



专题：新型网络

面向专线业务的光传送网（OTN）关键技术及应用

唐雄燕¹, 王海军¹, 杨宏博²

- (1. 中国联合网络通信有限公司网络技术研究院, 北京 100048;
2. 中国联合网络通信有限公司云网运营中心, 北京 100032)

摘要：专线业务的高速发展驱动光传送网从运营商的基础网络发展为直接面向客户的高品质专线业务承载网。随着 MSTP 的退出, OTN 成为实现光业务网的主要技术。分析研究了 OTN 承载专线业务的关键技术及演进, 研究 OTN 多域级联保护中存在的问题并推动在 ITU-T 进行标准修订, 研究并解决域间采用高速接口互连时异厂商设备间的互通问题。提出了运营商通过 SDN 与 OTN 相结合建设高品质政企专网的发展方向, 推动在 IETF 制定基于 ACTN 的 SD-OTN 控制器北向接口标准和 YANG 数据模型, 在中国通信标准化协会制定接入型光传送网 (OTN) 的设备管控技术要求, 实现南向接口标准化和 OTN 网络的开放解耦。分享了中国联通在业界开发并部署首个基于 SDN 智能管控的 OTN 政企精品网的成果。

关键词：光传送网; 分组增强型; 专线; SDN; OSU

中图分类号：TN915.11

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020200

Key technologies and application of optical transport network for leased line services

TANG Xiongyan¹, WANG Haijun¹, YANG Hongbo²

1. Network Technology Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China
2. Cloud and Network Operation Center of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: The rapid development of leased line services has transformed the optical transport network from operator's basic network to leased line service network. With the withdrawal of MSTP, OTN has become the main network technology for high-value leased lines. Several key technical solutions and evolution of OTN carrying leased line were analyzed and researched. The problem of cascade protection in multi-domain OTN was researched. Interoperability of different vendors' equipment was researched and solved. SDN and OTN were proposed as the development direction for high-quality leased lines. ACTN-based SD-OTN controller northbound interface standard and YANG model, technical requirements of management and control for access OTN equipment were promoted in IETF and CCSA separately, which would promote decoupling of OTN network. China Unicom's leading experience of development and deployment of SDN orchestrator on OTN for high quality leased line was shared.

Key words: OTN, packet enhanced, leased line, SDN, OSU

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1801204)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801204)

1 引言

长期以来,光传送网(optical transport network, OTN)主要是作为支撑运营商电话与数据业务的基础网络而存在的,是运营商业务网的配套。但随着政企客户对高质量专业业务需求量的持续高速增长,OTN 作为直接服务于客户的专线业务网络的作用凸显。本文将基于 OTN 的资源出租(专线、VPN/切片)网络定义为光业务网,笔者曾于 2005 年分析了光业务网的发展趋势^[1],并指出由基础传输网转变为业务网有一系列的问题需要研究和解决,如业务定义、业务管理、业务接入、服务保障等,而组网方式、网络结构、网络覆盖也要相应地调整,网络管理维护体制、电路调度手段、商业运营模式等都要适应业务网的需要进行相应变革。随着光传送网技术的进步,光业务网在不断演进发展,并逐步成为最重要的高品质专线网络。

同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)技术诞生于 20 世纪 90 年代初期,主要提供以 2 Mbit/s 为主要接口和业务颗粒的 TDM 数字电路传输。为适应以太网业务传送需求,基于 SDH 的多业务传送平台(multi-service transport platform, MSTP)技术应运而生, MSTP 将 SDH 技术与以太网技术结合起来,为 2 Mbit/s~1 Gbit/s 速率的以太网互连业务提供了广域组网的传输解决方案,大大丰富了 SDH 的应用场景, MSTP 技术至今仍然在电信运营商的网络中占据非常重要的地位。随着传统电话业务的萎缩和新型 IP 交换技术的发展, SDH/MSTP 网络的主要业务逐渐从以运营商自用的网络互连为主变成以客户专线为主。虽然产业链早在 2015 年前后纷纷宣称 SDH/MSTP 将逐步退出运营商市场,但至今国内运营商依然每年有一定的 SDH/MSTP 采购以满足专线业务发展的需要。

