

“863”

通信高技术丛书



高速宽带 光互联网技术

徐荣 龚倩 编著

人民邮电出版社

“863”通信高技术丛书

高速宽带光互联网技术

徐 荣 龚 倩 编著

人 民 邮 电 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

高速宽带光互联网技术/徐荣, 龚倩编著. —北京: 人民邮电出版社, 2002.2
(“863”通信高技术丛书)

ISBN 7-115-09912-X

I.高... II.①徐... ②龚... III.光纤通信—宽带通信系统—计算机通信网 IV.TN915.142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 085057 号

内 容 提 要

本书全面介绍了光互联网络的需求源动力、光传送网技术、分层网络结构、节点结构设计、组网技术与网络的优化设计等内容, 并在此基础上通过对多协议标签交换 (MPLS) 技术的体系结构、流量工程和 MPLS 向光网络的扩展等智能光网络技术的详细阐述, 着重引出了目前在高速宽带通信领域内非常引人注目的热点技术——将 MPLS 流量工程控制技术和标签交换技术综合进光网络的新型光互联网技术。重点介绍了四种新型光互联网实现方案, 它们是路由器+WDM 光网络方案 (也就是 Packet over WDM 技术)、多协议波长标签交换 (MP-LSP) 方案、基于标签的光突发交换 (COBS) 实现方案 and 全光标签分组交换 (OLPS) 技术。

本书系统收集了目前着重引出了目前在高速宽带通信领域内非常引人注目的热点技术: 年来对 WDM 光网络、宽带 IP 网络和 IP over WDM 等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, 可供具集工程控制技术知识的工程、营销人员阅读, 也适合于系统学习光网络和光互联网技术的网络专业技术人员和大专院校师生参考。

“863”通信高技术丛书 高速宽带光互联网技术

◆ 编 著 徐 荣 龚 倩
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@pptph.com.cn
网址 <http://www.pptph.com.cn>
读者热线 010-67180876
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京朝阳展望印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 27.25
字数: 660 千字 2002 年 2 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2002 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-09912-X/TN·1812

定价: 45.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

“863” 通信高技术丛书

编 委 会

主 任：叶培大

委 员：(按姓氏笔画顺序排列)

卫 国	王志威	王 京	王柏义
韦乐平	尤肖虎	冯记春	朱近康
邬江兴	邬贺铨	孙 玉	纪越峰
杜肤生	李少谦	李世鹤	李红滨
李武强	李 星	李默芳	杨千里
杨 壮	张 凌	陈俊亮	周炯槃
郑南宁	赵梓森	赵慧玲	侯自强
姚 彦	郭云飞	唐 健	蒋林涛
曹淑敏	强小哲	谢麟振	简水生

序

在过去的 20 多年中, IP (Internet Protocol) 网络和基于 IP 网络的数据业务量的增长势如破竹、如火如荼,使得对基于 IP 的下一代高速宽带网络和技术的研究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, 并给整个信息通信网络的技术模式、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都带来了深远的影响。

随着密集波分复用设备、光层直接联网技术和可实现动态带宽分配的具有智能性的光交换机/光路由器的相继开发成功, IP over WDM 光互联网的观念应运而生。光互联网技术是利用 WDM 的大容量、易操作和灵活联网等特性在光网络层上传输 IP 数据包的一种组网技术。它的目的是想用新型的高速路由器/交换机作为网络核心建成一个能够体现先进性、开放性、创新性和可持续发展性的高速、宽带综合信息通信网络。

最近, 在组网技术方面的两项技术进展使得对光网络带宽的动态指配成为可能。首先是由于可重构型的光联网节点如光交叉连接器(OXC)和光分插复用器(OADM)的开发成功, 使得由网络提供商动态指配带宽成为现实, 在这些新型可重构的光网络节点设备的控制通路中使用了现有的数据网络控制协议(如多协议标签交换 MPLS、开放式最短路径优先 OSPF)来决定路由。另外由于在 IP 路由器、ATM 交换机、光交换机等设备中强化了流量工程 (Traffic Engineering) 和基于约束的路由 (Constraint-based Routing) 技术, 从而容许这些设备动态决定什么时候和什么位置需要增加或减少多少带宽。这两种技术的使用, 为传统的光网络引入了智能控制和管理信令, 从而使得光网络具有了智能性和自动性, 它为高效传送 IP 业务、发展按需分配带宽和买卖带宽的新型商业模式提供了条件。因而各种新技术、新的多层协议简化型 IP 直接到 WDM 的集成化光互联网实现方案层出不穷。

