

弹性光网络中节点优先的虚拟网络映射算法

赵继军, 郑 斗, 胡劲华, 任丹萍, 李凤云, 徐月欢

河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 针对弹性光网络中虚拟网络映射的资源消耗问题, 综合考虑节点、链路对虚拟网络映射资源需求的影响, 提出了节点优先的虚拟网络映射算法。所提算法先对虚拟节点依据节点权值进行排序, 然后为虚拟节点分配满足资源需求的物理节点, 并采用贪心原则映射虚拟节点, 最后利用协同映射方式将虚拟链路映射到长度最短的无环物理路径上, 以达到减小虚拟网络资源消耗的目的。仿真结果表明, 所提算法能有效减小虚拟网络资源消耗并降低网络请求阻塞率。

关键词 光通信; 弹性光网络; 虚拟网络映射算法; 协同映射; 网络虚拟化; 成本优化

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0906003

Node-First Virtual Network Mapping Algorithm in Elastic Optical Network

Zhao Jijun, Zheng Dou, Hu Jinhua, Ren Danping, Li Fengyun, Xu Yuehuan

School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract Aiming at the resource consumption of the virtual network mapping in the elastic optical network, we propose a node-first virtual network mapping algorithm considering the influences of the node and the link on resource requirements of virtual network mapping. Virtual nodes are firstly sorted according to the node weight and physical nodes which meet the resource requirements are then allocated for virtual nodes by the greedy principle. Finally, the virtual links are mapped to the shortest non-loop physical path by coordinated mapping. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce resource consumption of virtual networks and the blocking probability of network request.

Key words optical communications; elastic optical network; virtual network mapping algorithm; coordinated mapping; network virtualization; cost optimization

OCIS codes 060.4510; 060.4258; 060.4256

1 引 言

近年来,云计算、大数据等业务的快速发展对光网络的信息承载能力提出了更高要求^[1-2]。基于传统波分复用(WDM)技术的 WDM 网络可实现大容量传输,但其资源使用灵活性较差、带宽浪费严重,难以满足网络业务需求。因此,弹性光网络技术受到了很大关注^[3]。弹性光网络能够弥补 WDM 网络的不足,可根据用户需求和实际业务量大小,动态有效地分配合适的频谱资源并配置相应的调制格式^[4-5]。然而,现有网络环境为多运营商共同构建,不同网络资源之间的相互耦合叠加加大了网络资源调度管理的难度,降低了网络资源的使用效率。网络虚拟化技术的发展给网络资源管控提供了新思路,通过对网络资源的虚拟化抽象,屏蔽其物理特性,使用户能够自由配置网络资源,达到提高网络灵活性和资源利用率的目的^[6-8]。

虚拟网络映射是网络虚拟化的关键问题之一,它需要将虚拟网络依据一定的约束条件映射到底层物理设施上,并为其分配合适的物理资源^[9]。虚拟光网络(VON)映射为非确定性多项式困难问题^[10],为了解决该问题,Zhang 等^[11]构建了混合整数线性模型,并提出两种适用于 WDM 网络环境的启发式算法;Pagès

收稿日期: 2017-03-20; 收到修改稿日期: 2017-05-01

基金项目: 河北省自然科学基金(F2014402075, F2017402068)、河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2016090)

作者简介: 赵继军(1970—),男,博士,教授,主要从事下一代光网络等方面的研究。E-mail: zhaojijun@ieee.org

等^[12]针对动态虚拟网络请求映射问题,结合光网络的物理特性提出虚拟网络映射算法,以降低网络请求的阻塞率;Peng等^[13]分析了物理损伤在单速率以及混合速率 WDM 网络中的不同影响,在此基础上提出了物理损伤感知的虚拟网络映射算法;Gong等^[14]在弹性光网络环境下对虚拟网络映射问题展开研究,考虑了频谱连续性及邻接性约束问题,并提出基于分层图的启发式算法;Madani等^[15]考虑虚拟网络映射过程中底层网络频谱碎片问题,通过衡量底层链路的频谱使用情况来为虚拟网络分配合适的资源,从而实现底层网络的负载均衡。另外,文献[16-17]进一步研究了物理设施故障及虚拟网络生存性问题,提出利用不同保护策略来增加服务的稳定性;文献[18]则针对故障发生后的内容连通性问题展开研究。对于物理设施提供商而言,在提供服务的同时,如何降低物理资源消耗也很关键^[19-22],而上述文献未对资源消耗问题进行深入研究。文献[19-22]中,作者针对 2/3 层网络环境下的网络请求资源消耗及网络生存性中的保护路径资源消耗问题,构建了整数线性规划模型并提出利用不同的启发式算法来达到降低资源消耗的目的。然而,由于物理特性的不同,上述文献所提算法无法适用于弹性光网络环境。

