

软件定义光网络研究进展 与创新应用探讨

Research Progress and Innovation Applications of Software-Defined Optical Networks

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 06-0039-006

摘要: 以软件定义网络(SDN)控制平面技术为特征的软件定义光网络(SDON)代表着未来传送网演进趋势,是新型超大容量光网络实现高度智能化的重要发展方向。认为通过在光层引入基于软件定义组网的控制平面解决方案,利用软件编程的方式对光网络的结构和功能进行动态定制,完成光网络设备配置、传输参数调整和带宽灵活分配,能够更好地适应新型光网络智能化发展的要求。认为开发软件定义光网络创新应用成为 SDON 领域新的研究热点。

关键词: 软件定义光网络; 网络和业务编排; 虚拟化; 创新应用

Abstract: Software-defined optical networks (SDONs), which is characterized by the software-defined networks (SDNs) optical control plane, represent the trend of future transport networks. SDONs enable new-type ultralarge-capacity optical networks to achieve a high degree of intelligence. SDONs enable the structure and functionality of optical networks to be customized through software. They also enable optical device configuration, transmission parameter adjustment, and elastic bandwidth allocation by introducing a control plane solution based on SDNs. It perfectly caters for the novel architecture of intelligent optical networks. The innovative application of SDONs has become a new research direction.

Key words: SDON; network and service orchestration; virtualization; innovation applications

张杰/ZHANG Jie

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)
(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

- 网络可编程和虚拟化是 SDON 技术发展的主要趋势
- SDN 的智能架构及其控制平面关键技术已经成为不同光网络应用场景的重要研究内容
- SDON 研究将不断关注传送技术发展对控制平面新的要求

近年来,软件定义网络(SDN)发展迅猛,作为一种创新体系架构的 SDN 与其他技术相融合构成“SDN+”,是当前网络演进的重要方向^[1-5]。基于“SDN+光”的软件定义光网络(SDON),通过在光层引入 SDN 控制平面解决方案,能够更好地适应新型超大容量光网络智能化发展的要求。SDON 可以根据用户或运营商的需求,利用软件编程的方式对光网

收稿日期: 2015-09-30
网络出版日期: 2015-11-05
基金项目: 国家自然科学基金(61271189); 教育部-中国移动研究基金(MCM20130132); 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室研究基金(IPOC2014ZZ03)

络的结构和功能进行动态定制,完成光网络设备配置、调制格式适配和带宽灵活分配,达到光层资源虚拟化与按需提供的目的。网络可编程和虚拟化是 SDON 技术发展的主要趋势,并由此带来业务编排、网络安全性和可监测性等一系列挑战与研究课题。我们总结了国际学术界关于 SDON 技术的最新研究进展,分析探讨了儿种典型的 SDON 创新应用。

1 软件定义光网络的研究进展

软件定义光网络技术得到国际上主要发达国家的重视,先后设立了

一系列科研项目开展相关的基础性创新研究工作。我们总结了欧盟第 7 个科技框架计划 FP7 以及后续的地平线 2020 科研计划中信息通信技术方向关于软件定义光网络的重要研究进展。

1.1 IDEALIST 架构

针对传送网由传统波分复用系统向光层灵活栅格组网的发展趋势,欧盟 FP7 计划于 2012 年 11 月启动了“工业驱动面向业务与传送网的弹性自适应波长基础架构(IDEALIST)”项目^[6],共有 23 家单位参加,研究周期为 3 年,总经费约 800 万欧元。

