



国之重器出版工程

网络强国建设

网络基础与关键技术研究丛书

Optical Transport Network (OTN) :
Principles and Applications

光传送网 (OTN)
技术的原理与应用

李允博 编著



国之重器出版工程
网络强国建设

网络基础与关键技术研究丛书

光传送网 (OTN) 技术的原理与应用

Optical Transport Network (OTN) :
Principles and Applications

李允博 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

光传送网 (OTN) 技术的原理与应用 / 李允博编著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2018. 8

(国之重器出版工程·网络基础与关键技术研究丛书)

ISBN 978-7-115-48860-2

I. ①光… II. ①李… III. ①光传送网 IV.

①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第142290号

内 容 提 要

本书系统地阐述了 OTN 技术的基本原理, 包括光网络发展现状、OTN 技术发展的背景、OTN 的架构和设备类型、OTN 接口结构、OTN 业务映射方式、OTN 交叉连接技术、OTN 承载同步技术和软件定义光传送网 (SOTN) 技术。

本书适用于设备厂商技术开发人员、设备维护人员以及相关院校学生。

◆ 编 著 李允博

责任编辑 李 静

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 710×1000 1/16

印张: 32.5

字数: 600 千字

2018 年 8 月第 1 版

2018 年 8 月河北第 1 次印刷

定价: 158.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	




专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士

- 
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



序

光纤尽管只存在了半个世纪，但凭借大容量、低损耗、抗干扰能力强等优异的性能，已经成为当今信息社会的核心物理基础设施。信息发展日新月异，4G/5G、移动互联网、大数据、4K 乃至 VR 和 AR 对带宽的需求持续增长，消耗大带宽的应用不断涌现，骨干网继续升级、下一代 400Gbit/s 乃至 1Tbit/s 网络的发展已经被提上日程。

纵观通信网络的发展，链路带宽的不断提升，对于大容量的节点设备的需求越来越高，因此，具备联网功能的光传送网（OTN）技术应运而生。ITU（国际电信联盟）早在 1992 年就启动了 OTN 标准体系的研究，这种技术体制最主要的优势在于支持客户信号的灵活透明传送，有利于维持基础设施的长期稳定。

通信网络的线路侧向 100Gbit/s、400Gbit/s 甚至 1Tbit/s 发展的同时，低于线路侧速率的支路侧 GE、2.5Gbit/s、10Gbit/s、10GE、40Gbit/s 等低速业务也在现网长期存在，这就导致线路和支路之间的速率差不断增大，使得业务汇聚、穿通、保护等诉求提升，从而提高波长的利用率。其中，汇聚是指低速业务到高速线路的汇聚；穿通的诉求主要是指减少中间站点业务落地互联的成本；保护主要是业务颗粒级的保护而不是管道级的保护，这些都要求对于带宽的使用更为精细化。

移动互联网时代，互联网内容提供商重新定义了网络的业务流向，以 DC 为中心重新构筑大容量、低时延、一跳直达的端到端智能灵活管控的网状网络成为业界的共识。OTN 技术将结合光交叉技术逐步构成统一的光电交叉合一的设备平台，基于资源池化和业务智能感知，结合软定义网络（SDN）技术，实现各种颗粒大小和不同类型的业务端到端一跳直达，适应云时代业务的各种传送承载需求。



本书系统阐述了 OTN 的网络架构、设备类型、接口结构和映射方式等标准协议，并结合业务的需求介绍了 OTN 交叉连接技术、时间同步机制以及与 SDN 的结合应用。

本书不仅仅是理论知识的普及，更反映了近几年业界对于 OTN 发展的经验总结和期望，有助于各类科技人员、大专院校学生更好地了解 OTN 技术，有助于推动 OTN 技术在我国的应用和发展。

韦乐平

2018 年 5 月 23 日



前 言

光传送网（OTN）技术更新的速度越来越快，以光线路速率的更新换代为例，2000年，10Gbit/s光线路开始在国内应用；2012年，100Gbit/s光线路开始应用，与10Gbit/s光线路应用间隔是12年；2014年，400Gbit/s光线路开始出现在现网，与100Gbit/s光线路应用间隔仅仅是两年。作为真正使光传送网具备组网能力的光传送网技术，近几年也在不断发展完善。自2013年4月第一版《光传送网（OTN）技术的原理和测试》出版以来，OTN标准、设备形态、组网应用都发生了变化，时移世易，修订宜矣。