光传送网技术自 1998 年左右兴起,并于 2001 年在 ITU-T 完成技术标准。当时的 OTN 主要目标是

在 WDM 系统上承载 SDH 组网链路,因此主要定义了基于 STM-16/64/256 的 OTU1、OTU2、OTU3 业务,未考虑直接面向客户专线业务需求。2009 年, OTNG.709 第三版本发布,定义了基于 GE、10GE 和 40GE 业务的光数据单元 ODU0、ODU2e、ODU3e1 和 ODU3e2,顺应电信网 IP 化趋势,将 OTN 技术与以太网技术结合,丰富了 OTN 的应用场景,促进 OTN 电交叉设备成熟并在电信网络中规模应用,主要面向运营商的 IP 网络互连链路以及 1 Gbit/s 及以上速率的客户专线电路。由于 1 Gbit/s 及以上的客户专线电路数量很少,因此应用推广比较慢。但市场迫切需要一个能够替代 MSTP 的传输专线网络技术,为此 OTN 技术面向专线市场的需求不断演进和完善。

2 专线业务及其承载方案发展特点

近年,随着企业和政府数字化和互联网化转型,政企专线业务需求快速增长,某运营商 2017—2019 年专线电路增长情况见表 1,可以看出,专线业务的发展呈现以下特点。

表 1 某运营商 2017—2019 年专线电路增长情况

专线电路带宽分类	专线数量占比	年增长率
<10 Mbit/s	51%	3%
10~100 Mbit/s	41%	21%
100 Mbit/s~1 Gbit/s	7%	28%
>1 Gbit/s	1%	21%
合计	100%	

(1) 数量增长快

专线电路数量年增长率在 10%以上,其中 10 Mbit/s~1 Gbit/s 专线增长最快,10 Mbit/s 以下专线虽然增长较慢,但基数大。随着社会数字化转型的发展,企业上云步伐加快,预计未来几年专线电路数量和带宽还将持续快速增长。

(2) 带宽增长快

随着国家提速降费战略的实施,大量 10 Mbit/s



以下政企专线逐步向 10 Mbit/s 以上速率升级。

1 Gbit/s 及以上速率的专线数量占比虽然还比较少，但年增长率在 20%以上，总带宽占比已经达到 30%以上。

（3）以太网电路为主

在新增专线电路中，几乎都是以太网专线（即客户设备采用以太网接口），客户专线电路带宽升级后，普遍采用以太网专线的方式，新增客户很少有采用 PDH/SDH 等传统 TDM 接口，OTN 接口仅在 OTN/WDM 网络组网中应用，几乎没有客户端设备支持 OTN 接口。

（4）IP 承载网络逐步提供专线电路

2012 年以来，IP RAN 技术随着 3G 移动网络的建设而广泛应用，并逐步承载大量的 GE 速率以下的以太网专线业务。随着 SDN（software

defined networking，软件定义网络）技术的发展，基于互联网的 SD-WAN 专线产品也快速发展，并承载一些低价值专线业务。

（5）高价值客户依然坚持 TDM 专线方案

政企专线市场依然有大量的高价值客户（主要是金融、证券和政府等关键客户）对 IP 网络的可靠性、安全性存在担忧。随着 MSTP 网络逐步退网，高价值客户迫切希望运营商提供新的物理隔离的硬管道网络专线解决方案，OTN 逐步成为运营商面向大带宽及硬管道需求的专线业务的最佳选择。

