

基于链路可靠性的无线虚拟网络分配方法

罗娟, 刘川川, 李仁发

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 针对无线网络链路可靠性差影响无线虚拟网络的分配这一问题, 提出了一种基于链路可靠性的无线虚拟网络分配算法 (WVNEA-LR)。该算法通过物理网络拓扑预处理和允许同一个虚拟请求中的多个虚拟节点映射到同一个物理节点上的方法, 提高了 Vn 构建成功率和节约了物理链路资源。利用 Q 因子改善了因拓扑分配稀疏时 Vn 构建成功率低的问题。此外, WVNEA-LR 的节点分配为链路分配作了准备, 并通过选择可靠性高的承载路径保证了分配后的 Vn 具有高可靠性。仿真结果表明, WVNEA-LR 获得较好的虚拟网络构建成功率、较高的收益成本比和资源利用率。

关键词: 虚拟网络分配; 无线网络虚拟化; 资源分配; 链路可靠性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z1-0088-08

Wireless virtual network embedding algorithm based on link reliability

LUO Juan, LIU Chuan-chuan, LI Ren-fa

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the problem of the poor reliability of wireless network links affecting wireless virtual network embedding, a wireless virtual network embedding algorithm based on link reliability named WVNEA-LR was proposed. This algorithm through the physical network topology pretreatment and the method of allowing multiple virtual nodes in the same virtual request mapping to the same physical nodes, improved the success rate of virtual networks construction and saved the physical link resources. The problem that low success ratio of virtual networks construction results from topology sparse was also improved with Q fact. Besides, node embedding of WVNEA-LR made the preparation for link embedding and this algorithm ensured virtual network embedded with high reliability via choosing high reliable paths during link embedding. Simulation results show the better success rate of virtual networks construction and higher resource utility can be acquired.

Key words: virtual network embedding; wireless network virtualization; resource allocation; link reliability

1 引言

网络虚拟化技术是构建未来网络的重要技术之一, 被认为是克服当前 Internet 僵化问题的一种

重要方法。网络虚拟化使得多个不同的网络架构能共存于同一个底层物理网络拓扑中, 其对未来的 Internet 的演示是一项必不可少的关键技术之一。网络虚拟化技术具有很大程度上的灵活性和弹性, 使

收稿日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60903019); 广东省部产学研结合基金资助项目 (2011B090400060); 湖南大学青年教师成长计划支持基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60903019); The Department University-Industry Cooperation Projects of Guangdong Province (2011B090400060); Hunan University Young Teachers Growth Supported Project

得多个服务提供者能够提供满足不同需求和特征的定制化服务。目前已有基于诸如 PlanetLab^[1]、VINI^[2]等不同架构实验原理的网络应用。

网络虚拟化技术在有线领域引起了互联网领域众多研究学者们的密切关注与广泛研究。在虚拟网络环境中，如今的单一的网络服务供应商（ISP, internet service provider）将在未来发展成为 3 个重要的角色：基础设施供应商（InP, infrastructure provider），虚拟网络服务提供商（VNP, VN provider）和虚拟网络用户（VN user）。VNP 根据来自 VN user 的虚拟网络请求（VN request），从 InP 租赁虚拟资源按需有效构建虚拟网络（VN），同时最大化底层物理网络资源的利用。因此，虚拟网络分配是网络虚拟化的核心，有效的虚拟网络分配算法必须保证 VN 能够映射到物理网络中最好或最优的网络拓扑上，在满足多约束条件下达到底层物理资源的负载均衡。相关一些有线的虚拟网络分配方法采用放宽限制条件来达到降低资源分配复杂度的目的，比如仅考虑 off-line 的情况，假设节点和链路资源是无穷以及不需要考虑接入控制问题^[3~5]；仅考虑了特定的虚拟网络拓扑的情况^[2]；假设节点分配是预先知道的，虚拟网络的分配问题只集中在链路的分配问题上^[6]。虽然这些方法在一定程度上放宽了限制条件，但是其算法的伸缩性和扩展性方面受到了很大的限制。文献[7]考虑了所有的限制条件，它试图通过节点迁移、链路迁移技术和采用多路径路由的方法来处理节点映射和链路映射问题，该算法在伸缩性和扩展性方面得到了较大的提升，但同时也增加了计算的复杂度。

随着现代通信与网络互联技术的飞速发展，无线网络已逐渐成为未来 Internet 的一种重要接入形式，如何解决无线网络环境下的网络虚拟化问题成为越来越多的研究学者们重点关注的问题之一。目前已存在少量关于无线网络虚拟化技术的研究。文献[8]在无线网络环境下，通过网络接口虚拟化有效缓和了移动设备硬件接口的限制和节约了硬件成本。在虚拟化的网络接口与 AP 相连接构成的主连接和子连接中切换来保持链路连接的可靠性。同时，在没有中继服务器的情况下，可以通过多路径流来改善链路数据流的性能。文献[9]中提出了实现无线网络的虚拟映射主要有空分复用、频分复用、时分复用、码分复用和混合复用的方法，通过这些方法保证同一个底层物理网络上的多个网络具有独立

