

"十五"国家重点图书出版规划项目: **光通信技术丛书**

光网络的组网与优化设计

GUANGWANGLUO DE ZUWANG YU YOUHUA SHEJI

编著 龚倩 徐荣 张民 叶培大



北京邮电大学出版社
<http://www.buptpress.com>

光网络的组网与优化设计

龚倩 徐荣 张民 叶培大 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

目前基于波分复用(WDM)技术的新一代光通信网络系统已经被电信运营商大规模采用,而且随着全球电信骨干网络升级的推进,以及城域网建设高潮的来临,光网络市场正在迅速膨胀。那么如何实现高效、低成本的光传送网络,以及如何优化设计网络结构和有效配置网络设备就成为光网络研究的核心问题。

本书全面系统地论述了光网络的组网和优化设计技术。主要对光联网设备、光网络的生存性、波长路由与波长分配技术、逻辑拓扑设计与路由优化技术,以及波长转换器和光放大器等关键设备的优化配置等技术的基本理论、执行原理和性能优化进行了详细研究和举例说明。

本书系统收集了目前国际上关于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、全光网、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,可供不同读者群参考。既可作为电信专业的教材使用,也适合广大科技工作者、工程技术人员、教师、研究生和大学高年级学生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光网络的组网与优化设计/龚倩等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2002

(光通信技术丛书)

ISBN 7-5635-0566-0

I. 光... II. 龚... III. 光通信-通信网 IV. TN915.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 037539 号

书 名: 光网络的组网与优化设计

编 著: 龚倩 徐荣 张民 叶培大

责任编辑: 张学静

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(100876)

电话传真: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷厂印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张: 24.75

字 数: 634 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0566-0/TN·259

定 价: 48.00 元

序 言

“千里眼、顺风耳”是古代人们在神话故事中的憧憬和向往,“秀才不出门,能知天下事”是人们长期以来的一种美好愿望,在信息技术高度发达的今天,都已经变成了现实。

当你坐在计算机旁尽情浏览因特网上各种丰富多彩的文字、图像和声音信息时,有没有想过在 10 年前,如果你想得到现在一分钟内得到的信息,需要花费千万倍的时间和难以估算的人力、物力和财力;当你用廉价方便的 IP 电话和远在大洋彼岸的亲朋好友侃侃而谈的时候,有没有想到在 20 世纪 70 年代之前,哪怕想打一个长途电话,也要到电信局等候几个小时甚至整天的情景;曾几何时,“大哥大”还是有钱人或有权人的象征,而今天,手机已成为普通百姓的日常生活用品。这一切,都得益于通信技术的飞速发展,也是社会进步的象征。

我常说,学通信的人很累。的确,通信技术的发展太快了,新概念、新技术、新设备层出不穷,通信网所提供的业务日新月异,真有一种一天不学就要落后,就要被新技术淘汰出局的感觉。我想,一定有许多读者与我有同感。

通信网一般由交换与传输两大部分组成。传输的技术有许多种,各有千秋。然而光传送技术因其无可比拟的众多优点,在各种传输技术中独占鳌头。当今世界信息量的 80% 以上是通过光传送网络进行传送的。因此,光通信技术成为人们非常关注的一种通信技术。

为了使读者能对光通信技术有一个全面的了解,我们组织国内一批科技骨干编写了这一套介绍光通信技术的丛书。该丛书既包括了目前光通信技术发展的热点,又反映

了光通信技术的发展前沿。我们将这套丛书献给奋战在光通信界的朋友们和愿意献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。

只有民族的,才是世界的。

毛 谦

2001 年 10 月

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,这就是新一代光网络系统的诞生。以波分复用(WDM)为核心的新一代光传输系统和联网设备已经被广泛用于构架容量更大的骨干光纤网络和城域网络。光传输设备正经历着一场从 SONET/SDH 到 IP over DWDM 转变的革命。SONET/SDH 是应单波长环型拓扑结构内语音传输而生的,而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,这是传统 SONET/SDH 传输网络与新一代的 WDM 构架的传输网络的根本区别。

合理的网络设计必须能够在一个地理区域上相对分散的社区之间以比较简单和方便的方式共享通信资源和其他的可资利用的设备资源(例如:计算能力)。但是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,而一种网络往往又不能很好地适用于其他的业务类型。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冗余、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。