徐荣博士在攻读博士学位期间, 对光纤通信系统、WDM 光网络、光接入网、多协议标签交换协议等技术进行了系统而深入的研究。并在此基础上编写了这本《高速宽带光互联网技术》。他以极大的热忱、倾注了大量精力、牺牲了太多的闲暇时间, 终于完成了该书的写作。该书第一次系统总结了目前风云变幻、争论不休的各种光互联网实现方案, 从基本机理和理论基础对各种新技术进行了翔实的阐述。该书涵盖了光纤通信系统、器件、光通信网络、因特网、分组交换网络、多协议标签交换 (MPLS) 等涉及光通信和数据通信两大领域最新技术的发展动态, 收集了目前国际上关于光互联网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 IP 网络和 IP over WDM 等技术的研究成果和经验。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像它会面世的。

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，不仅技术性很强，而且具有很高的易读性，是一本不可多得的好书。

中国科学院资深院士
北京邮电大学终身名誉校长，教授

Handwritten signature in black ink, reading '王培刚' (Wang Tiegang).

前 言

随着信息化程度的不断加深，人类对通信的容量、速度、质量以及服务种类的要求越来越高。个人计算机和国际互连网络（Internet）的普及、数据业务与电子邮件通信以及各种宽带接入技术的飞速发展给今天的通信网络提出了革命性的要求。

只要我们对现今的通信网稍加分析就不难看出，对于用户需要的每一项特定的通信业务，至少存在针对该业务而专门设计的一种网络结构，而一种网络结构往往又不能很好地适用于其它的业务类型，最终导致通信网络整体架构呈现出业务专门化、结构和功能重叠化等特点。原有基于语音业务而设计的骨干通信网络由于功能重叠、网络层次结构复杂、缺乏互操作性，极大地降低了网络的效能和可靠性，并增加了网络运营的成本和管理的难度，已不能适应当前数据业务的发展需求。因此为了释放光传送网巨大的带宽资源，以便更高效、更经济地传送 IP 数据业务，IP 网与光传送网的无缝融合势在必行。

基于 IP 的网络业务量的飞速增长，使得对基于 IP 的网络和技术的研究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都带来了深远的影响。随着数据业务的爆炸式发展，目前由业务层、SDH 层和物理层所构成的多层网络结构，将不再能够满足今后数据业务的增长需求，而且任何层间的适配和复用都会带来不必要的光/电转换操作而增加了业务的转发成本和操作复杂度。

伴随着 Internet 对商业和社会的影响，Internet 业务的指数级增长正在改变着 IP 业务层与下层光传输层的关系。随着容量的增长，驱使光交换层的交换能力也在不断增强，使之更易于管理、更加灵活和具有健壮性，同时业务指配和故障恢复也能够更快地自动完成。对于宽带网络上图像和语音业务的高质量、实时的要求，促使多协议标签交换（MPLS）技术成为能够使 IP 提供这些多媒体应用所要求的高质量服务的一种方法。WDM 传输设备的波长数飞速增长以及光交换机(OXC)的实用化，使得第三层的交换或 MPLS 直接运行在波长级上成为可能，因此基于 MPLS 控制平台的 IP over Optical Network 技术近来发展十分迅速，相关的标准化活动也正在加速制定。许多标准化组织和工业协会都在极力促进 IP/MPLS 和 WDM 的无缝融合，以求为 Internet 构建统一的网络结构。

