

无线网络虚拟化中的映射算法研究

曹 侯, 夏士超, 何 芳, 李 云

(重庆邮电大学重庆市移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 无线网络虚拟化技术是 5G 研究的热点, 其中虚拟网络映射问题是关键技术之一。对无线网络虚拟化映射问题进行介绍, 针对现有映射算法不能完全适应网络动态变化的不足, 以最小化映射成本为目标, 提出一种新的网络中带宽和功率资源的联合映射算法 (WVNEA-JBP, wireless virtual network embedding algorithm based on joint bandwidth and power), 同时考虑无线链路之间的干扰对映射性能的影响和路径分离。实验结果表明, 该算法在实现资源高效利用的同时, 提高了无线虚拟网络映射成功的概率。

关键词: 无线网络虚拟化; 映射算法; 负载均衡; 路径分离

中图分类号: TN92

文献标识码: A

Research of embedding algorithm for wireless network virtualization

CAO Bin, XIA Shi-chao, HE Fang, LI Yun

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Wireless network virtualization has become one of the promising techniques in fifth generation mobile networks (5G), and the virtual network embedding plays a very important role. A model was formulated to describe the problem and a wireless virtual network embedding algorithm based on joint bandwidth and power allocation (WVNEA-JBP) was put forward, which selected the suitable node and path to serve the data transmission from virtual networks. In order to minimize the overhead while satisfy the higher capacity request, this algorithm considered the impact of interference of wireless links and supports path splitting. A case study was introduced to show how WVNEA-JBP to work. Furthermore, simulation results show that WVNEA-JBP is able to accomplish the efficient utilization of network resources and improve the accept rate of virtual network requests.

Key words: wireless network virtualization, embedding algorithm, load balancing, separate paths

1 引言

随着无线网络技术日益成熟和智能终端蓬勃发展, 多样化业务需求大量涌现, 无线网络发展也面临着很多挑战, 如多种无线网络技术兼容和不同的接入网络选取等。无线网络虚拟化技术的提出为目前的无线网络提供了一种有效的管理方式^[1,2], 结

合已有的 SDN(software defined networking)^[3,4]和 NFV(network functions virtualization)^[5]技术, 可以对无线网络资源实现统一管理和调度, 以及实现多种无线网络的有效融合与共存。在满足用户不同业务需求的同时, 降低整个网络运营成本, 提高网络管理效率^[6,7]。

网络虚拟化不仅可以有效解决当前网络“僵化”

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-09-28

基金项目: 重庆邮电大学博士启动基金资助项目 (No.A2014-92); 重庆邮电大学青年科学研究基金资助项目(No.A2014-94); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(No.KJ1500406); 重庆市基础与前沿研究计划基金资助项目(No.cstc2015jcyjA40048); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(No.IRT1299); 国家自然科学基金资助项目(No.61402065)

Foundation Items: Doctoral Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications(No.A2014-92), The Science Research Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications for Young Scholars(No.A2014-94), The Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission of China (No.KJ1500406), Basic and Advanced Research Projects of Chongqing (No.cstc2015jcyjA40048), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No.IRT1299), The National Natural Science Foundation of China (No.61402065)

问题^[8]，而且可以充分发挥资源共享的优势，支持灵活配置与管理，通过抽象、隔离和分配机制，使多个异构的虚拟网络同时运行于底层物理网络，实现资源高效利用。它与传统网络的最大不同是将网络服务提供商解耦为基础设施提供商(InP, infrastructure provider)和服务提供商(SP, service provider)。其中，InP 负责管理和维护底层物理网络，而 SP 则负责向 InP 租赁底层物理资源来构建虚拟网络^[9,10]。

虚拟网络映射问题是指在不改变底层物理网络的前提下，InP 如何从物理资源中选择满足虚拟网络请求的物理节点和链路。映射过程一般可以分为节点映射和链路映射，以满足资源约束为前提，在底层物理网络中为虚拟请求找到合适的物理节点和链路^[11,12]。目前，已经有一些针对无线网络映射算法的研究，文献[13]中提出一个无线虚拟网络的系统框架，其中，网络控制器(NO, network operator)负责资源分配，SP 根据用户的行为对网络资源投标，NO 通过执行 Vickrey-Clarke-Groves(VCG)机制进行拍卖，将其建模为一个斯坦伯格博弈并找到最优解，以纳什均衡报价为基础执行 VCG 机制，进行资源分配。文献[14~16]针对无线多跳网络，结合有线网络环境下的映射算法建立无线网络模型，分析了无线链路之间的干扰对映射性能的影响。文献[17~20]提出将无线资源抽象为时隙和正交频率乘积的矩形，其中，文献[17]提出了一种基于类似卡诺图的映射算法，可以处理在线的虚拟网络请求。由于无线网络链路的低可靠性，文献[21]为提高映射后虚拟网络的可靠性，对网络拓扑进行预处理并根据处理结果选择可靠性更高的物理路径映射。

然而，现有无线网络虚拟化映射算法仍然存在很多问题。首先，已有的映射算法并没有将带宽资源与功率资源^[22,23]进行明确区分，也没有详细考虑不同资源之间的差异性、互补性和替代性。当某一种资源（如功率）紧张，而另一种资源（如带宽）富余时，在满足业务请求（如速率）的前提下，如何实现资源的灵活调度，是一个十分重要但尚待解决的问题。其次，在虚拟网络映射过程中，为了实现高效的资源利用，必须统一均衡地协调各个虚拟网络对物理资源的占用，使各个物理节点和物理链路之间的负载处于相对平衡的状态，防止部分节点或链路拥塞、过载，而其他节点或链路闲置。虽然在相关文献中提到过该问题，但是缺乏有效完善的