面对数据业务量爆炸式增长的现状,现在的电信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,给核心公用网络的设计带来了新的要求。通常网络性能的优劣最终是由实际使用的物理资源和相关支撑技术所能提供的功能以及技术发展的水平所共同决定的。一个结构性能优化的光网络应该是在合理价格的基础上既要能得到高的吞吐量又要能得到高的连接率。

本书主要分两大部分,第一部分主要研究光网络的组网技术。在第一章我们对光网络的基本概念、组成结构以及规划与优化设计,光网络的意义进行了简要介绍。由于光网络节点的容量、端口数目、交叉矩阵规模以及性能都会对网络的容量、阻塞率、生存性和可扩展性等产生影响,针对不同的业务需求和线路环境利用功能各异的光网络节点组网,也是未来网络优化设计、工程规划和降低成本需要考虑的关键问题之一。所以我们在第二章对光联网设备和选路系统进行了研究,主要包括节点功能结构、无阻塞交换网络结构设计和新型光交换设备的设计技术。在第三章对不同的联网方案和生存性策略进行了研究。

不幸的是,在单模光纤上进行长距离传输的大容量光信号受一些物理因素的限制。所以要想设计一个能克服限制光网络系统速率和传送距离的各种不利因素的传输系统是十分困难的。由于在 WDM 网络中,可用波长数量限制了网络能够提供的最大数量的端到端连接量,而光纤链路上的波长信道间隔、光收发机的调谐能力等物理约束都限制了可用信道的数量。另外,给每一个信道分配波长时,并没有考虑带宽需求量等因素,所以带宽粒度问题也同样限制了波长通道的带宽利用率。也就是说,现有的光网络虽然已经有了巨大的进步,但由于各种物理的、技术的限制因素,使得光网络还不能够提供所有我们所要求的物理性能,因此就存在对现有可用资源的高效利用和优化问题。在本书第二部分我们着重研究光网络的优化设计问题。在第四章先给出了光网络优化设计的一些基础知识,在此基础上在第五章和第六章分别研究了光网络的路由与波长分配技术以及逻辑拓扑的设计与路由优化技术。最后在第七、八章研究了波长转换技术和波长转换器的优化配置问题。在第九章研究了光放大器的优化配置技术。然后基于这些基本理论在第十章给出了优化设计与组网在实际网络中的具体应用实例。总而言之,由于光网络存在诸多的限制因素,为了最优化网络性能、降低组网成本,不仅要对联网节点进行优化设计,而且也要使用物理层优化配置算法和网络层路由与波长分配算法对网络进行优化设计。

本书系统收集了目前国际上关于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 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、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。该项目是国家为抢占未来信息基础设施关键技术的制高点,于1999年6月紧急启动的。作者主要对可重构 OADM 和 OTU(光转发器)等光网络关键器件进行了系统和组网两方面的研究,解决了节点结构、状态检测、功率均衡、环网自激、保护倒换、环网应用、光网管理和性能测试等关键技术难题,为高性能 OADM 设备的具体实施提供了技术保障。该项目历时两年多终于攻克了一个个技术难关,于2001年“十一”前夕在北京通过了科技部组织的国家级验收。包含9名院士的15人专家验收委员会认为,中国高速信息示范网已经达到了国际先进水平,实现了我国在宽带信息网核心技术领域的跨越式发展和群体突破。本书第二、三和十章内容就涵盖了该项目的部分研究成果。

作者主研并完成了中国网通公司(CNC)下一代光网络的规划和设计工作。此项工作定位于面向IP的智能光网络,着重对光网络的智能控制信令、组网策略、节点结构设计、高效智能的路由恢复算法、基于多协议波长标签交换 MPLmS 的 IP over WDM 网络技术等核心关键技术进行了深入细致的研究。开发了新型智能路由恢复算法并应用于不同协议层联网技术中,将这些网络与传统的保护恢复算法在恢复速度、容量使用效率和组网成本等方面进行对比研究,提出了科学的网络优化与规划方案,证明了所规划设计的网络结构的科学性。本书第四、五、六和十章就涵盖了这方面的研究成果。