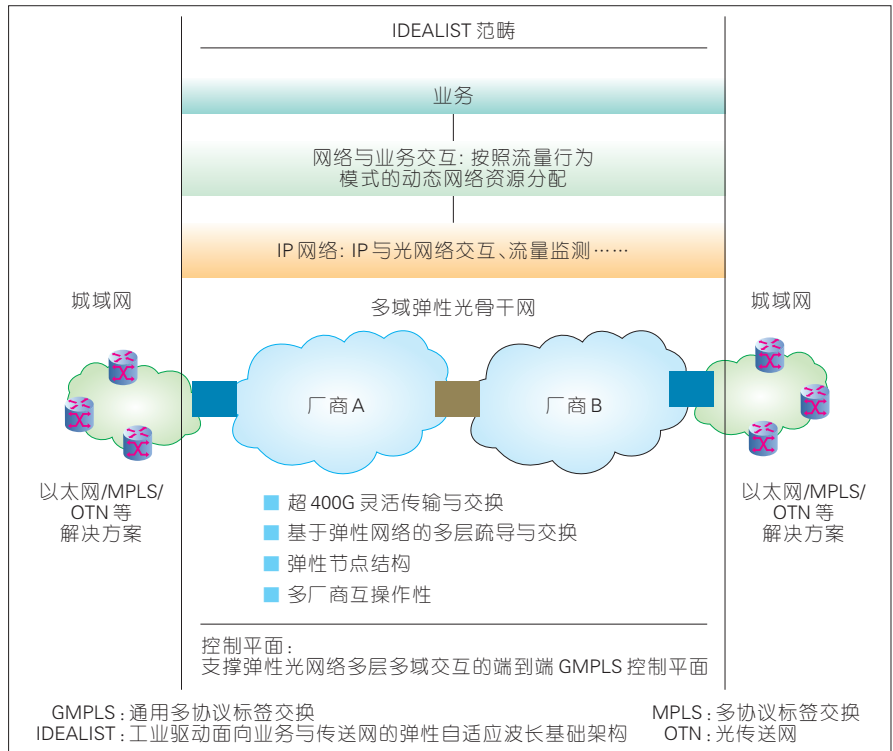
如图 1 所示, IDEALIST 项目致力于设计开发一种创新的传送解决方案,在具备多域和多技术控制平面的弹性化光网络架构基础上,实现自适应的网络与业务交互,支持 3D 视频、云计算等新的宽带应用,满足未来核心网大容量和高动态的性能需求。IDEALIST 面临的主要挑战是如何实现对可变带宽传输与交换、智能控制平面等弹性光网络关键技术标准化和工业化运用。IDEALIST 项目研究内容包括:支持灵活自适应传输以及单信道 100 Gbit/s 以上速率交换的数据平面节点结构和传送系统;面向多域、多层和多供应商弹性网络的控制平面协议扩展;IP 和弹性光层协同的动态网络资源分配;具备对弹性光网络离线规划和在线重优化能力的多层网络优化工具。

IDEALIST 项目控制平面的研究重点,是设计实现一种面向大容量弹性光网络节点与传送系统的运营级控制管理系统。IDEALIST 所提出的网络控制架构体现了分布式与集中式的协同,其分布式智能采用通用多协议标签交换(GMPLS)协议,主要针对实时响应、故障生存性等动态连接需求;集中式智能应用了 SDN 技术,在项目中定义为自适应网络管理器(ANM),一方面通过连接规划工具实现网络优化功能,另一方面提供与应用层的交互能力。如图 2 所示,ANM 使用基于应用的网络操作(ABNO)模型构建,在项目中结合弹性化需求重点规范了 PCE、指配管理器、VNTM、OAM 处理器等标准单元接口功能的实现细节。