解决方案。同时，由于无线网络的广播特性，物理链路之间相互干扰不可避免，干扰管理问题就显得十分必要。最后，在链路映射过程中，很可能因无法找到一条满足条件的物理路径而映射失败，而路径分离^[22,23]可以有效提高虚拟网络映射成功概率，增加映射的灵活性。即使已经有部分映射算法支持路径分离^[24,25]，但是高效易执行的路径分离原则依然缺乏。

虚拟网络映射问题属于 NP 困难问题^[26~28]，其相应的解决方案大多基于启发式算法，因此，本文从功率资源、地理位置和带宽资源 3 个限制条件进行探讨。与此同时，在本文的基础上，可以根据实际需要，调整变化限制条件，从而实现更广泛的应用。本文贡献主要包括：1) 提出带宽资源和功率资源联合分配的自适应映射算法，以资源代价最小为目标，建立资源映射联合优化的理论分析模型；2) 考虑物理网络的负载均衡，构造虚拟网络映射的成本函数和目标函数来反映网络负载水平；3) 考虑链路之间的干扰对映射性能的影响；4) 对虚拟链路的流量请求以映射成本最小为原则对链路请求进行分割，提高物理资源利用效率和虚拟网映射成功的概率。

2 问题描述与系统模型

2.1 网络模型

在网络虚拟化的环境中，InP 和 SP 分别扮演重要角色，其中，InP 负责物理网络中基础设施资源的维护与管理，而 SP 负责提出构建虚拟网络的请求。

1) 物理网络模型

底层物理网络可以用 $G^S = (N^S, L^S)$ 表示，其中， N^S 对应底层物理节点集合， L^S 对应底层链路集合。对于每个物理节点 $n^S \in N^S$ ，同时包含节点功率信息 $p(n^S)$ 和地理位置 $loc(n^S)$ ， $p(n^S)$ 表示该物理节点最大发送功率；对于每条物理链路 $l^S \in L^S$ ，包含该链路带宽信息 $b(l^S)$ ， $b(l^S)$ 表示该物理链路带宽资源的最大值。此外，用 p^S 表示物理网络中的一条物理路径。

2) 虚拟网络请求模型

类似地，用无向图 $G^V = (N^V, L^V)$ 表示虚拟网络请求。其中， N^V 表示虚拟网络中的节点集合， L^V 表示虚拟网络请求中的链路集合，每个节点 $n^V \in N^V$ 包含位置信息 $loc(n^V)$ 。对于每条虚拟链路 $l^V \in L^V$ ，它包含该虚拟链路要求的传输速率 $R(l^V)$ ，物理网

络需要分配一定的带宽资源 $b(l^V)$ 和功率资源 $p(n^V)$ 以满足虚拟网络请求。

$$b(l^V) \ln \left(1 + \frac{p(n^V)G(l^V)}{\sigma^2 + \sum_{n^S \in N^S \setminus \{n^V \rightarrow n^S\}} p(n^S)G(l^S)} \right) \geq R(l^V) \quad (1)$$

其中, $G(l^V)$ 表示所映射链路的信道增益, σ^2 表示信道中的高斯白噪声大小, $\sum_{n^S \in N^S \setminus \{n^V \rightarrow n^S\}} p(n^S)G(l^S)$ 表示其他链路对映射链路产生的干扰。

图 1 为网络模型, 其中字母表示节点, 字母间的连线表示节点之间的链路。左侧代表物理网络, 节点间的数字代表链路带宽, 单位为 MHz, 即 $b(l^S)$, 字母旁数字代表节点的功率大小, 单位为 W, 即 $p(n^S)$ 。右侧代表 2 个虚拟网络请求, 链路上的数字代表请求的速率大小, 单位为 Mbit/s, 即式 (1) 中的 $R(l^V)$ 。其中, 虚拟请求应满足 $b(l^V) \leq b(l^S)$ 和 $p(n^V) \leq p(n^S)$, 且应满足不等式 (1)。

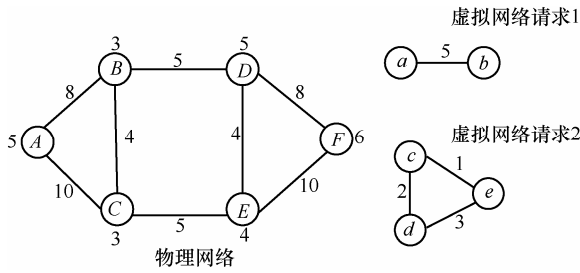


图 1 网络模型

2.2 问题分析

2.2.1 无线网络可用资源

虚拟网络映射算法根据物理网络资源和虚拟请求, 分为虚拟节点映射和虚拟链路映射, 随着虚拟网络生命周期的结束释放资源。因此, 某一时刻物理网络的可用节点资源和链路资源为分别定义如下。

1) 节点可用资源

对于每个节点 $n^S \in N^S$, 可用资源 $A_N(n^S)$ 为

$$A_N(n^S) = p(n^S) - \sum_{n^V \rightarrow n^S} p(n^V) + \sum_{n^V \rightarrow n^S} Rel(p(n^V)) \quad (2)$$

其中, $\sum_{n^V \rightarrow n^S} p(n^V)$ 为所有映射在 n^S 上的虚拟节点所消耗的功率资源大小, $\sum_{n^V \rightarrow n^S} Rel(p(n^V))$ 为虚拟节点释放的功率资源。