性和不相互干扰。文献[10]基于大规模的 802.11 mesh 试验床致力于无线 mesh 网络的虚拟化，以 WISEMESH 项目为背景，通过采用混分复用的切割（slicing）方案使得多个实验或网络同时共享于底层的无线 mesh 网络设施上。针对 WiMax 网络，文献[11]研究其底层物理网络的虚拟化，通过部署多个定制化的虚拟网络以满足不同的性能需求，但是只局限于单跳的蜂窝系统的虚拟化。为此，文献[12]考虑了无线多跳网络环境下的虚拟网络分配问题，针对无线网络链路的干扰性特点提出了无线网络分配模型和分配算法。

目前，已有一些研究机构搭建了无线网络虚拟化的实验平台。与有线网络相比，构建虚拟网络所要面临的关键问题之一是如何按需有效地实现资源映射，一个无线虚拟网络是由一组虚拟节点集合和连接虚拟节点的虚拟链路集合组成，虚拟节点以底层物理节点作为宿主，虚拟链路是由底层物理链路或多条物理链路组成的物理路径所配置。但是无线网络环境具有自身的特点，具备特定的约束，比如在链路可靠性、节点资源能量受限、高的传输延迟和干扰性等方面都存在明显差异，这使得无线网络环境下的资源分配问题变得更加复杂和艰难。本文基于无线环境中底层链路的不可靠性特点，为解决无线网络虚拟化的资源分配问题，提出了一种虚拟网络分配算法，并通过仿真验证了该分配算法的实际性能。

2 问题描述与无线网络模型

网络虚拟化资源分配过程就是根据到达的 $VnRequest$ ，在物理网络中找到合适服务资源的过程。资源分配过程主要分为节点分配和链路分配 2 个密切相关的过程。物理网络和虚拟网络请求都可以用无向带权图来表示，本文使用下面的模型来描述整个虚拟网络资源分配过程。

2.1 无线物理网络模型

本文采用一个带权值无向图 $G^S(t)=(N^S, L^S, Relia(t))$ 表示底层的物理网络，考虑一个时隙的系统。其中， N^S 表示底层物理节点的集合， L^S 表示底层链路的集合， $Relia(t)$ 表示底层链路的可靠性的集合。对每个物理节点 $n^S \in N^S$ 而言，它配有多个无线接口同时包含 $cpu(n^S)$ 和 $location(n^S)$ 2 个属性。 $cpu(n^S)$ 表示节点的计算能力， $location(n^S)$ 表示节点的位置信息。对每条物理链路 $l^S(i,j) \in L^S$ 而言，它包含

$bandwidth(l^S)$ 和 $relia(l^S)$ 2 个属性。 $bandwidth(l^S)$ 表示物理节点 i 到物理节点 j 间链路所能承受带宽容量的最大值, $relia(l^S)$ 表示物理节点 i 到物理节点 j 间链路的承载可靠性, 通过周期性的探针分组获取的分组丢失率来衡量, 分组丢失率越小可靠性越高。

2.2 无线虚拟网络请求模型

每一个 $VnRequest$ 都是动态地到达、停留然后在完成服务的时候离开, 定义一个带权重的无向图 $G^V=(N^V, L^V)$, 作为无线虚拟网络请求。 N^V 表示虚拟网络请求节点的集合, L^V 表示虚拟网络请求的链路集合。每个虚拟节点 $n^V \in N^V$, 它包含 $cpu(n^V)$ 属性, 表示需要的计算能力。每条虚拟链路 $l^V \in L^V$, 它包含 $bandwidth(l^V)$, 表示该虚拟链路所需的带宽容量。

2.3 节点平均利用率和链路平均利用率

1) 节点平均利用率

每个物理节点 $\forall n^S \in N^S$, 节点负载表示映射到物理节点的虚拟网络所占用的物理节点资源总和, 用式 (1) 表示, 其中, $n^V \rightarrow n^S$ 表示虚拟节点 n^V 映射到物理节点 n^S 。在 t 时刻, 整个物理网络中节点的平均利用率定义为式 (2), 式 (2) 表示所有物理节点负载之和与物理节点总资源之和的比值, 且 $0 \leq AverageRate^N(t) \leq 1$ 。

$$Burden^N(n^S) = \sum_{\forall n^V \in N^V \rightarrow n^S} cpu(n^V) \quad (1)$$

$$AverageRate^N(t) = \frac{\sum_{\forall n^S \in N^S} Burden^N(n^S)}{\sum_{\forall n^S \in N^S} cpu(n^S)} \quad (2)$$

