



基于 SDN 的多域光网络虚拟化技术

刘世栋¹, 王攀²

(1. 国网智能电网研究院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着信息社会的发展, 网络中的信息流量开始急速增长, 光网络不仅需要大容量和长距离的传输, 还需要动态和灵活的管控, 传统自动交换光网络架构的通信模式很难满足这一需求。同时, 海量数据的存储访问, 需要扩展性极强的分布式存储架构来实现。针对面向数据中心之间互联的多域光网络, 提出了一种基于 SDN 的跨域光网络虚拟化服务的资源权衡策略。实验证明, 该方法可以对网络资源进行高效合理的映射分配, 提高业务接受比、降低网络阻塞率, 满足用户的需求。

关键词: 虚拟化光网络; 资源分配算法; OpenFlow 协议; 基于 SDN 的光网络

中图分类号: TN915.8

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016056

Multi-domain optical network virtual technology based on SDN

LIU Shidong¹, WANG Pan²

1.State Grid Smart Grid Research Institute, Nanjing 210003, China

2.Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: With the development of information society, the information flow in the network began to grow rapidly, optical network requires not only large capacity and long distance transmission, but also the need for dynamic and flexible controls, the traditional automatic switching optical network architecture is very difficult to meet it. At the same time, storage access to massive amounts of data is a very high requirement for the scalability of the distributed storage architecture. A resource balancing strategy based on SDN for the inter-domain optical network virtualization service was proposed. Simulation results indicate that network resources can be allocated effectively, service acceptance ratio is improved, and network blocking probability is reduced.

Key words: virtualized optical network, resource allocation algorithm, OpenFlow protocol, SDN-based optical network

收稿日期: 2015-11-20; 修回日期: 2016-01-07

基金项目: 2013 江苏省六大人才高峰计划基金资助项目 (No.rld201303); 2013 国家发展和改革委员会信息安全专项基金资助项目 (No.2013 外 79); 国家电网公司 2014 年科技项目“电力信息通信网络流量预测和管道智能化关键技术研究及应用” (No.XXN17201400030); 2015 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (No.BY2015011-02)

Foundation Items: 2013 Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (No.rld201303), 2013 Information Security Special of National Development and Reform Commission (No.2013 外 79), 2014 Science and Technology Projects of State Grid: Research and Application of Key Technologies of Network Traffic Prediction and Smart Pipeline for Electric Information Communication Network (No.XXN17201400030), 2015 Prospective Joint Research Project of Jiangsu Province (No.BY2015011-02)



1 引言

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 (software defined optical network, SDON) 能够统一调度和控制各种光层资源,满足业务多样化、复杂化的需求,实现对光网络智能化的延伸与增强^[1]。同时,流量的急速增长,对未来光网络的扩展会造成一定的限制与约束,由于部署的光纤和终端非常昂贵,如何提高现有资源的利用率变得十分关键。网络虚拟化技术可以解决网络设备僵化问题,使得物理设备资源可共享化,是应对互联网爆发式发展的有效途径^[2]。随着云计算、大数据的爆炸式出现,数据中心的存储以及计算资源作为大数据的最终载体,已成为数据中心 IT 资源的基础架构。而随着存储技术的发展,集中式存储已不再是数据中心的主流架构。海量数据的存储访问,需要扩展性、伸缩性极强的分布式存储架构来实现。因此,基于 SDN 的多域光网络虚拟化技术的理论与实践^[3],是十分重要且必要的。

本文提出了针对虚拟光网络映射的资源权衡策略,并基于软件定义的多域频谱灵活光网络实验平台,植入了业务模型,完成了业务模型和分配算法的仿真。与传统的随机路由算法、负载均衡算法相比,本文算法有效降低了网络阻塞率,提高了网络性能。

2 相关工作

针对光传送网所面临的控制不灵活和资源利用低效等问题,国内外已展开对软件定义光网络的控制理论研究和网络实验,其标准化工作以及相关算法的研究已成为重要的研究领域热点之一。