在 IP 业务的高速增长产生的带宽需求和 WDM 传输技术提供超大容量带宽资源的双重刺激下，传统光网络朝适于传输 IP 业务的下一代光网络演进势在必行。因此对面向未来 IP 业务的下一代宽带高速光互联网络技术的研究已经成为各国研究计划的重点，因而各种新技术、新的多层协议简化型 IP 直接到 WDM 的集成化光互联网实现方案层出不穷。光互联网的最主要的研究方向是逐渐由开销较大、功能重叠的多层协议结构向更紧密的 IP 直接到 WDM 光网络的集成化方向发展。目前光互联网的众多解决方案可大致分为四大类：一种是 IP 路由器与 WDM 光网络直接相连方案；另一种是基于多协议波长标签交换技术的 MPLmS 方案；再有

就是基于标签的光突发交换 LOBS 方案和全光标签分组交换技术。

在未来的若干年内不同的光互联网网络解决方案将呈现蓬勃发展的态势，而 WDM 智能光联网技术将作为各项技术发展的基石，提供充分的带宽潜力。通过 MPLS、Diffserv（区分服务）等新协议增加了更加灵活的选路、业务量工程和显式路由功能的智能型自动路由交换光互联网络将是未来宽带通信网络的优选发展方向。

本书在第一章首先叙述了推动光互联网不断向前发展的需求源动力和技术源动力；第二章和第三章介绍波分复用（WDM）和光开关等技术的原理和最新进展情况，并在此基础上在第四章引出了通过可重构光网络节点建立端到端透明光连接的光网络技术；然后在第五章和第六章分别对光网络的组网技术、节点结构设计、路由和交换的优化设计等核心技术进行了全面详尽的阐述；在第七章和第八章通过对在光网络上承载 IP 数据业务的特点、要求以及对新型核心协议 MPLS 的基本原理、体系结构和它向光网络层的扩展等技术的详细介绍，引出了直接在具有智能联网功能的自动交换光网络上承载 IP 业务的下一代高速宽带光互联网络技术。在第九章、第十章、第十一章和第十二章着重介绍了目前国际上研究最热的将 MPLS 流量工程控制技术综合进光网络的几种新型光互联网络技术，作者按照这些技术方案所采用的驱动方式、交换方式等不同特点，将它们分为四种新型的光互联网实现方案，它们是路由器加 WDM 光网络方案（也就是 Packet over WDM 技术）、多协议波长标签交换（MPLmS）方案、基于标签的光突发交换（LOBS）实现方案和全光标签分组交换（OLPS）技术。

本书系统收集了目前国际上关于光互联网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 IP 网络和 IP over WDM 光互联网等技术的研究成果和经验。本书作者曾参与并主研了众多的国家级、省市级重大研究项目。这些项目主要有：

作者作为主要研发成员，参与了国家 863 计划重大专项——“中国高速信息示范网”工程中的重大课题——“光分插复用（OADM）设备”（项目编号：863-300-01-02-99）的研究和开发。

作者作为北京市自然科学基金资助项目“高速宽带 IP 网络体系结构及关键技术研究（项目编号：4002008）”的技术主管，主要研究了基于多协议标签交换技术和 WDM 多波长联网技术的面向数据业务的未来高速宽带组网技术。

作者还参与了国家 863-317 科研课题“广域网 IP 传输平台”（项目编号：863-317-01-05-99）的研究工作。

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）叶培大教授的悉心指导和各位师兄弟的大力支持，其中主要有申云峰、迟楠、赵勇、何建武、张民、徐云斌、韦烜、高巍、孙盟、王勇等，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，在此一并表示感谢。

高速宽带光互联网是一项全新的技术，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

第一章 为什么需要光互联网	1
1.1 Internet 高速增长对带宽的巨大需求	1
1.2 新型增值服务对带宽的无限需求	3
1.3 探索未来的高速宽带组网技术	6
1.4 光互联网应运而生	7
第二章 高速大容量光通信系统的演进	10
2.1 波分复用不断向高速大容量迈进	12
2.2 波分复用向城域网渗透	15
2.3 波分复用在接入网中的应用	18
2.4 构筑超大容量传输系统的新型光纤技术	22
2.4.1 概述	22
2.4.2 新型非零色散光纤	24
2.4.3 大有效面积光纤	26
2.4.4 消水峰的全波光纤	26
2.4.5 反色散补偿光缆技术	27
2.5 无纤光通信技术	28
2.6 全球 DWDM 产品的市场格局及各大公司的光网络理念	31
第三章 光开关新技术和光交换原理	43
3.1 层出不穷的光开关新技术	43
3.1.1 光开关技术分类与性能比较	43
3.1.2 几种新型光开关技术	45
3.1.3 光开关的应用	51
3.2 光交换原理及技术	52
3.2.1 空分光交换	52
3.2.2 时分光交换	54
3.2.3 波分光交换	55
3.2.4 复合光交换	56
3.2.5 自由空间光交换	58
3.2.6 无交换式光路由器	59
3.2.7 阵列波导光栅路由器	60

