

现代光通信技术丛书

城域光网络

徐荣 龚倩 张光海 编著

人民邮电出版社
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS

现代光通信技术丛书

城域光网络

徐 荣 龚 倩 张光海 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城域光网络 / 徐荣, 龚倩, 张光海编著. —北京: 人民邮电出版社, 2003.1

(现代光通信技术丛书)

ISBN 7-115-10819-6

I. 城… II. ①徐… ②龚… ③张… III. 光纤通信—通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 088499 号

现代光通信技术丛书

城域光网络

◆ 编 著 徐 荣 龚 倩 张光海

责任编辑 陈万寿

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67129258

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京鸿佳印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 33.75

字数: 822 千字

2003 年 1 月第 1 版

印数: 1-5 000 册

2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10819-6/TN • 1952

定价: 56.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

内 容 提 要

随着业务需求不断增长和光纤通信技术逐渐向用户侧推进,城域网的地位日益重要。本书定位于面向城域网应用的光网络技术,是一本系统阐述城域光网络技术最新研究成果和工程应用的图书。全书共分8章,第1章首先概略介绍了光网络的基础知识。第2章阐述了城域光网络的由来、定义、技术特点和设备特征。在随后的几章里分门别类地论述了城域光网络的不同解决方案和各厂家提供的相应产品,主要包括:城域波分复用 OADM、10GE 光以太网、弹性分组环(RPR)和以 SDH 为基础的多业务平台(MSTP)等技术。第7章介绍了作为城域网中不可分割的一部分的几种最新的城域光接入技术。本书最后一章简要介绍了一种新兴的基于自由空间光通信技术的城域网解决方案。

本书在内容上力求将基本原理和基本概念与网络的实际应用相结合,首次系统论述了城域光网络的技术原理、解决方案和应用现状,并总结了作者多年来对 WDM 光网络、宽带城域光网络、IP over WDM 等光通信系统及技术的研究成果和经验。

本书选材新颖、内容详尽、系统性强,在叙述时力求深入浅出,并配有丰富的图表,既可作为高等院校相关专业的教材和参考书,也适合广大科技工作者、工程技术人员使用。

专 家 的 话

近来，城域网已经成为社会和业界关注的热点和竞争点，也是通信设备提供商新的利润增长点，然而，究竟城域网的内涵是什么？该怎样发展？众说纷纭，每个不同社会背景和技术背景的人都有不同的观点和诠释。

城域网处于骨干网络的边缘会聚节点，主要功能是进行本地业务的接入、汇聚、传输和交换，同时面向骨干网汇聚和吸收业务量。城域网与广域网或长途网的主要区别首先是容量，广域网或长途网注重传输容量，而城域网注重交换容量；其次是覆盖距离的缩小，典型广域网或长途网的传输距离可达数千公里；再有是支持的客户层信号不同，广域网或长途网目前只支持 SDH，将来预计也只有 SDH 和以太网，而城域网需要支持各种客户层信号，而且要能很快地、灵活地提供客户层信号所需的带宽；最后是容许的成本不同，广域网或长途网的高容量可由成千上万的大量用户共享，因而可以容许较高的成本，而对城域网来说成本是关键，这与长途网恰好相反。

近年来，城域网由于引入了多种先进技术，速率不断提高，业务趋于多样化。城域网所提供的带宽已从 155Mbit/s、622Mbit/s 向 2.5Gbit/s 以及 10Gbit/s 发展。一些运营商不仅提供大带宽，而且还向用户提供服务质量承诺。城域网正在朝着一个能够承载话音、数据和视频等所有比特流的多业务网演变，要变成一个需要包容所有协议、速率和业务的中间环节，其地位变得越来越重要。

目前，城域网的解决方案十分活跃，有基于 SONET/SDH 的、基于 ATM 的，也有基于以太网或 WDM 的，以及 MPLS 和 RPR（弹性分组环技术）等。可以归结为四大类：第一类是以 SDH 为基础的多业务平台；第二类是基于层 2 交换和层 3 选路的方案，主要指以太网解决方案；第三类是城域网用 WDM 方案，即以 OADM 为基础的多业务平台；第四类是以 ATM 为基础的多业务平台方案。它们有的着重于传送，有的着重于业务，互有争议，但对将来“走向光”这一点是没有争议的。