(1) OpenFlow 协议扩展

软件定义光网络通过将数据平面和管理平面解耦,使得网络变得程序化、动态化。作为软件定义网络中主流的控制协议,OpenFlow 已经具有基于流交换层次的开放式标准接口,采用了集中式控制架构,实现了软件定义路由、交换以及网络管理等。目前,已经有一些关于 OpenFlow 协议的扩展,对基于光交换的上下路端口、光载波的中心频率以及光传输带宽等光数据流进行了补充定义。通过这些扩展,可以将 OpenFlow 协议引入光域,并实现软件定义网络类型的光路建立和管理。

(2) 数据中心光互联体系架构

为了解决数据中心内网互联的种种挑战,采用弹性光网络技术来实现数据中心的互联,弹性光网络技术的核心思想是根据业务所需的带宽来灵活分配大小相符的频谱资源进行业务传送。基于弹性光网络的架构,超波长、子波长以及混合传输速率的流量模式可以在底层的物理网络中共存,从而实现低能耗、高可靠性、高效率的光传输通道^[4]。为了支持多终端的云平台以及物理硬件设备的共享,提高频谱的利用率,虚拟化技术被越来越多的科研人员所重视。参考文献[5]中详细介绍了一种业务感知的虚拟数据中心架构,将光网络的网络资源和数据中心 IT 资源的虚拟化结合起来,这一部分还未有过深入研究。

(3) 网络虚拟化技术

随着网络虚拟化技术的成熟和光网络技术优势的凸显,光网络虚拟化日渐受到更多学者重视。国内外学者从整体架构、应用场景、算法设计等角度对光网络虚拟化技术进行深入研究,推动了光网络虚拟化技术的发展。参考文献[6]站在数据中心应用的角度,对光网络虚拟化技术进行了研究。参考文献[7,8]站在算法的角度,提出了光网络虚拟化映射的 ILP 模型和启发式算法。可见,随着越来越多的光器件具有可编程能力,光网络的虚拟化成为可能。通过光网络整体架构和映射策略的不断完善,光网络虚拟化将很好地支持面向数据中心的网络应用。

3 问题描述

虽然网络虚拟化技术使得物理设备资源可共享化,但资源总量是一定且有限的。在多域网络互联场景中,资源分配是最关键的。为了实现数据中心网络的平衡,基于数据中心资源负载均衡算法,将数据中心的计算能力考虑到虚拟化节点映射的策略中。在频谱灵活光网络中,网络资源的本质从波长到频谱转化,对资源的管控变得复杂。在路由选择和资源分配中,要考虑到两个约束:波长一致性和频谱连续性。同样,频谱灵活光网络中每个路径的可用频谱资源都可能存在碎片,要是碎片不能被清理,频谱资源利用将会受到影响。

在不影响业务传输质量的前提下,需要适当对业务流经频繁的节点链路进行部分流量疏导,实现应用资源和带宽资源的协同虚拟化,在部分流量被疏导后,进行统一映射,从而可以有效减少阻塞率,提高业务接受比。

4 基于 SDN 的多域光网络虚拟化技术模型

虚拟光子网的映射过程,是指在满足底层物理网络资源容量约束的前提下,将多个具有不同拓扑结构的虚拟光子网同时映射到共享的基础架构中,并且保证物理网络资源以及数据中心服务器的应用资源得到充分利用。

