



宽带中国出版工程

宽带 光传输技术

张海懿 赵文玉 李 芳 徐云斌 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

宽带光传输技术

张海懿 赵文玉 李 芳 徐云斌 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书针对光通信技术的发展,结合宽带中国的发展情况,从高速光传输、多业务传送、智能光通信、接入光通信和前沿光通信技术几个方面,对于光通信技术发展进行了全面的介绍。通过阅读本书,可使广大读者对光通信领域的相关技术及其应用场合等内容有更深入而详尽的了解。

本书可供光通信领域的相关技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

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

宽带光传输技术 / 张海懿等编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.11

(宽带中国出版工程)

ISBN 978-7-121-24707-1

I. ①宽… I. ①张… III. ①光纤通信 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第238837号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 刘真平

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: 27.5 字数: 570 千字

版 次: 2014年11月第1版

印 次: 2014年11月第1次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 88.00 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。



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（以下按姓氏汉语拼音排列）

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 许志远 续合元 张海懿 赵丽松

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国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 领域的权威研究机构，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，通信业务从以语音为主到以数据和视频为主，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，全球互联网忙时流量是平均值的 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。

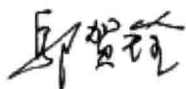
为了抢占信息技术新的制高点并获得宽带化的红利，一些国家纷纷出台国家宽带战略。最近两三年来美国出台了《国家宽带计划》和《大数据研究和发展倡议》等，全球有 146 个国家都制定了加速发展宽带的国家战略或规划，不少国家建立了宽带普遍服务基金。

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，这几年虽然有了显著改进，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

近年来随着互联网、云计算、物联网等多种新技术的发展及应用，IP 类数据和视频早已超越语音成为通信网络的主要业务，流量规模持续高速增长。根据思科公司 2014 年 6 月发布的研究报告，全球 IP 流量在 2008—2013 年 5 年期间增长了约 5 倍，2013—2018 年 5 年内将增长 3 倍（年均增长率为 21%左右），其中视频类业务在 IP 流量中的占比将从 2013 年的 66%提高到 2018 年的 79%，预计 2016 年年底全球的 IP 流量将进入 Z 比特（相当于 P 比特的 100 万倍）时代。用户业务流量的这种增长趋势从客观上直接驱动了带宽传输网络相关技术的持续发展和不断创新。

基于无可比拟的超大容量和高性能等特点，光纤通信技术构建的宽带光传输网络成为信息社会的高速路，WDM 传输速率也在不断攀升，近十年单波道速率已经从起初的 2.5Gbps、10Gbps 逐步提升到目前的 100Gbps，商用系统单纤传输的容量业已达到 8Tbps（ $80 \times 100\text{Gbps}$ ），相当于 10 年增长了大约 10 倍。伴随着承载业务转向以 IP 数据和视频为主、传输带宽容量需求逐年快速增长等强力驱动，宽带光传输网络及技术也在不断发展与演进，譬如在高速大容量传输、多业务承载和传送、智能灵活管控等方面均涌现出了多种新型技术。

在光传输网络提升传输速率和容量的过程中，兼顾传输距离、频谱效率、核心光电器件产业水平、成本等多种因素，依次围绕 40Gbps 和 100Gbps 典型速率，逐步引入了相位调制、偏振复用、自相干解调、基于数字信号处理（DSP）的相干解调等技术，使得光传输网络的单纤传输容量逐步逼近香农极限。鉴于 2000 年 IT 泡沫破灭和高速传输技术路线尚处于探索阶段等因素影响，40Gbps 速率商用设备出现多种传输码型并存情形，商用部署方面并没有得到持续规模发展，而 100Gbps 速率在 40Gbps 发展的基础上重新实现了技术路线的统一，可谓是高速传输技术发展历程中的里程碑事件。