OTN技术是一种光传送网体系，它定义了标准的帧结构、速率和映射方式，引入了波长/子波长交叉连接功能，能为信号提供在光层的传送、复用、交叉调度、监控和保护恢复。ITU-T在1999—2008年完成关于OTN技术的主要标准的制订工作，2009年，OTN技术开始完成向“面向全业务承载”的转变，加强了对以太网业务的承载。OTN技术逐步完善了对ODU0、ODU3e2、高阶/低阶光通道数据单元（HO/LO ODU）、ODU4、通用映射规程（GMP）、无损调整协议（G.HAO）、OTUC_n和FlexO等技术方案的标准化，满足了多业务承载的需求。由于OTN具备标准协议的一致性和包容性，其从最初只提供简单的带宽通道，慢慢发展到具备分组处理能力，可实现同步传递能力，并支持SDN功能。

OTN技术最初的目标是提升传送网的网络组织能力，为大量GE、2.5Gbit/s、10Gbit/s、40Gbit/s、100Gbit/s甚至400Gbit/s等大颗粒业务提供传输通道；为信号提供在波长/子波长级别的传送、复用、交叉调度和监控能力；在提供丰富带宽的基础上，增强节点汇聚和交叉能力、组网保护和OAM管理能力。随着业务速率的增加，OTN设备也在将基于ODU_k的电交叉调度与波长级的光交叉融合在一起。



随着软件定义网络 (SDN) 技术的发展, OTN 逐步实现了多厂商互联互通、与 IP 网络的协同组网, 并不断满足数据中心日益发展的互联需求, 逐步向应用层开放网络服务能力。

本书共分 8 章, 第 1 章介绍了光网络发展现状、OTN 技术发展的背景、标准进展、应用场景分析等; 第 2 章介绍了 OTN 架构和设备类型, 包含 OTN 功能结构等; 第 3 章介绍了 OTN 接口结构、光通路帧结构、复用 / 映射原则和比特速率、OTN 开销描述和信号维护; 第 4 章介绍了 OTN 业务映射方式, 介绍了信号映射方式、信号级联方式; 第 5 章介绍了 OTN 交叉连接技术, 介绍了光、电、光电混合交叉连接的各种技术和实现方式; 第 6 章介绍了 OTN 承载同步要求, 包括频率同步和时间同步的原理、承载方式; 第 7 章介绍了软件定义光传送网 (SOTN) 的发展, 论述 SDN 在 OTN 组网中的应用; 第 8 章为 OTN 接口相关技术附录。

一种技术的生命力在于海纳百川, 不断汲取创新, 也在于不断充实完善, OTN 技术也是如此。本书就是将 OTN 技术的最新进展呈现给大家。在本书的编制期间, 感谢韦乐平老师的指导和帮助, 尤其是在 SDN 技术与 OTN 有机融合方面, 韦老师提出传送网应当从“互联网应用被动适应网络”向“网络主动、快速、灵活适应互联网应用”转变的思路。同时也非常感谢中国移动研究院的领导、同事们, 中国信息通信研究院的专家以及业界合作伙伴所给予的帮助和支持。希望本书对读者了解 OTN 技术的最新现状和未来发展有所帮助。

OTN 技术是一个已经在现网中被规模部署的技术, 其还在不断更新、发展中, 书中难免有遗漏和不当之处, 恳请专家和同行批评指正。

作者

2018 年 5 月 1 日于北京



目 录

第 1 章 概论	001
1.1 网络解决的问题	002
1.1.1 接入网	002
1.1.2 交换网	003
1.1.3 光传送网	004
1.2 光传送网现状	005
1.2.1 高速传输技术	005
1.2.2 传输节点技术	006
1.3 业务发展对光传送网的需求	007
1.3.1 宽带化需求	008
1.3.2 快速开通业务需求	009
1.3.3 扁平化需求	011
1.3.4 低时延需求	012
1.4 OTN 技术简介	012
1.5 OTN 标准的进展	015
1.6 OTN 应用场景分析	029
1.6.1 骨干网络	029
1.6.2 城域网络	033
参考文献	039