软件定义光网络中的虚拟化静态映射是一个 NP 问题,为了更好地描述映射过程以及虚拟光子网与物理网络的映射关系,本文将采用表 1 中的符号。

表 1 符号对照

变量	含义
$G(V^s, E^s)$	物理层的网络拓扑
c_{v^s}	每个物理节点的计算资源容量
B^s	每个物理链路 $e^s \in E^s$ 上子载波的总数
$W_{(u^s, v^s), k}^s$	物理链路 $e^s = (u^s, v^s)$ 上第 k 个 MCSB 的起始子载波下标
$Z_{(u^s, v^s), k}^s$	物理链路 $e^s = (u^s, v^s)$ 上第 k 个 MCSB 的结束子载波下标
$G(V^r, E^r)$	虚拟光网络请求
$\frac{S_{e^r}}{d_{e^r}^r}$	虚拟链路 $e^r \in E^r$ 的两端节点
$C_{v^r}^r$	虚拟节点 $v^r \in V^r$ 所需的计算资源
n^r	每个虚拟光链路所需的带宽
ξ_{v^r, v^s}	若虚拟节点 v^r 映射到物理节点 v^s 上, 值为 1; 否则为 0
$f_{u^s, v^s}^{e^r}$	若虚拟链路 $e^r \in E^r$ 映射到物理链路 $e^s \in (e^s, v^s)$ 上, 值为 1; 否则为 0
$\delta_{(u^s, v^s), k}^{(k)}$	若物理链路 $e^s \in (u^s, v^s)$ 上第 k 个 MCSB 的一个 CSB 分配给了 VON 请求 $G(V^r, E^r)$, 值为 1, 否则为 0
w	整数变量, 表示分配给 VON 请求 $G(V^r, E^r)$ 的 CSB 起始子载波下标
z	整数变量, 表示分配给 VON 请求 $G(V^r, E^r)$ 的 CSB 结束子载波下标
CSB	连续频谱块为频域中连续可用的空闲子载波
MCSB	在某一频域, 包含所有可用的空闲连续频谱段

优化目标函数如下:

- $\min f(w + B^s \sum_{e^r \in E^r} \sum_{(u^s, v^s) \in E^s} f_{u^s, v^s}^{e^r});$
- 最小化虚拟光子网请求所使用的子载波总数;
- 最小化分配的连续空闲频谱段的起始子载波下标。

模型及变量约束条件具体如下。

(1) 节点映射

$$\sum_{v^s \in V^s} \xi_{v^r, v^s} = 1, \quad \forall v^r \in V^r \quad (1)$$

$$\sum_{v^r \in V^r} \xi_{v^r, v^s} \leq 1, \quad \forall v^s \in V^s \quad (2)$$

$$\sum_{v^s \in V^s} \xi_{v^r, v^s} c_{v^s}^s \geq c_{v^r}^r, \quad \forall v^r \in V^r \quad (3)$$

其中, 式(1)表示每一个虚拟节点需要至少映射到一

个物理节点上; 式(2)表示一个物理节点最多承载一个虚拟节点, 即不同的两个虚拟节点不能映射到同一个物理节点上; 式(3)说明实际映射的物理节点的空闲资源需要大于或等于虚拟节点请求所需的资源容量。

(2) 链路映射

$$\sum_{(u^s, v^s) \in E^s} f_{u^s, v^s}^{e^r} - \sum_{(v^s, u^s) \in E^s} f_{v^s, u^s}^{e^r} = \xi_{s^r, u^s} - \xi_{d^r, u^s}, \quad \forall e^r \in E^r, \forall u^s \in V^s \quad (4)$$

$$\sum_{e^r \in E^r} (f_{u^s, v^s}^{e^r} + f_{v^s, u^s}^{e^r}) \leq 1, \quad \forall (u^s, v^s) \in E^s \quad (5)$$

$$z - w + 1 = n^r \quad (6)$$

其中, 式(4)为流守恒约束条件, 以保证在每个非端点的物理节点上, 数据流入等于流出; 式(5)可保证所有的虚拟光链路在映射到物理拓扑时都是链路分离的, 即不会发生不同的虚拟链路映射到同一条物理链路上的情况; 式(6)可确保给任意虚拟光子网请求分配的连续空闲频谱段均能够满足带宽需求。

$$\sum_k \delta_{(u^s, v^s), k}^{(k)} = \sum_{e^r \in E^r} (f_{u^s, v^s}^{e^r} + f_{v^s, u^s}^{e^r}), \quad \forall (u^s, v^s) \in E^s \quad (7)$$

$$w \geq w_{(u^s, v^s), k}^s \delta_{(u^s, v^s), k}^{(k)}, \quad \forall (u^s, v^s) \in E^s, \forall k \quad (8)$$

$$z \leq (z_{(u^s, v^s), k}^s - B^s) \delta_{(u^s, v^s), k}^{(k)} + B^s, \quad \forall (u^s, v^s) \in E^s, \forall k \quad (9)$$