2) 链路可用资源

对于每条物理链路 $l^S \in L^S$, 可用资源 $A_L(l^S)$ 为

$$A_L(l^S) = b(l^S) - \sum_{l^V \rightarrow l^S} b(l^V) + \sum_{l^V \rightarrow l^S} Rel(b(l^V)) \quad (3)$$

其中, $\sum_{l^V \rightarrow l^S} b(l^V)$ 为所有映射在 l^S 上的虚拟链路消耗的带宽资源大小, $\sum_{l^V \rightarrow l^S} Rel(b(l^V))$ 为虚拟链路释放的带宽资源大小。

2.2.2 目标节点选择

在映射过程中, 现有研究往往优先选择可用资源充足的物理节点映射, 再进行链路映射。这种节点映射和链路映射相互独立的方法, 难以保证链路资源的合理利用, 进而导致链路映射阶段资源代价大或无法成功完成链路映射。因此, 引入物理节点扩展资源的概念, 定义为该节点功率资源的大小与相连的所有链路上带宽资源和

$$A_N(n^S) + \mu \sum_{l^S \in L^n} A_L(l^S) \quad (4)$$

其中, μ 为权重, 表示带宽资源和功率资源的相对重要性, L^n 为通过节点 n 的链路集合。在映射阶段将优先选择物理节点扩展资源大的节点映射, 以保证在链路映射成功的前提下对资源的合理利用。

2.2.3 干扰模型

在无线网络环境中, 由于链路之间干扰的存在, 影响虚拟网络性能。因此, 在链路映射过程中, 不仅要选择资源丰富的链路, 还要避免该链路受到其他链路的干扰。假设只考虑相邻链路之间的干扰, 则对于某一条链路, 定义链路干扰系数

$$d_l(l^S) = \gamma \frac{d_l + 1}{A_L(l^S)} \quad (5)$$

其中, d_l 为可能与其他相邻链路产生干扰的链路数, γ 为常数, 链路干扰系数与 d_l 成正比。该链路干扰系数作为链路权值的一部分, 综合考虑链路的可用资源和干扰, 以最短路径算法寻找最优路径。

2.2.4 成本函数

在设计虚拟网络映射算法的过程中, 为了保证物理资源高效均衡利用, 接受更多的虚拟网络请求, 需要同时考虑底层物理节点和链路的负荷压力、均衡链路和节点的负载。

在本文中, 为反应网络负载情况, 定义单位资源成本为可用资源大小的倒数, 对于某一节点或链路, 若负载大, 其可用资源小, 相应的单位资源成

本高, 如式(6)所示。

$$\alpha(n^S) = \frac{\eta}{A_N(n^S)}, \beta(l^S) = \frac{\xi}{A_L(l^S)} \quad (6)$$

其中, $\alpha(n^S)$ 表示为节点 n^S 单位功率资源的价格, $\beta(l^S)$ 表示链路 l^S 上单位带宽资源的价格, η 和 ξ 均为常数。

接下来, 定义虚拟网络映射的成本函数, 该函数代表 SP 向 InP 租赁资源所需的开销。对于任意一个虚拟网络请求, 其映射成本包括映射的物理路径上节点所需功率成本和链路所需带宽成本。

$$Cost(P^S) = C(P^S) = \sum_{n^V \rightarrow n^S, n^S \in P^S} \alpha(n^S) p(n^V) + \sum_{l^V \rightarrow l^S, l^S \in P^S} \beta(l^S) b(l^V) \quad (7)$$

其中, $p(n^V)$ 表示映射路径中节点消耗的功率, $b(l^V)$ 表示映射路径中链路分配的带宽。

2.3 虚拟网络映射问题

在请求到达时, 物理网络必须为其找到合适的节点和路径, 以及决定如何分配物理资源。对每一次无线网络虚拟化的映射过程, 可以描述为从虚拟网络请求 G^V 到物理网络 G^S 子集的映射, 表示为 $Map: G^V \rightarrow G^S(N^*, P^*)$, 其中, $N^* \subset N^S, P^* \subset P^S$ 。

2.3.1 节点映射

对于任意一次节点映射 $\forall n^V \in N^V, Map^N: n^V \rightarrow n^S$, 需要满足一定的限制条件, 在满足请求的情况下, 为虚拟节点分配的功率资源不能超过底层物理节点的可用功率资源; 同时, 虚拟节点和物理节点之间的距离不能超过虚拟节点可以映射的范围, 即

$$p(n^V) \leq A_N(n^S), \forall n^V \rightarrow n^S \quad (8)$$

$$dis(loc(n^V), loc(n^S)) \leq D \quad (9)$$

其中, $dis(loc(n^V), loc(n^S))$ 表示虚拟节点 n^V 到物理节点 n^S 的距离, D 表示虚拟节点的可映射范围。

2.3.2 链路映射

对于 $\forall l^V \in L^V, Map^L: l^V \rightarrow P^S$, 通过路径分离的方法, 一个虚拟请求可以同时映射到多条底层物理链路上, 用 P^S 表示映射的物理链路的集合。由于底层链路资源的约束, 链路映射过程中也需要满足一定的限制条件, 用不等式(10)表示。

$$b(l^V) \leq A_L(l^S), \forall l^V \rightarrow P^S, l^S \in P^S \quad (10)$$

2.3.3 目标函数

虚拟网络映射的目标是将一个具有资源约束的网络请求映射到实际的物理网络中。以满足虚拟网络请求为前提, 物理网络负载均衡为基础, 最小化资源代价为目标, 提高整个物理网络的资源利用率和虚拟请求接入成功率, 即目标函数为

$$\begin{aligned} \min(C(P^S)) = \min & \left(\sum_{n^V \rightarrow n^S, n^S \in P^S} \alpha(n^S) p(n^V) + \sum_{l^V \rightarrow l^S, l^S \in P^S} \beta(l^S) b(l^V) \right) \\ \text{s.t. } & p(n^V) \leq A_N(n^S), dis(loc(n^V), loc(n^S)) \leq D \\ & b(l^V) \leq A_L(l^S) \\ & b(l^V) \text{lb} \left[1 + \frac{p(n^V)G(l^V)}{\sigma^2 + \sum_{n^S \in N^S \setminus n^V \rightarrow n^S} p(n^S)G(l^S)} \right] \geq R(l^V) \quad (11) \end{aligned}$$