随着多业务承载和网络容量需求的持续增长，原有 SDH 技术也逐步演进和转型以适应需求的变化。为了适应分组类业务的传输，最初出现了基于 SDH 的 MSTP 技术，并且随着分组传送需求的变化增加了内嵌 MPLS 等处理功能，但这些都是基于 SDH 基础架构上的改进型技术。为了更进一步提升分组业务传送效率，基于全分组平台处理的分组传送网（PTN）技术逐步出现并日益完善，目前已在实际网络中得到广泛应用。从交叉颗粒和容量的角度来看，原有 SDH 基于 2Mbps（VC-12）和 155Mbps（VC-4）粒度满足不了大带宽分组业务的传送和调度需求，基于更大带宽粒度的光传送网（OTN）技术应运而生。基于 2.5Gbps、10Gbps、40Gbps 和 100Gbps 等不同带宽容器粒度不但适应了大带宽传送需求，同时提供了比 SDH 更丰富的管理维护开销并实现了与 WDM 技术的无缝结合，目前已成为干线和城域核心层的主要组网技术。另外，同时兼顾分组处理效率和大传送容量的分组增强型 OTN（POTN）

技术和设备也已出现，目前正在进一步发展完善之中。

除了大容量传输和高效组网新技术之外，带宽光传输网络在智能管控方面也取得不少进展。最初基于 SDH 的自动交换光网络（ASON）技术引入了智能控制层的理念显著推动了光传输网管控技术的发展，后续波长交换光网络（WSON）、PTN、OTN 等不同交换粒度光网络均引入了智能控制层面并开展了技术研究、设备研制和网络应用等工作，同时在路径计算单元（PCE）、多层多域框架等方面也展开了大量管控技术研究。从目前发展来看，虽然基于智能控管的光传输网并没有得到大规模部署和应用，但其引入的智能管控技术理念和前期的研究、试验和测试验证工作都将为未来更加动态灵活的光传输网发展奠定了坚实基础。

受多种新型宽带业务发展驱动，奈奎斯特 WDM、基于电域或光域的正交频分复用（OFDM）、更高阶的相位/幅度调制、超低损耗光纤技术、灵活栅格、光突发交换、软件定义网络（SDN）等光传输前沿技术业已引起业界高度关注，这些都有可能成为未来十年宽带光传输领域的热点发展和应用的焦点技术。

工业和信息化部电信研究院是我国在宽带光传输新技术研究、标准制定、测试验证等领域的权威研究单位，在我国宽带光传输技术发展及应用过程中发挥了非常重要的作用。《宽带光传输技术》是该院多位专家多年理论研究与工作实践经验的综合集成，内容既包括了宽带光传输多项关键技术理论知识，又包含了国内外标准进展和产业化应用发展水平等具体应用知识，该书的出版有助于读者系统学习面向未来工程应用的宽带光传输最新前沿技术，准确了解和掌握宽带光传输网络标准及产业化发展水平，从而提升对于宽带光传输网络的研究、规划、设计、管理及运营水平。《宽带光传输技术》可作为通信类工程技术人员或在校研究生的参考书，也可作为通信工程、电子工程及相关专业的授课教材。

工业和信息化部通信科学技术委员会常务副主任
中国电信集团公司科技委主任

韦乐平

2014 年 10 月 20 日

前 言

从 20 世纪 70 年代光纤通信出现以来,经过四十余年的发展,光传输技术经历了器件、芯片、材料等方面的创新,在容量、业务承载能力、智能性等方面都取得了长足的发展。在宽带中国战略出台的背景下,电信网面临着海量业务、网络 IP 化和多业务承载等多方面的需求,传送网也从宽带化、融合化和智能化等角度进行了不断演进和发展。这些技术为电信网提供了底层强有力的带宽支持,为信息高速公路的建设奠定了良好的基础,使得移动互联网、物联网、大数据、移动网、数据网等海量业务和应用能够畅通无阻,无须顾忌带宽方面的限制。

综合传输网多年来的发展,始终在高速传输、多业务承载、智能控制增强等多个维度持续进行技术创新,围绕着传输网发展的主旋律,光传输技术四十余年的发展中又出现了一系列的技术,比如大家熟悉的 PDH、SDH、WDM、OTN 和 PTN 等,这些技术都从不同维度或者多个维度解决了光传输中遇到的问题。本书旨在对近年来光传输技术出现的新技术、新概念做一些介绍,考虑针对单个技术进行讨论比较零散,故将不同技术归纳在不同的趋势之下,从高速传输、多业务传送、智能光网络、宽带光传输网络管理和前沿光传输技术等多个维度,分别从技术现状、关键技术、标准和产业发展,以及未来发展展望等多个方面进行技术分析和讨论,力争较为全面和深入浅出地反映技术的发展。