式(7)~式(9)为了确保给 $G(V^r, E^r)$ 分配的连续空闲频谱段是某一条物理链路上唯一的可用连续频谱段, 且该路由频域上的可用连续频谱段的容量比分配的空闲连续频谱段要多。

(3) 变量取值范围

$$\xi_{v^r, v^s} \in \{0, 1\}, \quad \forall v^r \in V^r, v^s \in V^s \quad (10)$$

$$f_{u^s, v^s}^{e^r}, \delta_{(u^s, v^s), k}^{(k)} \in \{0, 1\}, \quad \forall (u^s, v^s) \in E^s, \forall e^r \in E^r, \forall k \quad (11)$$

$$w, z \in [1, B^s] \quad (12)$$

式(10)~式(12)用于约束变量的取值范围。其中, 式(10)表示虚拟节点和物理节点的关系只有两种情况, 即映射关系或者非映射关系, 故变量 ξ_{v^r, v^s} 的取值非 0 即 1。

5 基于 SDN 的多域光网络虚拟化技术算法

(1) 传统方法——随机路由算法

由最短路由 (K shortest path, KSP) 计算映射后物理网络中, 相应两节点间的 K 条最短路由及分配路径。在所分配的路径中采用首次命中 (FF) 算法寻找邻接可用的带宽资源。若分配资源失败, 则寻找次短路径再次确认, 直到第 K 条路径。随机算法没有采用任何优化措施, 但计算复杂度很低, 执行速度很快。因此, 当资源优化和运行时间相比



并不是特别重要时,可以采用随机算法来节省运算时间。随机路由算法通过一条随机路径来承载虚拟链路。

(2)传统方法——负载均衡算法

该算法先映射链路,后映射节点。当一个虚拟子网请求到达时,按所需频谱带宽的大小逆序排列选择一条虚拟链路。然后寻找一组满足计算资源需求的物理节点集合,用来作为所选虚拟链路两端的虚拟节点,且该集合需要排除已经映射了同一个虚拟子网请求的虚拟节点的物理节点。在整个过程中,首先考虑网络负载均衡,从而可以很好地确保网络资源的利用率。

(3)创新方法——资源权衡算法

本文提出了适用于大规模虚拟网络业务的资源映射的算法——资源权衡映射算法,与随机路由算法和负载均衡不同的是,资源权衡算法通过一条负载均衡路径来承载虚拟链路,并实现应用资源和带宽资源的协同虚拟化。资源权衡算法可以分为如下两个步骤。

①节点映射

每个虚拟节点在满足地理位置和交换能力的条件下,映射到对应的物理节点上。映射原则为带有较大需求的虚拟业务节点映射到空闲较大容量的物理光节点中。

②链路映射

每个虚拟链路在满足一定频谱宽度的条件下,通过KSP方法映射到物理路径上。在找到对应的 K 条路由后,会检测该路径上每个物理链路是否满足波长一致性和频谱连续性。该方法需要判断虚拟链路映射产生的集合中每一个节点对 (u^s, v^s) 的所有路由组合,并记录每个节点对 K 条路由的映射概率,记为 $P(u^s, v^s)$ 。在所有候选的 K 条链路中,选择具有最高映射概率的路由,并在所选路由上采用一定的调制格式为虚拟链路分配频谱资源。在整个过程中,考虑了网络频谱资源的均衡,可以很好地确保网络资源的利用率。

其中,映射概率的计算算法为:

$$P(u^s, v^s) = \frac{\text{链路}(u^s, v^s) \text{上满足容量 } w \text{ 的空闲连续频谱段数}}{\text{链路}(u^s, v^s) \text{上的频谱带宽总数}} \quad (13)$$