本书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)”的主研人员。主要研究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。通过在光网络中引入 IP 控制协议和 MPLS 流量工程技术来实现对光网络资源的动态分配、动态网络重构、光路自愈恢复、带宽管理和业务疏导等关键技术。综合利用 IP 寻址、MPLS 信令和动态波长分配/路由技术实现高速、宽带和具有 QoS 质量保证与综合自愈能力的下一代光因特网技术。在数据网和光网络互联方面提出了一些有创新性的新型结构方案,并对全光标记交换、光突发交换、波长标签交换等技术进行了仿真分析和模拟试验,取得了初步进展、积累了许多实际的组网经验。

作者还参与国家 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。在千兆比以太网与 WDM 光网络集成互联方面提出了一些高效、可靠且具有 QoS 质量保证的 IP over WDM 实现方案。由作者提出并实现的独到的创新点有:多业务疏导与整合(grooming)技术、带宽管理技术、资源调度技术等。该项目的研究成果,将为高速信息示范网项目提供多业务接入支持,使得 OADM 可支持吉比特路由器以实现 IP over SDH over WDM 和 Gigabit Ethernet over WDM 技术。

本书作者参与完成的其他项目有:国家自然科学基金重大项目“光纤宽带接入网技术研究(项目编号:69896242)”;教育部项目:“教育部跨世纪优秀人才培养

计划基金”、“教育部高校骨干教师资助项目”、“教育部优秀青年教师资助项目”；和北京市电信局科学技术研究与发展中心项目：“城域网上 DWDM 技术的应用方案研究”、“IP over DWDM 技术跟踪研究”等。

本书作者在参与以上各大型研究项目的同时还参与起草了 2001 年国家“973”重大项目通信主题建议书。并作为“十五”863 通信主题写作组成员，起草了国家 863 计划信息领域“十五”期间通信技术主题建议书和光通信专题建议书。作者还翻译了由 Thomas E. Stern 和 Krishna Bala 编著的《Multiwavelength Optical Network》一书，该书已于 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。

通过以上国家级项目和业界重要社会活动的参与，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发表论文 50 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、北京邮电大学校长林金桐教授、电信工程学院院长顾婉仪教授和国家“863”通信技术专家组组长纪越峰教授的悉心指导和各位师兄弟的大力支持。在出版过程中，北京邮电大学出版社的编辑同志也付出了大量血汗，给予了极大帮助，在此一并表示感谢。

光网络的组网与优化设计是一项全新的技术，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

2001 年 10 月

目 录

第 1 章 光网络技术纵览

1.1 概述	1
1.2 波分复用技术	2
1.3 WDM 光网络	6
1.4 光传送网(OTN)	10
1.5 光网络的组成结构	13
1.5.1 广播与选择网	13
1.5.2 波长选路网	14
1.5.3 波长通道网络与虚波长通道网络	16
1.5.4 光网络的演变与发展	17
1.6 光网络技术的新发展	19
1.6.1 关键器件与技术	19
1.6.2 网络控制与管理	22
1.6.3 故障管理	23
1.6.4 光组播技术	25
1.6.5 IP over WDM	26
1.6.6 WDM 环网中的流量疏导	27
1.6.7 光分组交换	28
1.6.8 智能自动交换光网络	28
1.7 光网络优化设计的意义	30
1.7.1 物理层限制	31
1.7.2 节点结构的优化设计	34
1.7.3 网络层的算法优化	35

第 2 章 光联网设备与选路系统

2.1 概述	38
2.1.1 光网络节点的基本功能	39
2.1.2 光网络节点的结构分类	45
2.2 无源光耦合器	50
2.2.1 广播星形耦合器	50

2.2.2	阵列波导光栅(AWG)	51
2.2.3	无环回(LOOP-FREE)广播星形耦合器	53
2.2.4	组播型耦合器	55
2.3	OADM	56
2.3.1	OADM 功能结构分类	56
2.3.2	OADM 性能参数	58
2.3.3	基于交换开关的 OADM 结构设计	60
2.3.4	基于 FBG 的 OADM 结构设计	79
2.3.5	基于 AWG 的 OADM 结构设计	85
2.4	OXC	92
2.4.1	OXC 性能指标	92
2.4.2	基于光纤光栅的 OXC 结构设计	95
2.4.3	基于星形耦合器和 SOA 门的 OXC 结构	99
2.4.4	基于 AWG 的 OXC 结构设计	105
2.4.5	基于波长变换器的 OXC 结构	112
2.5	光子分组交换机	115
2.5.1	光分组交换节点的结构模块	116
2.5.2	分组同步与冲突解决技术	118
2.5.3	光子时隙路由(PSR)	125
2.5.4	全光标记分组交换机	127
2.6	下一代多粒度标签交换机	128
2.6.1	智能自动交换节点	128
2.6.2	多粒度节点结构	131