本书作者之一徐荣是我的博士研究生，他在攻读博士学位期间，对高速大容量光纤通信系统、WDM 光网络、光分组交换网络、光接入网、城域光网络以及智能自动交换光网络等技术进行了系统而深入的研究，理论功底深厚，在国际国内科技期刊上发表论文 60 余篇，取得了不小的成绩。毕业后他一直在光通信行业从事光网络技术和系统的研究与开发，参与了多个国家重大攻关项目和产品应用开发项目，尤其是不仅跟踪研究了城域光网络的各种技术方案，而且直接参与了城域光网络产品的开发和应用推广，因此积累了坚实的工程设计与应用经验，在此基础上编写了这本《城域光网络》一书。他以极大的热忱、倾注了大量精力、牺牲了太多的闲暇时间，系统总结了自己在工作中积累的经验，终于完成了该书的写作。该书系统论述了城域光网络的基本原理、结构特点、不同的组网方案，并从基本机理和发展演进的过程上对各种城域光网络技术进行了非常翔实的阐述。目前市场上城域光网络解决方案众说纷纭，各种技术并存，给广大读者和工程技术人员造成了很大的困惑。本书就以各种

城域光网络解决方案为主线，系统阐述和总结了目前国际上关于城域光网络的最新科研成果和应用研究资料，并结合了作者多年来对 WDM 光网络、城域光网络、光传送网 OTN 等组网技术的研究成果和经验。完成如此既有广度又有深度的著作，如果没有坚实的基础和顽强的毅力是难以想象的。他将这本书献给奋战在光通信界的朋友们和愿意投身光通信事业的读者，目的是使更多的读者和我们一起掌握光纤通信的最新技术，致力于发展我国的民族光通信产业，使我国的民族光通信产业在国际上占有一席之地。

徐荣和龚倩还编写了《高速宽带光互联网技术》一书，翻译了由 Thomas E. Stern 和 Krishna Bala 编著的 *Multiwavelength Optical Network* 一书（中文书名为《多波长光网络》），这两本书已分别于 2002 年 2 月和 2001 年 4 月由人民邮电出版社出版，相关工作受到业内专家学者的一致好评。

作者既具有多年从事光网络研究的工作经历，又有参与多项国家重大高技术研究项目的实践经验，因而对该项技术把握得比较准确、论述得比较流畅。我认为本书的出版能起到及时雨的作用。本书不仅技术性很强，而且具有很高的易读性，能够很好地对目前如火如荼的城域网建设提供基础理论和应用实践方面的指导，是一本不可多得的好书。

中国科学院资深院士
北京邮电大学名誉校长，教授



2002 年 5 月于北京

前 言

骨干网与城域网的传统功能是提供话音业务,随着电信运营政策的放宽及数据业务的增长,运营商与设备供应商面临着同样的挑战和机遇,这就迫使新一代光网络系统的诞生,新一代光传输设备是面向高效传送 IP 数据业务而设计的多波长光网络。

随着骨干光网络的发展和技术的不断成熟,光通信逐渐向本地、城域范围扩展。光网络技术的迅速发展为 Internet 日益膨胀的信息流量提供了强大的网络支持。更为重要的是,光放大器和波分复用等光通信新技术的不断进步,不仅强化了光联网的重要地位,而且将光逐渐扩大到网络边缘并显示出强大的生命力。在城域网(MAN)和局域网(LAN)中,虽然带宽和网络容量持续地增长,但是仍然面临着严重挑战,那就是要求现在的城域网络必须要同时兼容静态的语音电路交换和日益增长的动态业务,这些动态业务通常是指分组、IP 或数据业务。为了支持这种综合业务,对城域网络的设计提出了新的要求。

总的来看,城域网是高度竞争和开放的网络环境,受用户和应用驱动,基本特征是业务类型多样化,业务流向与流量的不确定性,它不仅是传统广域网与局域网的桥接区或传统长途网与接入网的桥接区,也是底层传送网、接入网与上层各种业务网的融合区,还是传统电信网与数据网的交叉融合地带乃至未来的三网融合区。各种不同背景的技术在此碰撞交融,往往会在复杂的融合过程中产生新的衍生体,多样化是城域网有别于长途网的重要特点。

