

A Low Blocking and Complexity Architecture of Integrated OTN/WDM

Li Shang¹, Jianchen Zhang¹, Cheng Zhong², Han Su²

¹Information and Telecommunications Branch, State Grid Hebei Company, Shijiazhuang Hebei

²State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang Hebei

Email: 332856800@qq.com

Received: Nov. 1st, 2016; accepted: Nov. 19th, 2016; published: Nov. 22nd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

We propose an integrated OTN/WDM switching architecture which is also in low complexity. First of all, the architecture integrates OTN and WDM in one switching architecture and reduces the complexity by decreasing the number of OTN switches. To relieve the blocking performance of network as a result of reducing the number of OTN switches, it is necessary to reasonably allocate OTN switches. In this article, we introduce an Integer Linear Problem in order to prove this problem NP-hard, and then use a heuristic to evaluate its blocking performance as well as obtain its approximate optimal solution. As the results show, allocating the OTN switches in reason can reduce complexity of the proposed architecture and guarantee proper blocking ratio which optimizes the switching nodes of network.

Keywords

OTN Switching Architecture, Blocking Ratio, Architecture Complexity

一种低拥塞低复杂度的集成OTN/WDM架构

尚立¹, 张建臣¹, 钟成², 苏汉²

¹国网河北省电力公司信息通信分公司, 河北 石家庄

²国网河北省电力公司, 河北 石家庄

Email: 332856800@qq.com

收稿日期: 2016年11月1日; 录用日期: 2016年11月19日; 发布日期: 2016年11月22日

摘要

本文提出了一个集成了OTN/WDM且低复杂度的交换架构。首先将OTN与WDM集成在一个交换架构中,通过减少其中的OTN交换器数量以降低该架构的复杂度。为缓解因减少交换器数量导致的拥塞上升,需合理配置OTN交换器,本文使用整数线性规划建模,证明该问题为NP-hard,然后使用一种启发法分析其拥塞表现并求解其近似最优解。实验结果表明,合理地分配OTN交换器可以有效的在降低架构复杂度的同时保证合适的拥塞率,从而达到优化OTN传输网络交换结点的目的。

关键词

OTN交换架构, 拥塞率, 架构复杂度

1. 背景介绍

近年来,在通信行业中光传送网(Optical Transmission Net, OTN)迅猛发展,它首先继承了传统密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术优点,并借用了同步数字序列(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)的帧封装方式,增添了电路调度和组网的灵活性,是SDH和DWDM的综合体,能够实现多种业务信号透明传输和封装,支持大颗粒的带宽复用以及交叉和配置[1]。目前OTN技术已经在公网中得到广泛应用,如电信、广电等;同时,在电力系统中的应用也逐渐增多,目前已有山东、山西、辽宁、四川、浙江等省电力公司相继开始采用OTN搭建电力通信网[2],但由于运维模式、业务流向等与公网相差比较大,因此所选用的OTN设备类型、网络结构等方面与公网差别较大;为了更加有效解决光纤资源、网络带宽、网络安全、网络结构以及业务维护等方面的问题,应该根据电力系统通信本身的特点,选择适宜的OTN引入策略[3][4][5]。

本文所介绍的集成OTN/WDM的交换架构是由集成了WDM接口与具有传统交换器电层交换功能的OTN交换器组成,该结构将WDM和OTN交换功能集成在一个系统中,避免了WDM和OTN分离系统中的互联,减少了设备数量和跳纤,减少了装机位置和功耗。为了降低该交换结构的复杂度,提出了一种可扩展的交换结构,该结构由容量为120 Gbs的 12×12 OTN交换器和一个大容量的空间交换结构组成,其中OTN交换器的容量为120 Gbs,规模为 12×12 ,而空间交换结构由容量为1.44 Tbs的 144×144 交叉点构成。为了降低拥塞,本文将介绍一个集成OTN/WDM的交换架构,并在此架构中引入空间加速比的概念,随着加速比的增加,交换器的复杂度显然会增加,因此目标是在降低拥塞和架构复杂度之间进行合理得权衡,使得该架构可以减少OTN交换器的个数以及OTN交换资源和空间交换结构的复杂度。为研究因减少OTN交换器所造成的拥塞影响,本文针对路由和交换资源分配问题展开研究,可证明此问题为NP-hard问题,因此将介绍一种启发式方法以评价网络的拥塞情况,同时将研究OTN交换资源和空间交换结构的复杂度。本文首先提出了一种集成OTN/WDM交换架构,接着分析了交换资源分配和路由问题,设计了最小OTN交换资源启发式方法。