具体算法描述如图1所示。

6 仿真与实验

将本文提出的资源权衡算法与传统的随机映射算法和负载均衡算法进行比较。仿真中采用14个节点的NSFNET拓扑。假设每段物理链路的容量为12.5 THz,子

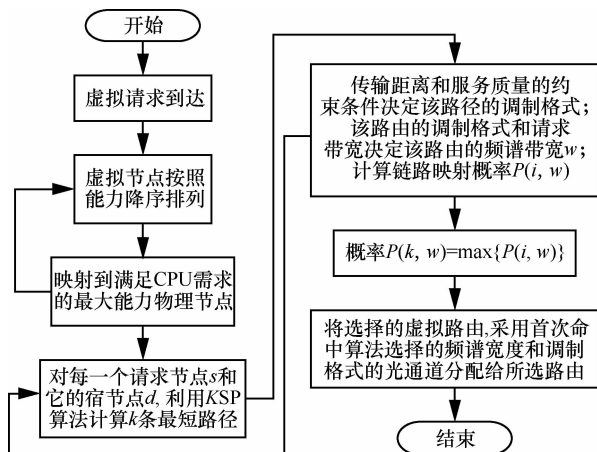


图1 资源权衡算法流程

载波的粒度为12.5 GHz,每个节点的CPU容量为2 000。虚拟光网络的业务请求随机产生,业务的到达和离去均服从泊松分布。其中虚拟节点的个数设定为3~5的随机整数,每个节点请求的CPU资源占节点资源比例在0.5%~1.0%中均匀分布,每根虚拟链路请求的带宽在{12.5 Gbit/s, 25 Gbit/s, 50 Gbit/s, 100 Gbit/s}中随机分布。

图2、图3为3种启发式映射算法(随机路由、负载均衡、资源权衡)业务映射阻塞率的变化曲线。可以看出,3种算法的资源阻塞率随着业务请求数量的增加均呈现上升趋势。业务数量很少时,随机路由算法初始阻塞率最低,但由于其没有对网络状态进行任何优化,随着业务数目的增加而急速上升。资源权衡算法和负载均衡算法性能基本持平,运行初始阶段,负载均衡算法的平均性能要优于资源权衡算法,这是因为负载均衡算法对核心节点的流量分配采用疏导策略,使得网络中各业务的流量分布相对平衡;但当仿真运行进入平稳阶段时,网络状态相对饱和,资源权衡算法的阻塞率低于负载均衡算法,这是因为

