



SDN 技术架构的适用性研究

陈显辉, 蔡怡挺, 陈梦娴, 王佑

(国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325700)

摘要: 首先, 介绍了几种软件定义网络 (software defined network, SDN) 架构及其关键技术; 然后, 就网络分层和网络抽象、南向接口协议选择、路径计算单元 (path computation element, PCE) 功能集成等几个关键方面对这几种 SDN 架构在光传送网络 (optical transport network, OTN) 中的适用性进行了技术性研究和分析; 最后, 对现有 OTN 向 SDN 技术架构迁移给出了指导性意见和建议。

关键词: OTN; SDN; 适用性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023191

Research on the applicability of SDN technical architecture

CHEN Xianhui, CAI Yiting, CHEN Mengxian, WANG You

State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325700, China

Abstract: Firstly, several software defined network (SDN) architectures and their key technologies were introduced. Secondly, technical research on the applicability of these SDN architectures in optical transport network (OTN) on several key aspects such as network layering and network abstraction, southbound interface protocol selection, and path computation element (PCE) function integration was conducted and analyzed. Finally, guiding opinions and suggestions on the migration of the existing OTN network to these SDN technical architectures were given.

Key words: OTN, SDN, applicability

0 引言

传统的因特网把控制平面和数据平面紧紧连接在传统的网络设备上, 使得网络控制平面的管理变得复杂烦琐, 同时网络控制平面的技术发展和更新也受到了束缚。这与当下对网络扩展性与灵活性的要求相违背。为了解决这些现有网络体系所面临的难题, 美国斯坦福大学研究组针对这

些问题提出了一种解决方案, 即设计一种新型网络创新架构——软件定义网络 (software defined network, SDN) 架构^[1-3], 这种新型的网络架构以 OpenFlow^[4]协议为核心技术, 创造性地提出了将网络控制平面与数据平面分离, 数据转发功能由网络设备在高层策略的指导下完成, 减轻了网络设备以往承载的复杂功能, 从而实现了在网络流量的灵活控制^[5]。

SDN 将网络的传统业务从硬件转移到了软件, 这种转换使得原本需要更换硬件设备才能具备的功能由软件进行替代。这样既对网络控制平面的功能进行了简化和整合, 又增加了网络硬件设备的可靠性。并且, 在将网络控制和数据平面进行分离之后, 厂商便可以单独地开发控制平面^[6]。因而, SDN 的发展会给网络产业的格局带来巨大的变化, 传统的通信设备行业和运营商必须做出巨大的调整以适应新型的 SDN 体系结构^[7]。

1 OTN 应用 SDN 技术应满足的条件

光传送网络 (optical transport network, OTN) (国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) G.709) 技术本质上是一种波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 技术, 它让 OTN 不仅具备承载大容量、高带宽业务的能力, 还具备了和 SDH/SONET 一样的灵活性和鲁棒性, 是目前通信运营商采用的主要的光传送网络技术。

要在 OTN 中应用 SDN 技术, 首先需要满足以下几个条件。

1.1 条件一: 引入控制平面

传统的传输网络一般采用双层模型: 网元层和管理层。网元层即设备层, 用于业务传送和调度; 管理层是指网元管理系统 (element man-

agement system, EMS)/网络管理系统 (network management system, NMS), 提供设备管理和网络管理功能。传统 OTN 组网也大多使用这样的网络模型。SDN 最主要的特征就是网络控制平面和数据转发平面分离, 传统 OTN 是没有控制平面的。如果要将 SDN 技术应用到 OTN 中, 则必须在 OTN 中引入控制平面。

OTN 引入控制平面应用 SDN 技术架构和引入控制平面构建类似, 都是通过在 OTN 网元上启用通用多协议标志交换 (generalized multiprotocol label switching, GMPLS) 实现。在 GMPLS 中, OTN 的各种电层光通道数据单元 (ODUk) 和光层光通道传送单元 (OTUk) 都被统一视作流量工程 (traffic engineering, TE) 链路, OTN 被视作 GMPLS 网络, 从而可以应用各种适用于流量工程的路由协议、信令协议和技术架构, 其中就包括 SDN 技术架构。OTN 引入控制平面示意图如图 1 所示。

这里需要注意的是, ASON 引入的控制平面通常是分布式的, 分布在全网的每个网元上, 而 SDN 引入的控制平面通常是集中式的, 集中在外部 SDN 控制器上。因此, OTN 在应用 SDN 技术架构之前应首先对引入的控制平面进行功能分解, 部分控制功能应采用分布式部署, 另一部分控制功能则适合采用集中式。例如, 本地标签转