2. 一种集成 OTN/WDM 交换结构

本文设计了一种集成OTN/WDM的交换节点,此节点有四条来自网状光网络光纤连接,四条光纤分别称作东向、南向、西向、北向光纤。在每条光纤中有48条复用波长信道。光信号由多频道 12×10 Gbps的PIC聚集接收以降低光接口的能量等开销。在节点的输入和输出处有4块复用和解复用器来进行信号

的复用和解复用。在这种数字光子节点中，所有即将到达的通信量，无论是本节点即将接收的流量或是将要被转发的通信量，皆会被 PIC 进行转化。携带着亚波长信号的波长信号进入交换核心进行 OTN/WDM 交换。即将被接收的通信量会向高密度 $N \times 10$ Gbps 收发机分组客户端接口路由；来自同一个方向并且将继续转发的通信量，经过 PIC 的光到电转化以及交换核心的交换后便被路由到另外一个 PIC 进行电到光的转化，然后在网络中继续传播。

本文将转换核心内部分成两层 OTN 传播架构，此架构可以传递两种光数据单元(ODU)，分别是高阶 ODU(H-ODU)和低阶 ODU(L-ODU)，分别用 f_H 和 f_L 表示 H-ODU 和 L-ODU 的比特率。在此引入复用率 F ，即 H-ODU 比 L-ODU 的比值。假设任何一个输入/输出的波长容量是 C ，与 f_H 相等，该波长可以携带一个 H-ODU 或至多 F 个 L-ODU。如果一个 H-ODU 只需空间交换，则该交换称为直接 H-ODU(DH-ODU)，相反若其携带的 L-ODU 需要时间交换则称作交换 H-ODU(SH-ODU)。

在此定义交换核心内的各个参数。其中， N 代表进出光纤的数量， W 代表每条光纤内携带波长的数量。交换部件由三部分组成，第一和第三部分是 $K \times K$ OTN 交换模型，可以执行空间和时间交换，而中间部分只能进行空间交换，并且只能执行 H-ODU 的交换。 N 条进出光纤中的每一条分别包含 R 个 OTN 交换器，同时在 Q 个波长中有 Y 个波长不经过 OTN 交换器。假设第一和第三部分的 OTN 交换用作交换输入/输出的 L-ODU 和 H-ODU。该交换核心内还包含由 OTN 交换模型构成的 ADD 和 DROP 部分，此二部分可扩展或删除架构的通道数目。当 $(Q - Y)/R = K$ 时，此时为一般情况。在最大幅度降低交换开销时，并不能保证交换核心架构的拥塞会降低，根据相关文献的研究，在这种配置下的某些情况里，拥塞概率反而会提高。为了缓和拥塞提高，引入一个空间加速比 $S = K / ((Q - Y)/R)$ ，即 OTN 交换器的规模与 OTN 交换器的输入(输出)的数目的比。显而易见，当 S 大于 1 时候，OTN 交换器的复杂度将会上升，同时也会降低拥塞概率。