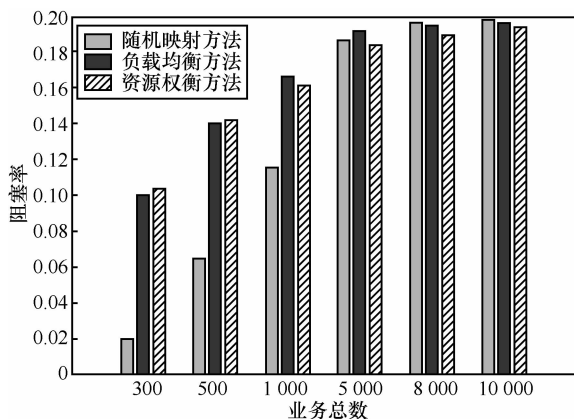


图2 3种映射算法在不同业务总数下的阻塞率对比

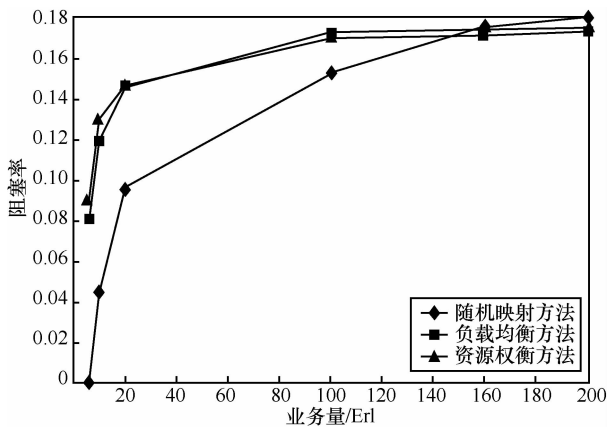


图3 3种映射算法在不同业务量下的阻塞率对比

资源权衡算法既能够进行流量疏导,又能够合理利用节点容量和链路频谱,从而降低了虚拟网络拓扑的映射难度,提高了映射的成功率。

资源接受比随时间的变化曲线如图4所示。可以看出,资源权衡算法的映射成功率远远超过了随机映射算法,具有明显的优势。

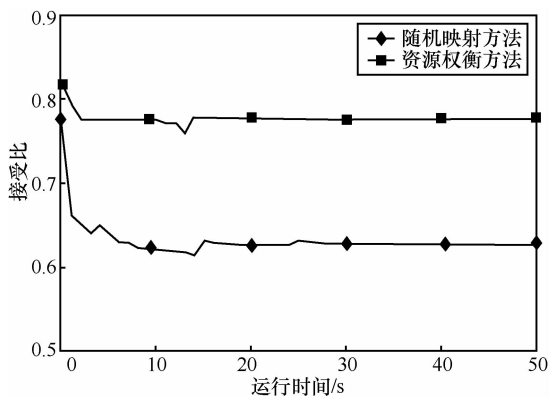


图4 资源接受比随时间的变化曲线

7 结束语

在SDN多域频谱灵活光网络架构下,针对虚拟光网络映射的资源选择策略,创新性地提出资源权衡算法。资源权衡算法能够实现应用资源和带宽资源的协同虚拟化,在部分流量疏导后,进行统一映射,有效地减少阻塞率,提高业务接受比。

参考文献:

- [1] 纪越峰. 软件定义光网络的机遇与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(5): 42-44.
JI Y F. Software-defined optical networks: opportunities and challenges[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(5): 42-44.
- [2] 姜明, 王保进, 吴春明, 等. 网络虚拟化与虚拟网映射算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1315-1320.
JIANG M, WANG B J, WU C M, et al. Research on network virtualization and virtual network mapping algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1315-1320.
- [3] 邢迎新. 多域光网络中的信令与资源预留技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
XING Y X. Research on signaling and resource reservation technology in multi domain optical networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [4] 张杰. 支持灵活谱利用的超大容量全光网体系结构研究[J]. 中兴通讯技术, 2011, 17(6): 22-26.
ZHANG J. Ultrahigh-capacity all-optical network architecture based on flexible spectrum use[J]. ZTE Technology Journal, 2011, 17(6): 22-26.
- [5] PADHI L, KARTIKEYA S, SIVALINGAM K M, et al. Multi-path routing in optical WDM networks: even versus uneven split bandwidth allocation[C]//The 2010 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM), July 18-21, 2010, Bangalore, India. New Jersey: IEEE Press, c2010: 1-5.
- [6] VELASCO L, ASENSIO A, BERRAL J L, et al. Towards a carrier SDN: an example for elastic inter-datacenter connectivity[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 55-61.
- [7] PATEL A N, JI P N, WANG T. QoS-aware optical burst switching in OpenFlow based software-defined optical networks [C]//The 17th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), April 16-19, 2013, Brest, France. New Jersey: IEEE Xplore Digital Library, c2013: 275-280.
- [8] 王颖. 频谱灵活全光网中资源分配与优化关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
WANG Y. Research on resource allocation and optimization technologies in spectrum-flexible all-optical network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.

[作者简介]



刘世栋(1971-),男,博士,国网智能电网研究院信息通信研究所主任工程师,主要研究方向为电力通信网。

王攀(1979-),男,博士,南京邮电大学副研究员,主要研究方向为信息网络、业务感知、DPI、大数据分析。