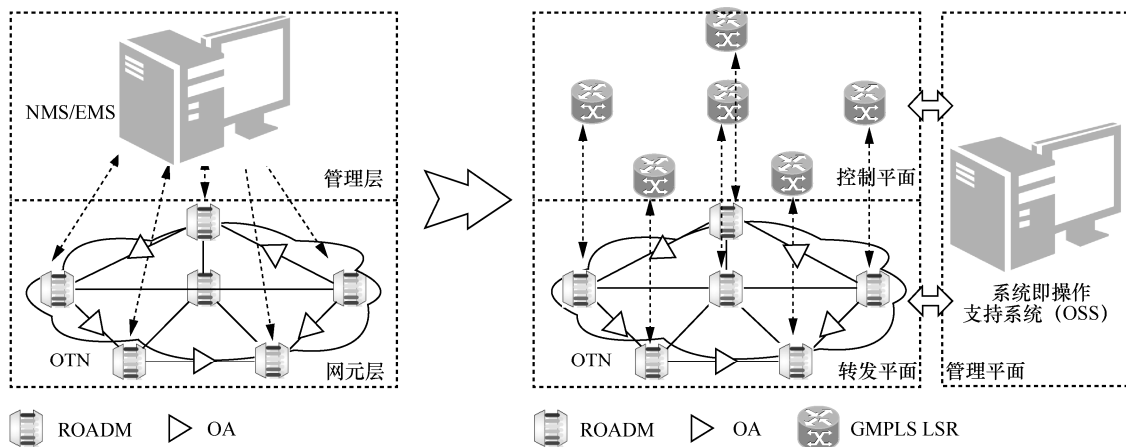


图 1 OTN 引入控制平面示意图



发信息库以及本地电层/光层交叉连接信息库等需要继续保留在网元上;而全局一致的 TE 链路状态数据库以及负责全网路径计算的功能部件等则可以统一集中到 SDN 控制器上。

1.2 条件二: 采用 ROADM MESH 组网

传统 OTN 大多采用背靠背固定光分插复用器 (fixed optical add-drop multiplexer, FOADM) 组网方式, 在这种线性传输系统中, 由于业务流向无法进行动态调整, SDN 技术没有应用价值。SDN 技术只有在无线网格 (Mesh) 网络中应用才有意义。

传统 OTN 要组建 Mesh 网络, 必须采用可重构光分插复用器 (reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM) 技术。近些年, ROADM 技术发展很快, 最新一代的 ROADM 使用可编程硅基液晶技术, 不仅具备波长无关、方向无关和冲突无关 (colorless & directionless & contentionless, CDC) 功能, 而且还具备灵活栅格 (flexible-grid) 功能, 支持可变波长间隔和超级通道。这些灵活栅格为 OTN 应用 SDN 技术提供了条件。

1.3 条件三: 采用 SDN 分层控制架构

传输网络一般都按照 ITU-T G.805 规范采用分层分块的体系架构, 无论是 SDH 网络还是 OTN 都可以被分解为多个独立的传输层, 相邻层之间是服务器-客户端 (server-client) 关系, 每个传输层又可以根据其内部结构和管理方式进行分块。

根据 ITU-T G.709 规范, OTN 在总体上分为电层 (OTN 数字结构) 和光层 (OTN 光结构) 两层。因此, 像 OTN 这样的多层网络在应用 SDN 技术架构时, 需要采用分层控制架构。

在 OTN 中无论是电层 (OPU/ODU/OTU) 还是光层 (OCH/OMS/OTS), 每个独立的传输层从上至下都是不断映射复用和子网块划分的过程, 其对应到 SDN 分层控制架构中, 从下至上则是一个不断网络抽象的过程。在启用 GMPLS 后, 这些光层和电层通道都被统一抽象为 TE 链路, 从而导致

这些不同的传输层都被抽象成了不同的 TE 网络层。分层控制网络的拓扑抽象示意图如图 2 所示。

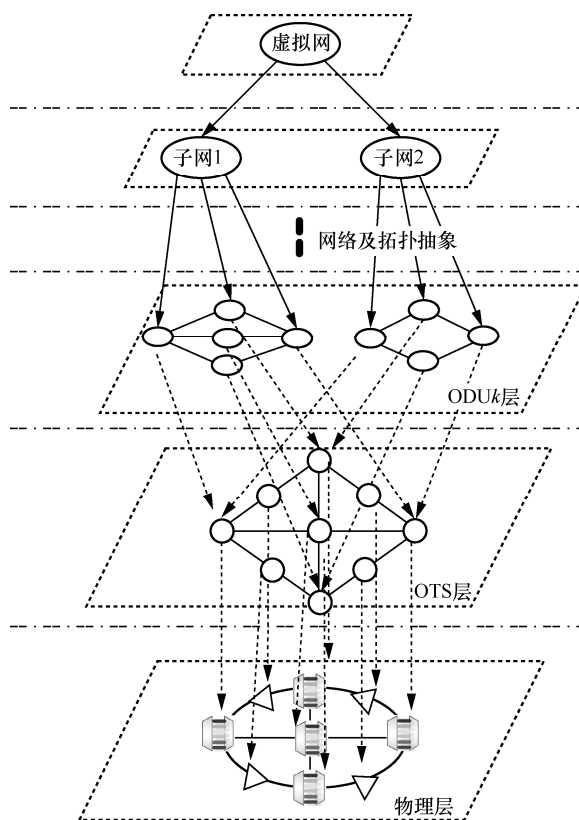


图2 分层控制网络的拓扑抽象示意图

1.4 条件四: 启用 PCE 路径计算功能

路径计算单元 (path computation element, PCE) (RFC 4655) 是诸如 MPLS-TE 和 GMPLS 等流量工程系统在多域多层网络环境下计算标签交换路径 (LSP) 时的一个必要的基本功能部件。PCE 是基于网络图算法计算业务路径和路由的, 并且可以在计算中应用各种约束条件。

启用了 GMPLS 的 OTN, 是一个同时具备 ODUk 时分复用 (time division multiplexing, TDM) 能力和光交叉连接 (optical cross-connect, OXC) 波长交换能力 (wavelength switching capability, LSC) 的 GMPLS 网络, 其中每个 OTN 网元就是一个 GMPLS 的标签交换路由器 (label switching router, LSR)。由于 OTN 本身就是一个多层网络, 每层传输网又可以划分为多个子网域, 在 OTN 这

样的大型多域多层网络中, 计算业务路径功能必须通过 PCE 实现。这和在单域 ASON 中业务路径计算使用的最短路径优先 (constrained shortest path first, CSPF) 算法有很大的不同。