全书共分 6 章,第 1 章介绍宽带光传输技术的发展历程,简要提及了目前现网中已经采用和即将采用的多种传输技术以及光纤技术的发展历程,并对光传输网的现状进行介绍。第 2 章围绕高速传输技术,主要针对单通路和多通路高速传输从 40Gbps、100Gbps 向超 100Gbps 发展,从关键技术、标准和产业发展方面进行了阐述。第 3 章是多业务传送技术,内容较为丰富,重点介绍了 OTN、PTN 和 POTN 技术。第 4 章是智能光网络技术,围绕 ASON 和 PCE 等技术进行了较为深入的论述。第 5 章着重介绍宽带光传输网络管理相关技术。第 6 章围绕软件定义光网络、光突发交换、新型光纤等对一些前沿技术研究的热点进行了简要分析。

本书凝聚了作者所在部门团队近年来的研究成果,收集整理了国内外相关资料,参照了国际和国内的有关标准建议。参与本书写作的同事还包括汤瑞、王郁、徐一军和吴庆伟等,同时也感谢部门其他同事和院内外专家对于本书写作的大力支持和帮助。

宽带光传输技术一直在不断发展和创新的过程中,涉及的领域和研究方向众多,多种技术还在不断发展完善,由于作者水平有限,写作时间仓促,书中一定还有不少谬误和偏颇之处,敬请读者予以批评指正。

编 著 者

目 录

第 1 章 宽带光传输技术发展概述.....1	第 3 章 多业务传送技术.....83
1.1 宽带光传输技术和应用发展历程..2	3.1 多业务传送技术的应用需求和 发展概况.....84
1.1.1 宽带光传输技术的驱动力...2	3.1.1 数据业务驱动 SDH 向 MSTP 技术演进.....84
1.1.2 宽带光传输技术发展历程...5	3.1.2 业务 IP 化驱动 PTN 技术 发展.....86
1.1.3 宽带光传输技术发展小结..21	3.1.3 承载 IP 化驱动 OTN 向 POTN 发展.....90
1.2 宽带光传输网络现状.....23	3.2 多业务传送关键技术.....92
1.2.1 骨干传输网现状.....24	3.2.1 MSTP 技术发展.....92
1.2.2 城域传输网现状.....28	3.2.2 OTN 技术发展.....124
1.2.3 光缆网现状.....28	3.2.3 PTN 技术发展.....189
第 2 章 高速光传输技术.....31	3.2.4 POTN 技术发展.....249
2.1 高速光传输技术现状.....32	3.3 多业务传送标准和产业发展.....269
2.2 40/100Gbps 关键技术.....33	3.3.1 MSTP 产业发展.....269
2.2.1 调制/码型技术.....34	3.3.2 OTN 标准和产业发展.....270
2.2.2 色散补偿技术.....41	3.3.3 PTN 标准和产业发展.....276
2.2.3 非线性效应抑制技术.....46	3.3.4 POTN 标准和产业发展.....282
2.2.4 相干接收技术.....49	第 4 章 智能光网络.....289
2.2.5 FEC 技术.....52	4.1 智能光网络技术的应用需求和 发展概况.....290
2.2.6 光层监控技术.....57	4.2 智能光网络技术发展.....291
2.3 40/100Gbps 标准和产业发展.....58	4.2.1 ASON 体系架构和技术...291
2.3.1 40/100Gbps 标准化进展.....58	4.2.2 WSON 控制平面技术.....298
2.3.2 40/100Gbps 研究及产业 发展.....66	4.2.3 PTN 控制平面技术.....315
2.4 超 100Gbps 光传输技术.....75	4.2.4 路径计算单元 (PCE) 技术.....325
2.4.1 概述.....75	
2.4.2 NYQUIST-WDM 方案.....77	
2.4.3 基于光域的 OFDM 方案.....78	
2.4.4 基于电域的 OFDM 方案.....78	
2.5 高速光传输技术未来展望.....79	