3.2.8 光子时隙路由	61
第四章 光网络基本描述和组成结构	62
4.1 传统电信网络向光网络的演进	62
4.2 光网络结构分类	69
4.3 光网络中的光连接和分层结构	72
4.4 光网络的拓扑结构	76
4.4.1 物理拓扑	76
4.4.2 逻辑拓扑	78
4.4.3 拓扑结构与网络设计的关系	78
4.5 环形光网络	82
4.5.1 单向两纤环结构	83
4.5.2 双向两纤环	85
4.5.3 四纤 WDM 环	87
4.5.4 多纤环	87
4.6 国内外光网络研究概况	88
4.6.1 北美的光网络试验床	88
4.6.2 欧洲的光网络试验项目	91
4.6.3 中国光网络的发展	93
第五章 光网络节点和光交换阵列的结构与设计	97
5.1 光网络节点的基本功能	97
5.2 光网络节点的结构分类	98
5.3 节点中光交换矩阵的结构设计和性能对比	102
5.3.1 光交换的核心矩阵结构设计	102
5.3.2 交换网络的阻塞性能分析与比较	104
5.3.3 广义交换机的结构性能	106
5.4 光交叉连接器 (OXC) 的节点结构	108
5.4.1 OXC 的功能和应用	108
5.4.2 OXC 节点结构的分析与设计	112
5.4.3 结构比较与讨论	117
5.5 光分插复用器 (OADM) 的节点结构	118
5.5.1 OADM 的功能和应用	119
5.5.2 OADM 的性能参数	120
5.5.3 OADM 的技术分类和结构组成	122
5.5.4 OADM 的发展趋势	131
5.6 光网络中的波长变换器技术	132
5.6.1 波长变换器的功能分类	132
5.6.2 波长变换方法与技术	137

5.6.3 波长变换在光网络中的作用	145
第六章 光网络的组网技术与优化设计	148
6.1 关键器件与技术	149
6.1.1 超高速光传输技术	149
6.1.2 可调谐滤波器技术	150
6.1.3 集成探测器和可调谐激光器	152
6.1.4 宽带光放大器技术	153
6.2 光层的生存性	155
6.2.1 概述	155
6.2.2 点到点的光层保护倒换	159
6.2.3 光网络自愈保护环	160
6.3 光层开销传送技术	165
6.3.1 光传送网的管理需求和基本特点	166
6.3.2 数字包封器(digital wrapper)	169
6.3.3 副载波复用(SCM)	172
6.3.4 光监视通路(OSC)	173
6.4 路由和波长分配技术	176
6.4.1 RWA的概念和意义	176
6.4.2 与RWA密切相关的几个问题	177
6.4.3 RWA算法的功能分类与比较	183
6.4.4 网络设计与RWA的实施	188
6.5 光网络中的传输损伤	192
6.5.1 信道串扰问题	192
6.5.2 功率均衡与功率管理技术	194
6.5.3 光网络中的环路问题	195
第七章 面向数据业务的光互联网技术	197
7.1 数据业务的特点及其对光网络的新要求	197
7.1.1 IP业务的特点	198
7.1.2 面向数据业务对光网络提出的新要求	201
7.2 IP over ATM	204
7.2.1 重叠模型	204
7.2.2 集成模型	209
7.2.3 IP over ATM技术的特点	213
7.3 IP over SDH	213
7.3.1 IP/PPP/HDLC/SDH	214
7.3.2 采用LAPS的IP over SDH	216
7.3.3 日本NTT的MAPOS协议	217