第3章 光网络的组网与生存性

3.1	概述	136
3.2	光网络的拓扑结构	137
3.2.1	物理拓扑	137
3.2.2	逻辑拓扑	138
3.2.3	拓扑结构与网络设计的关系	139
3.3	环形光网络的结构	141
3.3.1	物理结构	141
3.3.2	逻辑结构	142
3.4	光网络的生存性	143
3.4.1	网络生存性的概念与意义	144
3.4.2	用户对业务恢复时间的要求	145
3.4.3	网络生存性策略——保护和恢复	146
3.5	保护恢复技术的分类	148
3.5.1	按协议层分类	148

3.5.2 按网络功能划分	150
3.5.3 按控制方式分类	151
3.5.4 按网络拓扑结构分类	152
3.5.5 按恢复容量的粒度来划分	153
3.6 点到点的光层保护倒换	154
3.6.1 1+1 光层保护	155
3.6.2 1:1 光层保护	155
3.6.3 1:N 光层保护	156
3.7 环形光网络的生存性	157
3.7.1 专用保护环	157
3.7.2 共享保护环	158
3.7.3 环网的故障判定、隔离与定位	160
3.7.4 环互联策略	162
3.7.5 环网自愈时间	162
3.7.6 WDM 环网自激	163
3.8 网状光网络的生存性	164
3.8.1 网状网的恢复	164
3.8.2 网状网的保护	167
3.8.3 恢复算法的执行过程	167
3.8.4 恢复路由的激发过程	170
3.9 光网络生存性策略的对比分析	171

第4章 光网络的规划与设计基础

4.1 概述	174
4.2 表征光网络的参数	175
4.2.1 表征拓扑的参数	175
4.2.2 表征物理限制的参数	176
4.2.3 表征业务需求的参数	177
4.2.4 表征结构的参数	178
4.2.5 表征生存性的参数	179
4.3 光纤通信中的仿真设计	179
4.3.1 光纤通信系统的仿真	180
4.3.2 光纤通信网络的仿真	181
4.4 SDH/WDM 网络的设计和规划	181
4.5 WDM 光网络的设计和规划	184
4.5.1 WDM 光网络的设计步骤	184
4.5.2 网状光网络的优化设计	185
4.5.3 环形光网络的优化设计	187
4.6 物理层的设计	189

4.6.1 物理层设备的优化配置	189
4.6.2 光网络中的传输损伤	191
4.6.3 光传输损伤参数和取值范围	194
4.6.4 功率均衡与功率管理技术	196
4.6.5 光网络中的环路问题	199
4.6.6 光网络的瞬态效应	200

第5章 光网络的路由与波长分配

5.1 基本概念及常见路由与波长分配的算法	203
5.1.1 基本概念	203
5.1.2 常见路由与波长分配的算法	204
5.2 单纤 WRON 中的 RWA 问题	206
5.2.1 网络模型	207
5.2.2 静态 RWA 问题与整数线性规划法(ILP)	208
5.2.3 静态 RWA 问题中波长需求的上、下限	210
5.2.4 启发式算法(Heuristic Algorithms)	212
5.2.5 规则连接网络与不规则连接网络	214
5.3 单纤网络中的链路故障恢复算法	214
5.3.1 网络模型及恢复方案	215
5.3.2 链路恢复问题中的 ILP 解法	216
5.3.3 链路故障恢复中的波长需求下限	219
5.3.4 链路故障恢复问题的启发式算法	220
5.3.5 对恢复方案的小结	221
5.4 设计多纤波长路由光网络	222
5.4.1 网络模型与恢复方案	222
5.4.2 多纤 WRON 上 RWA 问题的整数线性规划法	225
5.4.3 多纤 WRON 中 RWA 问题的下限	228
5.4.4 多纤 WRON 中 ILP 方法举例	230
5.4.5 多纤波长路由光网络 RWA 问题的启发式算法	231
5.4.6 网络流量与资源的关系	237