OTN 中的 PCE 路径计算包括业务的主用路径、保护路径和恢复路径生成, 以及故障路径的重路由等。

2 SDN 基本架构

如前所述, SDN 是 ONF OpenFlow 的出现引发的网络技术热潮, 因此, 任何网络在应用 SDN 技术时, 都无法绕开 ONF 对 SDN 架构 (TR-504) 的总体定义: 3 个平面 (数据平面、控制平面和应用平面) 和 2 个接口 (南向接口数据-控制平面接口 (D-CPI), 北向接口应用-控制平面接口 (A-CPI)), 此外, 还有一个并不在 ONF SDN 架构范畴内的“伪”平面——管理平面, 分别和这 3 个平面进行通信。ONF SDN 架构如图 3 所示。

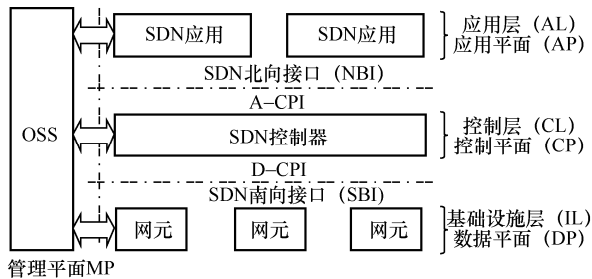


图3 ONF SDN 架构

由于除了 ONF 之外, 还有诸如 ITU-T、光互联网论坛 (OIF) 等国际化标准制定机构和 OpenDayLight、ONAP 等开源社区也在做 SDN 方面的工作, 这些组织都有自己的 SDN 定义。为了消除歧义达成共识, 国际互联网工程任务组 (IETF) 颁布了 RFC 7426, 在该文档中重新规范并统一了 SDN 架构中平面、层和接口的定义, 将 SDN 架构进一步细化为 5 个平面、4 个抽象层和 4 个接口。IETF 定义的 SDN 架构如图 4 所示。

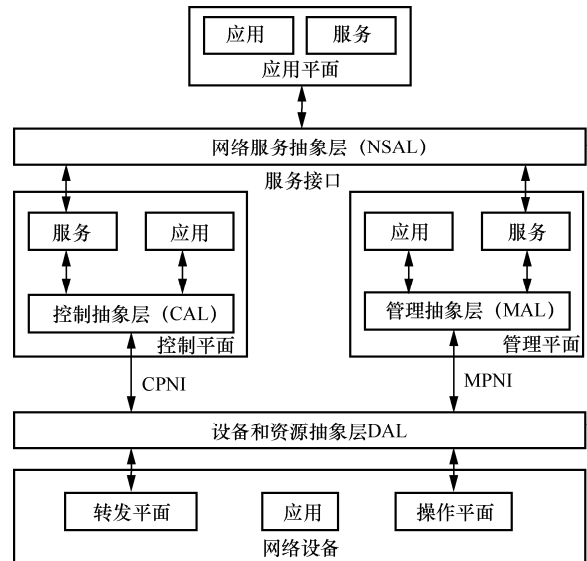


图4 IETF 定义的 SDN 架构

由图 4 可知, IETF 定义的 SDN 架构将 ONF 架构中的数据平面分成了转发和操作两个平面; 将 ONF 架构各层的协调器 (coordinator) 统一为管理抽象层 (MAL); 将 ONF 的 A-CPI 分为 MPNI 和 CPNI 两个接口, 将 D-CPI 分为 MPSI 和 CPSI 两个接口。

总体而言, IETF 定义的 SDN 架构是和 ONF SDN 架构等效的, 并且更具灵活性和可扩展性, 也更适于延伸到 OTN 等非分组网络。

3 适用于 OTN 的 SDN 技术架构

SDN 技术关注的是对网络的“控制”和“管理”, 其中“管理”是 SDN 控制器通过北向接口向上层应用提供的网络服务编程手段, 这是在 SDN 技术架构范畴之外的, 因此, SDN 技术的焦点在于对网络的控制。

网络控制的关键是在传统的转发平面和控制平面之间引入抽象 (RFC 7426)。这种抽象分为设备抽象和网络抽象两部分。设备抽象主要是指按照统一的信息模型或数据模型建模, 并由 SDN 控制器通过南向接口实现集中控制。网络抽象则由不同的 SDN 技术架构使用不同的技术和方法实现底层物理网络和拓扑抽象, 为上层应用提供各种虚拟网络业务。



当前,除了 ONF 的 OpenFlow 外, IETF 中多个工作组还根据不同的应用场景提出了多种不同的 SDN 技术架构。不同的 SDN 技术架构使用的设备抽象和网络抽象的方法不同,适用的南向接口技术也有所不同。

对于 OTN 而言,这些 SDN 技术架构中可能会用到的南向接口协议有以下几种。

- 简单网络管理协议 (simple network management protocol, SNMP), 传统 OTN、WDM 等光传输设备使用的网络管理协议,是传统传输网络向 SDN 技术迁移必须使用的南向接口技术。
- 路径计算单元通信协议 (path computation element protocol, PCEP), 如同 ASON、基于 WDM 传输网的 ASON(WSON)和 SDN OTN, 启用了 GMPLS 的光传输网络用于 PCE 业务路径计算时所使用的通信协议,一般来说,它只是个东西向协议,但在有些 SDN 技术架构中,它是必要的南向接口协议。
- OpenFlow, ONF SDN 架构唯一指定南向接口协议。
- ForCES (forwarding and control element separation) 协议, ForCES 协议可用于监视、配置和控制任何采用逻辑功能块 (logical functional blocks, LFB) 建模的网元设备,而 LFB 是基于 XML 的,通过模型扩展可用于启用了 GMPLS 的 OTN 设备的统一建模。
- NETCONF (network configuration protocol), 只要网络和设备数据模型是使用统一建模的,就可以使用 NETCONF 作为管理配置协议。

