

“十二五”国家重点图书出版规划项目：光通信技术丛书

OTN 原理与技术

刘国辉 张皓 编著 毛谦 主审



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

“十二五”国家重点图书出版规划项目:光通信技术丛书

OTN 原理与技术

编著 刘国辉 张 皓
主审 毛 谦



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书系统地吸收了迄今为止 ITU-T 和 OIF 关于光传送网方面的最新建议,结合作者近 20 年来从事光通信技术研究的成果和体会,介绍了光传送网的产生和演进历程、分组化趋势、OTN 控制智能化和 SDN 化趋势、5G 的 OTN 承载方案(MOTN)以及 OTN 演进的最终形态(全光网);介绍了光传送网和灵活光传送网(Flex OTN)的最新分层结构、接口结构、客户信号的映射和复用路线、帧结构和开销;介绍了各种速率、各种格式的客户信号在 OTN 中的映射方法和复用方法(包括客户信号到 OTN 的映射、虚级联技术和链路容量调整方案);介绍了 OTN 的节点设备及组网应用、OTN 的网络结构与保护、光传送网物理层接口;介绍了超 100 Gbit/s OTN 技术,包括 Flex OTN 的接口与帧结构、Flex Ethernet 技术及在 OTN 中的映射、灵活栅格技术;介绍了软件定义光网络的体系构架、SDON 多层多域控制架构、SDON 与现有网络的兼容和演进等内容。

本书是一本关于 OTN 的比较全面、新颖、专业的书籍,内容翔实、概念清晰、剪系统性强,可供从事光传送网研究与光网络规划、光传送网设备开发的科技人员阅读,可作为从事通信网工作的专业技术人员和管理人员学习 OTN 技术的参考书,也可供欲了解光通信前沿技术的大专院校信息通信类专业的教师、研究生、高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

OTN 原理与技术 / 刘国辉,张皓编著. — 北京:北京邮电大学出版社,2020. 1

ISBN 978-7-5635-5951-0

I. ①刘… II. ①刘… ②张… III. ①光传送网 IV. ①TN929. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 292689 号

书 名: OTN 原理与技术

著作责任者: 刘国辉 张 皓

责任编辑: 刘 颖

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(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷:

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 21.75

字 数: 542 千字

版 次: 2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5951-0

定 价: 52.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

光通信技术丛书

编委会

主 审 毛 谦

主 编 陶智勇 曾 军

副主编 魏忠诚 胡强高 胡 毅

杨 靖 原建森 魏 明

从 书 序

现代意义上的光纤通信源于 20 世纪 60 年代,华人高锟(C. K. Kao)博士和霍克哈姆发表了题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,指出利用光纤进行信息传输的可能性,提出“通过原材料提纯制造长距离通信使用的低损耗光纤”的技术途径,奠定了光纤通信的理论基础,简单地说,只要处理好石英玻璃纯度和成分等问题,就能够利用石英玻璃制作光导纤维,从而高效传输信息。这项成果最终促使光纤通信系统问世,而正是光纤通信系统构成了宽带移动通信和高速互联网等现代网络运行的基础,为当今我们信息社会的发展铺平了道路。高锟因此被誉为“光纤之父”。在光纤通信高科技领域,还有众多华人科学家做出了杰出的贡献,谢肇金发明了“长波长半导体激光器件”,金耀周最早提出了同步光网络(SONET)的概念,厉鼎毅是“光波分复用之父”等。

武汉邮电科学研究院是我国光纤通信研究的核心机构。1976 年,武汉邮电科学研究院在国内第一次选用改进的化学气相沉积法(MCVD)进行试验,改制成功一台 MCVD 熔炼车床,在实验过程中克服了管路系统堵塞、石英棒中出现气泡、变形等一系列“拦路虎”,终于熔炼出沉积厚度为 0.2~0.5 mm 的石英管,并烧结成石英棒。1977 年年初,研制出寿命仅为 1 h 的石英棒加热炉,拉制出中国第一根短波长(850 nm)阶跃型石英光纤(长度 17 m,衰减 300 dB/km),取得了通信用光纤研制史上第一次技术突破。1981 年,武汉光纤通信技术公司在国内首先研制成功一批钢镓砷磷长波长光电器件,开启了长波长通信时代。1982 年 12 月 31 日,中国光纤通信第一个实用化系统——“82 工程”按期全线开通,正式进入武汉市市话网试用,从而标志着中国开始进入光纤通信时代。