2) 链路平均利用率

每条物理链路 $\forall l^S \in L^S$, 链路负载表示映射到物理链路的虚拟网络占用带宽资源的总和, 映射到物理链路是指虚拟链路映射的物理路径中包含该物理链路, 用式 (3) 表示, 其中, $l^V \rightarrow l^S$ 表示虚拟链路 l^V 映射到物理链路 l^S 。在 t 时刻整个物理网络的链路平均利用率表示在 t 时刻所有链路的负载总和与所有链路带宽总和的比值, 用式 (4) 表示, 且 $0 \leq AverageRate^L(t) \leq 1$ 。

$$Burden^L(l^S) = \sum_{\forall l^V \in L^V \rightarrow l^S} bandwidth(l^V) \quad (3)$$

$$AverageRate^L(t) = \frac{\sum_{\forall l^S \in L^S} Burden^L(l^S)}{\sum_{\forall l^S \in L^S} bandwidth(l^S)} \quad (4)$$

2.4 可靠性和网络能力因子

无线底层物理网络中的链路可靠性的高低影响链路的服务质量, 同时不同的物理链路具有不同的可靠性。

1) 平均可靠性

每个物理节点配备多个不同的虚拟接口和具有不同半径的信号传输范围。任意 2 个物理节点之间的链路构建均建立在节点相互之间有共同的信号覆盖域的基础上, 每条链路具有不同的可靠性。平均可靠性指针对于与节点直接相连的 m 条物理链路可靠性的平均值, 用式(5)表示。其中, $l^S \oplus n^S$ 表示物理链路 l^S 与物理节点 n^S 直接相连。

$$Averagerelia(n^S) = \frac{\sum_{\forall l^S \in L^S \oplus n^S} relia(l^S)}{m} \quad (5)$$

2) 最小和最大物理链路可靠性

任意一条路径 $p^S \in P^S$ 都包含可靠性最小和最大的物理链路。分别用式(6)和式(7)表示。

$$relia_{\min}(p^S) = \min\{relia(l^S), l^S \in p^S\} \quad (6)$$

$$relia_{\max}(p^S) = \max\{relia(l^S), l^S \in p^S\} \quad (7)$$

3) 路径可靠性最大偏差度

任意一条路径 $p^S \in P^S$ 由一条或多条的物理链路组成, 路径可靠性偏差度定义为该路径上可靠性最大的物理链路和最小的物理链路的差值。用式(8)表示。

$$reliamd(p^S) = relia_{\max}(p^S) - relia_{\min}(p^S) \quad (8)$$

4) 路径可靠性

任意一条路径 $p^S \in P^S$ 由一条或多条的物理链路组成, 每条物理链路相当于以串行的方式构建一条物理路径。路径可靠性定义为该路径上每条链路可靠性的相互乘积。用式(9)表示。

$$relia(p^S) = \prod_{l^S \in p^S} relia(l^S) \quad (9)$$

5) 节点资源能力

节点资源能力指物理节点自身剩余的计算能力, 是节点自身能力的因子。用式(10)表示。

$$Capacity_{cpu}(n^S) = A_N(n^S) = cpu(n^S) - \sum_{\forall n^V \in N^V \rightarrow n^S} cpu(n^V) \quad (10)$$

6) 链路可用带宽和路径可用带宽

每条物理链路可用带宽资源是指物理链路还能够承担的虚拟链路带宽资源的总和, 即物理链路

剩余的带宽资源，定义为式(11)。每条物理路径的可用带宽，表示为该路径中所有链路带宽的最小值，用式(12)表示。

$$A_L(l^S) = \text{bandwidth}(l^S) - \sum_{\forall l^V \rightarrow l^S} \text{bandwidth}(l^V) \quad (11)$$

$$A_p(p^S) = \min_{l^S \in p^S} A_L(l^S) \quad (12)$$

7) 节点通信能力

由于虚拟节点被映射到某一节点时，物理节点可能会与任何的物理节点相连，所以节点通信能力是指与节点直接相连的物理链路的可用带宽的总和，反应了节点的通信能力，用式(13)表示。

$$\text{Capacity}_{\text{Com}}(n^S) = \sum_{\forall l^S \in L^S \oplus n^S} A_L(l^S) \quad (13)$$