第 2 章 OTN 架构和设备类型、特性	041
2.1 OTN 的分层	042
2.1.1 OTN 的层次模型	042
2.1.2 光通路层网络	043
2.1.3 光复用段层网络	048
2.1.4 光传输段层网络	049
2.2 OTN 的分割	050
2.2.1 OTN 的分域	050
2.2.2 不同管理域的互联互通	050
2.2.3 OTN 域内分割	051
2.3 OTN 拓扑	052
2.4 OTN 层次结构、域、拓扑和连接	052
2.4.1 网络概述	052
2.4.2 层网络	053
2.4.3 OTN OAM 功能	056
2.5 操作、管理、维护及配置	057
2.5.1 OAM 应用	057
2.5.2 TMN 接入	067
2.5.3 同步功能	068
2.6 光传输网络设备的接口	069
2.6.1 I-NNI	069
2.6.2 E-NNI	071
2.6.3 UNI	071
2.7 OTN 设备基本类型	073
2.7.1 3R 再生组合功能	073
2.7.2 OTN 终端单元 (NTU)	074
2.7.3 波长分插复用器 (WADM)	074
2.7.4 波长交叉连接 (WXC)	075
2.7.5 子波长交叉连接 (SWXC)	076
2.7.6 光放大器	078
2.7.7 子波长分插复用器 (SWADM)	079
2.8 OTN 和分组传送网络 (PTN) 混合设备	079
2.9 SNC 保护实施的举例	080



2.10 OTN 链路和连接举例	084
参考文献	093
第 3 章 OTN 接口结构	095
3.1 光传送网接口结构	096
3.1.1 基本信号结构	097
3.1.2 OTN 接口信息结构	099
3.2 复用 / 映射原则和比特速率	103
3.2.1 映射	103
3.2.2 波分复用	103
3.2.3 比特率和容量	103
3.2.4 ODU k 时分复用	109
3.3 OTN 接口	117
3.3.1 单个 OTU (SOTU) 接口	117
3.3.2 多个 OTU (MOTU) 接口	118
3.3.3 具有管理功能的单个 OTU (SOTU m) 接口	118
3.3.4 具有管理功能的多个 OTU (MOTU m) 接口	118
3.4 OCh 和 OTSiA	118
3.4.1 OCh	118
3.4.2 光支路信号组件 (OTSiA)	119
3.5 光传送单元 (OTU)	119
3.5.1 OTU k 帧结构	119
3.5.2 扰码	121
3.5.3 OTUC n 帧结构	121
3.6 光数据单元 (ODU)	123
3.6.1 ODU 帧结构	123
3.6.2 ODU 比特速率和比特速率容差	124
3.7 光净荷单元 (OPU)	127
3.8 OSC 和 OCC 承载的开销信息	128
3.9 开销描述	129
3.9.1 开销类型	132
3.9.2 路径踪迹标识符和访问点标识符定义	134
3.9.3 OTS-O 描述	136
3.9.4 OMS-O 描述	136