4.2.5	多层多域控制技术	332	5.3.3	传输网管网的保护	390
4.2.6	智能光网络标准化状况	368	5.3.4	管理接口技术	391
4.2.7	智能光网络产业发展	375			
第 5 章	宽带光传输网络管理	381	第 6 章	前沿光传输技术	393
5.1	光传输网络管理体系架构	382	6.1	光传输新技术发展方向	394
5.1.1	光传输网 TMN 管理 功能块和参考点	382	6.2	频谱灵活光网络技术	396
5.1.2	光传输网管网体系结构	382	6.2.1	发展驱动	396
5.1.3	光传输网络管理分层 结构和系统组成	384	6.2.2	关键技术	397
5.1.4	光传输管理通信网	386	6.3	软件定义光网络	401
5.2	光传输网络管理的标准化状况	387	6.3.1	发展驱动	401
5.2.1	国际标准化	387	6.3.2	关键技术	402
5.2.2	国内标准化	388	6.4	光突发交换技术	404
5.3	光传输网络管理系统建设和 部署	388	6.4.1	OBS 架构	404
5.3.1	管理维护方式	388	6.4.2	OBS 关键技术	406
5.3.2	传输网管系统建设和 部署	389	6.4.3	OBS 技术特点	408
			6.5	新型光纤技术	409
			附录 A	缩略语	411
			参考文献		424

第 1 章

宽带光传输技术发展概述

本章要点

- ✓ 宽带光传输技术和应用发展历程
- ✓ 宽带光传输网络现状



1.1 宽带光传输技术和应用发展历程

2013 年 8 月正式发布的《“宽带中国”战略及实施方案》中明确提出“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，发展宽带网络对拉动有效投资和促进信息消费、推进发展方式转变和小康社会建设具有重要支撑作用。”自此宽带网络的发展成为一项重要的国家战略，而宽带光传输网络作为基础承载网络，是宽带网络重要而且不可或缺的一个组成部分，在未来的战略实施和网络建设中将得到长足的发展。

回顾光传输技术的发展，可以说是一个从窄带到宽带，从低速到高速，从链型向大规模组网，从单纯承载话音信息到承载多种业务逐步发展的历程。如果将光传输系统比喻为信息高速公路，路是光传输系统中的传输介质也就是光纤，车作为光传输系统本身，车中运载的货物作为光传输系统承载的信息，在过去的 30 余年中，光传输系统可谓发生了翻天覆地的变化，路已经从羊肠小道过渡到了高速公路，车也从牛车过渡到了赛车，而所承载的信息也从纯话音信息过渡到了分组信息，适应了全网 IP 化的发展需求。光传输技术的发展驱动来自多个方面，网络的需求在不断发展，作为基础承载网络，上层业务在 30 年间也发生了很大变化，多种新技术层出不穷，对传输网提出了宽带、多业务、智能化等多方面的需求，为了应对这些需求，传输技术无论从传输速率到承载业务都发展迅猛；另外，从技术发展的角度来看，新型码型的出现、新型芯片和集成技术的发展等也为传输技术的飞速发展提供了助力。

1.1.1 宽带光传输技术的驱动力

1. 宽带化

随着信息通信技术日新月异地发展，人们在任何时间、任何地点实现“无所不在”、泛在通信的需求正在逐步实现。网络应用层出不穷，网络流量爆炸式增长，以 IP 为核心的新技术、应用不断发展，对网络的传输能力和接入带宽要求越来越高。信息通信网络加速向光纤化、IP 化、智能化方向发展，固定宽带、移动宽带、下一代互联网和广播电视网络数字化等新技术的发展，正在加速实现网络的宽带化，同时国家对于宽带战略的重视，从接入网开始的宽带提速工程势必对于传输网提出更多更新更高的要求，同时云计算和物联网等新兴的业务和产业的兴起会对传输网络的带宽提出更高的要求。

传输网在骨干和城域网层面的业务需求会有一些不同，中国电信科技委韦乐平主





任指出,未来网络中的业务模式将主要是视频业务,占据60%以上,其中网络视频占据主导,而IPTV、网络电视和移动网流量对骨干网影响较小。移动互联网的流量增速是固网的2倍,但进入骨干网的很小,城域局部热点可能超过固网,甚至拥塞。而骨干网的潜在流量中,LTE和云计算占据主导,其中前者主要影响城域网。同时,他也指出,按照目前的流量发展趋势,2013—2017年,年增长率接近40%,到2017年,中国电信的最大截面传输带宽约为38Tbps;未来5~10年,年增长率约为30%,高流量地区链路容量将需要达到45~125Tbps;未来10~20年,年增长率约为20%,高流量地区的链路容量需要达到320~700Tbps。而从节点的层面来看,2017年的最大节点容量将在170Tbps以上。