3 OTN 承载专线业务的关键技术及演进

MSTP、IP 承载网和 OTN 承载专线业务各有特点，详见表 2。

表 2 专线承载方案的比较

对比项	MSTP	OTN	IP 承载网
隔离性	物理隔离，专用通道和专享带宽	物理隔离，专用通道和专享带宽	VPN 逻辑隔离，共享链路带宽
安全性	高	高	较高，协议配置较复杂，协议配置错误易影响业务安全，存在非法入侵和流量攻击等安全隐患
OAM	采用固定帧结构及开销提供 OAM	采用固定帧结构及开销提供 OAM	采用 OAM 报文方式
支持的业务类型	点对点、点到多点	点对点、点到多点	点对点、点到多点、多点到多点
时延	无拥塞，时延短	无拥塞，时延短	存在拥塞和调度机制，高等级业务优先，拥塞情况下时延会加大
时延抖动	TDM 时隙转发，时延抖动小	TDM 时隙转发，时延抖动小	分组报文转发，时延抖动较大
保护倒换时间	快，一般可保证在 50 ms 以内	快，一般可保证 50 ms 以内	慢，一般为几百毫秒，高等级业务采用 TE 隧道保护，可实现 50 ms
互连链路	单链路最高 10 Gbit/s	目前单链路可达 400 Gbit/s	目前单链路可达 100 Gbit/s
可承载业务带宽	以 2 Mbit/s~1 Gbit/s 为主	以 100 Mbit/s~N×10 Gbit/s 为主，最大不超过 100 Gbit/s	通常 1 Gbit/s 以下，最大不超过 10 Gbit/s
带宽调整灵活性	一般分为 N×2 Mbit/s 和 N×155 Mbit/s 两类，LCAS 方式的带宽调整灵活	N×1 Gbit/s、N×10 Gbit/s、40 Gbit/s 等，带宽调整机制不够灵活	可提供任意粒度带宽调整，可快速进行带宽灵活调整
带宽弹性	一般很少配置缓存，带宽入口弹性小，在客户业务出现微突发并超出租用带宽时，会出现分组丢失	一般很少配置缓存，带宽入口弹性小，在客户业务出现微突发并超出租用带宽时，会出现分组丢失	配置有适当容量缓存，在客户业务出现微突发并超出租用带宽时，可通过流量整形避免业务分组丢失
SDN 演进	无 SDN 演进能力	正在向 SDN 演进	SDN 已广泛应用

基于传输网络承载专线的光业务网方案在业务隔离性、安全性、低时延、低抖动、高可靠等方面的天然优势,大量高价值客户坚持采用 TDM 专线电路。随着 MSTP 逐步退网,OTN 成为运营商面向大带宽及硬管道需求的专线业务的最佳选择,OTN 也已经从面向内部组网应用的基础网络演进为面向专线业务的承载网。2016 年中国联通推出了基于 OTN 技术和 SDN 理念建设的 SD-OTN 金融专网,受到了金融、证券等高端客户的欢迎。而后中国移动和中国电信也先后于 2018 年年底和 2019 年发布了 OTN 政企专网。客户对专线服务能力越来越高的要求,也对 OTN 网络技术及面向业务的运营能力提出了新要求。

3.1 提供 1 Gbit/s 及以下速率(sub 1 Gbit/s)业务承载

传统 OTN 最小时隙是 1.25 Gbit/s,但考虑到当前及未来相当一段时期内,sub 1 Gbit/s 以太网业务依然是专线的主要需求,OTN 最小 1.25 Gbit/s 的时隙用于承载大量 sub 1 Gbit/s 的业务效率太低,运营商迫切需要 OTN 能够提供 sub 1 Gbit/s 的解决方案。

2012—2015 年,国内运营商和设备商借鉴 MSTP 将分组交换和 SDH VC 调度集成在一起的成功经验,制定了《分组增强型光传输网网络总体技术要求》^[2]和《分组增强型光传输网(OTN)设备技术要求》^[3]两个行业标准。利用“通用信元交换技术”,将 OTN 和 SDH 时隙交换、多协议标签交换的传送子集(MPLS-TP)和以太网的分组交换能力整合在一起,通过多层网络间的层间适配和映射复用,实现对分组、OTN、SDH 等各类业务统一承载,并能够实现与 MPLS-TP、SDH^[4]设备混合组网,以此实现 OTN 对 sub 1 Gbit/s 业务的承载能力。

但这种方式引入额外的 VC 容器或者分組管道,本质上属于多种传输技术叠加,业务适配层级多、实现复杂度高、不同技术和厂商设备间兼

容性问题多、设备成本也高,因此运营商多采用单厂商设备组建烟囱化网络的方式满足高品质客户的专线需求,但这背离了网络简化、开放及 SDN 智能管控等网络技术发展方向。分组增强型 OTN 技术集成的分组承载方式,无论是 MPLS-TP 方式还是以太网方式,都属于共享带宽承载方式,也无法满足高品质客户专线应用场景要求的带宽保证和安全隔离的需求。

针对上述问题,国内运营商和多个设备供应商自 2018 年开始研究 OTN 原生的 sub 1 Gbit/s TDM 电路解决方案,即光业务单元(optical service unit, OSU)方案,2020 年 ITU-T 也正式立项了 G.808 项目,引领业界进行 OTN 原生 sub 1 Gbit/s 传输技术及标准的研究。该方案可将 PDH、SDH、以太网以及其他各种固定比特速率(constant bit rate, CBR)的业务映射到最小业务容器为 2 Mbit/s 或 10 Mbit/s 的 OSU 时隙中,通过 OSU 的级联(OSUflex)提供各种带宽的业务。采用标准的帧结构和开销,提供丰富的 TDM OAM 能力。