3.9.5	OCh-O 和 OTSiG-O 描述	137
3.9.6	OTU/ODU 帧定位开销描述	139
3.9.7	OTU OH 描述	140
3.9.8	ODU OH 描述	146
3.9.9	OPU OH 描述	160
3.10	维护信号	163
3.10.1	OTS 维护信号	163
3.10.2	OMS 维护信号	163
3.10.3	OCh 和 OTiSA 维护信号	164
3.10.4	OTU 维护信号	164
3.10.5	ODU 维护信号	165
3.10.6	客户维护信号	167
	参考文献	167
第 4 章	OTN 业务映射方式	169
4.1	客户信号映射	170
4.1.1	OPU 客户信号故障 (CSF)	171
4.1.2	CBR2G5、CBR10G 和 CBR40G 信号 (STM-16/64/256) 到 OPU _k 的映射	171
4.1.3	GFP 帧到 OPU _k 的映射 ($k=0,1,2,3,4,flex$)	175
4.1.4	测试信号到 OPU 的映射	177
4.1.5	非特定客户比特流到 OPU _k 的映射	178
4.1.6	含码速调整的其他固定比特速率的信号到 OPU _k 的映射	179
4.1.7	采用同步透明编码转换后将 1000BASE-X 和 FC-1200 信号 映射到 OPU _k	189
4.1.8	使用 BMP 将高于 2.488 Gbit/s 的 CBR 信号映射至 OPU _{flex}	192
4.1.9	分组客户信号映射至 OPU _k	195
4.1.10	使用 IMP 将 FlexE 客户信号映射至 OPU _{flex}	195
4.1.11	FlexE 识别信号映射至 OPU _{flex}	197
4.2	ODU _k 到 ODTU 信号以及 ODTU 到 OPU _k 支路时隙的映射	201
4.2.1	OPU _k 支路时隙定义	202
4.2.2	ODTU 定义	208
4.2.3	ODTU 信号到 OPU _k 的复用	210
4.2.4	OPU _k 复用开销和 ODTU 调整开销	217



4.2.5	ODU _j 到 ODTU _{jk} 的映射	228
4.2.6	ODU _j 到 ODTU _{k.ts} 的映射	236
4.2.7	ODU _k 信号映射至 ODTUC _n 信号及 ODTUC _n 映射至 OPUC _n 支路时隙	242
	参考文献	254
第 5 章	OTN 交叉连接技术	257
5.1	OTN 交叉连接设备	258
5.2	OTN 电交叉连接技术	259
5.2.1	电交叉连接技术基本原理	260
5.2.2	OTN 交换单元的保护	270
5.3	OTN 光交叉连接技术	271
5.3.1	光交叉连接技术的应用背景	272
5.3.2	光开关技术	273
5.3.3	光交叉连接设备原理	278
5.3.4	CDC 功能要求及实现	284
5.4	OTN 光电合一交叉连接技术	289
5.4.1	OTN 光电合一交叉连接设备应用场景	289
5.4.2	OTN 光电合一交叉连接设备实现	292
5.5	未来光节点的发展	296
	参考文献	299
第 6 章	OTN 承载同步技术	301
6.1	OTN 支持同步的需求	302
6.2	同步的原理	305
6.2.1	频率同步	305
6.2.2	时间同步	319
6.3	OTN 同步技术	324
6.3.1	OTN 频率同步	324
6.3.2	OTN 时间同步	328
6.3.3	各种接口的实现方案	331
6.3.4	OTN 设备的同步实现方案	336
6.3.5	OTN 同步网的保护倒换机制	337
6.3.6	OTN 设备的应用组网场景	338



6.3.7 1588 v2 光纤不对称补偿问题 341

参考文献..... 343

第 7 章 软件定义光传送网 (SOTN) 技术345

7.1 软件定义光传送网应用场景 346

7.1.1 多域网络的统一控制 346

7.1.2 多层网络统一控制和管理 347

7.1.3 传送网能力开放和提供新型传送业务 348

7.1.4 IP+ 光协同 348

7.1.5 数据中心光互联 349

7.2 SOTN 总体架构 350

7.2.1 总体架构 350

7.2.2 传送平面 353

7.2.3 控制器平面 353

7.2.4 管理平面 356

7.2.5 应用平面 356

7.2.6 数据通信网 357

7.3 SOTN 控制器功能要求 357

7.3.1 总体功能要求 357

7.3.2 接口和协议要求 366

7.3.3 控制器性能指标 369

7.3.4 控制器可靠性要求 370

7.3.5 控制器扩展性要求 371

7.3.6 控制器安全性要求 371

7.4 应用平面要求 373

7.5 数据通信网要求 374

7.6 管理平面要求 374

7.6.1 管理平面实现方式 374

7.6.2 管理平面功能要求 376

7.7 SOTN 恢复技术 379

7.7.1 基于控制器的集中恢复类型 380

7.7.2 恢复路由计算的约束条件和策略 381

7.7.3 基于控制器的集中恢复倒换触发条件 381

7.7.4 恢复的倒换方式和返回机制 381