2.5 目标节点选择和目标路径选择

1) 目标节点选择

无线底层物理网络中的节点具有不同的节点资源能力和节点通信能力。虚拟节点宿主的选择要综合进行考虑。目标宿主（承载）节点的选择定义如式(14)和式(15)。 $\text{Averagerelia}(n^S)$ 值越大的节点拥有更多的机会被选作虚拟节点的承载节点。式(15)引入参数 Q 作为 n^S 的相关因子，值的大小定义为 $[1, \infty)$ 。系数 η 是同一个 $VnRequest$ 的已分配节点与 n^S 连接的节点的个数。

$$\text{Taget1}(n^S) = A_N(n^S) \cdot \text{Averagerelia}(n^S) \cdot \text{Capacity}_{\text{Com}}(n^S) \quad (14)$$

$$\text{Taget2}(n^S) = Q^\eta \cdot \text{Taget1}(n^S) \quad (15)$$

2) 目标路径选择

虚拟链路分配阶段是按照虚拟网络的拓扑特征为已经映射完的节点构造物理路径。选择的物理路径必须是路径最短同时可靠性最优。通过 k -最短路径算法选择最短的物理路径。对于同一 k 值下的一条或多条最短路径采用链路可靠性的决策定义来选择，在路径最短的前提下，选择相对可靠性高的物理路径作为虚拟链路的承载链路。相对可靠性高的物理路径用 F 值的大小来定义，用式(16)表示。

$$F = \frac{\text{relia}(p^S)}{\text{reliamd}(p^S) + 1} \quad (16)$$

2.6 虚拟网络分配问题

当一个 $VnRequest$ 到达时，物理网络必须决定

是否接受该 $VnRequest$ 。如果接受，则物理网络必须从自身的节点和链路中为 $VnRequest$ 选择一系列满足要求的节点和路径。当 Vn 停留然后在完成服务离开时，它所占有的所有资源将被释放。对每一个 $VnRequest$ 的虚拟网络分配，定义一个从 G^V 到 G^S 子集的映射 Map ，同时满足 G^V 的约束，即 $Map: G^V \rightarrow (N^*, P^*)$ 。其中， $N^* \subset N^S$ ， $P^* \subset P^S$ 。

1) 节点映射: $Map^N: N^V \rightarrow N^*$ 。

For $\forall n^V \in N^V$ $Map^N: n^V \rightarrow n^S$

节点映射过程存在一定的约束条件，即 $VnRequest$ 的虚拟节点的计算能力不能大于底层物理网络节点的计算能力。用不等式(17)表示。

$$\text{cpu}(n^V) \leq A_N(\text{Map}^N(n^V)) \quad (17)$$

2) 链路映射: $Map^L: L^V \rightarrow P^*$ 。

For $\forall l^V \in L^V$ $Map^L: l^V \rightarrow p^S$

链路映射过程存在一定的约束条件。首先， $VnRequest$ 的虚拟链路的带宽不能大于路径的可用带宽，用不等式(18)表示。其次虚拟链路映射选择的目标物理路径的 F 值在 $(0.8, 1]$ 时，物理网络将成功映射该虚拟链路。

$$\text{bandwidth}(l^V) \leq A_p(\text{Map}^L(l^V)) \quad (18)$$

3) 收益函数

当一个 $VnRequest$ 到达时，对于 VNP 而言，其希望能够有效并可靠地处理该请求的同时又能尽量减少来自底层物理资源的租赁成本；而对于 InP 而言，资源的高效利用依赖于可靠优化的分配。因此 InP 若想得到更多的收益(Revenue)，则其需要被部署尽可能多的虚拟网络。本文假设 InP 接受一个 $VnRequest$ 所得到的收益用式(19)表示。

$$\text{Revenue}(G^V) = \alpha \sum_{l^V \in L^V} \text{bandwidth}(l^V) + \beta \sum_{n^V \in N^V} \text{cpu}(n^V) \quad (19)$$

其中， α 和 β 是加权系数，目的是平衡带宽资源和计算资源的影响。当研究实际应用时，加权系数可以用来表示收益的单元价格。

4) 成本函数

InP 每部署一个 Vn 都需要分配相应承载的底层物理网络资源，因此本文将部署 Vn 的成本定义为物理网络每接受一个 $VnRequest$ 并在其上运行所需的代价。这是根据用于构造虚拟网络节点的计算能力和链路的带宽以及不同物理链路的代价而定义的。具体定义用式(20)表示。

$$Cost(Map(G^V)) = \alpha_c \sum_{l^V \in L^V} [Hop(l^V) bandwidth(l^V) + \sum_{l^S \in Map^L(l^V)} \lambda(l^S)] + \beta_c \sum_{n^V \in N^V} [cpu(n^V) + \sum_{n^S \in Map^N(n^V)} \lambda(n^S)] \quad (20)$$

由于无线底层物理网络的节点资源和链路资源具有非均匀性，同时物理链路具有的可靠性也不一致，所以不同链路的能量消耗成本也不一样。假设无线底层物理网络中的每一条链路传输能量消耗成本为 $Power(l^S)$ ，每一个节点因计算能力而消耗的成本为 $Power(n^S)$ 。因此则有： $\lambda(l^S) = \frac{Power(l^S)}{relia(l^S)}$ ； $\lambda(n^S) = Power(n^S)$ 。在虚拟网络映射的过程中，本文考虑并采用同一个虚拟网络的不同虚拟节点可以映射到同一个物理节点上，此时构建链路的带宽成本和链路的能量消耗成本几乎为 0。 $Hop(l^V)$ 表示虚拟链路分配到底层物理网络中的物理路径具有的跳数。 α_c 和 β_c 是为了平衡节点资源和链路资源的加权系数。当研究实际应用时，加权系数具有价格成本意义。

