

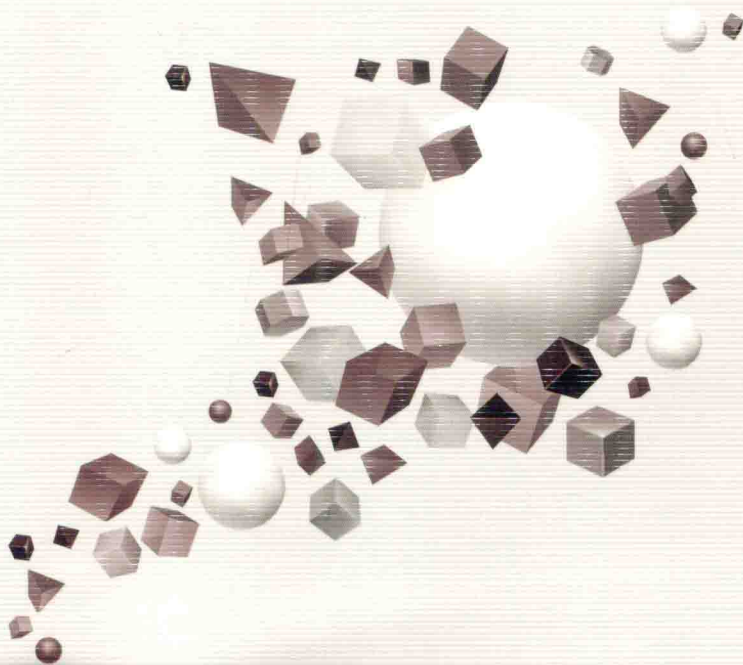


宽带中国出版工程

光传送网

——前沿技术与应用

曹 畅 唐雄燕 王光全 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



宽带中国出版工程

工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版

光 传 送 网

—— 前沿技术与应用

曹 畅 唐雄燕 王光全 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是一本有关光传送网前沿技术的技术专著,内容涉及光传送网的应用场景、平面架构、关键技术、协议机制等。全书共6章,第1章为概论;第2章介绍100Gb/s波分复用(WDM)技术;第3章介绍400Gb/s光传送网技术;第4章阐述光传送网智能控制技术;第5章结合PTN和IP RAN讨论分组技术引入光传送网后的多业务传送特性;第6章讲述未来极具发展前景的光与IP资源协同和数据中心网络技术。

本书适用从事光传送网研究的工程技术人员以及高校相关专业的研究生和教师阅读参考。

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

光传送网:前沿技术与应用 / 曹畅等编著. —北京:电子工业出版社, 2014.8
(宽带中国出版工程)

ISBN 978-7-121-23938-0

I. ①光… II. ①曹… III. ①光纤网 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第173098号

策划编辑:宋 梅

责任编辑:底 波

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:720×1 000 1/16 印张:11.75 字数:244千字

版 次:2014年8月第1版

印 次:2014年8月第1次印刷

印 数:3 000册 定价:39.00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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



宽带中国出版工程

指导委员会

主任委员

尚冰：工业和信息化部副部长

副主任委员

曹淑敏：工业和信息化部电信研究院院长

委员

邬贺铨：中国工程院院士，工业和信息化部通信科学技术委员会主任

韦乐平：工业和信息化部通信科学技术委员会常务副主任

綦成元：国家发展和改革委员会高技术产业司司长

张峰：工业和信息化部通信发展司司长

敖然：电子工业出版社社长

编审委员会

主任

刘多：工业和信息化部电信研究院副院长

副主任

蒋林涛：工业和信息化部电信研究院科技委员会主任

余晓晖：工业和信息化部电信研究院总工程师

委员（以下按姓氏拼音排列）

敖立 曹蓟光 冯明 高巍 何宝宏 李婷 刘九如 罗振东
唐雄燕 王爱华 王传臣 魏亮 续合元 许志远 赵丽松 张海懿

编委召集人

王雪飞 武莹

策划编辑

宋梅

总序 1

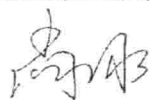
宽带网络是新时期我国经济社会发展的战略性公共基础设施，是推进国家治理能力现代化和公共服务均等化的重要手段，是推动工业强国建设、促进农村经济发展和新型城镇化建设的重要途径。发展宽带网络对于促进信息消费、推动经济发展方式转变、全面建成小康社会具有重要支撑作用。加快宽带网络建设、增强技术创新能力、丰富信息服务应用、繁荣网络文化发展、保障网络安全，利在当前惠及长远。