本书共分 8 章。在第 1 章我们从总体上对光网络的基本概念、波分复用技术、组成原理、拓扑结构和网络生存性进行了简要介绍。在第 2 章介绍了城域光网络的由来、面临的技术挑战、技术特点、组网解决方案的选择以及城域联网设备的功能特点。在随后的第 3 章到第 6 章里分门别类地着重论述了城域光网络的不同解决方案的技术原理、关键技术、应用模式和各厂家相应的产品特点。第 3 章为城域波分复用技术,主要介绍了波分复用技术在城域光网络中的应用、OADM 设备及应用方式和稀疏波分复用技术等。第 4 章为 10GE 光以太网技术,首先介绍了以太网的发展历史,然后论述了 10GE 以太网的技术原理和应用类型。第 5 章是弹性分组环 RPR 技术,介绍了 RPR 的发展背景和 DPT、RPT 等不同的 RPR 技术特点。第 6 章详细介绍了以 SDH 为基础的多业务平台 MSTP 技术、SDH 上传送以太网帧技术,以及各厂家的全套 MSTP 解决方案。作为城域网中不可分割的一部分,我们在第 7 章介绍了几种最新的城域光接入网技术,包括 APON、EPON 和 WDM-PON。在本书最后一章简要介绍了一种新兴的基于自由空间光通信技术的城域网解决方案和关键技术。

本书系统收集了目前国际国内关于城域光网络的最新科研成果和研究资料,并总结了作者多年来对 WDM 光网络、宽带城域网和 IP over WDM 光互联网等技术的研究成果和经验。本书作者都有在著名通信设备制造公司从事光传输产品的研发经历,参与过众多城域网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级的全国范围内城域网建设设备选型框架谈判和相关设备的测试工作,因此不但对城域光网络理论与技术有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。

本书作者长期从事光网络的研究和开发，曾参与和主研了众多的国家级、省市级重大研究项目。作者还翻译了由 Thomas E. Stern 和 Krishna Bala 编著的 *Multiwavelength Optical Network* 一书，翻译书名为《多波长光网络》，已于 2001 年 4 月由人民邮电出版社出版，相关工作受到业内专家学者的一致好评；编著了《高速宽带光互联网技术》一书，该书已于 2002 年 2 月由人民邮电出版社出版；编著了《光网络的组网与优化设计》一书，该书已于 2002 年 6 月由北京邮电大学出版社出版。

参与国家级项目和业界重要社会活动，为作者把握最新科技动态，掌握前沿技术奠定了坚实的基础。本书作者在国际国内科技期刊和会议上发表论文 60 余篇，其中 IEEE Journal of Lightwave Technology 期刊文章 1 篇，国际会议论文 4 篇，国内学报 3 篇，积累了丰富的研究成果，取得了较好的成绩。

在本书的编写过程中，得到了中国科学院资深院士、北京邮电大学终身名誉校长、IEEE 终身会士（IEEE Life Fellow）叶培大教授，中国移动通信集团公司总工李默芳高工，北京邮电大学校长林金桐教授的悉心指导。信息产业部电信传输研究所、中京邮电设计院的一些专家给本书提供了大量的文献资料。

参加本书材料整理工作的还有：张民、张帆、方来付、罗晖、魏冰、黄宇宏、赵继军、唐建军、徐云斌、李晗、张杰、王建全、潘勇、孔庆东、李芳、李允博、王玲、黑宝琴、赵文玉、杜江、宁安、寇伟国、栗斌风、苏伟、陈磊等。在出版过程中，人民邮电出版社的编辑同志也付出了大量心血，给予了极大帮助，在此一并表示由衷的感谢。