最近,由武汉邮电科学研究院余少华总工程师牵头承担的国家 973 项目“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”:国内首次实现在一根普通单模光纤中在 C+L 波段以 375 路、每路 267.27 Gbit/s 的超大容量超密集波分复用传输 80 km,传输总容量达到 100.23 Tbit/s,相当于 12.01 亿对人在一根光纤上同时通话。对于我们日常应用而言,相当于在 80 km 的空间距离上,仅用 1 s 的时间,就可传输 4 000 部 25 GB 大小、分辨率 1 080 像素的蓝光超清电影。该项目实现了我国光传输实验在容量这一重要技术指标上的巨大飞跃,助力我国迈入传输容量实验突破 100 Tbit/s 的全球前列,为超高速超密集波分复用超长距离传输的实用化奠定了技术基础,将为国家下一代网络建设提供必要的核心技术储备,也将为国家宽带战略、促进信息消费提供有力支撑。

经过 40 多年的发展,武汉邮电科学研究院经国家批准为“光纤通信技术和网络国家重点实验室”“国家光纤通信技术工程研究中心”“国家光电子工艺中心(武汉分部)”“国家高新技术研究发展计划成果产业化基地”“亚太电信联盟培训中心”“商务部电信援外培训基地”“工业和信息化部光通信产品质量监督检验中心”和创新型企业等,已形成覆盖光纤通信

技术、数据通信技术、无线通信技术与智能化应用技术四大产业的发展格局,是目前全球唯一集光电器件、光纤光缆、光通信系统和网络于一体的通信高技术企业。

2013年第68届联合国大会期间,中国政府推动并支持通过决议将2015年确定为“光和光基技术国际年”。其重要原因是,2016年是诺贝尔奖获得者、号称“光纤之父”的科学家高琨先生发明光纤50周年。为了进一步普及推广光纤通信技术的最新成果,武汉邮电科学研究院和北京邮电大学组织资深的工程师和培训师,编写了“十二五”国家重点图书出版规划项目:光通信技术丛书,该丛书包括《光纤宽带接入技术》《光纤配线产品技术要求与测试方法》《分组传送网原理与技术》《光网络维护与管理》《OTN原理与技术》《光纤材料》《光有源器件》等,力图涵盖光纤通信技术的各个层面。

著名的通信网络专家、武汉邮电科学研究院总工程师、国际电联第15研究组(光网络和接入网)副主席余少华院士,烽火科技学院卢军院长和各位领导对光通信技术丛书给予了大力支持。国际电信联盟组织的成员、武汉邮电科学研究院原总工毛谦教授在百忙之中对光通信技术丛书进行了细心审核。

我们将这套丛书献给通信技术和管理人员、工程人员、高等院校师生,目的是进一步普及光纤通信的最先进技术,共同为我国的光纤通信技术发展努力奋斗!

陶智勇

前 言

全光通信是人类通信的梦想,随着光纤通信的发明和应用,人们发现全光通信的梦想通过努力是可以一步步实现的。于是,全光通信和全光网成为人们追求的理想和目标。

全光网为人类勾画出了通信的美好蓝图,但人们很快发现美好蓝图的实现面临着巨大的困难。首先,光信号的再生、波长变换等在电域很容易实现的功能在光域实现起来十分困难,有些功能虽然可以实现,但效果并不理想,且成本高昂。再者,全光网的管理和维护信息无法在光域处理。因此,全光网不能组成全球性/全国性的大网以实现全网内的波长调度和传输,而仅能组成一个有限区域的子网。光信号在子网内可透明传输和处理,子网之间的互连互通只能通过 3R 电再生实现。

在这一背景下,ITU-T 于 1998 年提出光传送网(OTN)的概念以取代全光网。光传送网根据网络功能与主要特征命名,虽然它的最终目的是构建透明的全光网络,但它不限定网络的透明性,可从“半透明”开始,即在网中允许有光电变换。因此,可以说 OTN 是向全光网发展过程中的过渡形态。