另外,适用于 OTN 的 SDN 技术架构还需要满足 OTN 分层网络体系,即提供 SDN 分层控制能力,并在架构中应用或集成 PCE 路径计算能力。

3.1 PCE 架构

在 MPLS-TE 和 GMPLS 这样的 TE 网络中, PCE 都是 SDN 技术架构必要的核心功能组件,它用于计算网络流量的最佳路径,并通过路径更新反映网络和流量需求的变化。RFC 8283 中定义了用于 TE 网络集中控制的 PCE 架构,如果是启用了 GMPLS 的 OTN, OTN PCE 架构如图 5 所示。

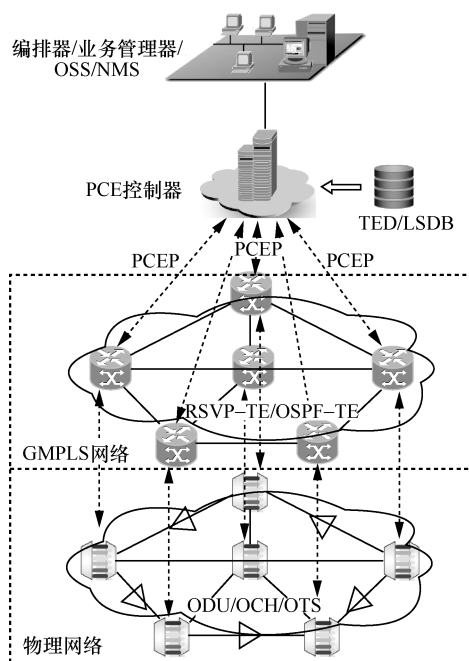


图 5 OTN PCE 架构

在 PCE 架构中,集中式 PCE 控制器充当了 SDN 控制器的角色, PCEP 作为南向接口协议,用于业务路径计算和网络流量调度。

PCE 架构的关键是 PCE 控制器和 PCE 客户端 (PCC) 之间通信所使用的 PCEP,这是一个功能强大,且易于扩展的通信协议, PCE 架构在 TE 网络中的普适性正是在于 PCEP 的灵活性和可扩展性设计。

TE 链路状态数据库是 PCE 控制器上用于业务路径计算的核心部件,通过 PCEP 扩展, PCE 控制器可以被动参与链路状态路由协议,收集 PCE 控制域内所有 TE 链路状态,在 PCE 控制器上集中构建数据库并实时同步数据。

通过 PCEP 扩展, PCE 可以用于 WDM、OTN 等采用不同底层技术的 TE 网络。在 OTN 这样的多层多域网络中, 可以使用 PCE 完成单个传输层的跨域 LSP 计算, 也可以使用 PCE 和虚拟网络拓扑管理器 (VNTM) 组合完成多个传输层之间的跨层 LSP 计算。

在 PCE 架构中, OTN 抽象可以使用分层 PCE 架构实现, 上层 PCE 将 TE 链路要求 (路径计算约束条件) 通过 PCEP 发送到下层 PCE, 下层 PCE 根据要求完成域内或跨域最佳 LSP 计算, 并将该 LSP 作为虚拟 TE 链路向上层通告, 用以在上层网络中构成满足客户要求的虚拟网络拓扑 (VNT) 的形式, 从而完成网络抽象。在分层 PCE 架构中, 这种网络抽象逐层递归, 最终实现在 OTN 上为客户提供虚拟网络业务。

在 PCE 架构中, 如果 OTN 和设备沿用的是传统 MIB 模型, 则使用 SNMP 作为网络和设备管理配置协议, 如果 OTN 和设备启用了统一的新颖 YANG 建模, 则使用 NETCONF/RESTCONF 作为网络和设备管理配置协议。

PCE 架构对网络和设备没有统一建模的要求, 理论上只要系统集成或启用了 PCE 功能, 就可以使用 PCE 架构作为 SDN 技术架构, 以 PCEP 作为南向接口协议实现网络及业务的集中控制, 为上层应用提供 SDN 服务。已有的 OTN 只要启用了 GMPLS 和 PCE 功能, 就可以适用 PCE 架构, 而无需进行其他升级改造, 是较容易实现的 SDN 架构, 也是目前很多光传输设备提供商向市场推出的 OTN 主要的 SDN 架构形式。

3.2 I2RS 架构

路由系统接口 (interface to the routing system, I2RS) 是 IETF I2RS 工作组提出的一个路由系统高级体系架构 (RFC 7921), 其主要目标是标准化不同设备提供商路由系统的接口, 让上层应用可以通过该接口访问和控制路由系统中的信息, 如网络状态、拓扑信息、流量监测、网络事件等,

并根据需求编排网络资源。

路由系统由路由单元 (routing element) 组成, 路由单元可以是传统意义上运行 IGP/BG/PIM 路由协议的路由器, 也可以是实现了 RSVP-TE、OSPF-TE 和 PCEP 并具有转发平面的 GMPLS 标签交换路由器, OTN 的 I2RS 架构如图 6 所示。