为了减小虚拟网络资源消耗并提高物理资源利用率,本文在现有相关研究的基础上,提出适用于弹性光网络环境的节点优先虚拟网络映射(NF-VONM)算法,并对该算法的性能进行仿真验证。

2 问题描述

2.1 符号定义

为了便于问题描述,定义: G^s 、 G^v 分别为物理网络和虚拟网络的集合, N^s 、 E^s 分别为物理节点和物理链路的集合, N^v 、 E^v 分别为虚拟节点和虚拟链路的集合, A_N^s 表示物理节点属性, $A_N^s(n^s)$ 为物理节点 $n^s \in N^s$ 的剩余计算资源, A_E^s 表示物理链路属性, $A_E^s(e^s)$ 为链路 $e^s \in E^s$ 的频谱资源状况, $A_E^s(e^s)[i] = 1$ 表示第 i 个频隙(FS)可用, R_N^v 表示虚拟节点资源需求, $R_N^v(n^v)$ 表示虚拟节点 $n^v \in N^v$ 的计算资源需求, R_E^v 表示虚拟链路属性, $R_E^v(e^v)$ 表示链路 $e^v \in E^v$ 的带宽需求, $H(i, j)$ 为节点 i, j 间的路径跳数。

2.2 物理网络与虚拟网络描述

用加权无向图 $G^s = (N^s, E^s, A_N^s, A_E^s)$ 表示底层物理网络。物理网络实例如图 1(a)所示,其中,物理资源包括计算资源与频谱资源,如图中矩形框数字及矩形条所示。与物理网络类似,虚拟网络也采用加权无向图 $G^v = (N^v, E^v, R_N^v, R_E^v)$ 表示,图 1(b)中描述了一个虚拟网络实例。另外,虚拟网络服务时间有限,当服务结束时,虚拟网络会离开并释放所占物理资源,以供后续到达的虚拟网络使用。图中 A、B、C、D 代表物理节点,a、b、c 代表虚拟节点。

2.3 虚拟网络映射问题描述

虚拟网络映射是指依据一定约束条件,将虚拟网络 G^v 放置在物理网络 G^s 中,并为其分配合适的物理资源,该过程可定义为

$$M(G^v) : G^v = (N^v, E^v, R_N^v, R_E^v) \rightarrow G^s = (N^s, E^s, A_N^s, A_E^s), \quad (1)$$

式中 $M(G^v)$ 为虚拟网络映射过程,可以分为节点映射和链路映射两部分。节点映射将 N^v 中所有的虚拟节点映射到 N^s 中满足其资源需求的物理节点上,并且不同的虚拟节点需映射到不同物理节点上^[11-17]。链路映射将 E^v 中的虚拟链路映射到 E^s 中物理链路组成的无环物理路径上,从而保证虚拟节点的连通性,并且该路径需满足虚拟链路带宽资源需求以及频谱连续性、频谱邻接性、频谱不重叠性等约束,以使网络业务在弹性光网络环境中更好地传输。

图 1 中描述了两种不同的映射方案。在图 1(c)中,虚拟节点依据节点资源大小进行映射,并利用 k 最短路径完成虚拟链路的映射。图 1(d)则展示了本文算法的映射结果,当映射虚拟节点时,考虑是否存在已被映射的相邻节点,如虚拟节点为 c 时,考虑节点计算资源及相连链路带宽需求后,存在 C、D 两个合适的节点,进一步分析节点 c 的已映射相邻节点 b 可以发现,将其映射至物理节点 C 可以占用更少的频谱资源,从而选择物理节点 C。图 1(d)所示映射方案的资源消耗要小于图 1(c)的映射方案。