3.2 完善 OTN 业务保护机制

OTN 技术定义了通道层的 ODUk 线性保护^[5]、环网保护^[6]、共享网状网保护^[7]等多种保护机制,在网络中常用 ODUk 线性保护方式,主要是子网连接保护(subnetwork connection protection, SNCP),分别通过段监视(section monitoring, SM)、通道监视(path monitoring, PM)和串联连接监视(tandem connection monitoring, TCM)的开销监测来触发保护倒换,从而实现 OTN 的分层分域保护。

SNCP 属于端到端的保护方式,但国内运营商的网络分为省际干线、省内干线和城域传送网 3 部分,一条端到端的专线最多跨域 5 个子网,包括两个城域网、两个省内干线网和一个省际干线网。为了提升端到端专线的网络可靠性,一般将 OTN 的线性保护分段配置,以实现业务端到端抗多点故障能力。一个经过两个城域子网和一



个省内骨干子网的业务分段保护示意图如图 1 所示。

图 1 中, 每个 OTN 子网都配置 ODU k SNC/S 保护, 运营商希望每个子网内出现故障时, SNC/S 保护启动并在 50 ms 内完成倒换, 并且每个子网内的故障和保护动作不影响其他子网。在图 1 网络中, 当在 X1、X2、X3 3 点均出现故障时, 业务可保证不中断。

但在实际的网络应用场景中, 当一个域发生 SNC/S 保护倒换时, 可能会引发下游子网也发生保护倒换动作, 即 OTN 中出现多域保护级联的联动问题。主要原因是上游 OTN 域发生保护倒换时, 产生的 OTN-LOF 告警向下游节点透明传输, 触发了下游 OTN 网络发生保护倒换。中国联通及多个设备商深入研究该问题后, 联合提出多篇文稿到 ITU-T SG15, 最终在 ITU-T G.798 Amd.3^[8] 中对 STAT 开销的接受处理进行了修订, 并在 ITU-T G.873.1^[5] 中增加对 SF 连续定时器的要求, 将出现级联保护倒换的概率从 20% 降低到 7%。

3.3 OTN 端到端时延自动测量

时延是高端客户非常关注的一个指标, 为满足客户对业务时延实时测量的需求, ITU-T G.709

在 ODU 开销中增加了用于时延测量的开销 DM (delay measurement)。图 2 (a) 中, PM&TCM 是 DM 开销字节, 位于 OTU 帧第二行、第三列; 其中 bit 1~bit 6 分别用于 TCM1~TCM6 层时延测量, bit 7 用于 PM 层时延测量, bit 8 为保留比特, 如图 2 (b) 所示。通过远端 DM 开销环回, 可实现在不影响业务的情况下, 对业务端到端双向时延的在线实时测量。

3.4 OTN 子网间高速互连

OTN 子网间互连通常采用客户侧业务接口互连, 如图 3 (a) 所示。这种方式各个子网的配置比较简单, 子网间需要人工在配线架上对每条业务在两个子网间进行尾纤连接。但这种方式有 3 个主要问题。