经过 20 多年的发展,OTN 技术已经取得了很大进步,居于通信网的主导地位。多维度的 ROADM 和 OXC 已经比较成熟,可以引入到 OTN 网络。近年来,中国电信已经在骨干网(长江中下游区域)和大城域网(上海)的核心传送节点实现了 ROADM 的规模部署。同时,OTN 技术还吸收了原来 SDH 和现在 PTN 的电层处理技术,具有处理多业务、多速率信号的能力。OTN 现在是既当“爹”(管大事,处理高速信号)又当“妈”(管中小事,处理中低速信号)。通过对 OTN 的功能和能力进行组合和裁剪后,OTN 不仅可用于省际干线和省内干线,而且可用于城域网的核心层、汇聚层,甚至接入层。

ITU-T 从 2007 年开始探索在数据业务占主导情况下 OTN 的应变与改进之道。为了适应业务的 IP 化,先后引入了 ODU0、ODU2e、ODU4、ODUflex 等容器来装载 GE、10GE、100GE 以及任意速率的分组业务和 CBR 业务;为了适应多业务的接入需求,OTN 增加了 GPON、CPRI、FC 以及各种速率的客户信号,引入了 GMP(通用映射规程)的映射方式,增加了低阶/高阶 ODU 结构;为了适应网络扁平化的趋势,OTN 吸收了 PTN 的功能,演变出了分组增强型 OTN(POTN);为了充分利用现有资源灵活承载和传送高速信号,ITU-T

提出了灵活光传送网(Flex OTN)、灵活波长栅格的概念和标准,OIF提出了灵活以太网(Flex Ethernet)的概念和标准;为了满足5G业务对承载网的要求,ITU-T近来提出了移动承载优化光传送网(Mobile-optimized Optical Transport Network, MOTN)的概念,简化了OTN的封装,用以降低OTN设备的时延和成本;未来几年,OTN还要在控制平面引入SDN(软件定义网络),以优化整个通信网。

本书系统地吸收了迄今为止ITU-T和OIF关于光传送网方面的最新建议,参考了近几年来国内外大量文献资料,结合作者近20年从事光通信技术研究的成果和体会,着重讨论了和光传送网密切相关的诸多技术问题。

全书共分9章。第1章以光传送网的演进为主线,介绍了光传送网的产生和演进历程、分组化趋势、OTN控制智能化和SDN化趋势、5G的OTN承载方案(MOTN)以及OTN演进的最终形态(全光网);第2章介绍了光传送网的新分层结构,并从原子功能的角度描述了各层网络的组成及其功能,还从标准的角度介绍了光传送网的标准架构以及各标准的主要内容;第3章介绍了光传送网和灵活光传送网(Flex OTN)的最新分层结构、接口结构、客户信号的映射和复用路线、帧结构和开销;第4章介绍了各种速率、各种格式的客户信号在OTN中的映射方法和复用方法(包括客户信号到OTN的映射、虚级联技术和链路容量调整方案);第5章介绍了OTN的节点设备及组网应用;第6章介绍了OTN的网络结构与保护;第7章介绍了光传送网物理层接口的有关概念、命名及技术要求;第8章介绍了超100 Gbit/s OTN技术,包括Flex OTN的接口与帧结构、Flex Ethernet技术及在OTN中的映射、灵活栅格技术;第9章介绍了软件定义光网络的体系构架、SDON多层多域控制架构、SDON与现有网络的兼容和演进等内容。

本书的前身《光传送网原理与技术》是“十五”国家重点图书出版规划项目,是在国际电信联盟组织成员、武汉邮电科学研究院原副院长兼总工程师毛谦教授的亲自指导下编写而成的。该书是我国第一本全面介绍OTN的专著,出版后受到广大读者的青睐,被广泛引用。

本书在《光传送网原理与技术》的基础上进行了全面更新。作者对引入的最新技术进行了逻辑梳理、难度分解、难点解读和画图说明。因此,本书逻辑性强,深入浅出,通俗易懂,易于理解。

毛谦教授高屋建瓴,对本书从选题到结构和内容的确定,再到全书的审阅和修改,都提出了许多宝贵的意见,倾注了大量的心血!烽火通信股份有限公司的吕建新教授级高级工程师、陈德华教授级高级工程师、郭志霞高级工程师为作者提供了很多帮助。在编写过程中,作者还得到了武汉邮电科学研究院烽火科技学院的领导和同事的鼎力支持和无私帮助。在本书出版之际,谨向所有给予作者关心、爱护、支持和帮助的领导和朋友们致以衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有诸多错误和不周之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2019年7月于武汉