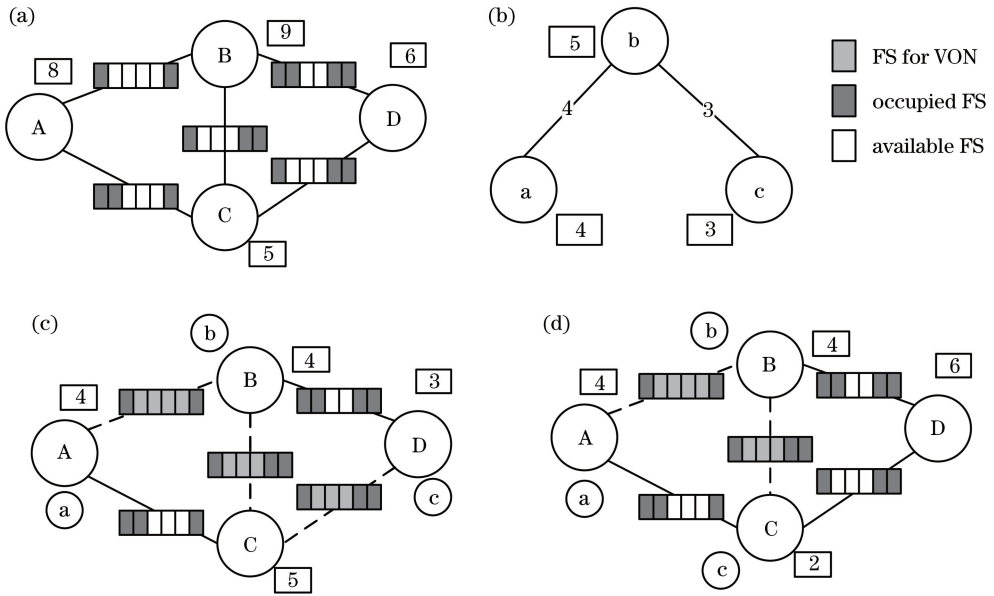


图 1 虚拟网络映射示例。(a)物理网络;(b)虚拟网络;(c)映射方案 1;(d)映射方案 2

Fig. 1 Examples of virtual network mapping. (a) Physical network; (b) virtual network; (c) result of the first mapping algorithm; (d) result of the second mapping algorithm

3 映射算法设计

虚拟网络占用的物理资源包括节点计算资源和光纤链路的频谱资源,而虚拟节点只能映射到唯一的物理节点上,因此其占用的计算资源相对固定。与虚拟节点不同,虚拟链路可以映射到由多条物理链路组成的无环路径上。因此,减小虚拟网络资源消耗的主要途径为减少虚拟链路占用的频谱资源。对于虚拟链路而言,其占用的物理资源的计算公式为

$$F(e^v) = R_E^v(e^v) \times H[M(e^v)], \quad (2)$$

式中 $F(e^v)$ 为虚拟链路占用的物理资源, $H[M(e^v)]$ 为虚拟链路 e^v 所映射的物理路径跳数。对于每条虚拟链路而言,在虚拟请求到来时其带宽需求已经确定,因此物理资源消耗随着映射物理路径长度的增加而增加,即物理资源消耗受虚拟链路两端节点映射结果的影响。基于上述考虑,设计了一种启发式算法,通过控制相邻虚拟节点的映射距离来减小虚拟链路的资源消耗,从而达到节约物理资源的目的。

3.1 概念定义

为了更好地对算法进行描述,对相关概念进行定义。

1) 最大连续频谱块。图 2 示出一条光纤链路上频谱资源的使用情况,其中连续频谱块指一段连续未被使用的频隙(FS)集合,图 2 中包含 4 个连续频谱块。最大连续频谱块则指频隙数量最多的连续频谱块,该频谱块的频隙数量即为该链路所能承载的最大带宽。如图 2 所示,第一个连续频谱块包含的频隙数量最多,为 3 个频隙,则该链路的最大承载带宽为 3。

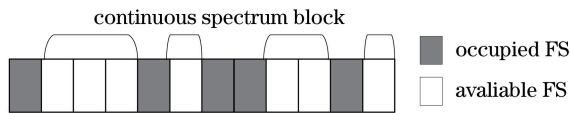


图 2 链路频谱状态

Fig. 2 Frequency spectrum state on a link

2) 节点状态。当映射虚拟节点时,如果该节点没有相邻节点已映射完成,则称该节点为自由节点,映射时无需考虑其他节点的相互影响;当该节点存在一个或多个已映射的相邻节点时,称之为约束节点,映射该节点需要考虑与已虚拟节点间路径的资源消耗。

3) 虚拟节点权值。为了保证虚拟链路映射路径具有较少的跳数并减小链路资源消耗,应优先映射带宽

需求大的虚拟链路两端节点,虚拟节点的权值计算公式为

$$W_v = \alpha L[T(n^v)] + (1 - \alpha)R_N^v(n^v), \quad (3)$$

式中 $T(n^v)$ 为虚拟节点 n^v 的相连链路集合; $L[T(n^v)]$ 为 $T(n^v)$ 的最大带宽需求; α 近似为 1, 即节点相邻链路的带宽需求对节点的权值具有决定性作用; W_v 为虚拟节点 n^v 在当前虚拟网络中的映射优先级。

4) 物理节点权值。物理节点权值代表将该虚拟节点映射到该物理节点的频谱资源消耗, 计算方式为

$$W_s = H(n^{s1}, n^s) \sum_{n^{v1} \in M_N^v} R_E^v(n^{v1}, n^v), \quad (4)$$

式中 M_N^v 为虚拟节点 n^v 已映射的相邻虚拟节点集合, n^{v1} 为虚拟节点, n^{s1} 为 n^{v1} 所映射的物理节点。

3.2 算法流程及说明

算法流程如图 3 所示。当请求到来时, 先根据(3)式计算虚拟节点权值, 从权值最大的虚拟节点开始, 为其分配候选节点; 然后根据节点状态选取不同的映射算法完成节点映射; 最后判断是否存在可映射虚拟链路, 如果存在则进行虚拟链路映射。重复此过程直至虚拟网络映射完成。当虚拟节点或链路因资源不足而映射失败时, 阻塞该虚拟网络请求。