3. 交换资源分配以及路由问题

本章将介绍交换资源的路由及分配问题(Switch Resource Routing and Assignment, SRRA)，首先介绍相关参数：

- $G = (V, E)$ ：该图表示网络的物理拓扑，其中 V 代表结点， E 代表连线；该结点与集成 OTN/WDM 的交换结点一一对应，而连线与连接两个节点的光纤一一对应；假设结点 $v \in V$ ，度是 d_v ，与交换结点有 d_v 个输入/输出结点一一对应；每个结点配备了 $K \times K$ OTN 交换器，其加速比是 S 。
- U ：每个结点的 ADD/DROP OTN 交换器数目
- W ：每条光纤承载的波长信道的数目，其中每个信道的容量可以承载一个 H-ODU 或至多 F 个 L-ODU。
- Y ：每条光纤中携带的不需要经过 OTN 交换器的波长信道的数目
- c_{sd}^{DH} ， c_{sd}^L ： c_{sd}^{DH} 和 c_{sd}^L 分别代表 $s \in V$ ，和 $d \in V$ 两个结点之间传递的 DH-ODU 和 L-ODU 的数目。

本文目标是确定已接收的 H-ODU 和 L-ODU 在 OTN/WDM 网路中如何路由，以及在空间交换中的输入和输出接口选择。同时，需做到在总接收带宽流量需求归一化为一个 L-ODU 所需的带宽 f_L 时，吞吐量达到最大。需要特别注意的是，接收一个 DH-ODU 和或接收一个 L-ODU 会分别占用 F 个和 1 个总接收带宽流量需求。

为了规范 ILP 的表达，引入无连接图 $G^* = (V^*, E^*)$ ，如图 1，其中 V^* 和 E^* 分别表示结点和连接。 V^* 就是包括图中所有的黑色结点，OTN 交换器、空间交换器输入和输出端口，以及 ADD/DROP 端口。而 E^* 就是图中所有连线的集合。

在此使用整数线性规划，为配备该交换器网络中的路由和交换资源分配问题建模。由于本文篇幅有限以及该问题参数过多，因此此处只是简要介绍建立该线性规划所需的问题约束。

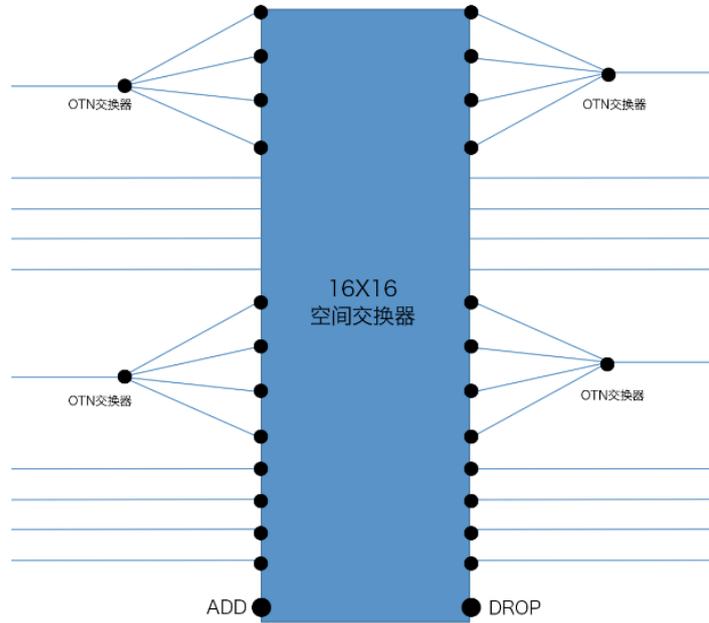


Figure 1. Image of switching architecture
图 1. 交换架构示意图

1) 首先需要建立一个保证任意一个空间交换器的输入输出端口之间仅仅被激活一条级间连接的约束。相反, 对于 ADD/DROP 部分, 可以激活至多 KU 个级间连接。

2) 对于 $s, v \in V$ 之间的 c -th j -ODU ($j \in \{DH, L\}; t \in [1, \dots, c_{sd}^j]$), 为结点内部的每一个小结点引入流保护约束。该限制不仅仅针对 ADD 和 DROP 结点, 当 j -ODU 成功传递的时候, 总流等于 1 或者 -1, 否则总流等于 0。