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光传送网的演进	1
1.1.1 从电通信到光通信	1
1.1.2 从 PDH/SDH 到 WDM	3
1.1.3 从 WDM 到 OTN	4
1.1.4 OTN 与 WDM 的关系	5
1.2 OTN 的概念及所涉及的技术	6
1.2.1 OTN 的概念	6
1.2.2 OTN 涉及的技术	7
1.3 OTN 的控制智能化——ASON	10
1.3.1 ASON 的主要特点	11
1.3.2 ASON 的网络结构	11
1.3.3 ASON 的网络接口	14
1.4 OTN 的分组化——POTN	16
1.4.1 通信业务的分组化	16
1.4.2 承载网的分组化	16
1.4.3 传送网的分组化	17
1.4.4 POTN 的技术演进	18
1.5 OTN 对 5G 承载的支持——MOTN	19
1.5.1 MOTN 概念的提出	19
1.5.2 MOTN 的思路	20
1.5.3 面向 5G 的光传送网承载方案	20
1.6 OTN 的未来——全光网	24
1.6.1 全光网的优点	24
1.6.2 全光网的基本结构	25
1.6.3 全光网的关键技术	25
第 2 章 光传送网的分层结构和标准架构	29
2.1 光传送网的分层结构	29
2.2 光传送网层网络的组成与功能	31

2.2.1	数字层网络的组成与功能	31
2.2.2	光信号层网络的组成与功能	31
2.2.3	媒质层网络的组成与功能	34
2.2.4	光传送网各层网络的客户/服务者关系	35
2.3	光传送网标准的框架结构	37
第3章	光传送网的接口及其帧结构	39
3.1	光传送网的接口结构	39
3.1.1	有关术语	40
3.1.2	传统光传送网接口的电域信息结构	42
3.1.3	灵活光传送网接口的电域信息结构	44
3.1.4	光传送网接口的光域信息结构	45
3.1.5	光传送网接口的信息包容关系	46
3.2	客户信号的映射和复用	51
3.2.1	客户信号的映射和复用路线	51
3.2.2	ODU _k 的时分复用路线	54
3.3	OTN 的帧结构与速率	63
3.3.1	OTN 的帧结构	63
3.3.2	OTN 各种信息结构的比特率	65
3.4	OTN 的非随路开销	70
3.4.1	路径踪迹标识符和接入点标识符	70
3.4.2	光传输段开销	72
3.4.3	光复用段开销	73
3.4.4	光通道开销和光支路组开销	73
3.5	OTU/ODU 的帧定位开销	74
3.6	OTU 的开销	75
3.7	ODU 的开销	79
3.7.1	ODU 的开销概貌	79
3.7.2	ODU 通道监视开销	79
3.7.3	ODU 串联连接监视开销	82
3.7.4	ODU 的其他开销	88
3.8	OPU 的开销	90
3.9	OTN 的维护信号	92
第4章	客户信号的映射和复用	97
4.1	普通客户信号到 OPU _k 的映射	97
4.1.1	CBR 信号到 OPU _k 的映射	98
4.1.2	ATM 信元流到 OPU _k 的映射	101
4.1.3	GFP 帧到 OPU _k 的映射	102