城域光网络是一项全新的技术，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。

作者

目 录

第 1 章 光网络基础知识	1
1.1 概述	1
1.2 波分复用系统	3
1.2.1 波分复用技术原理	3
1.2.2 波分复用系统组成和分类	6
1.2.3 波分复用系统工作波长的选择	7
1.2.4 波长转换单元 (OTU)	9
1.2.5 波分复用器	11
1.2.6 光放大器	13
1.3 WDM 光网络	16
1.3.1 光网络的形成	16
1.3.2 光传送网	19
1.3.3 光网络节点的基本功能	22
1.3.4 光网络节点的结构分类	27
1.4 光网络的组成结构	32
1.4.1 广播与选择网	32
1.4.2 波长选路网	34
1.4.3 路由与波长分配 (RWA) 技术	36
1.5 光网络的拓扑结构	40
1.5.1 物理拓扑	40
1.5.2 逻辑拓扑	42
1.6 环形光网络的结构	43
1.6.1 物理结构	43
1.6.2 逻辑结构	44
1.7 光网络的生存性	45
1.7.1 网络生存性的概念与意义	46
1.7.2 用户对业务恢复时间的要求	47
1.7.3 网络生存性策略——保护和恢复	48
1.7.4 保护恢复技术的分类	50
1.7.5 点到点的光层保护倒换	57
1.7.6 环形光网络的生存性	59
1.7.7 网状光网络的生存性	66
1.7.8 光网络生存性策略的对比分析	69

第2章 城域光网络概论	72
2.1 城域网的由来	72
2.2 城域网面临的挑战	75
2.3 城域网的业务	77
2.4 城域光网络	78
2.4.1 城域光网络的定义	79
2.4.2 城域光网络的技术特点	81
2.4.3 光网络的演进与发展	87
2.5 城域网的技术选择	92
2.5.1 基于 SDH 的多业务平台	93
2.5.2 基于以太网的城域网方案	94
2.5.3 城域波分复用光网络	95
2.5.4 基于 ATM 的多业务平台	96
2.5.5 各种方案的对比分析	97
2.6 城域网设备及市场应用	99
2.6.1 对城域网设备的基本要求	99
2.6.2 城域光网络设备	99
2.6.3 边缘网络产品——多业务传送平台	100
2.6.4 光以太网设备	101
2.6.5 小结	104
第3章 城域波分复用技术	105
3.1 波分复用技术的新发展	105
3.1.1 用户对业务提供速度的要求	105
3.1.2 第三代 DWDM 结构特点	106
3.1.3 波分复用向城域网渗透	111
3.1.4 波分复用接入网中的应用	114
3.2 城域波分复用技术和网络	116
3.2.1 Metro DWDM 的概念及特点	117
3.2.2 城域 DWDM 网络的系统结构	118
3.2.3 OADM 环网的光通道配置结构	128
3.3 城域波分复用设备	130
3.3.1 OADM	131
3.3.2 OXC	141
3.3.3 应用方式分析	145
3.4 构建城域光网络的新技术	148
3.4.1 光通信器件的新进展	148
3.4.2 多级复用与子速率复用技术	149
3.4.3 具有光组播功能的光交换机	152
3.4.4 新型放大器	154

3.4.5	新型光纤技术	159
3.4.6	CWDM 技术及应用	161
第 4 章	基于 10GE 技术的城域光以太网	166
4.1	以太网技术综述	166
4.1.1	以太网的起源与发展	166
4.1.2	以太网的基本概念与知识	167
4.1.3	常用的局域网互连设备	173
4.1.4	快速以太网	175
4.1.5	吉比特以太网	179
4.2	基于 10GE 技术的光以太网	186
4.2.1	光以太网的发展背景	186
4.2.2	10Gbit/s 以太网技术	189
4.2.3	10GE 光以太网的组网	194
4.2.4	光以太网的优势	196
4.3	光以太网关键技术	197
4.3.1	各模块的功能	198
4.3.2	MAN 中的 DWDM 技术	202
4.4	光以太网的应用	206
4.4.1	10GE 在本地网中的应用	207
4.4.2	城域网和存储网络中 10GE 的应用	207
4.4.3	10GE 在广域网中的应用	209
第 5 章	基于 RPR 技术的城域光以太网	211
5.1	RPR 的发展背景	211
5.2	DPT 技术	213
5.2.1	双环结构	213
5.2.2	空间重用技术 SRP	214
5.2.3	空间重用公平算法 (SRP-fa)	215
5.2.4	智能保护倒换 (IPS)	225
5.2.5	DPT 业务节点的特点	234
5.2.6	DPT 业务节点的功能	237
5.2.7	SRP over SONET/SDH	239
5.3	RPT 技术	239
5.3.1	RPT 的 MAC 帧结构	241
5.3.2	RPT 内嵌控制协议	243
5.3.3	空间复用技术	244
5.3.4	多等级和可靠的 QoS 服务	245
5.3.5	基于源路由和服务等级的 50ms 环保护倒换	246
5.3.6	带宽管理和拥塞控制机制	247
5.3.7	带宽动态分配	247