5) 收益成本比 (R/C)

收益成本比是评判资源分配算法的重要性能指标之一。该指标的大小表示网络资源的分配有效性。值得注意的是，由于不同的无线底层物理网络链路对应的可靠性不同且存在实时变化，使得成本也随之发生变化。因此一个完全确定的收益成本比是难以计算得出的，同时为了简化计算的复杂度，将 $Power(l^S)$ 和 $Power(n^S)$ 不考虑在内。简化用式(21)表示。

$$\begin{aligned} \frac{R}{C} &= \frac{Revenue(G^V)}{Cost(Map(G^V))} \\ &= \frac{\alpha \sum_{l^V \in L^V} bandwidth(l^V) + \beta \sum_{n^V \in N^V} cpu(n^V)}{\alpha_c \sum_{l^V \in L^V} Hop(l^V) bandwidth(l^V) + \beta_c \sum_{n^V \in N^V} cpu(n^V)} \end{aligned} \quad (21)$$

在式(21)中，假设 $\alpha=\beta=\alpha_c=\beta_c=1$ ，即 R/C 取值范围在(0,1]之间，当近似收益成本比越大时，相应的分配方案越接近最优。

3 基于链路可靠性的无线虚拟网络分配算法(WVNEA-LR)

链路可靠性是虚拟网络分配在无线网络环境与有线网络环境之间所存在的显著不同点之一。传

统的虚拟网络分配均建立在底层物理链路具有完全可靠性的有线链路连接前提下。相比无线链路而言，传统的有线网络有着稳定的且具有一定带宽的通信链路，其分组丢失率较低，链路干扰因子较小，能保证较高的网络吞吐量。然而在无线网络环境中，无线链路有着明显不同于有线链路的特征，例如不同链路具有不同的分组丢失率和数据传输速率等；无线链路更容易受到自身因素和外界因素的干扰，使得不同链路的分组丢失率和传输速率处于不稳定的变化状态之中，甚至有可能造成链路的中断；同时较之于可靠性低的物理链路，可靠性高的物理链路所受的干扰性小、稳定性强。传统的有线网络环境下的虚拟网络分配算法不适用于无线网络环境中。

传统有线网络环境的基本虚拟网络分配算法 BVNEA (basic virtual network embedding algorithm) 由 2 个阶段组成：贪婪节点映射阶段和 K 最短路径的链路映射阶段。BVNEA 没有考虑链路可靠性的特点，当应用于无线网络环境下时，其虚拟网络分配的性能会降低。

本文提出了更好地适应无线网络环境下的无线虚拟网络分配算法 WVNEA-LR (wireless virtual network embedding algorithm based on link reliability)。该算法考虑了无线链路不可靠性的特点，针对节点分配和链路分配 2 个阶段解决无线虚拟网络分配问题。WVNEA-LR 通过物理拓扑预处理降低 Vn 构建的失败率、减少节点分配和链路分配的时间。节点分配阶段，WVNEA-LR 允许同一个 Vn 的多个虚拟节点可以映射到同一物理节点上，提高了节点利用率、降低了链路开销和提高 Vn 构建成功率。此外 WVNEA-LR 综合节点可用资源、通信能力和链路平均可靠性为接下来的链路分配做准备，利用 Q 因子使得虚拟节点分配在底层物理网络中相对集中的区域，从而大大地改善因拓扑分配稀疏时 Vn 构建率低的问题。最后在链路分配过程中，结合最短路径算法和选择可靠性高的物理路径来承载虚拟链路，保证分配后的 Vn 具有高的可靠性。

WVNEA-LR 算法分为 8 个步骤。

1) 当一个 $VnRequest$ 到达，底层物理节点和链路进行一次预处理过程。根据可靠性 $Relia(l^S) \in (0.8, 1]$ 的链路生成候选节点列表 $CandidatePhysicalNodeList$ 和候选链路列表 $CandidatePhysicalLinkList$ ，同时生

成每个物理节点与该节点直接相连链路列表 $NodetoNeighborLinkList$ 。保证分配的虚拟网络具有较高的可靠性链路，减少链路搜索和分配的时间。

2) 底层物理网络检查是否有满足 $VnRequest$ 节点资源和链路资源。如果有，则接受 $VnRequest$ ，进入 3)。如果没有，则将 $VnRequest$ 放到虚拟请求队列 ($VnList$) 末尾，等待其他已分配虚拟网络释放资源。