4.1.4	测试信号到 OPU _k 的映射	103
4.1.5	非特定客户比特流到 OPU _k 的映射	104
4.2	通用映射规程	104
4.2.1	引入 GMP 映射的目的	104
4.2.2	灵活的光数据单元	105
4.2.3	GMP 映射的原理	105
4.2.4	GMP 处理客户信号的流程	106
4.3	其他 CBR 信号到 OPU _k 的映射	107
4.3.1	速率小于 1.238 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU ₀ 的映射	107
4.3.2	速率为 1.238~2.488 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU ₁ 的映射	109
4.3.3	速率接近 9.995 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU ₂ 的映射	110
4.3.4	速率接近 40.149 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU ₃ 的映射	111
4.3.5	速率接近 104.134 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU ₄ 的映射	112
4.4	FC-1200 信号到 OPU _{2e} 的映射	113
4.5	速率大于 2.488 Gbit/s 的 CBR 信号到 OPU _{flex} 的映射	116
4.6	低阶 ODU 到高阶 ODU 的复用	116
4.6.1	OPU _k 的支路时隙	117
4.6.2	ODTU 的定义	122
4.6.3	ODTU _{jk} 到 OPU _k 的复用	124
4.6.4	ODTU _{k,ts} 到 OPU _k 的复用	127
4.6.5	OPU _k 的复用开销	131
4.6.6	ODU _j 到 ODTU _{jk} 的映射	138
4.6.7	ODU _j 到 ODTU _{k,ts} 的映射	145
4.7	客户信号的虚级联映射	148
4.7.1	虚级联的概念	148
4.7.2	虚级联容器及其开销	149
4.7.3	客户信号的虚级联映射	151
4.8	虚级联信号的链路容量调整方案	151
4.8.1	LCAS 控制开销	156
4.8.2	链路容量调整原理	158
4.8.3	LCAS 协议	160
4.8.4	LCAS 命令的时序分析	163
第 5 章	OTN 的节点设备	170
5.1	POTN 设备的总体构架及主要功能	170
5.1.1	POTN 设备系统构架	170
5.1.2	板卡式 POTN 设备逻辑功能模型	171
5.1.3	集中交叉式 POTN 设备逻辑功能模型	172
5.1.4	POTN 设备的主要功能	173

5.2	POTN 的电层交换技术	174
5.2.1	集中交换的原理	174
5.2.2	实现统一信元交换的关键技术	175
5.2.3	统一信元交换设备的实现	177
5.3	OADM 的功能与结构	177
5.3.1	OADM 的功能及其性能要求	178
5.3.2	OADM 节点的结构	179
5.4	OXC 的功能与结构	184
5.4.1	OXC 的功能及其性能要求	184
5.4.2	OXC 的结构	188
5.4.3	基于空间光开关矩阵的透明 WXC 结构举例	190
5.5	烽火通信公司 POTN 设备介绍	194
5.5.1	烽火 FONST 6000 U 系列设备介绍	194
5.5.2	FONST 6000 U60 介绍	195
5.6	POTN 设备的组网应用	197
5.6.1	POTN 设备在光层的组网应用举例	197
5.6.2	POTN 设备在电层的组网应用举例	199
第 6 章	OTN 的网络结构与保护	204
6.1	OTN 的网络结构	204
6.1.1	OTN 的物理拓扑结构	204
6.1.2	OTN 的逻辑拓扑结构	206
6.2	OTN 的保护策略	207
6.2.1	网络保护的概念与分类	207
6.2.2	路径保护	207
6.2.3	子网连接保护	209
6.2.4	共享环保护	211
6.3	OTN 线性保护的结构与 APS 协议	211
6.3.1	常用术语	211
6.3.2	线性保护的体系结构	212
6.3.3	保护组命令	214
6.3.4	线性保护的 APS 协议	215
6.4	OTN 线性保护 APS 协议的传输	220
6.4.1	1+1 单向和双向倒换举例	220
6.4.2	1:n 的双向倒换举例	221
6.4.3	练习命令操作	221
6.5	OTN 环网保护的 APS 协议与传输	224
6.5.1	OTN 环网保护的结构	224
6.5.2	OTN 环网保护的 APS 协议	225

6.5.3 OTN 保护环的配置	228
6.5.4 OTN 环保护倒换中 APS 信令的传输	230
6.6 OTN 的光层保护	232
6.6.1 光线路 1+1/1:1 保护	233
6.6.2 光复用段 1+1 保护	233
6.6.3 光通道 1+1 波长保护	235
6.6.4 光通道 1+1 路由保护	235
6.7 OTN 的 OCh 层保护	238
6.7.1 OCh 1+1 保护	240
6.7.2 OCh $m:n$ 保护	241
6.7.3 OCh Ring 保护	242
6.8 OTN 的 ODUk 层保护	244
6.8.1 ODUk 1+1 保护	244
6.8.2 ODUk $m:n$ 保护	245
6.8.3 ODUk Ring 保护	247
第 7 章 光传送网的物理层接口	249
7.1 域间接口及其命名	249
7.1.1 域间接口	249
7.1.2 光网络单元的参考点	250
7.1.3 域间接口的命名	251
7.2 多信道和单信道域间接口	253
7.2.1 多信道域间接口	253
7.2.2 单信道域间接口	256
7.2.3 多信道域间接口与单信道域间接口的互联	258
7.2.4 域间接口的横向兼容	258
7.3 域间接口的技术要求	260
7.3.1 域间接口的技术参数	260
7.3.2 多信道域间接口的技术参数值	269
7.3.3 单信道 NRZ 码域间接口的技术参数值	270
7.3.4 单信道 RZ 码域间接口的技术参数值	271
第 8 章 超 100 Gbit/s OTN 技术	273
8.1 Flex OTN 的接口与帧结构	273
8.1.1 Flex OTN 的短距接口	273
8.1.2 Flex OTN 的长距接口	275
8.1.3 Flex OTN 的帧结构与比特率	276
8.2 ODUk 到 ODTUC _n 以及 ODTUC _n 到 OPUC _n 的复用	277
8.2.1 OPUC _n 支路时隙的定义	277