(1) 逐条业务人工互连, 很难实现业务端到端自动化部署。

(2) 需要在子网互连的地方配置大量 ODF 和尾纤, 占用宝贵的机房资源。

(3) 子网间互连采用业务接口, 无法实现业务端到端 OAM。

为克服上述缺陷, 可在子网间采用高速 OTN 接口互连的方式, 一个 OTU4 接口的速率为 100 Gbit/s,

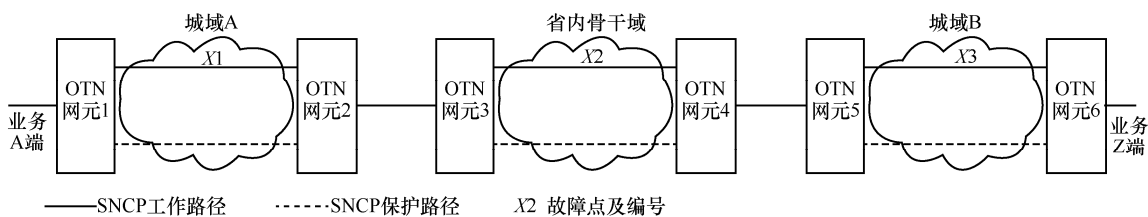


图 1 OTN 多域分段保护示意图

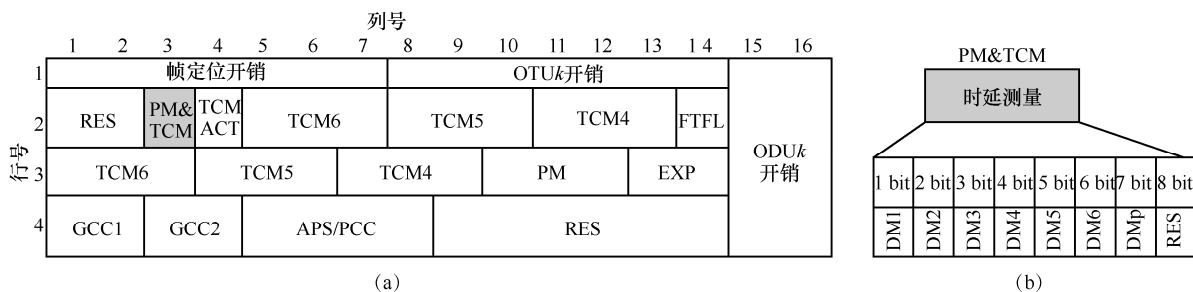


图 2 ODU k 中的时延测试字节^[9]

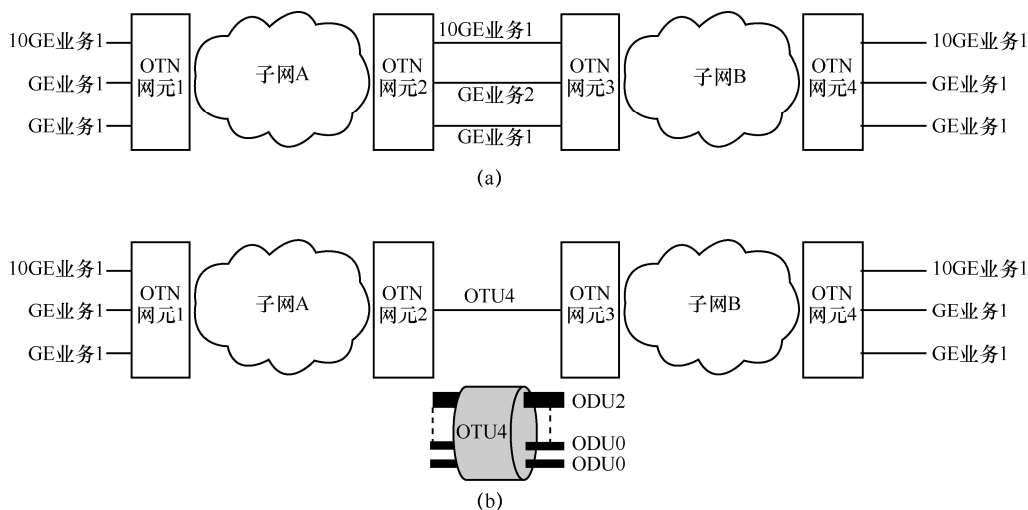


图3 OTN子网互连示意图

在网络建设阶段仅通过一对光接口互连，即可实现多条 ODU k 通道的连接（如图 3（b）所示）。最多可做到 80 条 ODU0 或 10 条 ODU2 业务的连接，或者 ODU0、ODU1、ODU2、ODU3 等多种带宽业务的混合互连。采用这种方式，业务从起点到终点的 ODU k 开销不中断，可实现业务端到端性能和故障信息处理。但采用该方式需要解决以下问题。

（1）不同厂商设备对 ODU k 时隙及编号的处理规则有差异，导致采用不同厂商设备的子网 A 和子网 B 配置的相同序号的时隙无法互通。

（2）不同厂商对业务的映射方式差异，导致业务互通错误。

（3）管控系统不支持配置“半电路”，即不支持将互连 OTN 高速端口中的时隙子端口作为业务起止端端口进行分段电路配置。

中国联通和几个主要设备商，就信号映射、时隙编号、半电路处理机制等制定统一的规则，在现网实现了多厂商设备组成的子网间通过高速 OTN 接口互连的业务互通和自动配置。