3) 进一步建立约束保证流量在交换节点内的某些小结点(如交换核心内的 OTN 交换器, 空间交换器的输入输出端口)小于或等于链路归一化为一个 L-ODU 的 f_L 传输容量。对于内部相连接的某些特定小结点, 此处包括 OTN 交换器的输出端和空间交换器的输入端间的连接, 空间交换器的输出端和 OTN 交换器的输入端的连接, 以及 $v \in V$ 结点中非 OTN 交换器的出线与 $u \in V$ 节点中不经过 OTN 交换器的空间交换器的入线之间的连接, 其容量为 F ; 而对于 $v \in V$ 结点中 OTN 交换器的出线与 $u \in V$ 节点中 OTN 交换器的入线的连接, 其容量等于连接它们的波长信道提供的容量综合, 即 $\frac{KF}{S}$ 。

4) 最后需添加一个使得任意激活级联的归一化容量为 F 的约束。

本文目标是使得在总接收带宽流量需求归一化为一个 L-ODU 所需的带宽 f_L 时, 吞吐量达到最大, 如公式 1 所示:

$$\sum_{s,d \in v} \sum_{c=1}^{c_{s,d}^L} H_{s,d}^{L,c} + F \sum_{s,d \in v} \sum_{c=1}^{c_{s,d}^{DH}} H_{s,d}^{DH,c} \quad (1)$$

其中, $H_{s,d}^{j,c} \in \{0,1\} (s,d \in v; j \in \{DH, L\}; c \in \{1, \dots, c_{s,d}^j\})$, 当 s,d 两个结点间所要传递的单元都成功传递时候, 该值为 1, 否则为 0。

若假设网络中只有 DH-ODU, 在严格意义上不使用会出现拥塞的交换节点, 那么本文所研究的 SRRA 问题将会变成路由与波长分配(RWA)优化问题。众所周知, RWA 问题是 NP-c 问题[6], 所以很自然能得出 SRRA 问题也是 NP-c 问题。在下一章节, 将提出一种启发法去评价大型网络在低计算时间情况下的表现。

4. 基于启发式算法的最小 OTN 交换资源分配

在配备最小数目 OTN 交换器的集成 OTN/WDM 交换架构中, 利用 OTN 交换器不支持的波长十分重要, 可以把一个 DH-ODU 或个 L-ODU 分配给这样的波长, 在下文中统一用最普通的“H-ODU”指代这些波长。最小 OTN 交换资源启发法的算法如图 2, 在第一个阶段, 通过给每个网络中结点传递一个 H-ODU, 该算法试图将通信量在网络中最短的路径中传输, 在这些可用的最短路径中, 再选择使用 OTN 交换器数量最少的路径。如果最短路径没有足够的容量传输通信量, 最小 OTN 交换资源启发法将会在阶段 2 中通过可替代的路径传输剩余的通信量。在阶段 1 执行之前, 有一个并未在算法中描述的初始化阶段, 在该阶段中, 将会建立 $G_{temp} = (V_{temp}, E_{temp})$, 其中 $V_{temp} = V^*$, 而 E_{temp} 除了包括 E^* 中所有的元素, 还包括在任意交换结点中连接输入表达、添加接口与输出表达以及删除接口的连接。其中, L_1 存储着降序排列的的归一化总带宽通信量需求 $c_{su}^{totl} = Fc_{su}^{DH} + c_{su}^L$ 。在阶段 1 每次重复执行的过程中, 最小 OTN 交换资源启发法尽量将一个 DH-ODU 或是 F 个 L-ODU 在 $s^*, u^* \in V$ 之间的最短路径中路由, 后续更高的归一化总带宽通信量需求 $c_{s^*u^*}^{totl}$ 也将在这条路径中被路由。同时, 算法将选择拥有最少 OTN 交换器的最短路径。当最短路径不可用或其值小于 F 时, 便不再继续向 L_1 插入 $c_{s^*u^*}^{totl}$ 。 L_1 为空的情况能保证阶段 1 的结束。如图 3, 在阶段 2 的起始, 未在第一阶段被路由的 DH-ODU 和 L-ODU 的通信量需求将被分别降序存储在链表 L_{DH} 和 L_L , 最小 OTN 交换资源启发法尽可能使用最少跳数的路径传输更高的通信量需求。算法将选择使用最少 OTN 交换器的可替代路径, 如果此操作成功执行, 那么将更新图和参数。当 L_j ($j \in \{DH, L\}$) 全都为空时, 阶段二结束。