第6章 逻辑拓扑设计与路由优化

6.1 基本概念	238
6.2 建立模型	240
6.3 逻辑拓扑问题的 MILP 方法	242
6.3.1 MILP 法的数学描述	242
6.3.2 MILP 在不同网络条件下的应用	243
6.4 逻辑拓扑问题的界限	245
6.4.1 拥塞率下限	246

6.4.2 波长数下限	247
6.5 MILP 方法和下限求法举例	248
6.5.1 对小规模网络的逻辑拓扑设计	248
6.5.2 对可重构性的优化设计	250
6.6 逻辑拓扑的启发式算法	251
6.6.1 问题的分解	251
6.6.2 启发式算法	252
6.7 局域网的逻辑拓扑设计	257
6.7.1 局域网中规则逻辑拓扑的一些特性参数	258
6.7.2 星形 WDM LAN 中常用的规则逻辑拓扑结构	258
6.7.3 小结	263

第 7 章 波长变换技术及其对光网络性能的影响

7.1 波长变换器的功能分类	264
7.2 波长变换方法与技术	271
7.3 波长变换对光网络性能的影响	280
7.3.1 波长变换对网络阻塞性能的影响	281
7.3.2 波长变换对联网节点性能的影响	283
7.3.3 对网络逻辑拓扑结构设计的影响	284
7.3.4 对网络传输性能的影响	286
7.3.5 对网络管理系统的影响	287

第 8 章 波长路由光网络中波长转换器的优化配置

8.1 概述	288
8.2 网状光网络中波长转换器的优化配置	289
8.2.1 阻塞性能的分析 and 计算	290
8.2.2 使平均阻塞概率最小化的波长转换器的配置	292
8.2.3 使最大阻塞概率最小化的波长转换器的配置	295
8.3 树形拓扑及树状环形拓扑中波长转换器的优化配置	296
8.3.1 数学描述	297
8.3.2 树形拓扑的最小有效系	297
8.3.3 树状环形拓扑的最小有效系	299
8.4 在任意拓扑的 WDM 光网络中波长转换器的优化配置	301
8.4.1 网络分析模型	301
8.4.2 波长转换器的配置算法	302
8.4.3 算法分析	307
8.4.4 数值结果	307
8.4.5 结论	309

第9章 光网络中放大器的优化配置

9.1 光放大器技术	310
9.1.1 掺铒光纤放大器	311
9.1.2 宽带光纤放大器	313
9.2 在等功率情况下的优化配置	316
9.2.1 概述	316
9.2.2 解决方案	319
9.2.3 放大器优化配置举例	324
9.3 不等功率情况下的优化配置	331
9.3.1 概述	331
9.3.2 解决方案	334
9.3.3 放大器优化配置举例	340

第10章 光网络优化设计实例

10.1 中国网通(CNC)网状光网络的优化设计	344
10.1.1 优化设计思路和算法理论	344
10.1.2 设计结果和性能分析	348
10.2 OADM 在中国高速信息示范网中的组网应用	355
10.2.1 中国高速信息示范网总体结构	355
10.2.2 节点结构原理	356
10.2.3 实验结果及组网分析	362

附录 缩略语	369
--------------	-----

参考文献	376
------------	-----

1.1 概 述

随着人类步入 21 世纪,信息革命所带来的机遇和挑战正在不断地改变人们的生活现实。电子商务向传统的商务活动提出挑战,同样人们生活的其他领域也正面临着各种各样网络化的挑战。这对于各种大小机构和企业实体甚至个人来说也都是一种新机遇。

近年来,Internet 爆炸性增长,推动了电信信息(Tele-formation)技术(信息处理和传送)的迅速发展,从而使各种 e-方式成为可能,不管何时、何地,通过个人电脑或手机电话等方式都能随心所欲地完成信息沟通和交流。互联网涉及的范围之广加上 PC 机的普及,已经并继续在形成一种十分有利的大环境,使开展各种创新的 e-xxx 成为可能。例如除了一般的电子商务外,像 e-办公,e-书本,e-政府,e-城市,甚至数字地球等新概念层出不穷。