8.2.2	ODTUC _n 的定义	282
8.2.3	ODU _k 到 ODTUC _{n, ts} 的映射	282
8.2.4	OPUC _n 的复用开销和 ODTU 调整开销	283
8.2.5	ODTUC _n 到 OPUC _n 的复用	286
8.3	OTUC _n 到 n 个 FlexO 实体的映射	287
8.3.1	OTUC _n 的分配和 OTUC 的合并	287
8.3.2	OTUC 到 FlexO 帧的映射	287
8.4	Flex Ethernet 技术	288
8.4.1	Flex Ethernet 的概念	289
8.4.2	FlexE 的主要功能	291
8.4.3	100G/200G/400G FlexE 的复用功能结构	293
8.5	Flex Ethernet 在传送网中的传送模式	296
8.6	Flex Ethernet 在 OTN 中的映射	297
8.7	灵活栅格技术	298
8.7.1	固定的 DWDM 栅格	299
8.7.2	灵活的 DWDM 栅格	302
8.7.3	灵活栅格的使用	302
第 9 章	软件定义光网络	304
9.1	软件定义光网络的体系构架	304
9.1.1	软件定义光网络的定义和基本特征	304
9.1.2	软件定义光网络的总体构架	306
9.2	SDON 多层多域控制架构	309
9.2.1	多域网络控制架构	309
9.2.2	多层网络控制架构	309
9.3	SDON 控制器功能要求	311
9.3.1	总体功能要求	311
9.3.2	控制器可靠性要求	316
9.3.3	控制器扩展性要求	317
9.3.4	控制器安全性要求	318
9.4	SDON 与现有网络的兼容和演进	319
9.4.1	光网络设备向 SDON 的兼容和演进	319
9.4.2	光网络向 SDN 的演进	320
	缩略语	323
	参考文献	332

第 1 章 概 述

1.1 光传送网的演进

光通信自问世至今已得到高速发展,被普遍推广应用。但一直以来,光纤传输主要还是作为一种信号传送的手段,网络的组织主要是在电的层面。随着社会对信息需求的日渐增长,仅在电层组织网络已经不能满足需求,于是光通信从电层网络向光层网络发展,出现了光传送网(OTN)。

1.1.1 从电通信到光通信

1873年,美国人莫尔斯发明了电报,用电传输了文字信息(数据);1876年,美国人贝尔发明了电话,用电传输了声音;1924年,英国人贝尔德发明了电视机,用电传输了图像。电报、电话和电视都是用无线电或有线电传输信息,电通信作为信息传输的有效通道,一直沿用了一个多世纪。

电通信网是一种成熟的网络,采用电缆将网络节点互连在一起,其网络节点采用电子交换。作为电信号承载信道的电缆,是一种损耗较大、带宽较窄的传输信道,主要采用了频分复用(FDM)方式来提高传输的容量。电网络具有如下特点:信息以模拟信号为主;信息在网络节点的时延较大;节点的信息吞吐量小;信道的容量受限、传输距离较短等。电网络完全是在电域完成信息的传输、交换、存储和处理,因此受到电器件本身的物理极限的限制。

1960年7月,美国休斯公司实验室的西奥多梅曼研制出世界上第一台激光器——红宝石激光器,并发出一束很强、很直、很纯的红光。从此,人类历史上便出现了第一束被驯服的光——激光。有了激光器,继而要解决的首要问题便是用什么样的导体传送它发出的信号。因为激光的大气传输本身并不是一种全天候的通信方式,遇到能见度不好的天气,它简直是一筹莫展。