5.3.8 RPT 与其它技术的比较	248
5.4 RPR 的技术优势	250
5.4.1 适应高带宽	250
5.4.2 带宽公平	250
5.4.3 广播或多播业务	251
5.4.4 灵活又兼容	252
5.4.5 高效复用	253
5.4.6 强大的保护和恢复能力	253
5.4.7 即插即用	254
5.4.8 网络管理	254
5.5 RPR 的城域网应用	255
5.5.1 城域传送技术的选择	256
5.5.2 SONET/SDH 的局限性	257
5.5.3 以太网的局限性	259
5.5.4 弹性分组环的城域应用	260
5.6 RPR 的标准化进程	262
5.7 LUMINOUS 的 PACKET WAVE RPR 城域解决方案	264
第 6 章 城域多业务传送平台	268
6.1 多业务传送平台的驱动力	268
6.1.1 业务发展的需要	269
6.1.2 网络演进的需要	270
6.1.3 技术发展的需求	272
6.2 城域多业务传送平台的界定	274
6.2.1 城域多业务传送平台的定义	274
6.2.2 城域多业务传送平台设备的结构	276
6.2.3 城域多业务传送网络的特点	276
6.2.4 多业务传送平台的功能模型	279
6.2.5 基于 SDH 多业务传送设备的功能特征	280
6.2.6 MSTP 的网络、设备保护能力	290
6.2.7 MSTP 的网络管理	292
6.3 SDH 上传送以太网 MAC 帧的协议	293
6.3.1 SDH 上传送 MAC 帧的 PPP 技术	293
6.3.2 SDH 上传送 MAC 帧的 LAPS 技术	295
6.3.3 GFP 技术规范	301
6.4 MSTP 的性能指标要求	305
6.4.1 SDH 性能指标	305
6.4.2 ATM 性能指标	305
6.4.3 以太网性能指标	306
6.5 各厂家的多业务传送平台解决方案	307

6.5.1	华为公司的城域 MSTP 解决方案	307
6.5.2	中兴通讯公司的城域 MSTP 解决方案	310
6.5.3	烽火科技的城域 MSTP 解决方案	314
6.5.4	大唐电信的城域 MSTP 解决方案	316
6.5.5	阿尔卡特/上海贝尔的城域 MSTP 解决方案	321
6.5.6	朗讯公司的城域 MSTP 解决方案	323
6.5.7	西门子公司的 MSTP 解决方案	328
6.5.8	Cisco 的城域解决方案	329
6.5.9	IDN/CIENA/ONI 公司的 MSTP 解决方案	334
6.5.10	爱立信/马克尼公司的城域 MSTP 解决方案	337
6.5.11	Nortel 的城域多业务解决方案	339
6.5.12	武汉 NEC 公司的城域 MSTP 解决方案	342
6.5.13	富士通公司的城域 MSTP 解决方案	345
6.5.14	杭州 ECI 公司的城域 MSTP 解决方案	347
6.5.15	光桥/Sycamore/Movaz 公司的城域 MSTP 解决方案	349
6.5.16	泰乐 (TELLABS) 公司的城域 MSTP 解决方案	352
6.5.17	REDBACK 的 SMARTEDGE 800	353
第 7 章	城域光接入网技术	354
7.1	接入网基础	354
7.1.1	接入网定义	354
7.1.2	接入网的界定	356
7.1.3	接入网的功能结构	357
7.1.4	接入网的通用协议分层模型	358
7.2	城域宽带接入的驱动力	359
7.3	宽带接入网的技术选择	361
7.4	光接入网技术基础	365
7.4.1	光接入网的定义	365
7.4.2	光接入网的参考配置	366
7.4.3	无源光网络的传输原理	369
7.4.4	光接入网的拓扑结构	372
7.4.5	光接入网的应用类型	373
7.4.6	光接入网的发展历程	375
7.5	ATM 无源光网络 (ATM-PON)	378
7.5.1	APON 系统的结构	379
7.5.2	APON 的帧结构	382
7.5.3	APON 系统中的突发技术	385
7.5.4	APON 系统的媒质接入控制 (MAC)	389
7.6	WDM 无源光网络 (WDM-PON)	394
7.6.1	WDM 向接入网的渗透	394