3) 首先，为 $VnRequest$ 生成一个虚拟节点列表 $VnNodeList$ 、虚拟链路列表 $VnLinkList$ 、已映射节点列表 $MappedNodeList$ 和路径分配列表 $MapPathList$ 。根据 $VnNodeList$ 的节点计算能力 (cpu) 的大小降序排列。寻找 $CandidatePhysicalNodeList$ 的可用资源大于最小虚拟节点需求的物理节点，形成降序可用的物理节点列表 $AvailablePhysicalNodeList$ ，同时根据式(14)降序排列。

4) 遍历 $VnRequest$ ，设置循环变量 $i=0$ ，判断 i 是否大于虚拟节点的个数。如果是，则进入 6)；如果不是，则进入 5)。

5) 遍历 $AvailablePhysicalNodeList$ 重新生成每个节点的 $NodetoNeighborLinkList$ ，计算每个节点的 $NodetoNeighborLinkList$ 与已经映射的节点列表 $MappedNodeList$ 的交集个数，保存在 $AvailablePhysicalNodeList$ 相应节点的交集个数 n 属性中。根据式(15)对 $AvailablePhysicalNodeList$ 重新排序。设置虚拟化变量 $j < AvailablePhysicalNodeList$ 的节点数目，初始化为 0。映射 $VnNodeList$ 中第 i 个节点到 $AvailablePhysicalNodeList$ 中的第 j 个，同时判断其节点的剩余资源是否大于虚拟节点的资源。如果是，则映射完跳出循环同时 $i=i+1$ ，返回 4)；如果不是，则 $j=j+1$ 。

6) 遍历 $VnLinkList$ ，设置循环变量 $k=0$ 。判断 k 是否大于 $VnLinkList$ 中的链路条数。如果是，进入 7)；如果不是，则映射结束。

7) 根据 K-最短路径算法将每个虚拟链路所映射的源、目的节点之间最短路径保存到 $ShortestPathList$ ，并根据式(16)计算路径的 F 值。根据 F 值大小降序保存到 $MapPathList$ 。

8) 判断 $MapPathList$ 中路径中 F 最大值是否在 $(0.8, 1)$ 内，如果是，则映射该路径到物理网络上，同时 $k=k+1$ ，跳入 6)。如果不是，则映射结束并将

该 $VnRequest$ 放入等待队列。

4 模拟仿真结果

利用云计算仿真平台 CloudSim2.0^[13]作为仿真工具，对基本分配算法 BVNEA、链路分配限制在 4 跳之内的 WVNEA-LR (3 hops confined) 以及不限跳分配的 WVNEA-LR(hops-free)进行了仿真。从 $VnRequest$ 接受率、收益成本比 (R/C)、资源利用率方面讨论本文提出算法的性能。

4.1 仿真环境

用拓扑产生器 BRITE 产生包含 100 个节点的拓扑，用来模拟无线物理网络。每对物理节点间都以 50% 的概率随机生成物理链路，物理链路的总数为 400 条；每条物理链路的分组丢失率都各不相同，且均是实时变化；每个物理节点的计算能力是随机生成的，其取值范围在 10~80 单位；每条物理链路的带宽也是随机生成的，其取值范围为 10~70 单位。本文假设虚拟网络请求的到达率为 4 个/秒，每个虚拟网络请求的生命周期是 10s。每个虚拟网络请求是随机生成的，其虚拟节点数目在 3~10 个之间，每对节点间的连接概率同样为 50%。每个虚拟节点的需求能力也是随机生成的，其范围为 1~30 单位，每条虚拟链路的带宽需求也是随机的，其范围为 1~20 单位。

4.2 仿真结果

仿真实验以虚拟网络构建成功率（接收率）、 R/C 、节点平均利用率和链路平均利用率作为性能指标。首先仿真了本文提出的算法 WVNEA-LR 在虚拟网络请求节点数 $NUM=3、6、10$ 的情况下参数 Q 对收益成本比的影响。如图 1 所示。

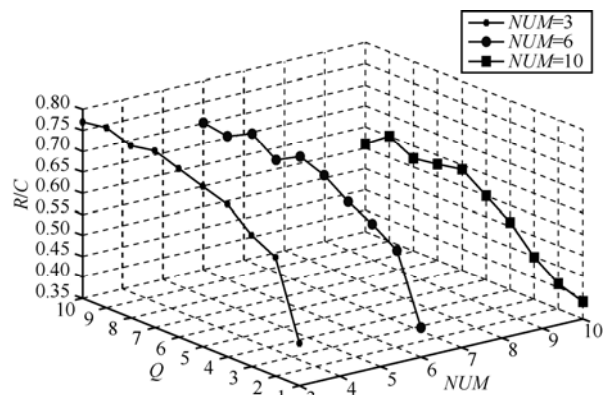


图 1 参数 Q 对收益成本比的影响

图 1 中，随着 m 值的增加， R/C 明显的减少。

收益成本比随着 Q 从 1~7 逐渐增加, 在 $Q \geq 7$ 之后 R/C 呈现稳定状态。同时 $VnRequest$ 的虚拟节点数目越多, 成本收益比呈减少的趋势。本文选择 $Q=7$ 作为接下来仿真的前提。