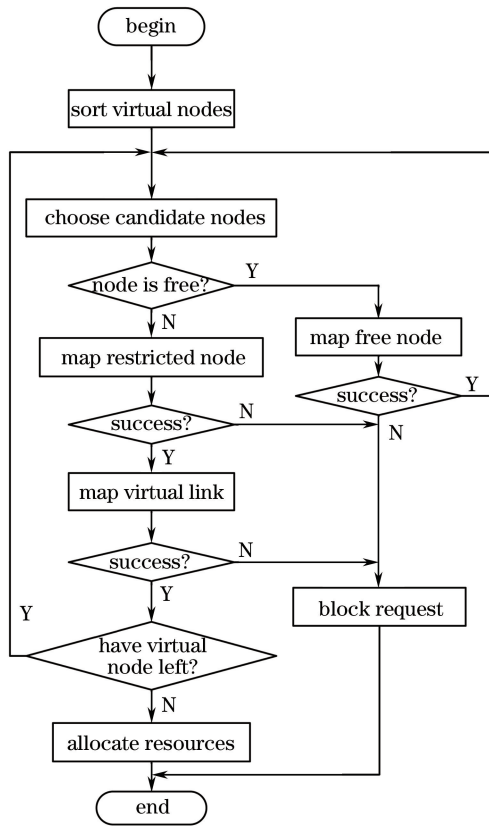


图 3 NF-VONM 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of NF-VONM algorithm

所提算法在虚拟节点映射之前为其分配候选节点, 在虚拟节点映射过程中, 需要根据(4)式计算所有物理节点的资源消耗, 并选择最优节点。然而, 部分物理节点无法满足虚拟节点的资源需求, 无需对此类节点进行计算。另外, 存在部分可满足计算资源需求的物理节点, 但这些节点相连链路的频谱资源不足, 如图 1 所示, 对于虚拟节点 b 而言, 物理节点 A、B、C 的计算资源可满足其节点资源需求。由图 1(b) 可以看出, 虚拟节点 b 有两条相连链路 $\{(b, a), (b, c)\}$, 带宽需求分别为 3 和 4。图 1(a) 所示的物理网络中, 节点 B、C 相连链路的最大链路频谱资源分别为 $(4, 2, 2)$ 和 $(3, 2, 3)$, 显然无法将虚拟节点 b 映射到物理节点 B、C 上。因此, 在虚拟节点映射之前, 为其分配符合条件的候选节点可以有效降低链路映射的失败率。候选节点需满足下列约束条件。

1) 物理节点计算资源满足虚拟节点需求, 即

$$A_N^s(n^s) > R_N^v(n^v); \quad (5)$$

2) 物理节点相连链路带宽满足:

$$\forall e^v \in T(n^v), \exists e^s \in T(n^s) \Rightarrow L[A_E^s(e^s)] \geq R_E^v(e^v), \quad (6)$$

式中 $T(n^s)$ 为物理节点 n^s 的相连链路。 $T(n^v)$ 中任意的 e^v 都需要存在不同的 e^s 来满足其资源需求。

3.3 约束节点及链路映射

当待映射虚拟节点为约束节点时,该节点的映射结果将影响相连虚拟链路的路径资源消耗。如图 1(b) 所示的虚拟网络,当映射虚拟节点 a 时,无已映射相邻节点,因此 a 为自由节点,节点 a 映射完成后虚拟节点 b,由于 b 与 a 相连,因此 b 为约束节点,此时 b 的映射结果将影响虚拟链路的路径跳数。所以,在映射约束节点时需要尽可能缩短其与已虚拟节点间的距离。

算法 1:约束节点及链路映射算法。物理网络的输入为 G^s ,虚拟网络的输入为 G^v 。虚拟网络映射步骤: 1) 为节点 n^v 分配候选节点集合 C_{n^v} ; 2) C_{n^v} 为空则阻塞请求,否则执行 3); 3) 将所有与 n^v 相邻的、已被映射的虚拟节点放入集合 M_N ; 4) 利用算法 2 求出所有候选节点到已虚拟节点的路径及跳数; 4) 按(3)式计算 C_{n^v} 所有节点到已虚拟节点的路径消耗资源; 5) 选择 C_{n^v} 中资源消耗最小的节点映射 n^v ; 6) 映射成功则根据路径选择算法虚拟节点间的虚拟链路,映射失败则阻塞该网络请求。