7.3.4	POS 中的高速路由器技术	217
7.3.5	几种 IP over SDH 组网方案	219
7.3.6	IP over SDH 技术的特点	225
7.4	IP over WDM 光互联网技术	227
7.4.1	多层协议重叠网络向简化的两层网络结构发展	227
7.4.2	IP over WDM 光互联网的提出	228
7.4.3	光互联网关键技术	231
7.4.4	IP via MPLS over WDM 的光互联网技术	237
7.5	国际国内典型的光互联网	242
7.5.1	有关 IP over DWDM 试验情况	242
7.5.2	国内外一些通信公司的光互联网络	243
7.6	光互联网及其相关技术的几个发展方向	249
7.6.1	光波长将是未来光网络的基本交换单元	249
7.6.2	光交换机将取代传统的电子交换机	250
7.6.3	路由器功能将不断增强	251
7.6.4	多交换粒度和多业务相融合的节点结构	253
第八章	多协议标签交换及其向光网络的扩展	257
8.1	为什么需要多协议标签交换技术	257
8.1.1	多层交换技术的演进	257
8.1.2	多协议标签交换 (MPLS) 技术的形成	261
8.2	MPLS 的体系结构	265
8.2.1	MPLS 的框架结构	265
8.2.2	MPLS 技术基础和基本组件	267
8.2.3	MPLS 的主要应用	271
8.3	MPLS 流量工程技术	273
8.3.1	传统的路由器核心网络	274
8.3.2	目前的 IP 重叠网络	274
8.3.3	应用 MPLS 技术的流量工程方案	276
8.3.4	LSP 灵活的路径计算和配置	279
8.3.5	基本流控功能的实现——业务流分类	282
8.3.6	MPLS 流量工程技术的优点	283
8.4	MPLS 虚拟专用网络	284
8.4.1	VPN 的基本要求和 IP VPN 的缺点	285
8.4.2	MPLS 虚拟专用网络的技术特点	285
8.4.3	MPLS VPN 的操作	288
8.5	QoS 在 MPLS 系统中的实现	290
8.5.1	集成服务在 MPLS 系统中的实现	290
8.5.2	区分服务在 MPLS 中的实现	291

8.6 MPLS 向光网络的扩展及智能型自动交换光网络	291
8.6.1 智能型自动交换光网络的出现	291
8.6.2 MPLS 与 WDM 技术的结合	293
8.6.3 MPLS over WDM 关键技术	297
8.6.4 MPLS over WDM 标准化进展	299
第九章 Packet over WDM 光互联网技术	305
9.1 Packet over WDM 技术概述	307
9.2 POW 结构体系	308
9.2.1 流分类技术和选路策略	311
9.2.2 网络节点结构设计	312
9.2.3 波长合并和业务汇聚	313
9.3 简单波长分配协议 (SWAP)	315
9.4 WDM 层的物理限制	319
9.5 POW 网络性能的仿真分析	322
第十章 多协议波长标签交换 (MPLmS) 光互联网技术	326
10.1 MPLmS 技术的形成	327
10.2 MPLmS 技术原理	331
10.2.1 光标签的定义	331
10.2.2 标签绑定和转发过程	332
10.2.3 节点功能和标签交换路径 LSP	333
10.2.4 MPLmS 网络的显式路由技术	337
10.2.5 信令协议对 MPLmS 的支持	339
10.3 MPLmS 组网技术	341
10.3.1 网络结构	341
10.3.2 MPLmS 网络中 OXC 控制平面与控制方式	342
10.3.3 网络节点结构和功能	344
10.3.4 MPLmS 网络的生存性	345
10.3.5 故障探测与定位	347
10.3.6 MPLmS 网络的控制结构	348
第十一章 基于标签光突发交换 (LOBS) 的光互联网技术	350
11.1 概述	351
11.2 三种交换技术对比	355
11.2.1 电路交换	355
11.2.2 包/分组交换	356
11.2.3 突发交换	357
11.2.4 对几种交换技术的比较	357