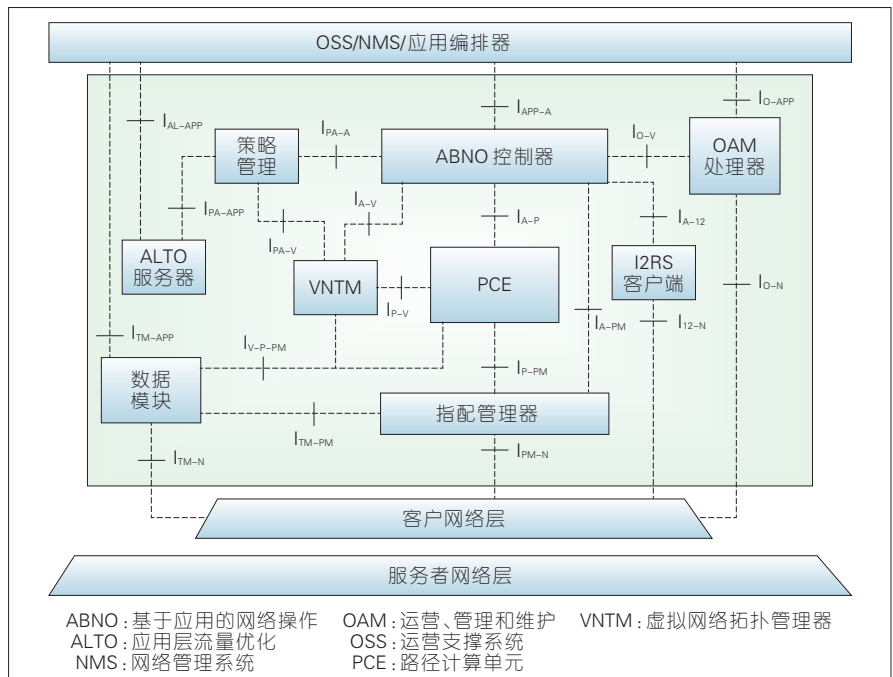
1.2 DISCUS 架构

欧盟 FP7 计划于 2012 年 11 月启动了“支持所有用户与业务无限带宽供应的分布式核心(DISCUS)”项目,该项目研究周期为 3 年,总预算超过 1 000 万欧元。

DISCUS 目标是设计和展示一种完整的端到端网络架构,研究包括长



▲ 图 1 IDEALIST 总体研究思路



▲ 图 2 自适应网络管理器的功能结构

距离无源以太网(LR-PONs)和扁平化光核心网等在内的一整套关键技术,通过简化结构设计,满足未来无线和光纤到用户驻地(FTTP)集成的

网络演进发展需求。

DISCUS 项目提出的灵活控制平面遵循 SDN 的层次化结构设计,具体方案如图 3 所示。项目定义了 3 类网

络控制平面逻辑单元:接入网控制器负责控制接入网元;核心网控制器负责控制支持核心传送的光网元设备;网络编排器负责从业务提供商获取请求信息,并解析为高层控制指令下达给接入网与核心网控制器。

1.3 STRAUSS 架构

为了从光网络层面有效支撑以太网数据业务的承载需求,欧盟与日本联合资助的“基于软件定义灵活光网络的高效可扩展以太网业务编排(STRAUSS)”FP7计划项目于2013年6月启动^[8],研究周期为3年,总预算500万欧元。

STRAUSS项目旨在定义一种适于以太网业务传送的高度有效和全球性(多域)的光基础架构,通过设计构建大规模的网络实验平台,研究和验证面向以太网端到端业务的软件定义组网、光网络虚拟化、超100G灵活光路/光包交换等异构传送与网络控制平面关键技术。

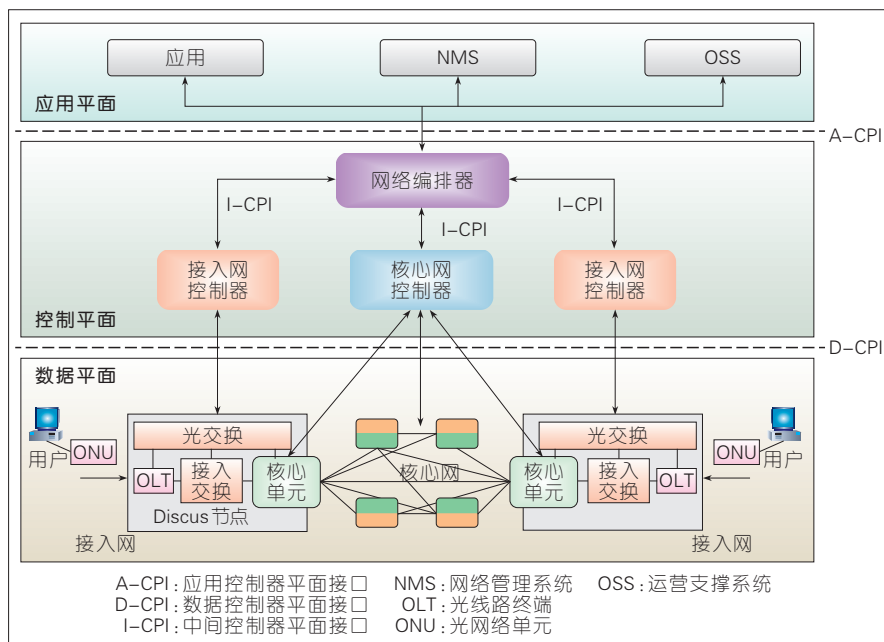
如图4所示,STRAUSS项目提出一种基于软件定义光以太网传送的未来网络架构,包含4个层次:

(1)灵活栅格光路/光包传送网络基础设施。涉及的关键技术包括:支持子波长粒度可扩展、成本与能耗有效流量疏导的光分组交换技术;支持灵活频谱管理能力的光谱域交换技术;支持不同调制格式与比特速率多数据流的软件定义可变带宽光转发器技术等。

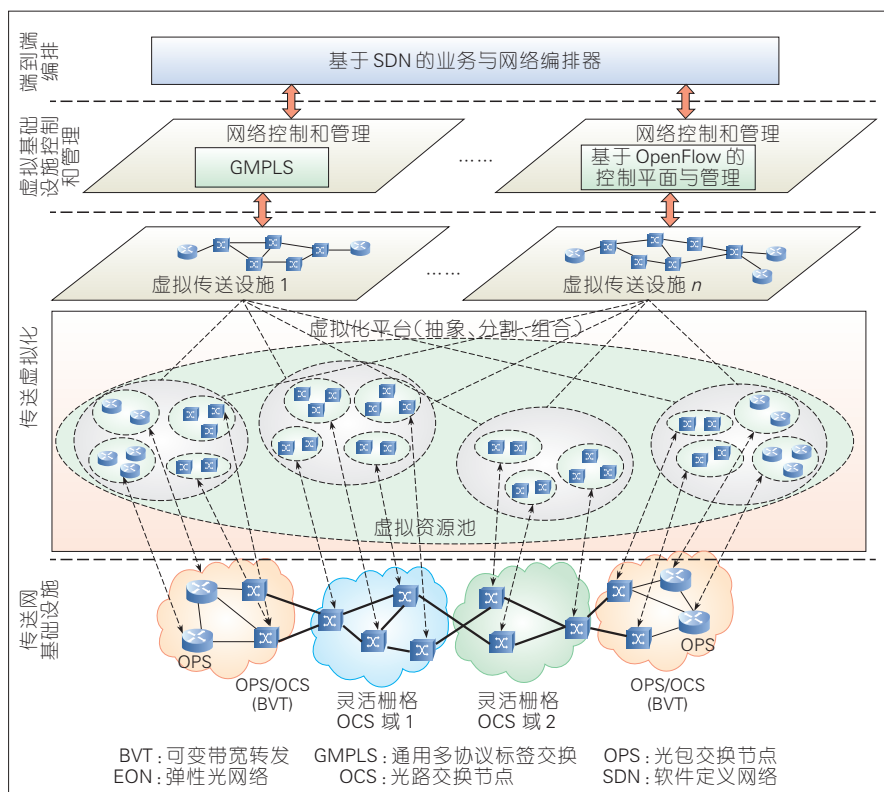
(2)传送网虚拟化层。通过对基础设施信息的抽象,实现异构数据平面资源虚拟化,物理层设施可以被分割和/或聚合为虚拟资源,同时选择来自不同域的虚拟资源能够构造端到端的虚拟传送网络。

(3)面向虚拟化基础设施的控制平面。利用GMPLS和/或基于OpenFlow的网络控制协议,提供自动连接配置和恢复业务。

(4)业务和网络编排层。在顶层引入SDN的业务与网络编排器,实现



▲图3 DISCUS控制平面设计方案



▲图4 基于软件定义光以太网传送的未来网络架构

不同类型控制平面的交互和提供端到端的以太网传送。

针对项目多域异构传送的研究重点,设计并提出了控制编排协议

(COP)的概念,利用SDN控制器摘要实现了一组控制平面功能的公共集,允许在不同类型的控制平面(包括OpenFlow、GMPLS/PCE)之间进行交互

互,实现成分组与电路光交换网络的统一控制。COP协议通过YANG模型定义和采用RESTconf传送消息。COP提供两项主要功能:全网范围内的集中式协调编排,满足跨越异构网络的动态连接性需求;引入新的接口和协议,用于对已知域中特殊控制平面技术的抽象。项目组不仅提出了STRAUSS框架内的COP应用描述(如图5所示),还针对IDEALIST、DISCUS、COMBO、INSPACE等欧盟FP7计划项目设计COP用例。