在虚拟节点映射过程中,需要通过路径选择算法获取候选节点与已虚拟节点间的路径跳数以及频谱资源,而与 2/3 层网络不同,由于链路映射需要满足频谱约束,即使得知每条光纤链路的最大承载带宽,也无法判断路径频谱资源是否满足需求。如图 4 所示, E_1 的最大承载带宽为 3, E_2 的最大承载带宽为 4,可以看出 E_1 和 E_2 组成的路径 E_3 的最大承载带宽仅为 2,计算式为

$$A_E^s(E_3) = A_E^s(E_1) \cap A_E^s(E_2), \quad (7)$$

式中 $A_E^s(E_3)$ 、 $A_E^s(E_1)$ 、 $A_E^s(E_2)$ 分别为 E_3 、 E_1 、 E_2 的频谱资源使用情况。



图 4 频谱约束示意图

Fig. 4 Diagram of frequency spectrum constraint

算法 2:路径选择算法。输入:待虚拟节点 n^v 的候选节点集合 C_{n^v} ,相邻节点 n^{v1} 所映射的物理节点 n^s 。输出:最短路径集合。具体步骤为: 1) 从当前物理节点 n^s 开始,若节点 n^{s1} 与 n^s 相邻,且 $L[A_E^s(n^s, n^{s1})] > R_E^v(n^v, n^{v1})$,则节点间路径为 (n^s, n^{s1}) , $H(n^s, n^{s1}) = 1$; 2) 从跳数为 1 的路径开始,若 n^{s2} 与路径端点 n^{s1} 相邻,且 $L[A_E^s(n^s, n^{s1}) \cap A_E^s(n^{s1}, n^{s2})] > R_E^v(n^v, n^{v1})$,则 $H(n^s, n^{s2}) = 2$,且链路 (n^s, n^{s2}) 频谱资源为 $A_E^s(n^s, n^{s1}) \cap A_E^s(n^{s1}, n^{s2})$; 3) 若 C_{n^v} 中存在尚未遍历的节点,令跳数加 1,继续执行步骤 2); 4) 若仍存在无法到达的候选节点,则将其从 C_{n^v} 中删除,最后输出最短路径集合。

3.4 自由节点映射

当待虚拟节点为自由节点时,映射结果不会对目前的虚拟网络资源消耗产生影响,并且该虚拟节点映射后也不存在可映射的虚拟链路,因此只需考虑其自身资源需求即可。由于候选节点集合 C_{n^v} 中任一节点都已满足其资源需求,因此,为了提高链路映射成功率,采用贪心原则选择节点相邻链路资源最丰富的物理节点进行映射,权值为

$$W_{\text{free}} = \frac{1}{N} \sum_{e^v \in T(n^v)} L(e^v). \quad (8)$$

4 仿真结果与分析

4.1 评价指标与对比算法

提出的节点优先的虚拟网络映射算法旨在减少虚拟链路的资源消耗,从而减小虚拟网络的映射成本并提高物理资源利用率。为了衡量算法性能并验证算法的有效性,从以下几个方面对算法进行仿真。

1) 虚拟链路平均占用物理链路数目。所有成功映射的虚拟网络占用的物理链路数目与虚拟链路数目的比值可反应本文算法在降低链路映射长度方面的效果,该比值可定义为

$$\overline{H(E^v)} = \frac{\sum_{e^v \in E^v} H[M(e^v)]}{|E^v|}, \quad (9)$$

式中 $M(e^v)$ 为虚拟链路 e^v 的映射结果, $|E^v|$ 为集合 E^v 中虚拟链路总数。

2) 虚拟网络平均频谱资源消耗。所有映射成功的虚拟网络占用的物理频谱资源总数与虚拟网络数目的比值可以用于衡量算法在降低链路资源方面的性能,该比值可定义为

$$\overline{F(E^v)} = \frac{\sum_{e^v \in E^v} \{R_E^v(e^v)H[M(e^v)]\}}{|E^v|}. \quad (10)$$

3) 物理网络收益。物理网络分配给虚拟网络的计算资源和频谱带宽资源所带来的收益可定义为

$$R(G^v) = \alpha \sum_{n^v \in N^v} R_N^v(n^v)t(n^v) + \beta \sum_{e^v \in E^v} R_E^v(e^v)t(e^v). \quad (11)$$

式中 α 、 β 分别为节点和链路的权重,参考文献[22]中的设置,将其统一设定为 1; $t(n^v)$ 、 $t(e^v)$ 分别为虚拟节点与虚拟链路的服务时间。

4) 虚拟网络阻塞率。接受的虚拟网络请求数目与所有到达虚拟网络的请求数目的比值体现了算法的可适用性,该比值可定义为

$$P_b(G^v) = \frac{N(G_{\text{success}}^v)}{N(G^v)}, \quad (12)$$

式中 $N(G^v)$ 为虚拟网络 G^v 的数目, $N(G_{\text{success}}^v)$ 为映射成功的虚拟网络数目。

5) 频谱资源可承载虚拟网络数目。虚拟节点占用资源相对固定,因此物理设施承载能力主要表现为链路频谱资源可以承载的虚拟链路数目,具体为物理设施所有链路资源与当前映射成功的虚拟网络平均占用的频谱资源之比,该比值可定义为

$$N(G^v) = \frac{N(G_{\text{success}}^v) \sum_{e^s \in E^s} A_E^s(e^s)}{\sum_{e^v \in E^v} R_E^v(e^v)}. \quad (13)$$