11.3	光突发交换网络结构	358
11.4	光突发交换协议	360
11.4.1	JET (Just Enough Time) 协议	361
11.4.2	DeR (Delayed Reservation) 协议	362
11.4.3	DiR (Differentiated Reservation) 协议与优先级机制	363
11.4.4	数据发送前的预时延	364
11.5	基于 LOBS 的 IP over WDM 技术	364
11.5.1	标签光突发交换 LOBS 网络	364
11.5.2	MPLS 与 OBS 的集成	365
11.5.3	OBS MAC 层	366
11.5.4	突发数据流装配机制	370
11.5.5	OBS 网络的 QoS 机制	371
11.6	OBS 网络的性能	372
第十二章	光分组交换与全光标签交换技术	375
12.1	概述	375
12.2	光分组交换技术分类	376
12.2.1	节点间的时延抖动	377
12.2.2	节点内的时延抖动	378
12.3	节点结构与同步技术	378
12.3.1	光分组交换节点的结构	378
12.3.2	网络及节点的同步	379
12.3.3	光存储器	381
12.3.4	偏射路由	384
12.3.5	波长变换	387
12.4	光分组格式	388
12.5	欧洲的光透明分组网 (OTP-N)	390
12.5.1	OTP-N 网络结构	390
12.5.2	OTP-N 网络的参考模型	391
12.5.3	透明光分组的格式	392
12.5.4	IP over OTP 技术	393
12.5.5	KEOPS 项目中所使用的交换节点	397
12.6	全光标签分组交换技术 (OLPS)	399
12.6.1	全光分组头复用技术	399
12.6.2	全光标签分组交换网络结构	401
12.6.3	全光标记交换网络的节点结构	402
附录 A	缩略语	405
附录 B	参考文献	412

第一章 为什么需要光互联网

20 世纪 70 年代，美国未来学家托夫勒在《第三次浪潮》中首次描绘了信息社会的美好前景，从此为人类揭开了信息时代的序幕。由于新技术革命的推动，经济全球化和社会信息化趋势日益明显。在全球信息化浪潮的冲击下，人类对通信的容量、通信业务的种类和通信质量的要求不断增长。在过去的 10 年间，通信网的巨大发展和广泛使用，已经在很大程度上改变了我们的工作和生活方式。人类社会正在进入一个前所未有的信息爆炸时代，其中最具影响的三大事件是：

- 伴随着个人电脑普及而来的 Internet 的飞速发展。
- 由数字移动通信业务向个人通信发展而引发的常规通信的革命。
- 新的具有增值能力的多媒体通信业务的出现。

Internet 网络用户数和业务量的爆炸式增长、宽带接入技术的快速发展和新型增值业务服务类型的不断涌现，都为电信网络运营商提供了一种全新的商业机会和技术挑战。

1.1 Internet 高速增长对带宽的巨大需求

随着不断向信息社会的推进，人们对网络的依赖性也在不断增加。尤其是在近几年 Internet 业务量持续以指数级增长和 IP 已经成为信息通信技术(ICT)的核心协议的情况下，更是如此。下一代网络面临的一个重要挑战是容量压力。