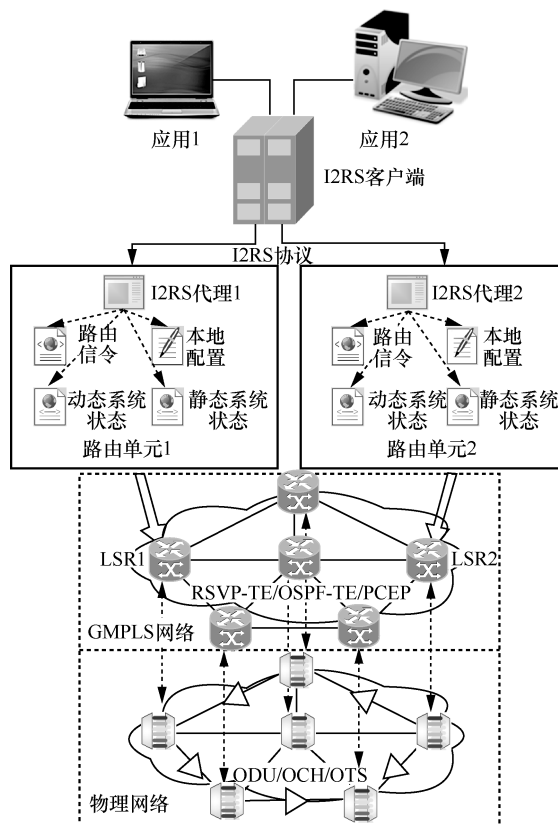


图6 OTN的I2RS架构

在 I2RS 架构中, I2RS 代理是路由单元的一部分, 并且充当了 SDN 控制器的角色, 它实现由其代理的那部分路由系统功能的数据模型, I2RS 客户端则是上层应用的一部分, 它实现上层应用需要访问和控制的那部分路由系统功能的数据模型, I2RS 客户端还负责实现 I2RS 协议, 并使用该协议和 I2RS 代理通信, 根据标准的数据模型语义进行信息交换, 以实现上层应用对路由系统的管理和控制。

I2RS 接口是一个由模型驱动的可编程接口,



I2RS 架构的关键是使用统一的标准化的信息模型和数据模型, I2RS 工作组建议选用 NETCONF/RESTCONF 作为 I2RS 协议, 推荐 YANG 作为统一建模语言, 并为 I2RS 架构下的路由系统路由择域信息库 (routing information base, RIB) 开发定义了统一的信息模型 (RFC 8430) 和 YANG 数据模型 (RFC 8431), 用于 I2RS 代理和客户端对路由系统的抽象和建模, 规范 RIB 库操作。此外, I2RS 工作组还在 RFC 8345 中为网络抽象定义了一个通用网络 YANG 模型 (ietf-network), 该网络模型不仅可以为 I2RS 应用提供最笼统和最基础的网络抽象, 还可以用作其他 SDN 技术架构中不同类型网络数据模型的基础。该网络抽象数据模型示意图如图 7 所示。

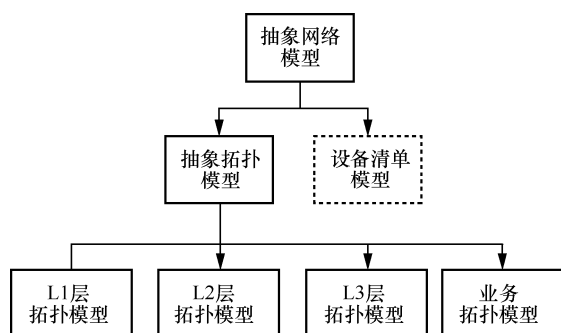


图 7 网络抽象数据模型示意图

该网络 YANG 模型由拓扑数据模型 (ietf-network-topology) 和设备 (inventory) 数据模型两部分组成, 在该网络模型中定义了网络分层结构, 用于分层网络抽象, 并对各个网络层中的节点设备进行维护。对于采用特定技术的网络而言, 可以在该网络模型的基础上在拓扑数据模型和设备数据模型中增加和技术相关的细节, 以 OTN 为例, 可以在 ietf-network-topology 模块中通过新增 OTN 层“节点 (node)”“链路 (link)”和“终结点 (termination point)”等网络实体以及与 OTN 相关的 TE 带宽、TE 标签等 TE 属性实现新增 OTN 拓扑数据模型的目的。

在该网络拓扑数据模型中, 上层网络的节点可

以映射为下层网络中的某个子网, 链路可以映射为下层网络在两个抽象节点之间的一条或多条链路, 逐层递归, 从而完成整个网络的抽象或分解。

在 I2RS 架构中, 网络分层和网络抽象都是由上层应用完成的, 上层应用通过 I2RS 客户端获取全网所有路由单元的状态和数据, 并在此基础上构建整个网络的数据模型, 按需抽象化网络拓扑和虚拟化网络资源。

I2RS 是一个开放式通用 SDN 技术架构, 支持 IETF 针对路由系统开发的各种数据模型。此外, I2RS 工作组没有对 I2RS 代理和路由单元各个功能模块之间的内部接口作定义和规范, 因此, 路由系统可以使用 MIB、ForCES 框架或 YANG 数据模型建模设备, 并分别选用 SNMP、ForCES 和 NETCONF 作为控制和管理网元设备的南向接口协议。只需要保证 I2RS 客户端和代理商路由系统和网络数据模型一致, 能通过 NETCONF/RESTCONF 协议交互。

由于路由单元在 I2RS 架构下可以采用不同的形式实现, 因此 PCE 作为路由系统的基本功能部件, 在 I2RS 架构中的部署形式也有所不同, 既可以分布式部署在路由单元中, 也可以集中式部署在 I2RS 客户端上或嵌入上层应用中, 并由它们负责构建全网统一的 TE 链路数据库。