当前，我国已建成覆盖全国、连接世界、技术先进、全球最大的宽带网络，网民数量、移动智能手机用户规模全球领先，相关产业能力持续提升，已经成为名副其实的网络大国。但同时，我国宽带领域的自主创新能力相对落后，区域和城乡普及差异比较明显，平均带宽与国际先进水平差距较大，网络安全形势日益严峻，总体上看国内宽带网络发展仍存在诸多瓶颈。在全球各国加强宽带战略部署、ICT 产业变革发展日新月异的形势下，要实现工业化、信息化、城镇化、农业现代化四化同步发展、建成网络强国仍然任重道远。

党中央、国务院高度重视宽带网络发展和管理，2013 年国务院先后出台了《“宽带中国”战略及实施方案》和《关于促进信息消费扩大内需的若干意见》。2013 年年底，中央网络安全和信息化领导小组成立，习近平总书记亲自担任组长，提出努力把我国建设成为网络强国，战略部署要与“两个一百年”奋斗目标同步推进，向着网络基础设施基本普及、自主创新能力显著增强、信息经济全面发展、网络安全保障有力的目标不断前进。这是党中央在新时期对我宽带网络发展提出的新目标和新要求，需要我们以改革创新精神，通过政策推动、技术驱动、产业带动、应用拉动促发展保安全；需要我们着眼长远、统筹谋划，积跬步、行千里，不断推动网络大国向网络强国迈进。

工业和信息化部电信研究院是我国在 ICT 领域权威的研究机构，多年来在重大决策支撑、行业发展规划、技术标准引领、产业创新推动和监管支撑服务中发挥了重要作用。“宽带中国出版工程”系列丛书，是该院及业界多位专家学者知识和智慧的结晶，是多专业科研成果的集中展现，更是多年理论与实践经验的综合集成，该系列丛书的出版有助于读者系统学习宽带网络最新技术，准确把握宽带应用和相关产业的最新趋势，从而提升对宽带网络的研究、规划、管理、运营水平。希望我国政产学研用各界齐心协力，共同为宽带中国发展、网络强国建设事业贡献力量！

工业和信息化部



总序 2

市场牵引是通信发展的动力，通信业务从语音为主到数据和视频为主，对带宽的需求与日俱增。思科公司 2014 年 6 月发布的报告指出，2013 年全球互联网忙时流量是平均值的 2.66 倍，与 2012 年相比，平均流量和忙时流量分别增长了 25% 和 32%，思科公司还预测从 2013 年到 2018 年，全球互联网流量忙时是平均值的 3.22 倍，平均流量和忙时流量分别年增 23% 和 28%。在互联网流量中视频已成主流，全球互联网视频流量占总量之比从 2013 年的 57% 将增长到 2018 年的 75%。全球移动数据流量增长更快，2013 年一年就增加 81%，到 2018 年还将保持平均年增 61% 的速度，届时移动数据流量将占全部 IP 流量的 12%。美国 Telegeography 公司给出的国际互联网干线流量 2009—2013 年平均年增 45%，2013 年相比 2012 年增加了 38%。我国国际互联网干线带宽从 2009 年到 2013 年平均年增 39.6%，2013 年相对 2012 年增 79%，增长的后劲更明显。