在满足虚拟节点和虚拟链路资源需求约束的同时, 最小化物理资源消耗和负载均衡, 既能满足当前的虚拟请求, 保证现有业务的服务质量, 又能接受更多的虚拟网络请求。

3 映射算法基本步骤

本文讨论的映射算法主要针对节点功率资源和链路带宽资源, 且 2 种资源在映射过程中密不可分。因此, 本文提出一种新型虚拟网络映射算法 WVNEA-JBP, 算法包括节点映射和链路映射 2 个相互协同的阶段。首先, 根据位置信息和节点扩展资源大小, 实现虚拟节点的优化映射; 然后, 根据可用资源大小和干扰系数, 以成本最小为目标, 为虚拟节点之间的虚拟链路寻找物理路径。映射的基本步骤如下。

- 1) 将虚拟网络请求速率按照降序排列, 选取速率请求最大的一条链路上的节点进行映射。
- 2) 为虚拟节点寻找在各自范围内可以映射的物理节点集合, 即满足 $dis(loc(n^V), loc(n^S)) \leq D$, 否则映射失败。
- 3) 根据式(4)分别计算物理节点集合中的节点扩展资源, 并选取扩展资源最大的节点映射虚拟节点。
- 4) 将该链路的速率请求分割成若干个速率大小相等的子虚拟网络请求, 依次映射。
- 5) 根据式(5)分别计算物理网络中每条链路的干扰系数。
- 6) 将节点映射成本分配到物理节点对应的链路中, 即每条物理链路的权值为对应节点的资源成

本与链路干扰系数之和。采用 Dijkstra 算法找到两物理节点之间的最短路径 P 。

7) 将虚拟网络请求映射至最短路径 P , 对于路径 P 中的每一条链路, 以最小成本为原则合理分配功率资源和带宽资源, 若无法满足映射所需资源, 则映射失败; 否则, 更新可用资源大小和单位资源成本。

8) 重复步骤5)~步骤7), 直到该链路达到请求速率。

9) 重复步骤1)~步骤8), 直到所有虚拟网络请求映射完成。

4 算法分析

假设虚拟网络请求速率为 R , 将其分割为 n 个相同速率(ΔR)的子虚拟网络请求, 即 $R = n\Delta R$ 。根据干扰系数和可用资源的大小确定虚拟节点之间的最短路径 P , 首先将第一个子虚拟网络请求映射至路径 P , 则路径 P 上任意一条物理链路上的传输速率均为 ΔR 。

$$\Delta R = \Delta b_i \text{lb} \left(1 + \frac{\Delta p_i G_i}{\sigma^2 + \sum_{n^S \in N^S \setminus n_i} p(n^S) G(l^S)} \right), \quad (12)$$

$$\forall n_i \in P, l_i \in P$$

$$\Delta C_i = \left(\frac{\eta}{A_N(n^S)} \Delta p_i + \frac{\xi}{A_L(l^S)} \Delta b_i \right), \quad (13)$$

$$\Delta p_i \leq A_N(n^S), \quad \Delta b_i \leq A_L(l^S)$$

其中, Δb_i 和 Δp_i 分别表示路径 P 上第 i 条链路消耗的带宽和功率大小, G_i 为路径 P 上第 i 条链路的信道增益, σ^2 为该信道上的噪声, ΔC_i 为映射至第 i 条链路的成本。对于某一条链路, 其链路增益和噪声可以计算得到, 根据式(12)和式(13)得到映射至某一条物理链路的成本函数为

$$\begin{aligned} \Delta C_i &= \frac{1}{A_N(n_i)} \Delta p_i + \frac{1}{A_L(l_i)} \Delta b_i \\ &= \frac{1}{A_N(n_i)} \Delta p_i + \frac{1}{A_L(l_i)} \frac{\Delta R}{\text{lb} \left(1 + \frac{\Delta p_i G_i}{\sigma^2 + \sum_{n^S \in N^S \setminus n_i} p(n^S) G(l^S)} \right)}, \\ &\forall n_i \in P, l_i \in P \end{aligned} \quad (14)$$

显然, 该成本函数为 Δp_i 的凹函数, 对式(14)求导, 导数为 0 的点即为 ΔC_i 的最小值点。此时路径 P 上的物理节点 n_i 所需要的功率为 $\Delta p'_i$, 计算链路 l_i 上需要的带宽大小为 $\Delta b'_i$, 得到最小成本

$$\min(\Delta C_i) = \frac{1}{A_N(n_i)} \Delta p'_i + \frac{1}{A_L(l_i)} \Delta b'_i \quad (15)$$