经过10年的寻觅,1970年美国康宁玻璃公司由加勒博士领导的一个研究小组,根据英籍华人科学家高锟提出的理论,研制成功了第一条损耗系数为20dB/km的单模石英光纤,这证明光纤作为通信的传输媒质是大有希望的。同年,GaAlAs异质结半导体激光器实现了室温下的连续工作,为光纤通信提供了理想的光源。从此,人类通信史上便开创了光纤通

信的新时代。

有了激光和光导纤维,信息传输的能力大大提高。光纤通信集电报、电话、有线电视、传真等于一体,形成了快速、便宜、交互的通信网。一根头发丝粗细的光纤的信息容量相当于数亿路电话线,足以传送数十万套电视节目。

光子具有极快的响应速度。电子脉冲的脉宽最窄限度在纳(10^{-9})秒量级,因此在电子通信中,信息速度被限定在 10^{10} bit/s 以下。而光子技术,其脉冲信号可轻易达到皮(10^{-12})秒量级,使用光子作为信息载体,其信息速率可以是电子通信的千万倍。

光子具有极强的互连能力与并行能力。在电子技术中为了实现互连,必须给导线搭“立交桥”,将其运行线路隔离,电子信号也只能串行提取、传输或处理。而在光子技术中,不存在这样的问题,光子的存储能力极强。与电子存储不同,光子除能进行一维、二维存储外,还能完成三维存储。而且光子无电荷,以其作信息载体既无电磁干扰,又具有极好的保密性。

从理论上讲,只需一根光缆便可承载全世界的所有通信。不过,目前的光通信实际上还是一种“电光通信”或者叫作“半光通信”,所构成的网络是光电混合网络。因为在通信过程中要有电信号的参与和电信号与光信号的相互转换。因此,现有的光通信系统,最好的通信能力也要比理论峰值低上千倍。

以打电话为例,讲话的甲方先用电话将声能转成电能使之成为电信号,通过发送光端机再将电信号变成光信号;而在听话的乙方则需先通过接收光端机将光能变成电能,再经电话将电能变成声能。在这种声电转换、光电互变的通信系统中,光子充其量只是一个“长跑冠军”,通信的两端仍是电信号的来回转换,在转换过程中难免要掺杂进一些杂音,使通信质量劣化。如何把电信号从通信过程中“请出去”,已成为科学家们攻关的目标。

光电混合网在网络节点之间用光纤取代了传统的电缆,实现了节点之间的全光化。这是目前广泛采用的通信网络。光纤传输与电缆传输相比有如下优点:通信容量大、传输距离远;信号串扰小、保密性能好;抗电磁干扰、传输质量佳;光纤尺寸小、重量轻、便于敷设和运输;节约有色金属。光电混合网是一个数字化的网络,它采用时分复用(TDM)技术来充分挖掘光纤的宽带宽资源,来进行信息的大容量传输,采用时分交换网络(结合空分)实现信息在网络节点上的交换。TDM有两种复接体系,即基于点到点的准同步复接体系(PDH)和基于点到多点、与网络同步的同步复接体系(SDH)。由于SDH优于PDH,因而目前SDH已经广泛取代PDH。也就是说,光电混合网的传输在光域进行,交换/交叉仍在电域进行。

未来的光通信将是“全光通信”,所构成的网络就是全光网络,电仅仅只作为能源使用而不参与通信过程。通信系统将由“电子世界”跃入“光子世界”。届时电报、电话、电视将统统改名换姓为光报、光话、光视。

全光网络将以光节点取代电节点,并用光纤将光节点互连在一起,实现信息完全在光域的传送和交换,是未来信息网的核心。全光网络最重要的优点是它的开放性。全光网络本质上是完全透明的,即对不同速率、协议、调制频率和制式的信号同时兼容,并允许几代设备(PDH/SDH/ATM)共存于同一个光纤基础网络中。全光网的结构非常灵活,因此可以随时增加一些新节点,包括增加一些无源分路/合路器和短光纤,而不必安装另外的交换节点或者长光缆。全光网络与光电混合网络的显著不同之处在于它具有最少量的电/光和光/电转换。