针对上述指标,分别对 3 种算法进行仿真,以对算法性能进行对比分析。3 种算法分别为:1) 所提出的 NF-VONM 算法;2) 基于节点连续度的虚拟网络映射(SC-VONM)算法^[23];3) 基于文献[6]中的算法进行修改以适用于弹性光网络的基本虚拟网络映射(BASE-VONM)算法。

4.2 仿真环境设定

仿真实验环境参照文献[14],使用如图 5 所示的美国国家科学基金网络(NSFNET)作为物理网络并在此环境下进行算法仿真,该网络拓扑包含 14 节点和 21 条链路。物理节点初始存在 200 个计算资源,物理链路包含 200 个可用频隙,且每个频隙的带宽为 12.5 GHz。

虚拟网络拓扑随机生成,虚拟节点数目均匀分布在[3,4]之间,虚拟节点间的连接概率为 0.5,虚拟链路的带宽需求均匀分布在[25 GHz,100 GHz]之间,且取值间隔为 25 GHz。虚拟网络的到来服从参数 $\mu=4$ 的泊松分布,每个虚拟网络的生存时间服从参数为 $1/\beta$ 的负指数分布, β 的取值范围为[5,100],且间隔为 5,每组虚拟网络数目为 10^4 个。另外,针对 $\mu=4$, $\beta=25$ 的固定网络负载,在不同虚拟网络数目下进行算法仿真,每次共计运行 1000 个虚拟网络,每处理 200 个虚拟网络请求时进行一次数据统计。

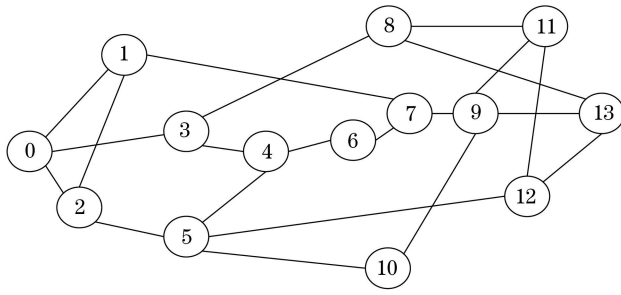


图 5 NSFNET 拓扑
Fig. 5 NSFNET topology

4.3 结果分析

首先,从网络阻塞率的角度分析本文算法的优势。由图 6 可以看出,与 BASE-VONM 算法和 SC-VONM算法相比,NF-VONM 算法的虚拟网络阻塞率较低,当爱尔兰业务强度范围为 320~400 时,阻塞率变化趋势趋于平缓,此时阻塞率分别降低 20%和 17%左右。BASE-VONM 算法由于在节点映射时只考虑节点计算资源,忽略了对链路映射的影响,从而导致后续链路映射成功率降低。SC-VONM 算法虽然加入了对链路频谱连续度的考虑,但该算法并未对节点间的链路频谱资源进行评估,从而导致虚拟网络可能因链路频谱资源不足而映射失败,制约了底层物理设施接收更多的虚拟网络请求。图中 Erland 为话务量强度单位。

其次,在链路平均映射长度方面,如图 7 所示,与表现较好的 SC-VONM 算法相比,所提 NF-VONM 算法的链路平均映射长度减小了 15%左右。这是因为该算法考虑了节点映射对后续链路映射的影响,在映射约束节点时,尽可能减小其与相邻节点的映射距离,从而减小虚拟链路映射的物理路径长度。对于 NF-VONM 算法而言,随着网络负载的不断增大,剩余物理资源逐渐减少,导致虚拟网络的节点映射位置分散,从而增加了虚拟链路的物理路径长度。

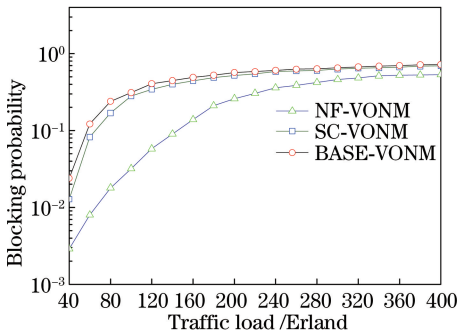


图 6 虚拟网络阻塞率

Fig. 6 Blocking probability of virtual network

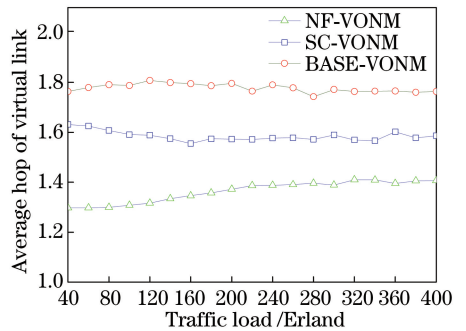


图 7 虚拟链路的平均跳数

Fig. 7 Average hop of virtual link

NF-VONM 算法在降低虚拟网络阻塞率和减少链路平均映射长度的同时,在链路的频谱资源消耗方面同样具有优势(图 8)。NF-VONM 算法的目标就是通过减小虚拟链路的频谱资源消耗来减少虚拟网络的映射成本。在映射约束节点时,优先选择可以使节点间链路频谱资源消耗最小的物理节点,由此保证虚拟链路占用较少的频谱资源。在仿真环境下,平均每条链路比 SC-VONM 算法中的链路节省了 1.5 个单位的频隙资源。