类似地, 得到路径 P 上所有链路的最小成本, 最后计算路径 P 上传输速率达到 ΔR 时所需的成本 C_1 为

$$C_1 = \sum_{n_i \in P, l_i \in P} \Delta C_i = \sum_{n_i \in N(P)} \frac{1}{A_N(n_i)} \Delta p'_i + \sum_{l_i \in P} \frac{1}{A_L(l_i)} \Delta b'_i \quad (16)$$

此时, 第一个子虚拟请求映射完成。由于虚拟网络请求消耗了路径 P 上的一部分物理资源, 需要更新物理网络资源大小以及相应的单位资源价格。当节点 n_i 被消耗的功率大小为 $\Delta p'_i$ 时, 可用功率资源更新为 $A_N(n_i) - \Delta p'_i$, 节点上功率资源的单价为 $\frac{\eta}{A_N(n_i) - \Delta p'_i}$; 当链路 l_i 被消耗 $\Delta b'_i$ 大小的带宽后, 可用带宽资源为 $A_L(l_i) - \Delta b'_i$, 链路上带宽资源的单价为 $\frac{\xi}{A_L(l_i) - \Delta b'_i}$ 。

根据映射算法步骤逐个映射剩余的子虚拟网络请求, 若某一个子虚拟网络请求映射失败, 则整个映射终止; 否则, 直到 n 个子虚拟网络请求全部映射成功。统计该虚拟网络请求的映射结果, 包括映射的路径集合和每一条路径上的速率大小, 计算总的映射成本为 $C = \sum_{i=1}^n C_i, n \in N$ 。

5 仿真与性能分析

本节利用 Matlab 仿真工具对 WVNEA-JBP 算法进行仿真。为了更好地验证 WVNEA-JBP 算法的性能, 本节采取基本的映射算法(BVNEA, basic virtual network embedding algorithm)^[25]进行对比, BVNEA 在节点映射过程中选取功率资源最大的节点进行映射, 节点映射成功后, 再根据链路资源大小利用最短路径算法找到一条物理路径进行链路映射。仿真实验主要从节点功率资源利用率、链路带宽资源利用率、虚拟网络请求映射成功率和映射成本几个性能指标进行验证分析。

5.1 仿真场景设置

利用仿真工具随机生成 50 个节点的物理网络拓扑, 物理网络中 50 个节点随机分布在 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 范围内, 假设 2 个物理节点在传输范围内生成一条物理链路。其中, 节点的功率资源服

从均匀分布 $U(5,10)$ ，链路的带宽资源服从均匀分布 $U(2,5)$ 。假设虚拟节点可映射范围 $D=500\text{ m}$ ， $\sigma^2=10^{-8}$ ， $G=d^{-k}$ ， d 为节点之间的距离， k 是信道衰落系数，设置 $k=4$ ， $\gamma=1$ ， $\eta=\xi=1$ ， $\mu=0.5$ 。物理网络拓扑如图 2 所示。

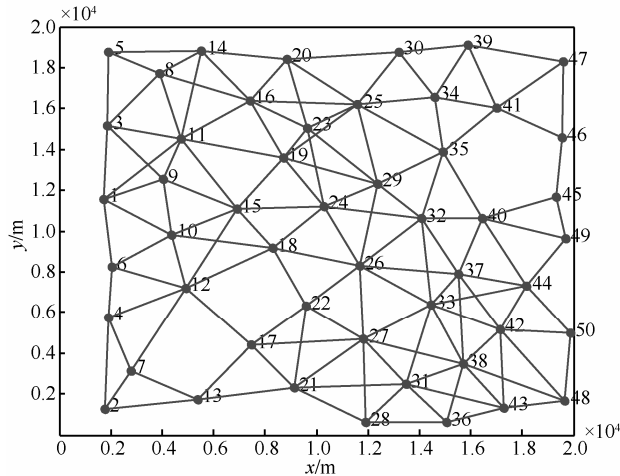


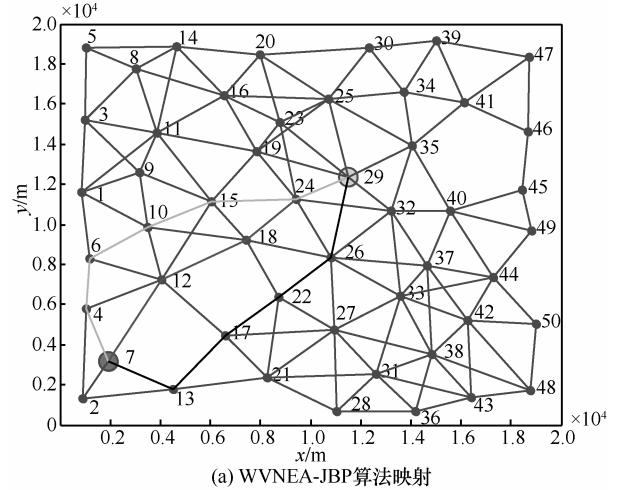
图 2 物理网络拓扑

假设虚拟网络请求的到达率服从参数为 $\lambda=5$ 的泊松分布，即每个时间窗内平均到达 5 个虚拟网络请求。假设每个虚拟网络服务时间（生命周期） μ 均为 10 个时间窗^[25]，整个仿真时间为 100 个时间窗。虚拟节点数随机生成，服从 $U(3,5)$ 的均匀分布，虚拟节点之间以 0.5 的概率形成虚拟链路，虚拟网络请求的速率大小服从 $U(3,8)$ 的均匀分布。