对于已有的 OTN, 可以在路由单元内部继续沿用 SNMP/MIB 对象模型, 而在 I2RS 代理和客户端上实现 OTN 系统的 RIB 可和网络 YANG 数据模型, 由 I2RS 代理完成两种数据模型之间的转换。

为了简化网络操作和未来的网络发展需要, 建议使用统一的 YANG 模型对 I2RS 架构中的路由系统及网络建模。

3.3 ACTN 架构

TE 网络抽象和控制 (abstraction and control of TE network, ACTN) 架构是 IETF TEAS 工作组在 RFC 8453 中针对 MPLS-TE 和 GMPLS 这样的流量工程网络提出的另一个 SDN 技术架构, 在该架构

下,可以通过操作虚拟网络(virtual network, VN)的方式编排、控制和管理大规模多域 TE 网络,以实现网络的可编程化、自动化、网络资源共享的高效化,提供虚拟网业务和端到端连接业务。

ACTN 架构适用的网络包括如 OTN/WDM 的光传输网络、如 PTN 的基于 MPLS-TP 的分组传输网络以及传统的基于 MPLS-TE 的 IP 网络。OTN 的 ACTN 架构如图 8 所示。

在 ACTN 架构中,配置网络控制器充当了域 SDN 控制器的角色,通过信息传递接口(MPI)向上为多域服务协调器提供 TE 链路操作,通过南向接口(SBI)向下控制和管理物理网络设备。而多域服务协调器充当了网络业务和资源编排器的角色,通过控制方法接口(CMI)为上层应用(客户网络控制器)提供 VN 操作。

ACTN 架构中最关键的技术就是网络抽象和网络切片,网络抽象又包括节点抽象和链路抽象。

在最底层的物理网络中,节点是物理网元,链路是物理连接;在其上层抽象中,节点则是物理网元及其物理连接的抽象,链路是一对抽象节点之间提供的具有特定 TE 参数的虚拟链路;网络抽象是递归应用的。以 OTN 为例,最底层的物理节点是 OTM 和 ROADM 设备,链路是物理光纤连接,其上层节点则是 OTN 光层网元,链路则是 OCH 光层 TE 链路,再往上层,节点是 OTN 电层网元,链路则是 OTU 电层 TE 链路……依次类推,逐层抽象。网络切片则是在网络抽象基础之上,通过通用网络基础架构为上层应用或客户构建的逻辑专用虚拟网络。

ACTN 也是一个开放式 SDN 技术架构,IETF TEAS 工作组在 ACTN 架构中(RFC 8453)定义了 CMI 和 MPI 的功能,并在 ACTN 架构信息模型(RFC 8454)中定义了用于 CMI 的 VN 操作原语和用于 MPI 的 TE 操作原语。理论上只要能支

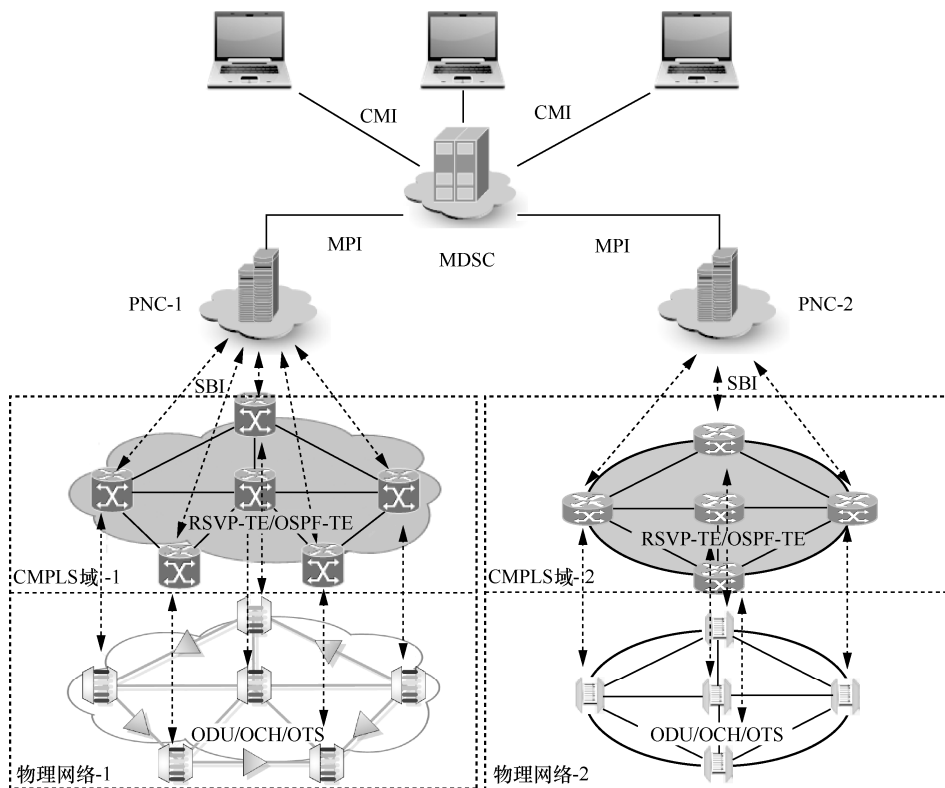


图 8 OTN 的 ACTN 架构



持虚拟网络操作的技术模型就可以用于 CMI, 支持 TE 链路操作的技术模型就可以用于 MPI, 而且 ACTN 架构中并未对南向接口的技术规范作要求, 可以灵活选用 ForCES、OpenFlow、PCEP、NETCONF 和 SNMP 作为底层网元设备的配置管理协议。