通信业务与技术的发展总是市场牵引与技术驱动相辅相成，市场催生了技术，技术支撑了市场。集成电路继续遵循摩尔定律，单位面积的晶体管数年增 40%，强大的计算和处理能力改进了频谱效率与信噪比，提升了通信流量，比较好地适应了互联网流量的增长。光器件的技术进步加上电域的信号处理，使光纤通信干线商用容量水平基本按照十年千倍提升。2009 年起我国移动通信从 2G 经 3G 跨越到 4G，借助先进的多址复用技术和频谱的扩展等，峰值速率增加数百倍。

近年通信技术与业务发展一个值得注意的趋势是从消费者的应用向企事业应用扩展，2013 年全球企事业单位互联网流量较 2012 年增 21%，到 2018 年还将达到 2013 年的 2.6 倍，将占全球互联网流量的 14%，而且全球企事业单位互联网流量中 14% 将是移动流量。随着物联网发展及信息化与工业化深度融合，企事业单位的互联网应用还将有更大的发展。

互联网的渗透促进了经济的复兴，2013 年发布的《OECD 互联网经济展望 2012》分析了互联网对所有行业经济的影响，得出如果宽带普及率增长 1%，GDP 将增长 0.025%，并且通过模拟得出互联网的贡献占 2010 年美国 GDP 的 4.65%~7.21%，占企业增加值的 3%~13%。波士顿咨询公司 2012 年发表的《连接世界》报告分析 2010—2016 年互联网经济对 GDP 的贡献，中国仅次于英国和韩国为第三位，占 GDP 的比例从 2010 年的 5.5% 增加到 2016 年的 6.9%。IDC 公司提出信息技术已从计算机和互联网这两个平台发展到移动宽带、云服务、社交应用和大数据为标志的第三平台，即宽带化平台，并预测到 2020 年信息产业收入的 40% 和增长的 98% 将由第三平台的技术所驱动。世界银行的研究报告表明，对制造业的海外销售额和服务业的销售额来说，使用宽带的企业与其他企业相比分别高出 6% 和 7.5%~10%，中低收入

国家的宽带普及率每增加 10 个百分点，GDP 将会增长 1.38 个百分点。美国认为宽带的发展对上下游产业就业的拉动作用是传统产业的 1.7 倍。GSM 协会和德勤咨询机构 2012 年发表的研究报告指出，3G 移动数据应用增加 100%，人均 GDP 增速提升 1.4 个百分点。

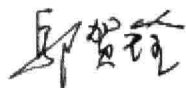
为了抢占信息技术新的制高点并获得宽带化的红利，一些国家纷纷出台国家宽带战略，最近两三年来美国出台了《国家宽带计划》和《大数据研究和发展倡议》等，全球有 146 个国家都制定了加速发展宽带的国家战略或规划，不少国家建立了宽带普遍服务基金。

我国网民数量世界第一，但按网民平均的国际互联网干线带宽、固网平均接入速率和移动互联网下载速率仍低于世界平均水平，这几年有了显著改进，但与互联网高速发展和社会大众的期望相比总是恨铁不成钢。国务院在 2013 年 8 月发布了《“宽带中国”战略及实施方案》，提出到 2015 年要初步建成宽带、融合、安全、泛在的下一代国家信息基础设施，到 2020 年我国下一代信息基础设施基本接近发达国家水平，技术创新和产业竞争力达到国际先进水平。该方案对宽带网络覆盖、网络能力、应用水平、产业链发展和网络信息安全保障五方面提出了具体发展目标、重大任务和保障举措等。可以预期“宽带中国”战略的实施，必将为我国经济和社会的发展奠定坚实的网络基础，并惠及大众。