除上述几个方面外,虽然 3 种算法的物理网络收益均随着虚拟网络数目的增多而逐渐增加,如图 9 所示,但相对而言,BASE-VONM 算法和 SC-VONM 算法的物理网络收益要低于本文算法,并且收益差距逐渐增大。结合图 6 的虚拟网络阻塞率来看,所提 NF-VONM 算法的网络阻塞率更低,进而可以接收更多的虚拟网络,因此该算法可以获得较高的物理网络收益。

此外,随着虚拟网络数目的增加以及虚拟网络服务的结束,部分物理资源被释放,以供新的虚拟网络使用,这就增加了物理网络的总体收益。3 种算法在固定网络负载下的虚拟网络阻塞率相对固定,导致物理网络接收的虚拟网络数目差距逐渐增大,从而加大了不同算法物理网络的收益差距。

NF-VONM 算法的物理网络可承载的虚拟网络数目也有所增加。由图 10 可以看出,NF-VONM 算法在此方面相比于 BASE-VONM 算法与 SC-VONM 算法分别提升了 22%和 16%左右。由于 NF-VONM 算法在链路资源消耗方面表现较好,进而降低了虚拟网络整体的映射成本,在资源一定的情况下,增加了可服务的虚拟网络数量。另外,随着虚拟网络服务时间结束,会有部分资源被释放并被重新分配给其他虚拟网络,从而影响虚拟网络映射成本,最终导致物理网络可承载的虚拟网络数目在较小范围内变化。

虽然 NF-VONM 算法与 BASE-VONM 和 SC-VONM 两种算法相比具有诸多优势,但是在平均映射时间方面,NF-VONM 算法却略高于其他两种算法,如图 11 所示。这是因为 NF-VONM 算法会对虚拟链路进行额外的频谱资源消耗评估,并对物理节点进行筛选,从而导致平均映射时间增加,尽管如此,NF-VONM 算法的映射时间仍然可以满足虚拟网络映射的需求。

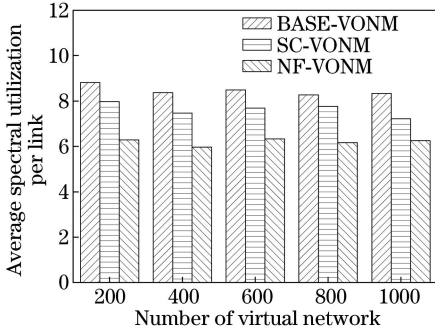


图 8 链路平均资源消耗

Fig. 8 Average resource consumption in link

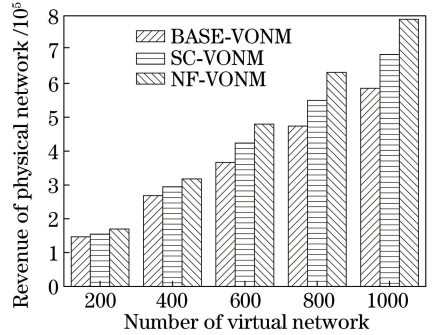


图 9 物理网络收益

Fig. 9 Revenue of physical network

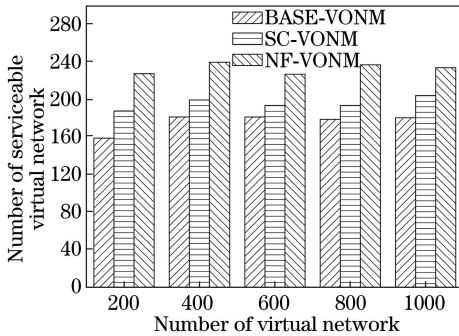


图 10 可服务虚拟网络数目

Fig. 10 Number of serviceable virtual network

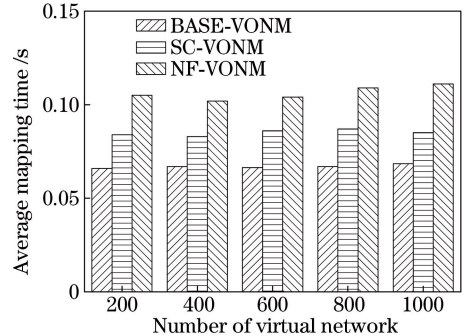


图 11 平均映射时间

Fig. 11 Average mapping time

5 结 论

提出了一种适用于弹性光网络下的虚拟网络映射算法,该算法通过缩短相邻虚拟节点的映射距离来减小网络请求的资源消耗。算法中采用虚拟节点、链路协同映射方式,保留了相互之间的约束关系,从而增加映射成功率,并且在节点映射前对物理节点进行筛选,减小了算法复杂度。仿真结果表明,所提算法不仅可以降低虚拟网络映射成本、提高请求接收率,还具有较高的物理网络收益。由于算法运行时间较长,因此,后续研究将考虑如何改进物理节点的选取方式,以缩短映射时间。