4 光业务网实践：基于 OTN 的政企专网

中国联通自 2016 年就推出了采用 OTN 和 SDN 技术的 SD-OTN 金融专网网络服务，并于

2019 年升级为面向全球市场的“政企精品网”，面向政企客户量身定制高带宽（10 Mbit/s~100 Gbit/s）、高可靠、高安全、高私密性的专属智能专线产品。基于 OTN 的政企专网具备如下特点。

（1）端到端跨域业务自动编排、快速自动开通，提供灵活及时的动态业务调整能力，如动态带宽调整、带宽日历、预约开通等。

（2）提供端到端业务性能的实时统计能力，为客户提供业务质量报告和在线业务性能诊断。

（3）快速智能的故障定位能力，实现快速故障修复，保证业务质量。

（4）实时的业务端到端时延在线测试能力，及基于时延的自动选路能力，满足客户对电路时延越来越高的要求。

（5）开放解耦，降低网络成本。

4.1 SDN 管控及跨域协同

中国联通制定了全国三级的 OTN SDN 协同及控制系统架构，如图 4 所示。

（1）设备管控系统（control & management）直接连接设备，鉴于 OTN 设备开放性不够，目前设备的管控系统多由设备厂商提供，实现对本厂商设备组成的子网内的网络和业务管控。

（2）省级和集团公司级两级协同器（orchestrator），省级协同器实现对省内业务的跨

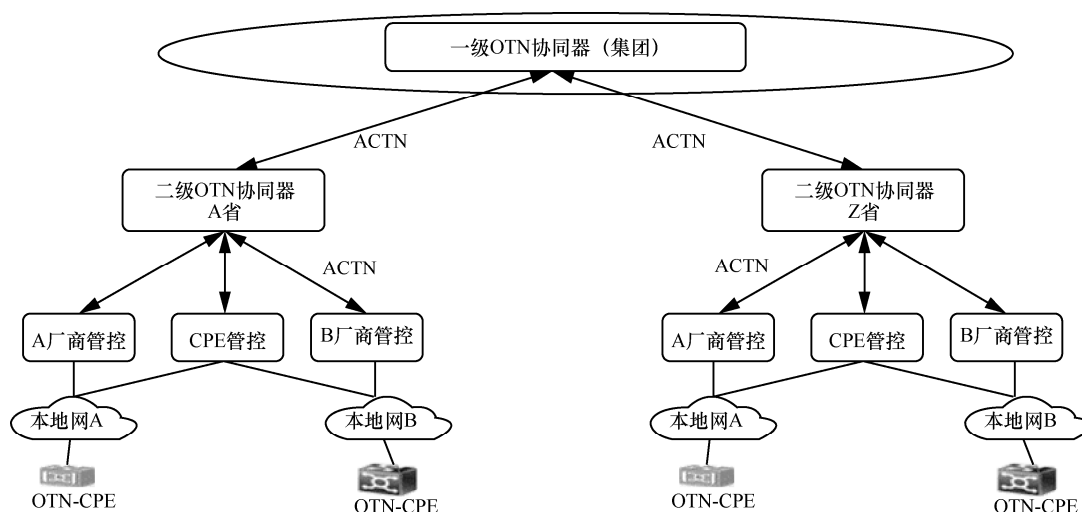


图4 OTN SDN 协同器及管控系统架构示意图

域、跨厂商端到端协同，集团级协同器实现跨省业务的端到端协同。

为提供自主创新的 OTN 服务能力，实现能力领先的差异化服务，中国联通自主开展 OTN 协同器的开发，实现对多厂商设备组成的多域网络能力抽象和标准化，实现自动业务编排和协同，包括时延最短、节点最少、跨域选路等多种选路策略，采用智能的编排算法和性能数据分析，实现灵活的业务动态开通、在线调整、智能故障定位和实时的在线时延测试服务能力。

SDN 协同控制北向接口的标准化是实现多厂商环境下管控的关键，中国联通与华为公司在 IETF 推动基于 ACTN (abstraction and control of traffic engineering network) 的 SD-OTN 控制器北向接口标准化和 YANG 数据模型的标准化，并实现了协同器采用标准化的 ACTN 接口和 YANG 模型与多厂商管控系统的对接。