工业和信息化部电信研究院作为“宽带中国”战略的起草支撑单位之一，为“宽带中国”战略的制定做了深入的调查研究，现在与电子工业出版社联袂推出“宽带中国出版工程”系列丛书。该丛书串起终端、接入、传送、网络和云端各环节，涉及研究、制造、运营与服务各方面，涵盖宽带化技术、业务、应用、安全与管理各领域，解读“宽带中国”战略制定的背景，分析宽带化的解决方案，展望宽带化发展的前景。本套丛书内容全面，系统性强，既反映了宽带网最新的技术及国际标准化进展，又有国内实践经验的总结，兼具前瞻性与实用性。在此，衷心感谢工业和信息化部电信研究院和电子工业出版社及众多的作者所付出的辛勤劳动，希望本套丛书能够有助于业内外人士加深对宽带化的意义和内涵及难度的理解，相信本套丛书能够对行业发展和政府决策起到积极作用，为“宽带中国”战略的实施贡献正能量。

工业和信息化部通信科学技术委员会主任

中国互联网协会理事长



序

当今时代是一个通信业大变革的时代，OTT 业务的蓬勃发展和智能终端的迅速普及带给用户巨大的便利，但随之而来的网络流量飞速增长却不断冲击着基础电信网络，导致运营商的建网成本和维护成本居高不下。在流量经营的大背景下，光传送网作为电信运营商的宝贵资产，体现出前所未有的重要性。同时，伴随着“宽带中国”这一国家战略的实施，光通信产业必将迎来新一波的发展机遇。

实现超高速率的信息传递仍是未来光传送技术发展的主题。据相关机构预测，未来 5 年我国干线网络流量的年增长率还将保持在 40% 以上，目前干线中广泛应用的 10G/40G WDM 技术难以满足需求，迫切需要引入 100G 技术。在 100G 之后，业界已经确定了 400G 的发展方向，国外已有小规模试商用的案例。

在链路速率提升的同时，业务的发展也要求光传送网具备更强的智能性，可以对光网络中的路由行为进行优化，业务流量进行调度，近些年来产生的 WSON、PCE、SDN 等技术就是在这方面的有益尝试。同时，应对数据洪流的冲击，光传送网还需要对分组业务具备良好的适配特性，以适应未来光电协同、数据中心互连等新场景的承载需求。

针对上述关键问题，中国联通网络技术研究院的多位专家展开了专题研究，结合大量技术调研、方案论证和设备测试的成果撰写了本书，详细阐述了下一代光传送网的基本原理、关键技术、组网方案和应用场景。由于本书作者均是在运营商研究院从事一线研究工作的专家，兼顾原理与应用就成为本书的一大特色。本书分章节依次介绍了近年来正在或将要应用的超高速、智能化和分组化光传送网技术，内容深入浅出，既为从事光传送网工程设计和规划的工程技术人员提供了参考，又可作为高等院校相关领域师生的学习参考书。

非常感谢本书作者能将自己在光传送网技术领域的研究成果与经验和业界分享，这也是中国联通网络技术研究院承担的一份社会责任。希望本书的出版，能够进一步带动国内光通信领域的研究不断走向深入，为实现我国由网络大国向网络强国的转变服务。

中国联通运营公司副总裁、网络技术研究院院长



前 言

光纤通信系统自 20 世纪 70 年代开始商用以来，共经历了三个发展阶段。第一个阶段是传输媒质由多模光纤转向单模光纤的探索阶段；第二个阶段是充分挖掘单模光纤能力，光纤通信迅速代替电缆通信成为传输主流技术的发展阶段；第三个阶段是以 DWDM 和 EDFA 的广泛应用为标志，光纤由点到点通信走向网络全连接通信的成熟阶段。光传送网就是第三个阶段的产物，具有大容量、易于管理、灵活性和透明性高等一系列优势。步入 21 世纪以来，光传送网除了承载语音、专线等传统电信业务以外，其越来越多的需要是为蓬勃发展的 IP 数据业务提供快速、灵活、高效的传输通道，并且还要努力降低自身成本，为运营商的全业务经营提供便利。基于以上要求，近年来光传送网的发展体现出超高速、智能化和分组化三大主要特征。