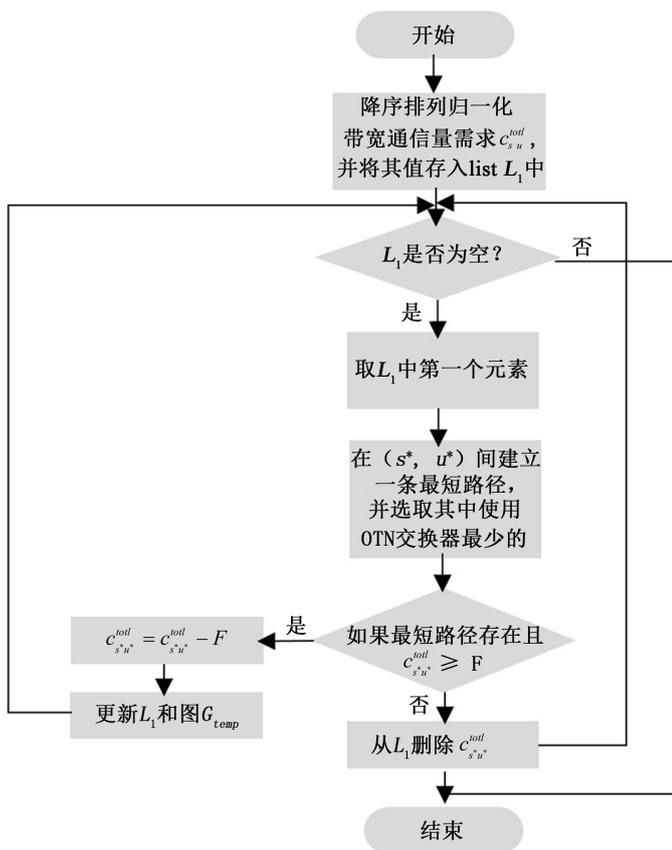


Figure 2. Algorithm flow diagram of phase 1
图 2. 阶段 1 算法流程图

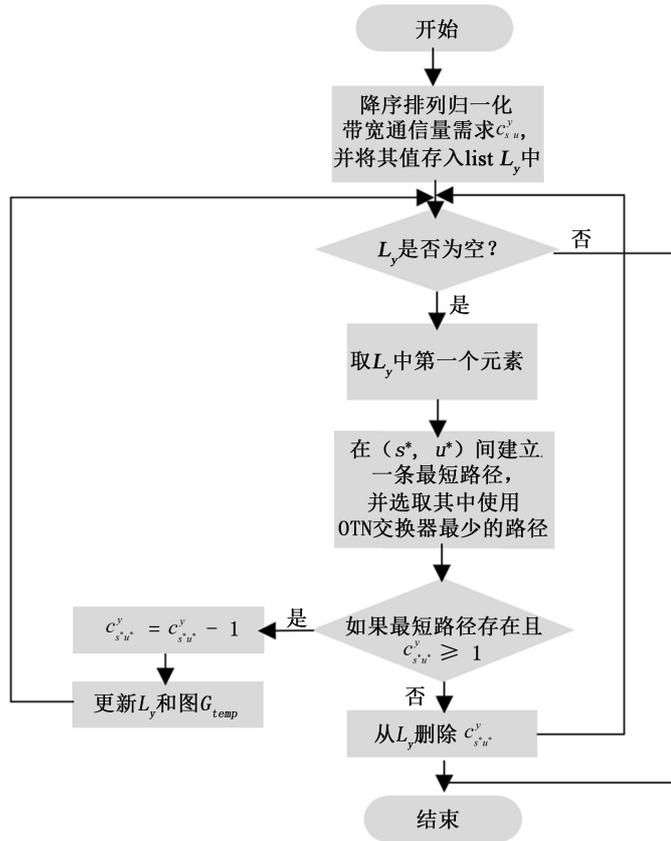


Figure 3. Algorithm flow diagram of phase 2
图 3. 阶段 2 算法流程图

5. 实例分析

本章将把上文提到的启发法应用到某仿真城域电力网中, 在此城域网中结点数 $M = 36$, 光纤连接数 $L = 114$, 每条光纤携带复用 $W=48$ 条波长。其中 $f_H = 10 \text{ Gbs}$, $f_L = 1.25 \text{ Gbs}$, 可得 $F = 8$, 并且每个节点配备 12×12 OTN 交换器。结点之间将传递 DH-ODU 和 L-ODU, 通信量模型参数为 I_{os} , 该参数由总接收带宽流量需求归一化的 f_L 所定义。同时定义 u 为 L-ODU 占有所有传输单元的比例。

用 P 来描述被拒绝的接收带宽流量需求, 以此来描述网络拥塞的情况, 取表 1 的参数进行仿真:

其中 M 为结点总数, L 为光纤总数, 每条光纤内携带的波长数为 W , OTN 交换器的规模为 K , 复用率为 F , 加速比为 S , 通信量模型参数为 I_{os} 。

经过仿真可得, 当 L-ODU 占有比例较大时, R 越大, 即 OTN 交换器越多, 产生拥塞的概率越小(因为 L-ODU 的交换需要使用 OTN 交换器)。根据交换器规模 K 和加速比 S 的数值, 以及波长数目 M , 可以计算出 R 的最大值, 即 $R = 6$, 此时所有经过 PIC 解复用的波长都会经过, 将会使用到大量的 OTN 交换器, 根据前文叙述, 需在 OTN 数目和拥塞概率之间做一权衡, 保证 OTN 总数较小, 同时拥塞概率较低。