因此, 前面提到的分层 PCE 架构可以完全匹配 ACTN 架构, 因为它们有着一样的分层架构 (RFC 8637)。在分层 PCE 架构中, 父层 PCE 充当多域服务协调器, 而子层 PCE 充当 PNC, PCEP 既可以用于 MPI, 也可以用于 CMI, 此时网络抽象和 TE 链路抽象可以完全参考 PCE 架构。

ACTN 架构也可以使用 YANG 模型和 NETCONF/RESTCONF 协议作为其最终解决方案, IETF 的 CCAMP、TEAS 等工作组为 TE 网络定义的各种 YANG 数据模型都可以用于该架构, 具体来说, 客户业务 YANG 模型用于 CMI, 网络 YANG 数据模型用于 MPI, 设备 YANG 数据模型用于 SBI。目前这部分技术的统一 YANG 数据模型, IETF 已经开发了一部分, 例如, 网络分层和抽象可以使用前面所述的 I2RS 工作组定义的通用网络 YANG 模型 (ietf-network) 实现, 但更多的诸如用于 VN 操作的 YANG 数据模型、TE 操作的网络配置 YANG 数据模型, 以及 TE 网络抽象的 YANG 数据模型等, 还在后续的开发定义中。

已有的 OTN 在应用 ACTN 架构时, 可以参照 PCE 架构模式实现。但是 ACTN 是一个面向未来的 SDN 技术架构, 推荐使用 NETCONF/YANG 作为解决方案, 并使用 IETF 统一的 YANG 数据模型为设备和网络建模, 以实现和设备提供商无关的网络可编程性, 以及 SDN 架构和底层技术无关的灵活性和可扩展性。

3.4 ONF TAPI 功能架构

TAPI 是 ONF 开放计算标准工作委员会 (OTCC) 项目组在 ONF SDN 架构和 ONF CIM 核心信息模型基础上针对 OTN 开发的一套应用程

序编程接口 (application programming interface, API) SDK 软件 (当前版本 2.1), 其中包含了统一建模语言 (UML) 信息模型、YANG 数据模型和 OpenAPI 规范, 用于 OTN 在 SDN 架构下各个服务功能模块 (拓扑服务、连接服务、操作维护管理 (OAM) 服务、路径计算服务、虚拟网络服务、通知服务) 的统一建模, 并规范了应用 API 在 NETCONF 协议下的 CRUD (create, read, update, delete) 操作, 以及 RESTful API 在 RESTCONF 协议下的 CRUD 操作。

也就是说, 开放式传输 API (TAPI) 将 SDN 控制下的 OTN 功能抽象为一组服务 API (TR-527), 提供给上层应用程序 (包括 Web 应用) 调用, 同时, TAPI 还可以用于分层 SDN 架构之间的服务递归调用。OTN 的 TAPI 功能架构如图 9 所示。

TAPI 信息模型 (IM) 将 ONF CIM 中用于表示流转发能力的转发域重构是为了节点和拓扑两个单独的实体, 其中拓扑是下层链路和节点的组合, 而节点则是转发功能的逻辑抽象, 节点可以包含内部拓扑。依据 ONF 开放式传输 API (TAPI) 数据模型建模的 OTN 分层网络, 从上至下是一个节点递归分解的过程, 可以将上层节点递归分解成其下层的节点和链路; 从下至上则是一个节点不断抽象的过程, 最底层的节点可以作为网元设备交换矩阵的抽象, 最顶层的节点可以作为整个网络拓扑的抽象。TAPI 中集成了 PCE 路径计算功能, TAPI 中的链路抽象和 PCE 架构中 TE 链路抽象原理一样, 都是将 PCE 计算出来的标签交换业务路径作为上层网络的 TE 链路呈现, 最底层是实际的物理链路。

在 TAPI 功能架构中, 使用 OF-Switch (on off-switch) 协议的 “光传输协议扩展” (TS-022) 作为南向接口协议, 在该 OF-Switch 扩展协议中, 采用和 GMPLS 相同的方法, 通过时隙或中心波长标识 OTN 各个层中的数据流, 扩展用于 OTN