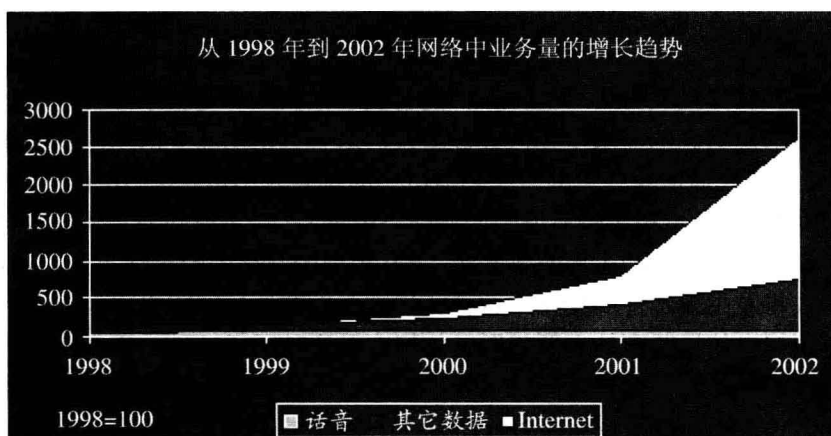


图 1-1 RHK 公司对未来通信业务类型和流量变化的预测

100 年来，电信网的主要业务一直是电话业务。传统的电话网设计都是以信道对称且流量恒定的话音业务为主要服务对象，这时成本和利润处于严格的管制之下、网络架构呈资本

密集型而且网络容量与话务容量高度一致（话路本位）。这种以话音业务为主的网络随着时间的推移，业务量和网络规模均呈稳定低速增长态势。近 10 年来，全世界电话用户的年增长率平均为 5%~10% 左右。然而，近年来，由于计算机的广泛应用和普及，数据业务正呈现高速增长态势，平均年增长率达 25%~40%，远高于电话业务。特别是 IP 业务的爆炸式增长，其规模和业务量已达到了约每 6~9 个月翻一番，比著名的 CPU 性能进展的摩尔定律（约 18 个月翻一番）还要快 2~3 倍。显然，按此趋势，用不了几年，网上的数据业务将会超过电话业务。从全世界范围看，估计在未来 10 年内，包括中国电信网在内的世界主要网络的数据业务量都将先后超过电话业务量，图 1-1 表明了近几年内语音和数据业务的发展趋势。最终，电信网的业务将主要由数据构成，而非电话业务。

从接入网的发展来看，由于一系列宽带接入技术的应用，例如电缆调制解调器（modem）、非对称数字用户线（ADSL）、以太网和 ATM 无源光网络（APON）接入等，使接入速率增加了数十至数百倍，导致核心骨干网上的业务流量大幅度增加。在图 1-2 中，给出了采用几种接入技术为 100 万户的用户服务，分别需要占用的峰值带宽数量，可以看出如果要给用户提供令他们满意的接入服务，骨干网络必须要有极大的带宽容量。再有，在网络业务组成中将占主导地位的 IP 业务量的分布模式将使未来的网络业务量分布大幅度向核心网转移，进一步加剧了骨干网容量需求的压力。而且随着 IP 电话、通过电缆调制解调器或 ADSL（非对称数字用户环路）将高速数据连接到家、光纤到路边和在 Internet 2 上开发的更高级应用、光互联网等技术的不断发展。我们有理由相信 Internet 业务将在可预见的未来继续保持指数级增长。

	用户数	速 率	峰值容量
模拟 Modem	100 万	56kbit/s	56Gbit/s
ADSL	100 万	6Mbit/s	6Tbit/s
UDSL	100 万	1.5Mbit/s	1.5Tbit/s
VDSL	100 万	26Mbit/s	26Tbit/s
以太网	100 万	100Mbit/s	100Tbit/s
APON	100 万	155Mbit/s	155Tbit/s

图 1-2 不同接入服务所需占用的带宽容量对比

个人计算机和国际互联网络（Internet）的普及、数据业务与电子邮件通信的飞速发展使得人类社会对通信及信息的需求呈几何级数增长，这一点由图 1-1 所给出的美国著名的投资咨询公司 RHK 对未来通信业务量的增长趋势所作的预测就不难看出。图 1-1 中纵坐标表示业务量与 1998 年的总业务量相比较所增长的倍数，从图 1-1 中清楚可见，数据业务明显成为未来的通信主导业务和运营商的主要收入来源，100 年来的网络中的电话主业将最终变成副业，网络的业务构成将发生根本性的变化，这种变化给今天的通信网络提出了革命性的要求和设想。因此现今困扰电信运营商的主要问题是应对这种因 Internet 宽带接入需求所导致的数据业务量的飞速发展以及对手之间的竞争。他们因此需要成倍地提升通信容量、降低运营成本、迅速提供各种全新增值业务服务。而且，IP 业务量的高度不确定性使不同路由的负荷会随时发生变化，造成网络资源利用的高度不平衡。所以要求网络，尤其是骨干网应该从网络拓扑到网络设备等诸多方面充分考虑数据业务的特性，更加有效快速地传送数据业务。应该说，网络的发展趋势是从电路网到分组网的过渡。IP 数据业务为主导，必然要求光网络以 IP 业务为主进行优化设计，从而产生了光互联网技术。