因此, 当提高 u 数值的时候, 为了保证拥塞概率尽量接近 $R = 6$ 情况下的概率, 就要适当的提高 R 的数值, 因此只需求得一个合适的 u 的数值以及其所匹配的最小的 R 的数值, 即可得出最小的拥塞概率, 在这种情况下, 节省的 OTN 数目的比例以及空间交换器接口的比例最大。

经过实际仿真模拟实验, 发现当 $u = 0.2$ 时, 每条光纤后只需使用一半的 OTN 交换器($R = 6$)即可保证拥塞概率几乎和 $R = 6$ 时一样, 可以节约 50% 的 OTN 交换器, 以及 15.59% 的空间交换器的交叉结点。

Table 1. Parameter values of instance**表 1.** 实例所采用的参数值

参数	M	L	W	K
值	36 个	114 条	48 条	12
参数	F	S	I_{os}	R
值	8	1.5	7500	1~6

6. OTN 未来发展趋势

当下社会需要传递的信息量大幅度增大, 本文做出的传输优化只能在一定意义上缓解爆发的信息洪流, 在线路传输速率向 400 Gbit/s 跃迁, 提升频谱的利用率以及合理利用网络资源去提升网络效率就显得十分重要[7]。与此同时 OTN 也存在着一定局限性, 传统 OTN 的特点是刚性带宽管道, 固定速率接口。这一特点与目前很多 IP 化业务的带宽动态变化、流量突发模式并不匹配。“刚性”特征不够灵活, 不能根据业务流量适时进行带宽资源的动态调整[8]。因此, 未来需要更灵活、动态、开放的网络架构[9]为实现网络的适时调整和按需分配。软件定义网络(Software Defined Network, SDN), 是一种新型网络创新架构, 是网络虚拟化的一种实现方式, 其核心技术 OpenFlow 通过将网络设备控制面与数据面分离开来, 从而实现了网络流量的灵活控制, 使网络作为管道变得更加智能[10]。

