电信业也正在被颠覆。在传统工业时代，客户在固定的时空内，选择极为受限，企业是消费行为的主导；进入互联网时代，互联网开拓了客户的产品选择边界，极大地增强了用户的产品选择权利，客户成为消费行为的主导者。随着人与网络、人与人之间双向沟通的打开，人与大众的多向交互、自媒体的产生、多元的原生内容等让消费者成为重要传播源，整个网络社会正在“去中心化”，网络也随之要求去适应、去变化。与此同时，无论是在发达国家还是发展中国家，由运营商主导的封闭型的传统电信业务“短信”和“语音”都已经开始萎缩，客户更愿意选择丰富多彩的互联网应用。随着智能手机和 3G/4G 网络的普及，大量涌现出来的 OTT 企业，提供了大量的具有更好的用户体验的互联网创新型应用。而用户选择的改变，也进而改变了网络所承载的业务结构——封闭型的语音业务占据统治地位的时代已经结束，数据业务开始在整个业务中占据统治地位，随之而来的对带宽的需求给光网络也带来了巨大的挑战。