中国移动相关专家在一些专业会议上提出,根据OVUM的预测,移动网络的流量10年增长240倍,其中2012—2017年伴随LTE驱动,业务流量5年增长55倍,2G到3G年代,中国移动5年数据流量增长60倍,中国移动各类客户和流量高速增长,预计移动互联网流量10年增长1000倍;在骨干网层面,2012年中国移动骨干网带宽为33.8Tbps,预计2013年将达到49.6Tbps,2014年将达到77.8Tbps,LTE的部署也对城域层面的带宽容量有很大的影响。中国联通的骨干传输网大量使用40Gbps的传输系统,满足大容量的传输需求,随着LTE和云计算等业务的蓬勃发展,网络各个层面的带宽需求等越来越高。

业务流量和带宽的不断增加对传输网带宽提出了越来越高的要求,也推动传输技术不断地向前发展,传输速率从低速向高速不断发展,以便为上层业务网提供更好的支撑。

2. IP化

从网络IP化的角度来看,业务网络的IP化集中体现在核心网软交换和IMS的广泛应用,以及移动无线接入网的IP化上。从核心网来看,软交换和IMS是PSTN向NGN演进的两个不同阶段,两者将以互通方式长期共存。IMS(IP多媒体子系统)将成为统一的融合平台,是一种开放性更好、标准化程度更高、适用于所有接入和业务的统一网络体系架构,有利于固网和移动网的无缝融合;IMS中各种业务具有共同的核心网、用户数据库、后台计费系统和业务开发平台,在用户数据管理和漫游方面更加完善;从无线网来看,无线侧IP化的目标为扁平化的IP RAN,从RAN的IP化逐步演进到LTE扁平化架构。移动无线接入网引入IP UTRAN,UTRAN的Iu、Iur和Iub接口上的用户数据和信令数据均通过IP技术承载。从网络IP化的发展路径来看,应逐步实现接口IP/以太网化、业务IP化、内核IP或分组化、全网架构IP化。网络IP化对光传送网的要求也是逐步深入的,首先是接口的支持,进一步是对IP业务的分组交换和分组传送功能的需求,最终将是光传送网和IP网络的融合组网,在联合设计之下提高光传送网和IP网络的整体效率、生存性和成本的最优化。伴随网络IP化的发展历程,光传送网技术逐步发展和演进,从1999年开始



探讨骨干网 IP over WDM, 2002 年城域网部署基于 SDH 的 MSTP, 到 2008 年面向分组业务的 PTN 和 OTN 等技术, 都为网络 IP 化承载提供了解决方案, 2014 年 POTN 等新型的融合型技术和设备形态也会助力宽带传输网络的建设和发展。

3. 智能化

随着 Internet 快速发展带来的巨大冲击, 移动话音和数据业务、互联网业务和各种新业务的迅速普及和应用, 各种业务呈现爆炸式的增长态势, 这给服务提供商带来广阔的市场前景和新的利润增长点。同时, 软交换、3G/超 3G、10G 以太网、IPv6、移动 IP、光纤高速传输技术等各种新技术层出不穷, 新业务的不可预测性和已有业务增长的不稳定性, 使得静态的网络资源配置方式无法与动态的业务分布模式相适应。为了更有效地利用网络资源, 更迅速地引入各种新的增值业务, 运营商面临新型增值业务的挑战; 同时为了提高竞争力, 运营商均在探索未来经济有效的组网方式。如何充分利用已有的网络基础设施, 通过有效的带宽管理, 快速、低成本地提高它们的业务提供能力, 创造能满足其客户需求并能增加收入的新业务, 是运营商首要解决的问题。

对于传送网来说, 未来的光网络业务远不是一个更大的波长管道而已, 必须加快业务部署速度, 及时对用户请求予以反应, 同时拓宽业务范围, 提高 QoS, 开发具有利润增长点的新应用。光网络需要从传统的“带宽驱动型”运营模式向“用户驱动型”运营模式转变, 借助路由协议和信令机制, 为光网元引入智能, 使光网络变得“聪明”起来, 从而提高带宽的使用率和多业务的承载能力。这使光层从一种静态的传输媒体变成一种智能的网络结构, 业务层和传送层能够融合, 实现理想的协同工作, 大规模降低建网投入和运维成本。光网络技术需要上一个新台阶, 从静态网向智能化动态联网方向发展, 引入交叉、信令、交换等动态概念, 来实现动态带宽分配和提供多种业务; 同时采用开放的网络体系, 结构简单, 扩展能力强, 组网灵活, 具有实时业务提供能力, 通过标准控制平面高效分配资源, 优化带宽调度, 统一多厂商接口, 这样的光网络具有显而易见的优越性和广阔的发展前景。