仿真实验对 BVNEA 和 WVNEA-LR 在一段时间内的构建成功率 (虚拟网络请求接受率) 进行了对比。WVNEA-LR 采用不限跳数虚拟链路分配算法和限制 4 跳以内的虚拟链路分配算法。从图 2 可以看出。仿真期间随着时间的推移, WVNEA-LR(hops-free) 的构建虚拟网络成功率明显高于其他 2 种算法, 而 WVNEA-LR (hops-free) 高于基本分配算法 BVNEA。原因在于, 虚拟网络构建的成功率受底层的物理网络链路不可靠性的影响, 基于同样的分配情况下, 考虑底层链路可靠性的算法能减少构建虚拟网络的失败率。限制构建虚拟链路的跳数会减少成功构建虚拟网络的机会。

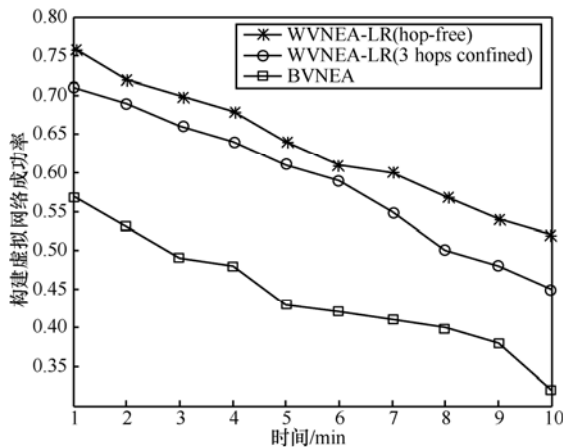


图 2 虚拟网络构建成功率

图 3 对 3 种算法进行了成本收益比的比较。WVNEA-LR(hops-free) 和 WVNEA-LR (3 hops confined) 的成本收益比相差不大, 这是因为这 2 种算法在构建虚拟网络的时候考虑了底层物理网络链路的可靠性, 同时都引入 Q 因子保证了分配节点与节点之间是紧密的, 使得链路分配的物理路径所经过的跳数比较少, 降低了承载虚拟链路的成本。如图 3 所示 BVNEA 的成本收益比低于 WVNEA-LR。

从图 4 中可知, 相比于基本的分配算法 BVNEA, WVNEA-LR (hops-free) 算法和 WVNEA-LR (3 hops confined) 算法拥有较高的节点利用率。WVNEA-LR 允许同一个 $VnRequest$ 的多个虚拟节点同时映射到同一物理节点上, 这必然导致节点 Vn

构建成功率增加, 从而提高了节点的利用率。然而在某种程度上, 也降低了链路的利用率和节约了链路资源, 因此使得没有利用节点重映射的基本分配算法 BVNEA 的链路利用率在几个时间点更接近 WVNEA-LR 算法。如图 5 所示。