互联网几乎能使所有 e-xxx 都成为可能。为此,互联网已被看作可以提供几乎是无限的可能性,无论是何种业务的、社会的或个人的活动,现在的或将来的,“正常的”或“非常规的”,什么都行。在互联网无处不在的情况下,人们的工作、业务、教育、服务、娱乐等方式都在改变。

现在,全球联网的 e-城市正在 e-xxx 的多维空间快速发展,按照这种发展趋势,人们可以预期信息在这些城市会出现爆炸性的增长。于是诸如网络经济、电子网络(e-network)、信息时代、网络时代、信息社会等名词的意义会逐步体现出来。简言之,互联网正在全球范围形成一个巨大的舞台,供每个人去充分表现和发挥他们的创造才能。e-xxx 正在为人们提供有史以来最平等的机遇,让他们为人类社会也为自己创造美好的未来。

多媒体以及丰富的图形用户终端接口,WAP 和新型的手机都为人们的广泛参与提供了便利。然而,它们会直接影响对终端用户的带宽要求,以及对接入网和骨干网的容量要求。而且,他们对带宽的需要通常是互相独立而随机的,这反映在提出要求的时刻、所延续的时间或表现的特征方面均是独立随机的。

我们正迈向一个信息化的社会,在信息化社会里,无论我们在任何时间、任何地点都能方便地得到任何格式的信息。但是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也越来越高。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都给今天的通信网络提出了革命性的要求,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。在以 IP 为代表的业务量井喷式增长和新型业务不断涌现所导致的巨大带宽需求的刺激下,全球通信网络主导业务正在由以话音业务为中心向以数据业务为

中心过渡,与此同时,网络体系架构也正在向高速大容量和高质量服务方向飞速发展,其发展势头之大正猛烈冲击电信运营商原有的技术发展思路和运营策略。

据此来看,一种灵活的、规模可伸缩的、具有所有必须的潜在能力的通信信息基础设施,是十分重要的基本要求。如何以及用什么样的技术才能满足几乎是无限的“e”的需要(不仅是数量,还有其随机性)。是否有一种超级 e-技术?没有!只有光波技术才能为现有的及未来的 e-方式提供强有力的发展平台并使之造福人类。

光通信技术有着巨大的潜力——带宽资源庞大(约 50 Tbit/s)、损耗极低(0.2 dB/km)、信号传输形变小、功率低、占空小、成本低廉,因而光通信技术成为我们满足信息化社会各种需求的大救星。光纤作为一种很好的传输介质所具有的优良特性已被大家所共知,但是有一点必须注意,那就是只有当光纤通过适当的、合理的、科学的体系结构互联以后才能组成真正理想的网络体系结构,以提供高速、宽带、高质量的业务服务。当电子设备逐步达到其物理极限时,波分复用(WDM)、光交换技术以其独有的技术优势和多波长特性,正在向人们展示通过波长通道直接进行联网(即光网络)的巨大潜力和光辉前景。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。另外,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。随着网络传输容量的增长,驱使光交换层的交换能力也在不断增强,使之向更易于管理、更加灵活和更具有健壮性,同时业务指配和故障恢复也能够更快地自动完成并向具有智能性的方向发展。

1.2 波分复用技术

信息社会给人类带来巨大的挑战,人们希望能够实现无论何时、无论何地、无论通过何种方式都能够方便地获取需要的信息,信息爆炸刺激了全球通信业务的疯狂增长,而这种疯狂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个 Gbit/s,而光通道带宽可达几十个 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 世纪信息互联需求。

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 (1 310/1 550 nm)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 2×1.7 Gbit/s。但是一直到 20 世纪 90 年代中期,WDM 系统发展速度并不快,主要原因在于:

(1) TDM(时分复用)技术的发展。在系统中采用 TDM 技术,可以从 155 Mbit/s 比较容易的升级到 622 Mbit/s 甚至 2.5 Gbit/s,TDM 技术相对简单。而且据统计,在 2.5 Gbit/s 系统以下