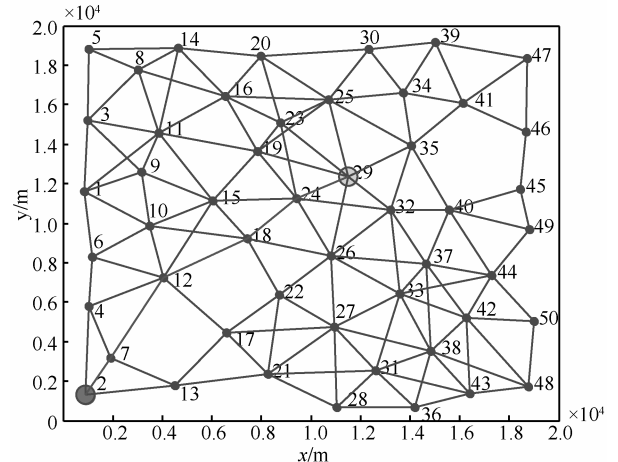
为了验证所提算法的正确性和有效性，分别在 2 种情况下与 BVNEA 进行对比。首先，针对一个虚拟网络请求，比较一个速率下的实际映射结果，并比较虚拟网络请求的速率变化对成本的影响；然后，对比验证 WVNEA-JBP 算法和 BVNEA 算法在 100 个时间窗内的性能。

5.2 仿真结果与性能分析

图 3 为虚拟网络请求为 6 Mbit/s 的映射结果。图 3(a) 中 WVNEA-JBP 算法所映射的源节点和目的节点分别为节点 7 和 29，链路映射过程中，以成本最小原则，通过路径分离一条虚拟链路映射至 3 条物理路径： $7 \rightarrow 12 \rightarrow 18 \rightarrow 24 \rightarrow 29$ 、 $7 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 15 \rightarrow 24 \rightarrow 29$ 、 $7 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 22 \rightarrow 26 \rightarrow 29$ 。图 3(b) 为 BVNEA 算法的映射结果，源节点和目的节点分别选择 2 和 29 进行节点映射，虚拟链路映射至 $2 \rightarrow 7 \rightarrow 12 \rightarrow 18 \rightarrow 24 \rightarrow 29$ 。



(a) WVNEA-JBP 算法映射



(b) BVNEA 算法映射

图 3 一个虚拟网络请求的映射结果

图 4 是 2 种映射算法的成本与速率关系，其中速率请求从 1 Mbit/s 逐渐增加至 20 Mbit/s，步长为 0.5，由于虚拟请求越大，映射所消耗的资源越多，因此，随着虚拟网络请求速率的逐渐增加，映射成本也将逐渐增加，但当虚拟请求的速率增加到一定值时，映射成本停止继续增加，这是因为此时的物理资源约束已不能满足映射的需求，导致映射失败，停止映射。当虚拟网络请求的速率较小时，

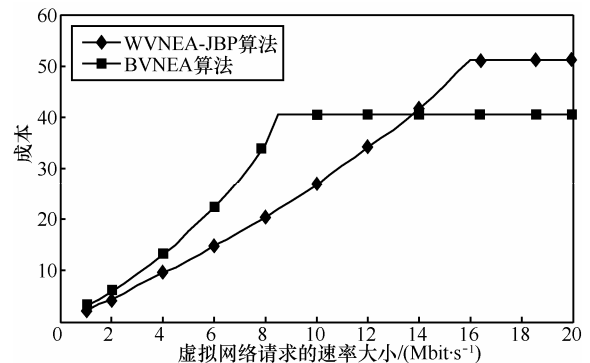


图 4 成本与速率的关系

WVNEA-JBP 算法的映射成本小于 BVNEA 算法，随着虚拟网络请求速率逐渐增大，WVNEA-JBP 算法的映射成本逐渐高于 BVNEA 算法，这是因为 BVNEA 算法在速率请求超过 8.5 Mbit/s 时开始拒绝虚拟网络请求，而 WVNEA-JBP 算法仍在构建虚拟网络，需要的映射成本也会继续增加。

接下来，仿真实验在 100 个时间窗内对 2 种映射算法在映射过程中的节点功率资源利用率和带宽资源利用率进行比较，从图 5 和图 6 中可以看出，在相同的物理条件下，映射开始阶段的功率资源利用率和带宽资源利用率逐渐增加，而随着时间的推移，已映射的虚拟网络服务时间结束而不断释放资源，同时新的虚拟网络请求也不断到来，因此，资源利用率会趋于稳定。另外，从图 5 和图 6 中可以发现，WVNEA-JBP 算法的资源利用率高于 BVNEA 算法，一方面是因为 WVNEA-JBP 算法通过扩展资源的定义，避免带宽资源的瓶颈影响虚拟网络请求的成功映射，且通过路径分离保证整个网络资源的均衡利用，避免因消耗大量的局部资源而导致未来的虚拟网络请求映射失败，另一方面是因为 WVNEA-JBP 算法比 BVNEA 算法会接收更多的虚拟网络请求，因此，资源利用率也相对较高。