1.2 新型增值服务对带宽的无限需求

自从 1970 年康宁公司制成了第一根低损耗的光纤,对全光信息高速公路的想象就激发了研究者、业务提供商和公众的巨大兴趣。尽管在世界范围内已经铺设了巨大数量的光缆,但在过去的几十年中,我们并没有充分利用这些资源本身所具有的容量潜能。例如,尽管在大都市的地下有数以千计的光纤,然而在这些地区目前所承载的业务信息流量与这些光纤的可用容量相比要低很多个数量级,例如,在美国即使是在业务高峰期间所有电话业务量的总和也小于单根光纤所具有的信道容量。

总的光纤容量和所承载的信息量之间的巨大差异可以说明这样一个事实:电话业务对光网络的发展不具有需求上的源动力。另一方面,由于新技术革命的推动,各种新型通信应用大量涌现,它们都需要很高的带宽,而这时也只有光纤才可以满足这种容量要求。如图 1-3 所示,不断涌现的新的通信应用包括互联网浏览、视频点播、视频电话和视频远程会议等都依赖于光网络所特有的巨大带宽的支持。此外,诸如可视图文、远程教育、远程医疗(高分辨率医学图像处理)、远程超级计算机可视化、电视购物、电视会议、高清晰度电视(HDTV)、交互式有线电视等数字或模拟图像通信新业务的出现必然需要大量的可视信息和要求非常快的反应时间,因此提出了进一步实现网络高速化和宽带化的迫切要求。

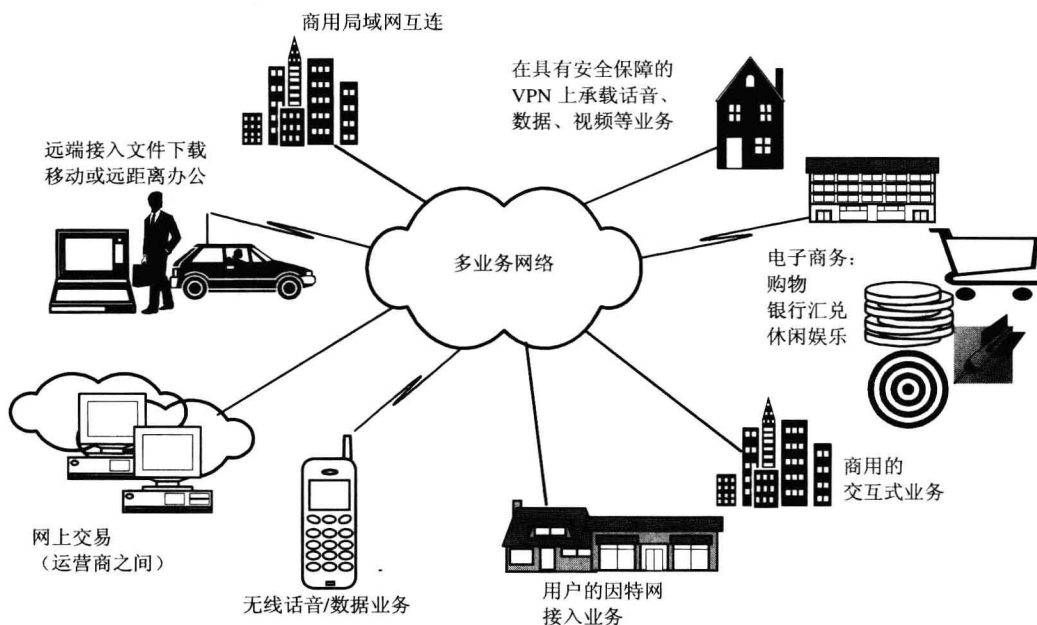


图 1-3 不断涌现的新业务对带宽造成很大压力

业务的迅猛发展迫使网络不断升级。世界上主要的 ISP 目前都已建设速率在 5Gbit/s 或