7.6.2	普通 PON 与 WDM-PON 的比较	395
7.6.3	用 WDM 升级 PON 系统	400
7.6.4	WDM-PON 的光源	404
7.6.5	APON+WDM 的 CPON	406
7.7	Ethernet PON	408
7.7.1	Ethernet PON 的优点	409
7.7.2	Ethernet PON 的结构	411
7.7.3	Ethernet PON 的工作过程	415
7.7.4	Ethernet PON 的技术特点	419
第 8 章	基于自由空间光通信技术的城域光网络	422
8.1	概述	422
8.2	高空自由空间光通信	427
8.2.1	简介	427
8.2.2	空间光通信的特点及关键技术	429
8.2.3	国际上空间光通信发展动态	431
8.2.4	我国空间光通信的发展现状	433
8.2.5	小结	433
8.3	大气光通信的技术可行性	435
8.4	FSO 技术原理	440
8.4.1	FSO 的基本原理	440
8.4.2	FSO 的不同的系统配置	443
8.4.3	FSO 的主要问题	443
8.4.4	FSO 的关键技术	445
8.4.5	FSO 的网络拓扑	448
8.4.6	FSO 的主要优势	449
8.5	FSO 在城域、接入网中的应用	450
8.5.1	FSO 的应用领域	450
8.5.2	FSO 在局域网连接中的应用	452
8.5.3	FSO 在城域、边缘网建设中的应用	453
8.5.4	FSO 在最后一公里接入中的应用	454
8.5.5	FSO 在移动通信中的应用	455
8.6	FSO 市场展望	456
附录 A	缩略语	459
附录 B	有关光网络的重要资料	469
B.1	搜索引擎	469
B.2	国内媒体刊物网址	469
B.3	国内主管部门及部分运营商网址	470
B.4	讲座幻灯片和短文	470
B.5	关于光网络的书籍	471

B.6	杂志及其链接	478
B.7	协会、社团	478
B.8	标准化组织	479
B.9	IETF 工作组	479
B.10	其他在线资源	480
B.11	网页文章	481
B.12	技术杂志/期刊文章	485
B.13	光网络设备提供商	491
B.14	光器件生产制造商	492
B.15	IETF 有关光网络的 RFC	493
B.16	IETF 有关光网络的 Draft	493
B.17	ITU-T 建议	497
B.17.1	光传送网(OTN)	497
B.17.2	自动交换光网络(ASON)/自动交换传送网(ASTN)	498
B.17.3	光接入网	498
B.17.4	同步数字体制(SDH)	499
B.17.5	光器件和光纤光缆	500
B.17.6	非常短距离(VSR)接口	501
B.17.7	保护倒换	501
B.17.8	传输设备	501
B.18	ANSI 的 SONET 标准	501
B.19	Telecordia Generic Requirements for SONET	502
附录 C	与光通信有关的标准体制	504
C.1	光通信网络方面的标准	504
C.1.1	网络基本概念和结构方面的标准	504
C.1.2	网络性能方面的标准	505
C.1.3	网络节点接口标准	505
C.1.4	网络管理方面的标准	506
C.2	光通信系统方面的标准	507
C.3	光通信设备方面的标准	508
C.4	光通信传输媒介的标准	509
C.5	光通信用器件的标准	509
C.6	有关光通信的国内标准	510
C.6.1	国家标准	510
C.6.2	通信行业标准	513
参考文献		518