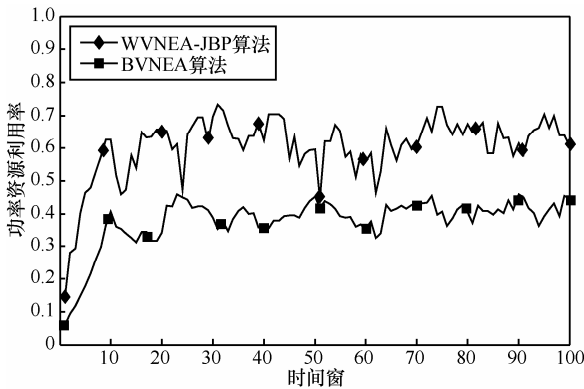


图 5 功率资源利用率

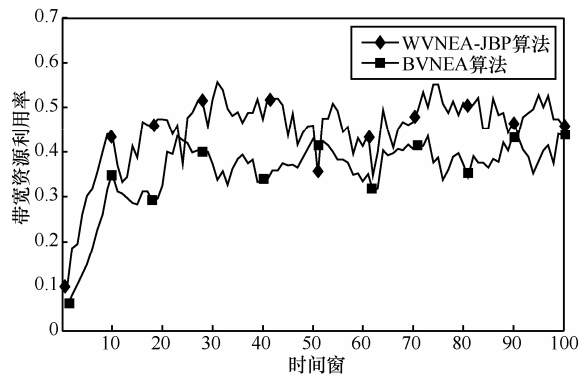


图 6 带宽资源利用率

图 7 所示为 2 种算法的虚拟网络请求映射成功率的对比。在仿真开始阶段，物理资源比较充足的条件下，2 种映射算法都具有比较高的映射成功率，且随着时间的推移，底层可用物理资源越来越少，映射成功率逐渐降低，最后趋于稳定。而 WVNEA-JBP 算法的映射成功率明显高于 BVNEA 算法，原因在于 WVNEA-JBP 算法对成本函数的定义和路径分离均从保证负载均衡出发，为未来的虚拟网络请求保留了某些重要位置的资源，有效地提高了虚拟请求映射的成功率。

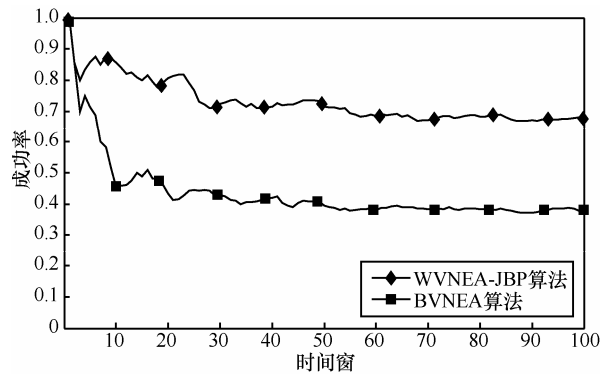


图 7 虚拟网络请求映射成功率

此外，图 8 对 2 种算法的映射成本进行比较。由于映射成本与映射成功率和网络中的可用资源有关，因此，需要结合前面的仿真结果综合分析。在仿真实验前期，WVNEA-JBP 算法的映射成功率高于 BVNEA 算法，但是 WVNEA-JBP 算法的映射成本几乎与 BVNEA 算法相等，这说明 WVNEA-JBP 算法的单个虚拟网络请求的映射成本更小。随着时间的推移，虽然 WVNEA-JBP 算法的映射成本明显高于 BVNEA 算法，但这主要是由于物理网络中可用资源的减少导致单位资源成本

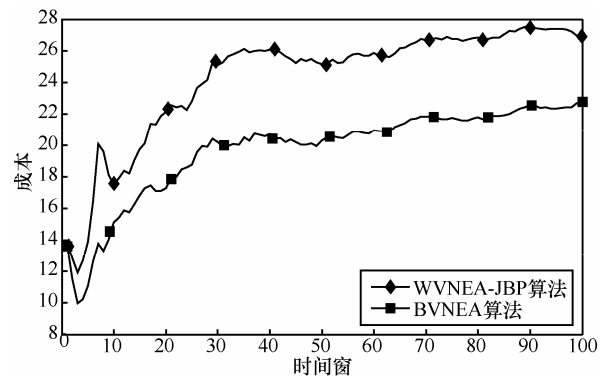


图 8 虚拟网络请求映射成本

增加, WVNEA-JBP 算法的映射成功率远远高于 BVNEA 算法, 前者会接收更多的虚拟请求, 这 2 个方面共同造成 WVNEA-JBP 算法的成本更高。

最后, 图 9 在虚拟请求满足泊松到达参数为 5 的环境下对 2 种算法的映射时间复杂度进行比较, 从图中可以看出, WVNEA-JBP 算法的映射时间复杂度要比 BVNEA 平均高 8 s, 前者平均单次映射时间复杂度比后者高 1.6 s, 原因是 WVNEA-JBP 算法在执行映射的过程中需要额外考虑负载均衡等影响而不断寻找最佳路径, 即 WVNEA-JBP 需要不断地进行监控迭代更新来应对请求的不断变化, 尽力分配资源, 优化网络性能。相反, BVNEA 算法在映射过程中并没有充分地平衡负载不均衡对网络造成的影响。此外, 可以通过限制 WVNEA-JBP 迭代更新的频率以及路径分离的上限, 降低时间复杂度。