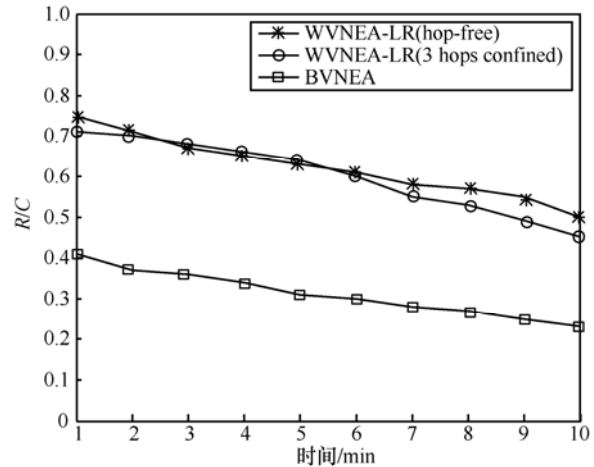


图 3 收益成本比

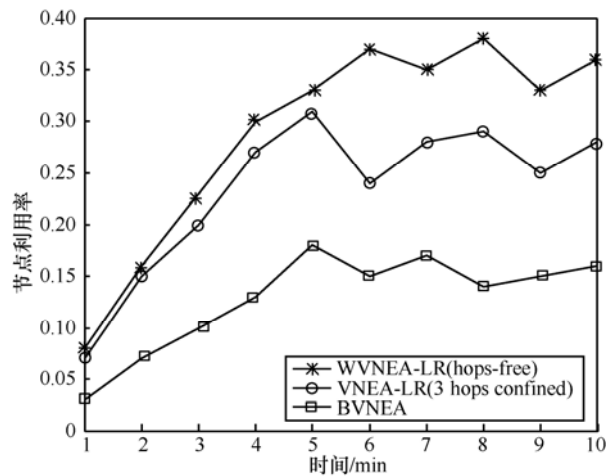


图 4 节点平均利用率

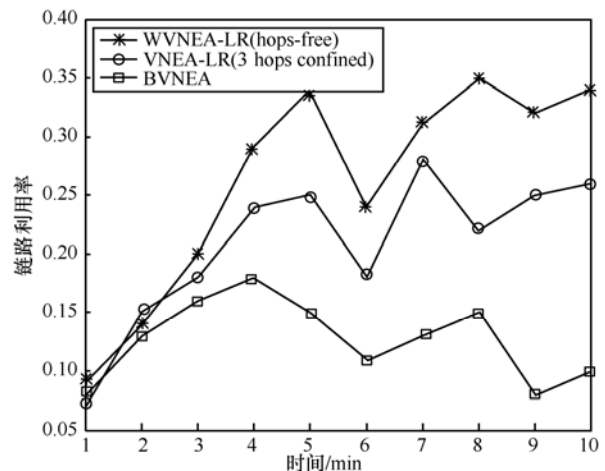


图 5 链路平均利用率

5 结束语

本文将网络虚拟化引入到无线网络环境下，针对无线链路分组丢失率的特点（链路不可靠性）和网络虚拟化中按需有效分配物理资源的目标，提出了基于链路可靠性的无线虚拟网络分配算法 WVNEA-LR，该算法通过物理网络拓扑预处理提高 V_n 构建成功率。同时 WVNEA-LR 允许同一个 V_n 的多个虚拟节点可以映射到同一物理节点，提高了节点利用率、降低了链路开销和提高了 V_n 构建成功率。此外，WVNEA-LR 综合节点可用资源、通信能力和链路平均可靠性为接下来的链路分配做准备，通过选择可靠性高的承载路径保证分配后的 V_n 具有高的可靠性。利用 Q 因子使得虚拟节点分配在无线底层物理网络中相对集中的区域，从而大大地改善因拓扑分配稀疏时 V_n 构建率低的问题。仿真实验表明：WVNEA-LR 算法在考虑底层网络链路可靠性的前提下能较好地提高虚拟网络构建的成功率、增加收益成本比 R/C 和资源利用率。

参考文献：

- [1] Planetlab: an open platform for developing, deploying, and accessing planetary-scale services[EB/OL]. <http://www.planet-lab.org/>, 2011.
- [2] VINI: a virtual network infrastructure[EB/OL]. <http://www.vini-veritas.net/>, 2010.
- [3] FAN J, AMMAR M. Dynamic topology configuration in service overlay networks- a study of reconfiguration policies[A]. INFOCOM: 25th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Spain, 2006.641-652.
- [4] JING L, JONATHAN T. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate[A]. IEEE INFOCOM Proceedings[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009.783-791.
- [5] ZHU Y, AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[A]. INFOCOM: 25th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Spain, 2006. 2812-2823.
- [6] SZETO W, IRAQI Y, BOUTABA R. A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation[A]. IEEE Global Telecommunications Conference United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers[C]. San Francisco, CA, USA, 2003. 3004-3008.
- [7] 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.

- [8] AHN S W, CHUCK Y. Network interface virtualization in wireless communication for multi-streaming service[A]. 15th IEEE International Symposium on Consumer Electronics Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers[C]. Singapore, 2011. 67-70.
- [9] SMITH G, CHATURVEDI A, MISHRA A, *et al.* Wireless virtualization on commodity 802.11 hardware[A]. 2nd ACM International Workshop. Canada: Association for Computing Machinery[C]. Montreal, DC, Canada, 2007. 75-82.
- [10] SHRESTHA S, LEE J, CHONG. Virtualization S and slicing of wireless mesh network[A]. Conference on Future Internet (CFI)[C]. Seoul, Korea, 2008.1-4.
- [11] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG H, *et al.* NVS: a virtualization substrate for WiMAX networks[A]. 16th Annual Conference on Mobile Computing and Networking United States: Association for Computing Machinery[C]. Chicago, IL, USA, 2010. 233-244.
- [12] YUN D, YI Y. Virtual network embedding in wireless multihop networks[A]. 6th International Conference on Future Internet Technologies Korea: Association for Computing Machinery[C]. Seoul, Korea, 2011. 30-33.
- [13] A framework for modeling and simulation of cloud computing infrastructures and services[EB/OL]. <http://www.cloudbus.org/cloudsim>, 2011.

作者简介：



罗娟(1974-),女,湖南株洲人,博士,湖南大学副教授,主要研究方向为无线传感网络、云计算和无线嵌入式系统等。



刘川川(1986-),男,湖南郴州人,湖南大学硕士生,主要研究方向为云计算和网络虚拟化。



李仁发(1957-),男,湖南郴州人,博士,湖南大学教授、博士生导师,主要研究方向为嵌入式计算、无线网络和网络与数字媒体等。