第 1 章 光网络基础知识

1.1 概述

信息社会给人类带来巨大的挑战，人们希望能够在任何时候、任何地点、以任何一种方式方便地获取需要的信息。信息爆炸刺激了全球通信业务的迅猛增长，而这种迅猛增长的最直接后果，是出现了所谓的对代表通信容量的带宽的“无限渴求”现象。目前，可商用化的电子设备速率最高可达几十 Gbit/s，而光通道带宽可达几十 Tbit/s。要弥补这样大的带宽差距，就得建立适宜的机制和协议，进而把大量电子终端（如工作站、网关等）的数据复用到光通道中去。因此，我们面临的任務就是充分挖掘光通信技术的潜力，不遗余力地消除带宽不匹配现象，以满足 21 世纪信息网络互联的需求。

根据物理技术的发展进程，我们可以将网络的发展历史划分为三代，如图 1-1 所示。我们可以将使用光纤之前的网络定义为第一代网络，那时的网络主要是使用铜缆和射频系统来承载和传递信息。第二代网络使用了光纤光缆传输介质，主要是利用光纤的巨大带宽、低误码率、高可靠性、价格低廉、抗干扰能力强等特性。第二代网络虽然由于使用光纤传输介质在很大程度上提高了性能，尤其是宽带宽特性，但其通信性能却严重受制于交换节点和终端节点的电子处理瓶颈。为了充分利用光纤潜在的巨大带宽，满足不断增长的带宽需求，第三代网络引入了光交换机或光路由器等直接在光层配置光通道的节点设备，以消除电子瓶颈问题。可喜的是新型光纤、全光波带放大器、光耦合器、可调谐激光器/探测器/滤波器和全光交叉连接器等技术的进步，使得第三代网络成为可能。

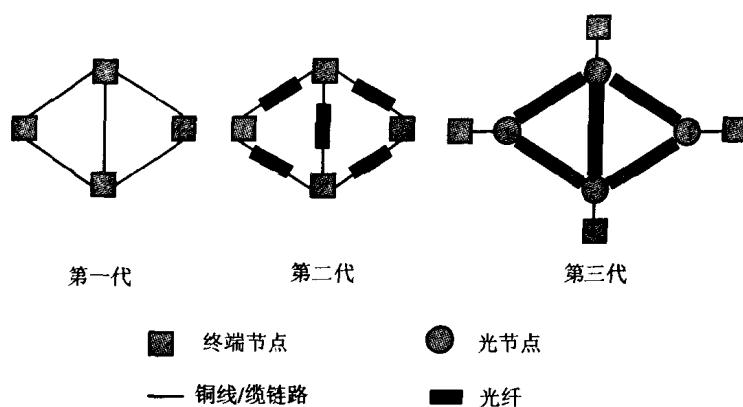


图 1-1 网络技术的演进——三代网络的技术差别

目前的光通信网络的复用技术有波分复用(WDM)、时分复用(TDM)和码分复用(CDM)三种。其中 TDM 和 CDM 对电子器件的速率要求很高，而在 WDM 中，电子设备的速率只

需是一个波长信道的速率即可（波长信道速率在理论上可以是任选的）。因为 WDM 对电子速率没有特别的要求，所以它成为最吸引人的光域复用技术。

波分复用技术从光纤通信出现伊始就出现了。首先出现的是两波长的 WDM（1310/1550nm）系统，此类系统在 20 世纪 80 年代就在美国 AT&T 网中使用，速率为 $2 \times 1.7\text{Gbit/s}$ 。但是一直到 90 年代中期，WDM 系统发展速度并不快。