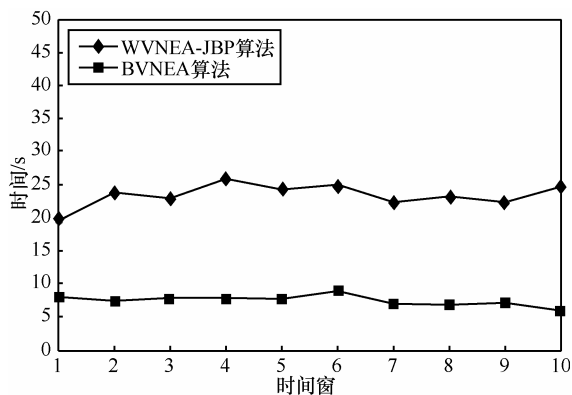


图 9 算法时间复杂度

6 结束语

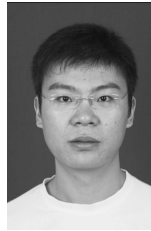
本文针对现有映射算法的不足, 从系统角度出发, 综合考虑网络中带宽和功率资源的联合优化配置问题, 建立带宽和功率资源映射联合优化的理论分析模型, 提出一种新型的基于带宽资源和功率资源的联合映射算法 WVNEA-JBP。该算法考虑节点资源、链路资源和地理位置的限制, 通过对单位资源成本的定义和以映射成本最小为目标, 综合负载均衡和路径分离思想, 考虑无线网络中相邻节点链路之间相互干扰的影响。仿真结果表明, 在满足虚拟网络请求的条件下, 该算法在节点的功率资源利用率和链路的带宽资源利用率、虚拟网络请求成功率以及映射成本上均有所提高。

参考文献:

- [1] LIANG C C, YU F R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 358-380.
- [2] PARK K, KIM C. A framework for virtual network embedding in wireless networks[C]//2009 Proceedings of the 4th International Conference on Future Internet Technologies. New York, 2009: 5-7.
- [3] JAMMAL M, SINGH T, SHAMI A, et al. Software defined networking: state of the art and research challenges[J]. Computer Networks, 2014, 72(2): 74-98.
- [4] BANIKAZEMI M, OLSHEFSKI D, SHAIKH A, et al. Meridian: an SDN platform for cloud network services[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 120-127.
- [5] CUI C, DENG H, TELEKOM D, et al. Network functions virtualization: an introduction, benefits, enablers, challenges and call for action[C]//Introductory white paper. ETSI, 2012: 22-24.
- [6] BHANAGE G, VETE D, SESKAR I, et al. SplitAP: leveraging wireless network virtualization for flexible sharing of WLANs[C]//2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010). Miami, FL, 2010: 1-6.
- [7] WANG X, KRISHNAMURTHY P, TIPPER D. Wireless network virtualization[C]//2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). San Diego, CA, 2013. 818-822.
- [8] ANDERSON T, PETERSON L, SHENKER S, et al. Overcoming the Internet impasse through virtualization[J]. Computer, 2005, 38 (4): 34-41.
- [9] 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.
- [10] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization[J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876.
- [11] CAI Z, LIU F, XIAO N, et al. Virtual network embedding for evolving networks[C]//2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010). Miami, FL, 2010: 1-5.
- [12] 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.
- [13] CHENG X, ZHANG Z B, SU S, et al. Survey of network embedding problem[J]. Journal on Communications, 2011, 32(10): 143-151.
- [14] FU F, KOZAT U C. Stochastic game for wireless network virtualization[J]. IEEE, ACM Transactions on Networking (ToN), 2013, 21(1): 84-97.
- [15] YUN D, YI Y. Virtual network embedding in wireless multihop networks[C]//2011 Proceedings of the 6th International Conference on Future Internet Technologies. New York, 2011: 13-15.
- [16] LV P, WANG X D, XU M. Virtual access network embedding in wireless Mesh networks[J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(7): 1362-1378.
- [17] YUN D, OK J, SHIN B, et al. Embedding of virtual network requests over static wireless multihop networks[J]. Computer Networks, 2013, 57(5): 1139-1152.
- [18] YANG M, LI Y, ZENG L, et al. Karnaugh-map like online embedding algorithm of wireless virtualization[C]//2012 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). 2012: 594-598.
- [19] VAN DE BELT J, AHMADI H, DOYLE L E. A dynamic embedding

- algorithm for wireless network virtualization[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC, 2014: 1-6.
- [19] ZAKI Y, ZHAO L, GOERG C, et al. LTE wireless virtualization and spectrum management[C]//2010 Third Joint IFIP, Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC). Budapest, 2010: 1-6.
- [20] ZHANG X, LI Y, JIN D, et al. Efficient resource allocation for wireless virtualization using time-space division[C]// 2012 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Limassol, 2012: 59-64.
- [21] 罗娟, 刘川川, 李仁发. 基于链路可靠性的无线虚拟网络分配方法[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 88-95.
LUO J, LIU C C, LI R F. Wireless virtual network embedding algorithm based on link reliability[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1): 88-95.
- [22] LV X, XIONG A, ZHANG S, et al. VCG-based bandwidth allocation scheme for network virtualization[C]//2012 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Cappadocia, 2012: 744-749.
- [23] WEI Y, WANG J, WANG C, et al. Bandwidth allocation in virtual network based on traffic prediction[C]//2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). Chengdu, 2010: 1-4.
- [24] YU M, YI Y, REXFORD J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [25] ZHU Y, AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]//2006 25th Proceedings IEEE INFOCOM IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain, 2006: 1-12.
- [26] CHOWDHURY N, RAHMAN M, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[C]//INFOCOM 2009, IEEE. Rio de Janeiro, 2009: 783-791.
- [27] ERLEBACH T, MEREU A. Path splicing with guaranteed fault tolerance[C]// 2009 IEEE Global Telecommunications Conference. Honolulu, HI, 2009: 1-6.
- [28] LU J, TURNER J. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate. WUCSE-2006-35[R]. 2006.

作者简介:



曹侯 (1983-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络虚拟化、软件定义网络、资源管理和网络协议设计及性能分析。



夏士超 (1991-), 男, 山东德州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线网络虚拟化、资源管理。



何芳 (1990-), 女, 安徽安庆人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线网络虚拟化、资源管理。



李云 (1974-), 男, 四川西充人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线通信、软件定义网络。