SDN 是一种新型的网络架构, 它有三个特点, 第一个特点是它的控制与转发分离, 第二是在逻辑层面上能做到集中控制, 第三点是十分重要的一点, 就是开放 API, 使得用户能够通过自由的编程实现自己希望实现的功能。传送层的可编程特征和能力是以组件可编程能力为基础得, 因而使得结点设备具有灵活的可编程特性, 同时将这些可编程能力对上层开放, 从而使得整个 OTN 网络具备更强的软件定义特征, 提升光网络资源利用率以及其整体性能, 支持更多光网络应用。

基于 SDN 的 OTN, 能够实现任意粒度交换、任意带宽传输, 能够实时根据业务的需求、集中统一的网络管理同控制, 和全局网络的视图, 对网络资源进行优化和配置, 以实现传输设备对传输介质和通道的最大利用率, 降低网络建设的成本。

基于 SDN 的 OTN, 不再局限于文中对 OTN 交换设备的优化, 而是可以通过软件灵活地配置硬件, 综合考虑各种因素从而选择出最优传输方案, 减少了单板类型, 从而大幅度降低硬件成本, 也降低了工程和维护人员的技术壁垒, 使得维护人员更加容易操控网络, 对业务的快速开通、部署以及后续维护大有裨益。

7. 结论

本文提出了一种低拥塞低复杂度的集成 OTN/WDM 架构, 然后提出了一种基于启发式算法的最小 OTN 交换资源分配方法, 评价在静态通信量场景下的该交换架构的表现, 最后在 36 个结点的仿真城域电力网中实验了该架构和方法, 由上文分析可知, 当 L-ODU 占所需带宽的 40%时, 可以节省约 50% OTN 交换器的数量, 由此可知该架构在一定程度上可以在保证低拥塞率的情况下保证较低的复杂度。在未来的工作里我们将试图将 SDN 和 OTN 进行融合, 提出更具效率的传输架构。

基金项目

国家电网公司科技项目 (SGHB0000KXJS1500046)。

参考文献 (References)

- [1] 张国新, 李昀, 叶春. OTN 技术与组网应用[J]. 光通信技术, 2010(4): 15-17.

- [2] 孙海蓬, 刘润发, 于昉. OTN 在电力骨干通信网中的应用策略研究[J]. 电力系统通信, 2012, 33(6): 9-14.
- [3] 赵文玉. 光传送网(OTN)技术应用分析[J]. 通信世界, 2008(35): 16-17.
- [4] 畹仪. WDM 超长距离光传输技术[M]. 北京: 北京邮电学院出版社, 2005.
- [5] 张越. SDH 技术在数字光传输网中的应用[J]. 广播电视信息(下半月刊), 2007(10): 3.
- [6] Zhu, K. and Mukherjee, B. (2002) Traffic Grooming in an Optical WDM Mesh Network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **20**, 122-133. <https://doi.org/10.1109/49.974667>
- [7] 何炜, 杨铸, 蔡鸣, 等. 光传送网的 SDN 化趋势及影响[J]. 光通信研究, 2014(3): 4-7.
- [8] 郑毅, 华一强, 何晓峰. SDN 的特征, 发展现状及趋势[J]. 电信科学, 2013, 29(9): 102-107.
- [9] Verchere, D.G. (2011) Cloud Computing over Telecom Network. *Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, OMW1*. <https://doi.org/10.1364/ofc.2011.omw1>
- [10] 赵慧玲, 冯明, 史凡. SDN——未来网络演进的重要趋势[J]. 电信科学, 2012, 28(11): 1-5.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org