实现超高速的传输速率，不断提升系统容量是光纤通信永恒的追求。在单通道 10Gb/s 和 40Gb/s 通信系统得到大规模应用之后，单通道 100Gb/s 的光纤通信系统已从 2011 年开始在国内外得到开通和运营。传输系统的关键技术，如调制码型、相干检测等在 100Gb/s 时代得到了广泛的统一，并且随着硬判决和软判决 FEC 的大量应用，100Gb/s 系统传输能力和传输质量相比 10Gb/s 和 40Gb/s 系统有了质的飞跃，有望开创光通信的下一个黄金时代。在 100Gb/s 系统部署的同时，产业界已经就超 100Gb/s（目前以 400Gb/s 为主）技术展开了讨论和标准化工作，相比 100Gb/s 技术，超 100Gb/s 系统的传输效率更加接近香农极限，因而实现难度更大，需要引入多载波、灵活栅格等创新性技术，并且兼顾传输系统的容量和传输距离。

如上所述，未来光传送网的技术原理和系统设计将会远比当前的系统复杂，因而光传送网需要具备智能性，以应对多种因素对传输系统的影响。光传送网智能化的配置和管控将由目前的可选项变成未来的必选项。就全球而言，智能光网络已有十多年的发展历史，ASON/WSO 等技术已在部分国家和地区部署，针对未来光网络建设面临的路由选择、流量规划、损伤评估等问题，业界已经在开发和研究 PCE 和 SDN 等技术，来实现光网络的集中控制与能力开放，更好地协调和调度波长、子波长、时隙、带宽等资源。

应对已经到来并不断增长的数据洪流，仅仅依靠承载网络的周期性扩容是难以奏效的，光传送网必须探索由刚性管道向柔性管道的转变。在数据业务已占绝对主导的移动回传网络，PTN 和 IP RAN 技术可以实现对 2G/3G/LTE 数据业务的高效承载，这是传送网分组化的一次积极尝试。当前 PTN 技术的标准化工作已经接近完成，IP RAN 设备也已相当成熟，对不同分组业务传送特性的研究将成为下一步的工作重点，即在关注网络设备 QoS（服务质量）的基础上，需更加关注 QoE（体验质量）。此外，以 TDM 为代表的传统电信业务在分组网络中的承载方案也需要不断地进行

完善和优化。

本书结合光传送网超高速、智能化、分组化的发展趋势，以上述问题的研究思路和解决方案为主线，阐述当前光传送网发展中的应用场景、平面架构、关键技术、协议机制等，内容凝聚了笔者多年来的科研经验和实践总结。本书通过参加“宽带中国出版工程”，得到了工业和信息化部与教育专著出版资金资助，中国联通网络技术研究院韩志刚院长欣然为本书作序，在本书写作过程中得到联通集团技术部张忠平总经理、联通网络技术研究院迟永生总工程师的大力支持。本书主要由曹畅、唐雄燕、王光全、简伟、师严、沈世奎、王硕、满洋锬、王海军、张贺编写，还得到了张沛、黄永亮等同志的帮助。本书部分内容参考和引用了中国通信标准化协会（CCSA）和其他标准化组织的相关资料，以及本学科相关期刊会议的论文资料，在此一并对相关组织和作者表示感谢。另外，还要特别感谢电子工业出版社宋梅编辑为本书出版所做的大量耐心、细致的工作。