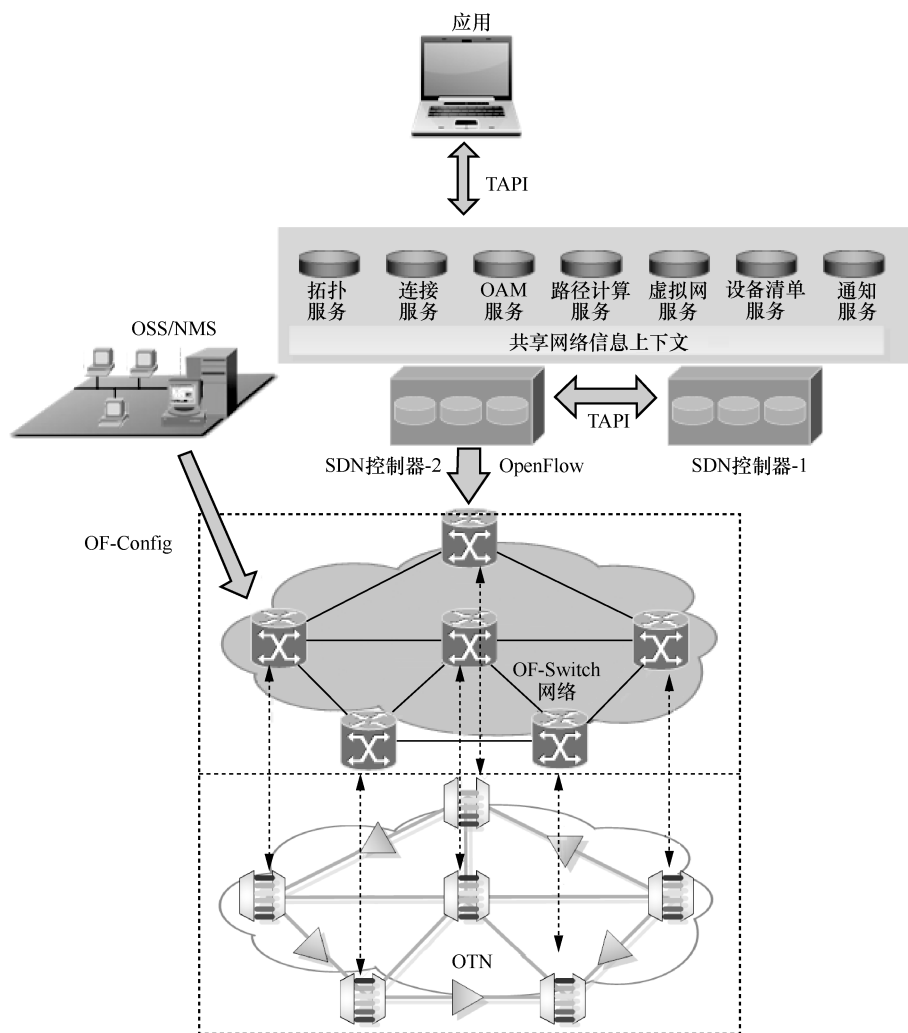


图9 OTN的TAPI功能架构

数据流的匹配和动作指令,添加 OTN 光层和电层连接的端口属性,新增 OTN 邻接关系发现功能,支持 OAM 和网络监控等。另外,在 OTN 的 TAPI 功能架构中,使用 OF-Config 协议作为设备的管理配置协议,并同样作了相应的功能扩展,以支持光传输网络及设备的安装配置。

2016 年,ONF 和 OIF 曾联合组织了全球多个运营商、设备厂商以及科研机构进行了基于 TAPI 1.0 的 OTN 互联互通测试;2018 年,ONF 和 OIF 再次组织了基于 TAPI 2.0 的互联互通测试,由此可见,ONF TAPI 是一个切实可行的 OTN SDN 功能架构模型,是未来 OTN 向 SDN 演进发展的方向之一。

但是,该架构只适用于采用 ONF CIM 建模并使用 OF-Switch 协议作为 D-CPI 的 OTN,无法应用于现有的 OTN,而且不同的 TAPI 技术版本之间还可能存在兼容性问题。

4 结束语

本文对几种 SDN 架构的技术特点,以及它们在 OTN 中的适用性进行了研究和分析。这些 SDN 技术架构中,除了集中式 PCE 架构可以直接用于当前基于 SNMP/MIB 信息模型的 OTN 之外,其他技术架构都需要首先对 OTN 底层设备及网络进行统一的 YANG 建模,基于数据模型实现设备层抽象和网络层抽象。



相较而言, IETF 的几个 SDN 技术架构更具开放性, 其南向和北向接口技术选择很多, 缺点是技术标准还不完善, 尤其是和 OTN、WDM 相关的很多光层/电层传输技术标准及其 YANG 数据模型目前还都处在讨论开发阶段。ONF 的 TAPI 功能架构经过了两次版本更新 (1.0 和 2.0 版本), 并且都通过了多厂商互联互通测试, 技术标准相对成熟, 但需要 OTN 遵照 TAPI 功能模型重新建模, 无法兼容现有技术模型。

尽管目前这些 SDN 技术架构还存在一些不足, 但是, SDN 化应该是以 OTN 为代表的光传输网络发展的必然方向, 并最终实现融合光网的控制集中化、硬件白盒化、软件开源化、接口开放化, 满足未来灵活多样的网络需求, 加速网络和业务创新步伐, 提高运维效率和降低成本。

参考文献:

- [1] 李璐. 联合厂商试水 CDN 共建中国电信开启境外 CDN 服务[J]. 通信世界, 2014(18): 39.
LI L. Collaborating with manufacturers to test CDN and jointly build China Telecom to launch overseas CDN services[J]. Communications World, 2014(18): 39.
- [2] 杨明华, 陈聪, 郑建群, 等. 安全可控的 SDN 技术研究[J]. 信息安全与技术, 2014, 5(8): 51-54.
YANG M H, CHEN C, ZHENG J Q, et al. Study on safe and controllable SDN[J]. Information Security and Technology, 2014, 5(8): 51-54.
- [3] ORLIKOWSKI W J. Using technology and constituting structures: a practice lens for studying technology in organizations[J]. Organization Science, 2000, 11(4).
- [4] 谢亮. 软件定义网络中 OpenFlow 交换机流表优化技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
XIE L. Research on optimization technology of OpenFlow switch flow table in software-defined network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 刘程, 李亚华, 卢晓宁. SDN 网络转发特性分析与流量监测研究[J]. 计量与测试技术, 2015, 42(8): 45-46, 48.
LIU C, LI Y H, LU X N. SDN forward network characteristic analysis and study in monitoring of flowing[J]. Metrology & Measurement Technique, 2015, 42(8): 45-46, 48.
- [6] 马文婷. 基于 OpenFlow 的 SDN 控制器关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
MA W T. Research on key technologies of SDN controller based on OpenFlow[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [7] 张卫峰. 深度解析 SDN 利益、战略、技术、实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
ZHANG W F. Deep analysis of SDN interests, strategies, technologies, and practices[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.