以目前的眼光看来,全光通信应该是通信的最高理想,然而,通往理想之路必须立足于

现实,理想的实现必然是一个渐进的演进过程。

1.1.2 从 PDH/SDH 到 WDM

自 20 世纪 90 年代中期起,国际上开放互联网让公众使用,用户使用计算机上网实现数据通信,并索取大量有用的数据信息。于是通信领域中数据通信业务量快速增长,超过电话的年增长率。进入 21 世纪后,数据通信业务总量必将超过传统电话业务总量。相应地,正在考虑设计的新型通信网必将以数据通信为重心,传统的电话网必将作出相应的改变。这是通信网发展过程中重大的、革命性的转变。

随着数字通信的普遍应用及其业务量的快速增长,为便于全世界各国统一使用,国际上曾经按电的时分多路复用(TDM)原则,制订了数字系列标准。最基本的是以 30~32 路电话为一群,按每路数字语音信号 64 kbit/s 设计,30~32 路数字电话的速率共约 2 Mbit/s,这样就成为基本的数字群。其后,4 个 2 Mbit/s 合成下一级数字群 8 Mbit/s,这样 4 个一组组成 34 Mbit/s、155 Mbit/s、622 Mbit/s、2.5 Gbit/s 以至 10 Gbit/s。这样把电的数字信号按 4 个低级群组成 1 个高级群的原则,称为准同步/同步数字系列(PDH/SDH)。在使用电的时分多路复用(E-TDM)技术时,其电的数字合路/分路器和复用/解复用(Mux/DeMux)的结构制造难度,随着数字速率提高而加大。迄今,电的 TDM 似乎限于 10 Gbit/s 以下,个别实验室曾做成 $4 \times 40 \text{ Gbit/s} = 160 \text{ Gbit/s}$,再高就有一定困难。因此,电的多路数字信号利用 TDM 技术所能达到的实用化数字速率,在最近期间只能以 40 Gbit/s 为限度。

在 20 世纪末和 21 世纪初,全球信息基础设施主要是由同步数字体系(SDH)支撑的,这种网络体系结构在传统电信网中扮演了极其重要的角色,但随着数据业务逐渐成为全网的主要业务,作为支持电路交换方式的 SDH TDM 结构,越来越不适应业务的发展,需要探索新的技术和新的、更有效的网络结构。

从 20 世纪八九十年代的电信发展史看,光纤通信发展始终在按照电的时分复用方式进行,高比特率系统的经济效益大致按指数规律增长。商用系统的速率已达 40 Gbit/s,有些实验室甚至已进行了 160 Gbit/s 乃至 320 Gbit/s 的试验。单路波长的传输速率正趋近上限,这受限于集成电路硅材料和砷磷材料的电子和空穴的迁移率及受限于传输媒质的色散和偏振模色散,还受限于所开发系统的性能价格比是否有商用经济价值,因而现实的进一步扩大规模扩容的出路是转向光的复用方式,即波分复用(WDM)。

采用 WDM 技术后,可以使容量迅速扩大几倍至几百倍;由于光放大器的出现,电再生距离从传统 SDH 的 40~80 km 增加到 400~600 km,甚至达到 10 000 km,节约了大量光纤和电再生器,大大降低了传输成本。

随后,WDM 系统发展十分迅猛,320 Gbit/s($32 \times 10 \text{ Gbit/s}$) WDM 系统开始大批量装备网络,北电、烽火、华为等公司的 1.6 Tbit/s($160 \times 10 \text{ Gbit/s}$) WDM 系统也相继投入商用。日本 NEC 和法国阿尔卡特公司分别实现了总容量为 10.9 Tbit/s($273 \times 40 \text{ Gbit/s}$)和总容量为 10.2 Tbit/s($256 \times 40 \text{ Gbit/s}$)的当时传输容量最新世界纪录。目前的最高纪录是 2012 年发布 NTT 实现的 WDM 最高容量,达到单纤 102.3 Tbit/s($224 \times 548 \text{ Gbit/s} = 122.752 \text{ Tbit/s}$ (加了 FEC)),传输 240 km。从应用场合看,WDM 系统已经从长途网向城域网渗透。总的看来,采用 WDM 后传输链路容量已基本实现突破,网络容量的“瓶颈”将转移到网络节点上。