1.4 SAFARI 架构

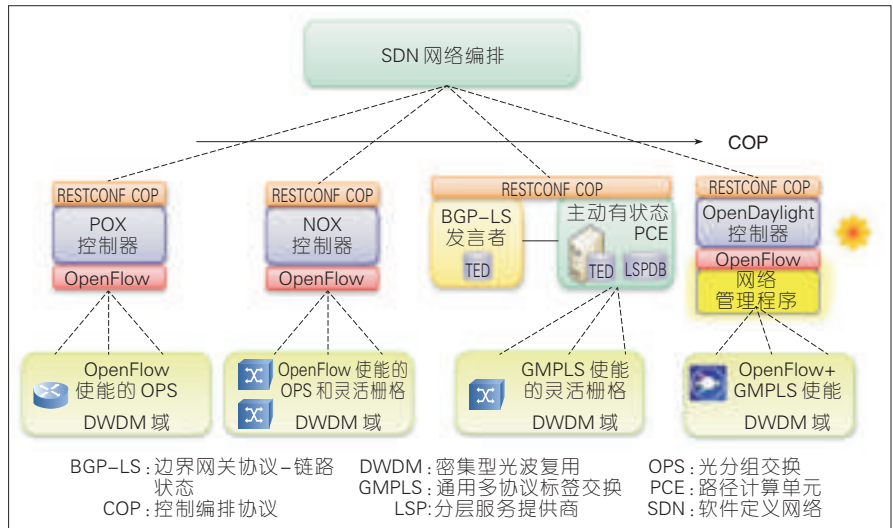
欧盟地平线2020计划于2014年10月启动了欧盟-日本联合项目“面向可重构基础设施的灵活可扩展光架构(SAFARI)”^[9],研究期限为3年,总预算近150万欧元。

SAFARI的目标是攻克可编程光硬件和基于空分复用的光器件关键技术,通过开发基于SDN可编程控制的光学硬件实现可扩展到单通路400 Gbit/s及以上速率的多流传送能力,满足超大容量可扩展和高度灵活的光传送功能需求。图6给出了SAFARI项目提出的光传送可编程控制解决方案。

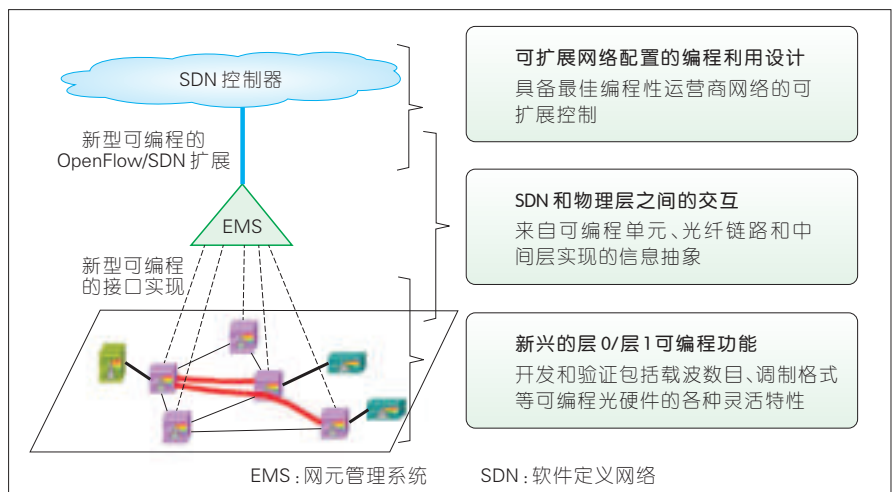
1.5 NEPHELE 架构

数据中心流量的快速增长对数据中心网络提出了一系列挑战,欧盟地平线2020计划于2015年2月启动了“面向应用感知SDN云数据中心的端到端可扩展与动态可重构光架构(NEPHELE)项目”^[10],研究期限为3年,经费超过300万欧元。

NEPHELE项目致力于研发一种动态光网络基础设施,旨在克服当前数据中心网络的结构化限制以及降低成本与功耗,推动云数据中心的建设发展。针对NEPHELE提出的混合电光网络架构,计划采用SDN控制器和相应接口技术开发一个全功能的控制平面叠层。南向侧支持对物理设施的抽象,实现动态的硬件可重