从 20 世纪 90 年代中期开始，波分复用技术首先在北美开始了飞速发展，并首先向密集波分复用 DWDM 系统方向发展。1995 年 Lucent 公司的 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 密集波分复用系统正式投入商用。1997 年，北美所有的电信业务运营商都已经使用了密集波分复用系统。越来越多的电信业务通过密集波分复用设备传输。到 1998 年，利用密集波分复用设备，北美长途传输主干线上单纤所承载的业务量已达到 100Gbit/s 左右。单信道容量从 2.5Gbit/s 上升到 10Gbit/s ，波长数从 4 或 8 波长增加到 32、40 直至上百个信道，发展非常迅速。在欧洲，从 1997 年开始，受业务量大幅度增加的推动，密集波分复用系统大规模地进入商用。欧洲各国各大电信运营商安装了大量点对点密集波分复用系统，这些系统以 $16 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 密集波分复用光纤通信系统为主，其中某些已具有光复用段保护倒换功能（OMSP）。

在波分复用特别是密集波分复用系统大规模进入商用，实现了产业化的同时，波分复用技术不断向着更多的波长、更高的单信道速率、更大的总容量方向发展。

在 1996 年的 OFC 会议上，日本 Fujitsu 报道了 $55 \times 20\text{Gbit/s}$ 传输 150km 的试验，光纤的容量达到 1Tbit/s 的历史记录。同时日本 NTT 也报道了 $(2 \times 25) \times 20\text{Gbit/s}$ 在非零色散位移光纤传输 55km 的试验。随后不久在 ECOC' 96 日本 NEC 公司报道了 $132 \times 20\text{Gbit/s}$ 传输 120km 的新记录，他们采用标准单模光纤和色散补偿光纤，更趋近于实用化。NTT 的 1997 年系统以 $70 \times 20\text{Gbit/s}$ (1.4Tbit/s) 成功地进行了 600km 的传输，而后 NTT 先利用光时分复用 OTDM 把每个波长信道速率提高到 $16 \times 10\text{Gbit/s} = 160\text{Gbit/s}$ ，再将 19 个波长信道的 160Gbit/s 用 WDM 复用在一起得到总速率为 3Tbit/s 的 OTDM/WDM 系统。Lucent 于 1997 年实现了 $64 \times 5\text{Gbit/s}$ (320Gbit/s) 的 7200km 传输，以及 $100 \times 10\text{Gbit/s}$ (1Tbit/s) 使用真波光纤（TrueWave Fiber）的 400km 的传输；并于 1999 年实现了单根光纤上 1022 路复用的最高记录。Siemens 公司也于 1999 年底完成了 3.2Tbit/s ($80 \times 40\text{Gbit/s}$) 传输 40km 的试验。Nortel 公司 1999 年 4 季度实现了 $160 \times 10\text{Gbit/s} = 1.6\text{Tbit/s}$ 的 OPTera 系统。

2000 年 3 月，在 OFC2000 会议上，美国朗讯（Lucent）公司发布 3.28Tbit/s WDM 试验系统，该系统速率为 $3.28\text{Tbit/s} = 82 \times 40\text{Gbit/s}$ （C 波段 40 波分复用，L 波段 42 波分复用），信道间隔 100GHz ，传输距离 300km （真波光纤），中间两级放大。2000 年 9 月，德国西门子 OPTISPHER 网络公司又公布 7.04Tbit/s WDM 系统，该系统传输速率为 $7.04\text{Tbit/s} = 176 \times 40\text{Gbit/s}$ ，传输距离 50km 。2001 年初阿尔卡特公司发布 10.24Tbit/s WDM 系统，该系统速率为 $10.24\text{Tbit/s} = 256 \times 40\text{Gbit/s}$ （C、L 两波段），传输距离 100km （特锐光纤），采用了分布拉曼放大和残余边带技术及极化复用，使频带利用率达 1.28bit/s/Hz 。2001 年 3 月，在 OFC2001 年会上，日本 NEC 公司又发布了当前世界上最高记录，该系统速率为 $10.92\text{Tbit/s} = 273 \times 40\text{Gbit/s}$ （采用 S、C、L 三个波段），传输距离 117km （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以及极化复用，频带利用率 0.8bit/s/Hz 。

阿尔卡特公司于 2001 年年末在海底光传输方面又创世界新记录，在一根光纤中以传输容量 3.65Tbit/s ($365 \times 10\text{Gbit/s}$) 实现传输距离长达 6850km 。在实验室内成功演示了使用宽