由于编者水平有限，本书中难免有错误或者不周之处，敬请广大读者批评指正。

编著者
2014年5月于北京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 光传送网发展的主要驱动力	2
1.1.1 宽带化驱动	2
1.1.2 分组化驱动	4
1.1.3 智能化驱动	4
1.1.4 扁平化驱动	5
1.2 光传送网中的关键技术	7
1.2.1 光波分复用 (WDM) 技术	7
1.2.2 OTN 技术	9
1.2.3 ASON/WSO 技术	12
1.2.4 PTN 与 IP RAN 技术	14
1.3 光传送网的主要应用场景	18
1.3.1 国家干线光传送网	18
1.3.2 省内/区域干线光传送网	19
1.3.3 城域光传送网	20
1.4 光传送网的体系架构	22
1.4.1 传送平面	23
1.4.2 控制平面	24
1.4.3 管理平面	26
1.5 本书写作思路和章节安排	27
第 2 章 100G DWDM 传输与组网技术	29
2.1 100G 技术标准化情况	30
2.1.1 国际标准	30
2.1.2 国内标准	33
2.2 100G DWDM 关键技术	34
2.2.1 调制码型	35
2.2.2 相干检测	36
2.2.3 FEC 技术	37
2.2.4 非线性效应	40
2.2.5 客户侧接口	43
2.2.6 系统余量	44

2.3	100G DWDM 组网关键问题	45
2.3.1	WDM 平台与 OTN 平台的选择	45
2.3.2	40G 及以下低速率业务传送方式	46
2.3.3	WDM 系统混传策略	47
2.3.4	客户侧接口选择	47
2.3.5	100G DWDM 技术引入策略	48
2.4	100G DWDM 测试方案	51
2.4.1	系统配置模型	51
2.4.2	测试仪表介绍	52
2.4.3	系统中心频率和波长要求	53
2.4.4	单机测试项	54
2.4.5	系统测试项	55
2.5	小结	55
第 3 章	400G DWDM 与 OTN 技术	57
3.1	400G 技术引入的背景	58
3.2	400G DWDM 关键技术	59
3.2.1	调制编码技术	59
3.2.2	灵活栅格技术	63
3.2.3	DSP 与 FEC 技术	65
3.3	400G OTN 关键技术	68
3.3.1	传统 OTN 架构	68
3.3.2	OTN 帧结构与开销	70
3.3.3	Flex OTN 架构	74
3.3.4	信号反向复用技术	77
3.4	400GE 承载与 400G 链路技术	78
3.4.1	400GE 承载技术	78
3.4.2	新型光纤技术	80
3.4.3	光放大技术	81
3.5	小结	82
第 4 章	光传送网智能控制技术	85
4.1	ASON 技术发展与应用情况	86
4.1.1	ASON 技术标准化进程	86
4.1.2	引入 ASON 技术的考量因素	88
4.1.3	ASON 网络结构规划	89

4.2	WSN 概述与研究进展	91
4.2.1	WSN 技术背景及需求	91
4.2.2	WSN 标准化进展	92
4.2.3	WSN 网络结构	93
4.3	PCE 概述与研究进展	95
4.3.1	PCE 技术背景及需求	96
4.3.2	PCE 功能架构及应用场景	96
4.3.3	PCE 的标准化进展	98
4.3.4	PCE 路由协议在 WSN 网络中的应用	98
4.4	SDN 技术研究与在光网络中的应用	100
4.4.1	SDN 的产生与发展	100
4.4.2	SDN 标准推进情况	102
4.4.3	SDN 在光传送网中的应用分析	106
4.5	控制平面与 SDN 融合阶段分析	107
4.5.1	第一阶段: 分布式 ASON+统一网管	108
4.5.2	第二阶段: 分布式 ASON+PCE	108
4.5.3	第三阶段: Transport-SDN 统一控制	110
4.5.4	融合中的关键技术	111
4.6	小结	115
第 5 章	光传送网多业务承载技术	117
5.1	分组传送网的业务承载模型	118
5.1.1	OAM 带内传送技术	118
5.1.2	双标签传送技术	120
5.1.3	业务通用封装格式	121
5.1.4	标签封装和标签栈	122
5.2	TDM 业务时延分析与优化	124
5.2.1	TDM 业务时延模型	125
5.2.2	TDM 包长自适应调整方案	127
5.2.3	TDM 业务仿真结果	128
5.3	流量特性对承载分组业务的影响	132
5.3.1	业务发生规律的影响	134
5.3.2	业务自相似性的影响	135
5.3.3	分组业务仿真结果	136
5.4	IP RAN 技术承载 LTE 业务的效率分析	139
5.4.1	IP RAN 技术介绍	140