参 考 文 献

[1] Yang H, Zhang J, Zhao Y L, *et al.* SUDOI: Software defined networking for ubiquitous data center optical inter connection[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 86-95.

[2] Qin Panke, Wang Liqian, Ma Jun, *et al.* Dynamic traffic balancing strategy experiment on optical line terminal of 40G coherent passive optical network[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405007.

秦攀科, 王立芊, 马 骏, 等. 基于 40G 相干无源光网络系统光线路终端的流量均衡策略实验[J]. 中国激光, 2015,

42(4): 0405007.

- [3] Gerstel O, Jinno M, Lord A, *et al.* Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 12525244.
- [4] Zhang G Y, Leenheer M, Morea A, *et al.* A survey on OFDM-based elastic core optical networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 65-87.
- [5] Xuan Hejun, Wang Yuping, Xu Zhanqi, *et al.* Nodes security-aware spectrum assignments algorithm in elastic optical network[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206002.
宣贺君, 王宇平, 徐展琦, 等. 弹性光网络中考虑节点安全性的频谱分配算法[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206002.
- [6] Chowdhury N M M K, Boutaba R. Network virtualization: State of the art and research challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(7): 20-26.
- [7] Wang A J, Iyer M, Dutta R, *et al.* Network virtualization: Technologies, perspectives, and frontiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 523-537.
- [8] Khan A, Zugenmaier A, Jurca D, *et al.* Network virtualization: A hypervisor for the Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(1): 136-143.
- [9] Chen Xiang, Zhang Zhongbao, Su Sen, *et al.* Survey of virtual network embedding problem[J]. Journal on Communications, 2011, 32(10): 143-151.
程 祥, 张忠宝, 苏 森, 等. 虚拟网络映射问题研究综述[J]. 通信学报, 2011, 32(10): 143-151.
- [10] Nejabati R, Escalona E, Peng S P, *et al.* Optical network virtualization[C]. 15th International Conference on Optical Network Design and Modeling, 2011: 11962951.
- [11] Zhang S Q, Shi L, Vadrevu C S K, *et al.* Network virtualization over WDM networks[C]. 5th IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks, 2011: 12578014.
- [12] Pagès A, Perelló J, Spadaro S. Virtual network embedding in optical infrastructures[C]. 14th International Conference on Transparent Optical Networks, 2012: 12908155.
- [13] Peng S P, Nejabati R, Simeonidou D. Impairment-aware optical network virtualization in single-line-rate and mixed-line-rate WDM networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(4): 283-293.
- [14] Gong L, Zhu Z Q. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 450-460.
- [15] Madani F M, Mokhtari S. Fragmentation-aware load-balancing virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[C]. 6th International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, 2015: 27-32.
- [16] Xie W S, Jue J P, Zhang Q, *et al.* Survivable virtual optical network mapping in flexible-grid optical networks[C]. International Conference on Computing, Networking and Communications, 2014: 221-225.
- [17] Assis K D R, Peng S P, Almeida R C, *et al.* Network virtualization over elastic optical networks with different protection schemes[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(4): 272-281.
- [18] Hmaïty A, Francesco F, Tornatore M. Survivable virtual network mapping to provide content connectivity against double-link failures[C]. International Conference on the Design of Reliable Communication Networks, 2016: 160-166.
- [19] Zhang S L, Qiu X S. A novel virtual network mapping algorithm for cost minimizing[J]. Journal of Selected Areas in Telecommunications, 2011, 2(1): 1-9.
- [20] Yu H F, Wen T, Di H, *et al.* Cost efficient virtual network mapping across multiple domains with joint intra-domain and inter-domain mapping[J]. Optical Switching & Networking, 2014, 14(3): 233-240.
- [21] Jarray A, Karmouch A. Cost-efficient mapping for fault-tolerant virtual networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(3): 668-681.
- [22] Xiong Wencheng, Wang Ying, Qiu Xuesong, *et al.* Link-first based quick coordinated virtual network embedding algorithm[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 2015063.
熊文成, 王 颖, 邱雪松, 等. 基于链路优先的快速协同虚拟网络映射算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 2015063.
- [23] Wang H X, Zhao J X, Li H, *et al.* Opaque virtual network mapping algorithms based on available spectrum adjacency for elastic optical networks[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(4): 042302.