▲图5 STRAUSS COP用例



▲图6 SAFARI光传送的可编程控制方案

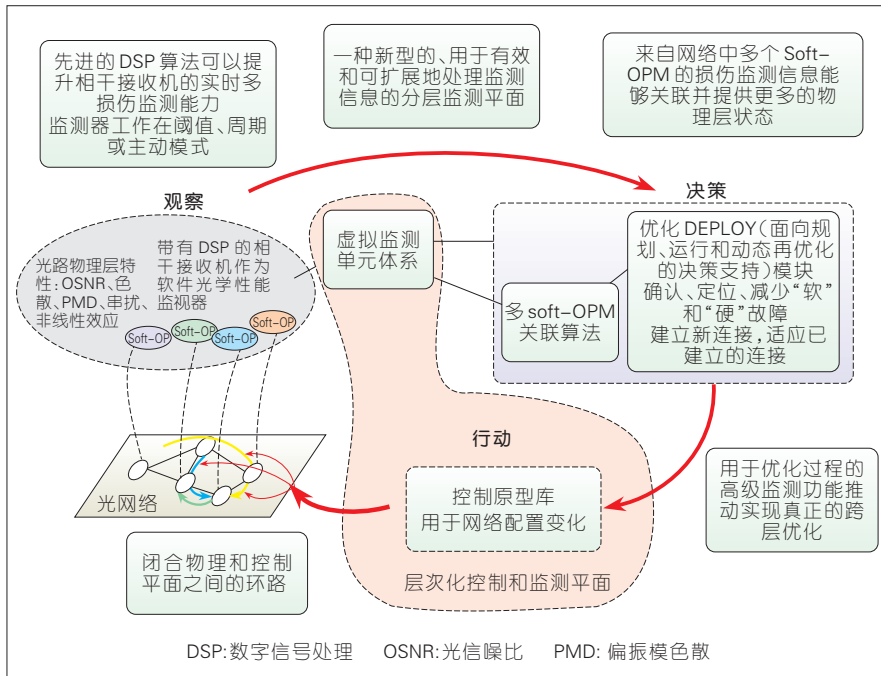
构能力。北向侧通过应用编程接口连接SDN控制器和网络应用功能。NEPHELE创新控制平面设计将使得应用定义组网成为可能,促进了基于混合光电基础设施的硬件与软件虚拟化。同时与面向数据中心间互联的SDN功能模块相集成,可针对虚拟机迁移等实际需要以及现有电信和数据中心运营商域间透明组网的业务等级约定要求,实现带宽资源的全网动态分配。

1.6 ORCHESTRA 架构

欧盟地平线2020计划于2015年2月启动了“采用整体性跨层、自配

置和真正灵活方式的光性能监测使能动态网络(ORCHESTRA)”项目^[11],研究期限为3年,总预算260万欧元。

如图7所示,ORCHESTRA项目认为光网络实现可控性与可优化的决策前提是必须能够进行细致地性能观测。因此,项目重点研究物理层与网络控制平面之间的闭合环路,通过光的性能监测信息与控制平面实体的互动,实现一种真实的动态控制与跨层优化网络,提高网络性能与传送效率。ORCHESTRA具体研究的内容包括:开发基于先进数字信号处理的物理层多损伤检测算法套件,利用分布式软件定义光性能监测器提供的



▲ 图7 ORCHESTRA 总体研究思路

信息并结合先进的关联算法提出全网光通路传输质量判断的整体性解决方案,设计具备主动/被动监测能力的分级控制与检测架构以快速和有效应对网络性能劣化与故障,开发针对故障管理和网络再优化的动态优化程序等。

1.7 ACINO 架构

欧盟地平线 2020 计划“以应用为中心的 IP 与光网络协同编排 (ACINO)”项目于 2015 年 2 月启动^[2],研究期限为 3 年,总预算 288 万欧元。

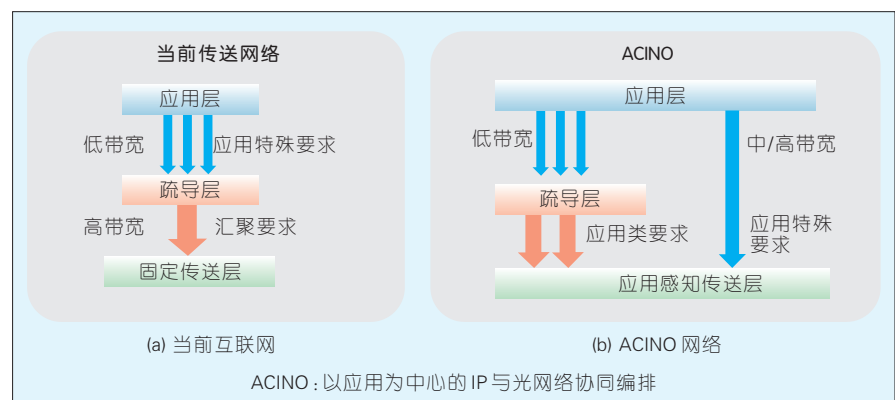
如图 8 所示,互联网演进形成了典型的 3 层结构,最上方应用层产生业务流量,由中间 IP/OTN 层进行疏导,最后利用底层的光路实现传送。在这一过程中疏导层将大量的细颗粒业务直接映射到数量较少的大带宽传送通路,而没有考虑业务性能的区别要求,由于应用层和光层适配信息的不准确性,一些对时延等性能敏感的特殊应用需求难以得到保证。