ASON 的出现, 是在充分吸收了 IP 网络和技术的优点, 将其融合到光传送网中实现的。它在设计之初, 就充分考虑到分组业务占主导地位的发展趋势, 同时将其设计成与 IP 网络相似的结构, 具有无限扩展性和兼容性。通过标准的接口, 不同厂家的设备可实现互通, 便于全网的管理, 其发展的终极目标是全球一张网就可连接各个地方; 同时, 由于其采用 GMPLS 技术, 通过标准的接口可与 IP 网络进行互通; 另外, 采用 ASON 后, 光网络层开始直接承载业务, 传统的多层复杂网络结构变得简单和扁平化, 避免了传统网络中业务升级时受到的多重限制, 从而满足用户对资源动态分配、高效保护恢复能力以及波长应用新业务等方面的需求。

经过多年的发展, 业务和应用又有了新的进展, 近年来, 随着固定宽带和移动互联网业务飞速发展, 云计算、物联网等新型业务的兴起, ICT 技术出现了革命性





进展,使得光网络承载业务的需求不断变化。数据中心互联、网络虚拟化和按需带宽租用、IP与光网络技术的协同融合等,对光网络提出了连接动态化、带宽弹性化、业务增值化的需求。传统自动交换光网络/通用多协议标签交换(ASON/GMPLS)架构,其核心是交换自动化,侧重于针对连接建拆处理过程的控制,包括路由、信令、发现和链路资源管理等功能。但是,连接并不等同于业务,业务的完成还包含丰富的业务提供逻辑和与业务层面的协作交互。传统光网络存在“重控制、轻业务”的问题,难以满足新业务发展的要求,如何以业务智能化为核心构建网络控制功能,迫切需要在机理上实现创新与突破,探索新的智能光网络发展途径。软件定义网络(SDN)的出现为解决以上难题提供了一种行之有效的实现方案。

1.1.2 宽带光传输技术发展历程

1. 宽带光传输技术发展概述

1966年7月,英籍华裔学者高锟博士(K.C.Kao)在英国电机工程师学会的学报上发表了题为《光频率的介质纤维表面波导》的论文,首次提出用玻璃纤维作为光波导用于通信的理论,从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性,作为传输介质的光纤在理论上成为可能,奠定了现代光通信——光纤通信的基础。高锟先生也因此获得了2009年诺贝尔物理学奖。而在此之前,1960年7月7日,《纽约时报》首先披露梅曼成功制成了世界上第一台红宝石激光器。梅曼以普通光射进一根特别的人工合成的红宝石棒,创造出了激光光束。梅曼的成功震惊了全世界。可以说20世纪60年代的这两项发明,为光纤通信的发展奠定了理论基础。

20世纪70年代,依据高锟的理论,康宁公司R.D.Maurer等人于1970年首次拉出了衰减为20dB/km的低损耗光纤,1974年得到2dB/km的光纤,至1976年则达到1dB/km的水平,为日后光纤通信技术的飞速发展奠定了基础。在1970年光纤研制取得了重大突破的同时,作为光纤通信的光源也取得了实质性的进展,双异质结激光器和高辐射发光管相继出现,使1970年成为光纤通信发展的一个重要里程碑。1976年,美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场实验,系统采用GAALAS激光器作为光源,多模光纤作为传输介质,速率为44.7Mbps,传输距离约10km。1976年美国亚特兰大进行的现场实验,标志着光纤通信从理论研究逐步发展到了商业应用的阶段。我国也于1977年研制成功了第一根多模光纤。光纤通信与传统的以铜缆为传输媒质的通信技术相比,主要区别在于它有很多优点:传输频带宽、通信容量大;传输损耗低、中继距离长;纤芯细、重量轻,原料为石英,节省金属材料,有利于资源合理使用;绝缘抗电磁干扰性能强;还具有抗腐蚀能力强、抗辐射能力强、泄漏小、保密性相对较强等优点,可在特殊环境或军事上使用。