5.4.2	IP RAN 组网方案	142
5.4.3	IP RAN 与 MSTP 承载效率对比	143
5.5	小结	145
第 6 章	光与 IP 资源协同和数据中心网络技术	147
6.1	光与 IP 协同的需求	148
6.1.1	运营商骨干网架构和面临的问题	148
6.1.2	光与 IP 协同的主要需求	151
6.2	光与 IP 协同策略	151
6.2.1	联合组网策略	151
6.2.2	联合生存性策略	153
6.2.3	流量旁路策略	155
6.3	云数据中心网络技术	158
6.3.1	数据中心内部网络技术	160
6.3.2	数据中心外部互连技术	162
6.4	SDN 技术在数据中心网络中的应用	166
6.4.1	数据中心内部应用场景	167
6.4.2	数据中心互连应用场景	168
6.4.3	业务协同平台的设计	169
6.5	小结	170
缩略语		171

第 1 章

概 论

本章要点

- ✓ 光传送网发展的主要驱动力
- ✓ 光传送网中的关键技术
- ✓ 光传送网的主要应用场景
- ✓ 光传送网的体系架构
- ✓ 本书写作思路和章节安排



信息技术是当今世界经济发展和社会发展的重要驱动力，通信产业已经成为我国全面建设小康社会的战略性、基础性和先导性支柱产业。支撑通信产业的基础是高可信的通信网络，而以光纤为物理媒介的电信传送网则是整个通信网络的重要组成部分。自 20 世纪 80 年代以来，以密集波分复用（DWDM）技术和掺铒光纤放大器的发明为标志，光通信的发展不断加速，传输容量一直以每隔 12 个月左右翻一倍的速度递增，成为网络时代“超摩尔定律”的重要践行者。随着数据业务的迅猛发展和运营模式的不断更新，传统的中低速传送技术和面向电路的刚性管道已不能完全适应网络对大带宽、多等级分组数据传送和承载的要求，而超高速、面向分组的高性能传送技术则应运而生。

在全球主要运营商的网络中，超高速 DWDM、大容量光传送网（OTN）、智能控制等技术层出不穷，并且为了适应网络业务 IP 化转变的需要，以 PTN、IP RAN 为代表的分组传送技术在短短几年内已经大规模部署，极大地缓解了运营商网络的承载压力。本章内容将从光传送网发展的主要驱动力入手，阐述目前光传送网的主要技术以及它们所适用的部署场景，最后介绍光传送网的功能架构和传送平面、控制平面、管理平面的主要概念。

1.1 光传送网发展的主要驱动力

技术的发展和业务的发展如同汽车的前后轮一样共同驱动着光网络高速向前发展，两者缺一不可，如图 1-1 所示。业务的发展引领了光网络的带宽需求、智能需求和弹性需求，指导着未来光传送网发展的方向；光学、电子学和计算机领域的技术进步则是光传送网坚实的推动力，每一次关键技术的突破对光网络的发展都具有重要意义，往往带来产业界巨大的机遇。从当今时代的业务需求和技术发展水平来看，下一代光传送网络发展的驱动力可以归结为四个方面：宽带化驱动、分组化驱动、智能化驱动和扁平化驱动。

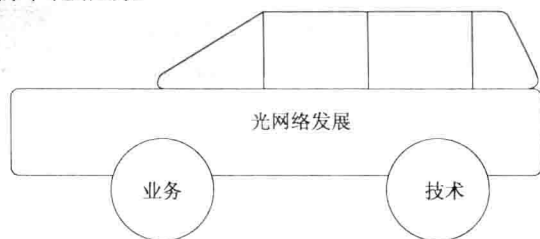


图 1-1 光网络发展与汽车的前后轮驱动关系图

1.1.1 宽带化驱动

近年来，随着高清视频，在线游戏和高可靠数据业务的飞速增长，骨干光传送

网的网络容量亟须扩容。而且在互联网运营商 OTT 业务的冲击下, VOD、CDN 等系统的部署方式也在不断转变, 这些对城域光传送网的容量和组网方式也带来了较大影响, 从整体上来看, DWDM/OTN 系统已经呈现出长距离和大容量传输的趋势。