ACINO 提出了一种以应用为中心的网络概念,能够区分不同应用对业务流的特点并且分类映射到光

层,对高带宽或有特殊性能要求的业务流将直接面向光层部署,例如数据中心之间的数据库迁移等。为此 ACINO 计划设计一套开源、厂商不可知的模块化编排器,通过 IP 与光协同的多层规划和优化实现由应用需求到底层光路的映射管理。

针对国际上已开展的软件定义光网络研究项目进行分析,可以得出如下结论:

(1) 基于 SDN 的智能架构及其控制平面关键技术已经成为不同光网络应用场景的重要研究内容,对提升网络传送的性能和效率起到重要的



▲ 图8 ACINO 网络结构方案

作用。

(2) SDN 研究将不断关注传送技术发展对控制平面新的要求。

(3) 基于网络与业务编排的 SDN 可编程和虚拟化将会成为关注焦点。

2 软件定义光网络的创新应用

基于软件定义组网的开放集中式控制架构,为软件定义光网络的创新应用 (Apps) 提供了有效的解决方案。下面介绍几种典型的 SDN 应用实例。

(1) 按需带宽提供业务

传统的专线业务提供方式是营业厅模式,以流程为中心,主要依靠电话、填写业务申请单等方式申请专线业务。存在业务响应速度慢,用户体验不好,流程长,人工环节多,业务开通运营成本高,与 IT 系统集成困难等多种问题。基于 SDN 的按需带宽提供业务 (BoD) 以客户为中心,采用互联网模式,通过开放传送网综合网络控制和管理系统北向应用程序编程接口 (API),向上层 BoD 应用提供网络灵活编程能力。客户可通过 BoD 应用远程自助灵活管理和控制其专线业务,包括业务连接的建立、修改、删除和查询等操作。其可以省去客户到营业厅申请、办理和等待业务开通等诸多环节,客户的业务体验大幅提升;同时可以节省运营商从营业厅到网络运维多环节流程成本,节

省专线运营成本;并能够提供标准北向接口,方便上层应用的快速更新,保证了新服务的快速上线。

(2) 虚拟传送网业务

随着云计算、大数据等宽带业务的迅猛发展,以数据中心为核心节点的数据中心网络将成为未来网络的重要形态。在数据中心网络中,用户需求不仅停留在端到端的连接,还需要一张多点互联的虚拟网络。虚拟传送网业务(VTS)利用传送SDN的网络虚拟化能力,为大客户/虚拟运营商提供虚拟传送网服务,类似于客户拥有自己的专用传送网。多个VTS用户可以共享运营商的物理传送网,从而提供网络资源利用率。VTS业务的用户请求可以包括流量矩阵、服务等级协议(SLA)、网络拓扑、OAM、恢复等。在给定的虚拟网络中,用户可以完全控制虚拟网络内连接的建立/修改/删除,包括连接路由的选择(如显示路由)和业务的保护恢复等。SDON控制器除了根据应用层的请求进行业务配置,还需要能够对VTS用户和业务进行管理。用户和业务管理功能可以采用独立的应用软件实现,也可以在网络管理系统(NMS)或网元管理系统(EMS)中实现。

(3) 异构网络统一控制

随着融合网络技术的发展,不同类型的业务和网络资源交织叠加在一起,形成了异构化的网络互联环境,加剧了全网业务控制与资源管理的实现难度。软件定义光网络方案能够有效地解决异构网络之间的互联互通问题。通过对OpenFlow等相关协议进行扩展,开发面向对象的交互控制接口,可以实现异构网络信息抽象化和跨层网络控制集成化,从而在接入网与核心网、数据网与光网络、有线网和无线网之间建立起具备统一控制能力的新型异构网络架构体系,为实现多域网络全局控制、跨层资源协同优化、开放业务统一提供奠定技术基础。