4.2 自主研发 OTN-CPE 控制器，实现网络开放解耦

为降低 OTN 政企专线网络和业务成本，运营商可从以下两个方面着手。

(1) 开发标准的管控系统北向接口，实现自主研发的协同器对多厂商管控系统的标准化接入，引入多个供应商提供设备，增强竞争，降低

网络建设成本。

(2) 开发标准的管控系统南向接口，自主开发直接面向 OTN 设备的管控系统，实现对多供应商设备的统一管控，同时制定更全面和具体的设备技术规范，实现设备的标准化或灰盒化。

接入型设备 CPE (customer premise equipment) 是实现 OTN 设备标准化或灰盒化的突破点，为此国内 3 个运营商共同支持并在中国通信标准化协会 (CCSA) 制定《接入型光传送网 (OTN) 设备技术要求》行业标准，对设备的功能模型、功能要求、设备形态和硬件特性、业务实现、互通性、设备管理等做出具体规范；制定《接入型光传送网 (OTN) 设备管控技术要求》，对设备管控系统的功能架构、主要功能、南向接口规范和信息模型、管控信息传输通道 (DCN) 实现及互通性、设备上电后的自动发现和自动上线、设备软件升级等做出具体规范。

中国联通基于上述标准，自主开发了面向接入型 OTN 设备、基于 SDN 理念的管控系统（如图 4 所示的“CPE 管控”），实现对 10 多个供应商接入型 OTN 设备统一管控。以省为单位集中部署，可实现对全省范围内所有厂商的接入型 OTN 设备的统一管控，并可通过标准的 ACTN 北向接口接入协同器。

5 结束语

随着专线业务的高速增长,光传送网络已经从运营商的基础网络发展为直接面向客户的专线业务承载网。经过运营商和设备供应商多年持续对 OTN 技术的改进和完善、对 SDN 管控技术和南北向接口的规范,采用 SDN 管控协同技术的分组增强型 OTN 技术逐步成为政企专线业务的主力承载网络。随着 OTN 智能管控功能和能力的完善、OSU 灵活时隙技术的发展,OTN 原生的 sub 1 Gbit/s 技术进一步提升了 OTN 专线业务的承载能力。

参考文献:

- [1] 唐雄燕. 光传送网的演进趋势[J]. 电信网技术, 2005(3): 38-39.
TANG X Y. The evolution trend of optical transport network[J]. Telecommunications Network Technology, 2005(3): 38-39.
- [2] 工业和信息化部. 分组增强型光传输网络总体技术要求: YD/T 2939-2015[S]. 2015.
MIIT. General technical requirements for packet enhanced OPTICAL transmission network: YD/T 2939-2015 [S]. 2015.
- [3] 工业和信息化部. 分组增强型光传送网 (OTN) 设备技术要求: YD/T 2484-2013[S]. 2013.
MIIT. Technical requirements for packet enhanced optical transport network (OTN) equipment: YD/T 2484-2013 [S]. 2013.
- [4] 林何平, 王澄, 张金亮, 等. 一种融合 VC 交叉功能的 OTN 系统技术应用[J]. 电信科学, 2018, 34(2): 173-180.
LIN H P, WANG C, ZHANG J L, et al. Application of OTN system technology integrating VC cross function[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(2): 173-180.
- [5] ITU-T. Optical transport network (OTN): linear protection: G.873.1[S]. 2017.
- [6] ITU-T. Optical transport network (OTN): ODUk shared ring protection: G.873.2[S]. 2015.
- [7] ITU-T. Optical transport network (OTN): shared mesh protection: G.873.3[S]. 2017.
- [8] ITU-T. Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks amendment 3: G.798[S]. 2017.
- [9] 中国通信标准化协会. 光传输网 (OTN) 接口: YD/T-1462-2011[S]. 2011.
China Communication Standards Association. Optical transmission network (OTN) interface : YD/T-1462-2011[S]. 2011.

[作者简介]



唐雄燕 (1967—), 男, 中国联合网络通信有限公司网络技术研究院首席科学家, 北京邮电大学兼职教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带通信、光纤传输、互联网/物联网、SDN/NFV 与新一代网络等。



王海军 (1970—), 男, 中国联合网络通信有限公司网络技术研究院技术专家、教授级高级工程师, 主要研究方向为宽带通信、光传输网络技术、IP 承载网络技术等。



杨宏博 (1974—), 男, 中国联合网络通信有限公司云网运营中心高级工程师, 主要研究方向为光纤传输、IPRAN 等。