超大容量、超长距离的传送通道一直是光传送网络的立足之本, 光传输技术的发展趋势如图 1-2 所示。目前, 电信网络中以 GE/10GE/40GE、2.5Gb/s/10Gb/s/40Gb/s POS 接口为代表的大颗粒宽带业务大量涌现, 飞速增长的数据流量需求直观地引导着光传送网络的发展, 推动光传输技术不断前进。从单信道速率(单波长速率)来看, 100Gb/s 的系统已经开始在国内外大规模商用, 400Gb/s 的系统也已在实验室完成研发, 并有部分的部署案例。单信道容量为 11.2Tb/s 的系统在实验室已经实现; 从单纤信道数来看, C 波段 80 波系统、C+L 波段 160 波系统已经成熟商用, 单纤 432 波、波长间距 25GHz 的试验系统已经实现; 从整个传输系统的总容量来看, 单纤 10Tb/s 技术已经完全突破, 目前单纤容量最高已经达到 69.1Tb/s, 正在逼近 100Tb/s。这些都表明下一代光传送网络有能力为未来业务提供大容量传输平台。

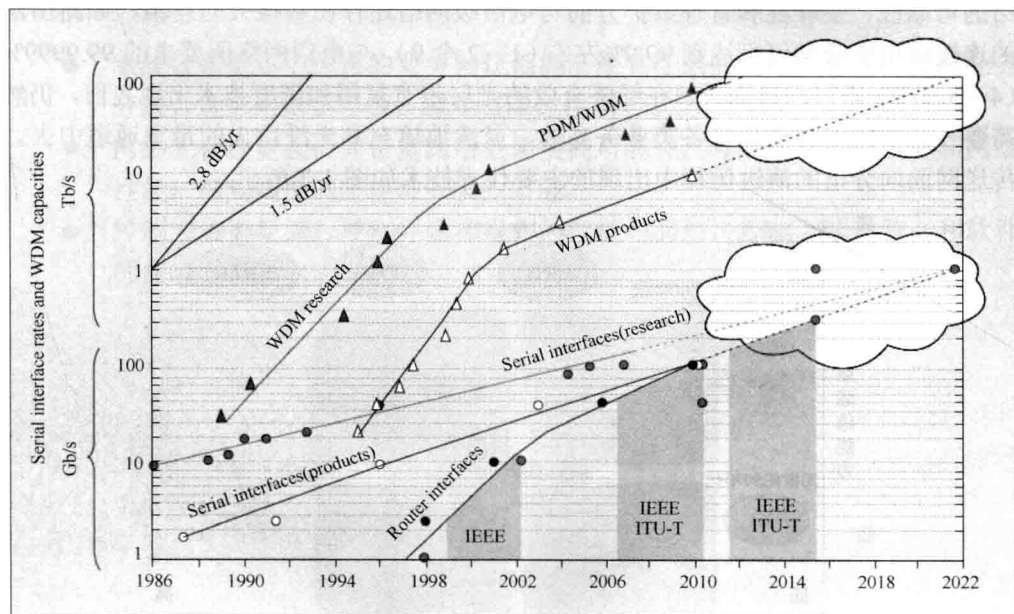


图 1-2 光传输系统的发展趋势

超长距离传输能有效地降低系统成本并提高系统的可靠性, 所以也备受产业界的青睐。随着分布式喇曼放大器、超强前向纠错技术、高速信号调制与接收处理技术、色散管理与相干检测技术、PMD 补偿技术、光子集成技术和严格的光域均衡技术的使用, 全光网传输的距离也在大幅度增加, 部分厂家研发的系统已经达到 4000km 以上。