(4) 虚拟资源动态迁移

数据中心光互联是当前数据中心组网的重要形式,数据动态迁移备份是数据中心一种重要的业务应用形式。因为数据中心迁移数据量巨大,需要光网络提供强大的带宽支持。常规的虚拟机迁移主要是在应用层实现,缺乏网络资源的统筹考虑,难以实现网络状态实时响应以及跨层资源的统筹优化。软件定义光网络通过集中控制器可以实现数据中心应用资源和网络资源的协同处理,实现传送网与数据中心资源的灵活互动,提供数据中心之间大容量虚拟资源的动态迁移解决方案,并有效地提高资源迁移过程中数据传输的可靠性。

(5) 业务重调度优化

在传送网中,客户业务请求依次到达,运营商按照其请求顺序即时地为每个请求预留对应的资源,同时可以根据预计的资源状态为每个请求预留最优化的路由和资源。但是由于多个业务以串行的方式被服务,因此以最优化的方式服务每一个请求并不代表全局的最优化。业务重调度优化应用(SSE)根据预留型业务的特征,可以对已经服务的多个业务进行批量的再调整,对每个业务所占资源进行重新分配,从而实现全局的资源优化和负载均衡。

未来软件定义光网络的创新应用开发将主要集中在两个方面:一是通过创新应用实现光网络的整体控制和管理,增强对网络自身资源的感知与优化能力;提升智能运维水平;二是面向网络安全与生存性、时间敏感业务等用户实际需求,在光网络应用层进一步提出创新的解决方案。

3 结束语

以SDN控制平面技术为核心的软件定义光网络代表着未来传送网发展趋势,是新型超大容量光网络实现高度智能化的重要解决方案。欧盟等世界主要发达国家纷纷投入力

量,开展相关技术的基础性研究与应用探索。从国际研究进展来看,在光层上实现基于软件定义组网的可编程控制与虚拟化更具挑战性,还有很多问题需要解决,不会一蹴而就,但必须坚持,因为发展动态灵活的光网络基础设施是大势所趋。同时,针对带宽提供的管控能力增强将推动传送网从“带宽运营”到“带宽经营”转变,开发丰富多样的软件定义光网络创新应用成为新的研究热点。

参考文献

- [1] 纪越峰,张杰,赵永利.软件定义光网络(SDON)发展前瞻[J].电信科学,2014,(8):19-22
- [2] 张杰,赵永利.软件定义光网络技术及应用[J].中兴通讯技术,2013,19(3):17-20. doi: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.03.004
- [3] CHANNEGOWDA M, NEJABATI R, and SIMEONIDOU D. Software-Defined Optical Networks Technology and Infrastructure: Enabling Software-Defined Optical Network Operations [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5 (10): A274-A282
- [4] PHILIP N J. Software Defined Optical Network[C]// ICOCN2012, Pattaya, Thailand, 2012
- [5] ZHANG J, ZHAO Y L, YANG H, et al. First Demonstration of Enhanced Software Defined Networking (eSDN) over elastic Grid (eGrid) Optical Networks for Data Center Service Migration[C]//OFC2013, Anaheim, CA, USA
- [6] ICT-IDEALIST [EB/OL]. <http://www.ict-idealists.eu/>
- [7] DISCUS Project [EB/OL]. <http://www.discus-fp7.eu/>
- [8] STRAUSS Project [EB/OL]. <http://www.ict-strauss.eu/en/>
- [9] SAFARI Project [EB/OL]. http://cordis.europa.eu/project/rcn/196615_en.pdf
- [10] NEPHELE Project [EB/OL]. <http://www.nepheleproject.eu/>
- [11] ORCHESTRA Project [EB/OL]. <http://www.orchestraproject.eu/>
- [12] ACINO Project [EB/OL]. <http://www.acino.eu/>

作者简介



张杰,北京邮电大学教授、博士生导师,信息光子学与光通信研究院副院长,兼任北京通信学会理事,北京通信学会青年工作委员会副主任,中国通信学会光通信委员会委员等;主要研究领域为光网络体系结构、控制管理等;已主持基金项目6项,获得2项国家技术发明奖;已出版著作8部,发表学术论文300余篇。