

车辆异构网络中预测垂直切换算法

马彬^{*①②} 谢显中^② 廖晓峰^①

^①(重庆大学计算机学院 重庆 400044)

^②(重庆邮电大学重庆市计算机网络与通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 在车辆异构网络中, 针对垂直切换决策时刻之后网络状态的动态变化, 提高切换性能问题, 提出一种基于马尔可夫过程的预测垂直切换(M-VHO)算法。算法考虑了切换决策后网络状态的动态变化对车辆终端服务质量(QoS)的影响。其基本思路是: 在需要垂直切换时, 利用马尔可夫过程的转移概率预测未来网络状态的变化; 另外, 采用模糊逻辑方法确定评价属性参数权重; 最后, 比较切换决策、切换执行和切换之后时刻的总收益来优化选择最佳切换网络。仿真结果证明, 该算法在确保较高负载均衡的情况下, 可有效改进车辆终端的平均阻塞率及丢包率, 降低乒乓效应, 确保了车辆终端的QoS。

关键词: 无线网络; 车辆异构网络; 垂直切换; 马尔可夫过程; 模糊逻辑

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)04-0874-07

DOI: 10.11999/JEIT140845

Prediction Vertical Handoff Algorithm in Vehicle Heterogeneous Network

Ma Bin^{①②} Xie Xian-zhong^② Liao Xiao-feng^①

^①(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology of China, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A prediction Vertical HandOff (M-VHO) algorithm is proposed by using a Markov process in vehicle heterogeneous network, to improve handoff performance when network status dynamic transformation after the handoff decision. It takes into account influence of network status dynamic transformation on vehicle terminal's Quality of Service (QoS) after the handoff decision. Its basic idea is in that a future wireless network's status transformation is predicted by transition probability of Markov process if vertical handoff is required; otherwise, the weight of evaluating attribute parameters be determined by fuzzy logic method; finally, the total incomes of each wireless network are compare, including handoff decision incomes, handoff execution incomes and communication service incomes after handoff execution, and the optimal network is selected. The simulation results show that when the high load balanced situation is ensured the algorithm effectively improves the average blocking rate and packet loss rate of vehicle terminal, reduces the ping-pong effect, and insure the QoS of vehicle terminal.

Key words: Wireless network; Vehicle heterogeneous network; Vertical handoff; Markov process; Fuzzy logic

1 引言

未来车辆通信系统的重要特征就是多种无线网络并存, 相互补充, 为终端用户提供透明的、普适的最佳服务体验。不同的无线网络在速率、业务类型、覆盖范围、用户体验等方面存在很大差异, 如何在异构网络间选择最佳的网络接入以满足终端用户的服务质量(Quality of Service, QoS), 成为学界

和产业界关注的重点^[1]。

现有的异构无线网络垂直切换算法均以当前相关网络属性为决策指标, 将垂直切换决策过程抽象为多属性决策问题。当前垂直切换算法主要分为3大类: (1)阈值判定算法^[2,3]: 移动节点接收到来自各网络访问点或基站的接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)为参考对象, 当RSS满足某种条件时做出切换决策。(2)基于模糊逻辑^[4,5]或神经网络^[6]的多属性智能切换算法: 移动节点结合网络性能、用户特性和业务类型做出垂直切换综合决策。(3)基于多属性的效用函数切换决策算法, 用户根据接入网络、业务及用户等做出垂直切换决策; 用户

2014-06-25 收到, 2014-09-28 改回

国家自然科学基金(61271259, 61301123, 61471076); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130536)和重庆市计算机网络与通信技术重点实验室基金(CY-CNCL-2010-02)资助课题

*通信作者: 马彬 mab_cqupt@sina.com

根据各网络的 RSS、网络带宽、用户业务类型等性能参数来构造效用函数, 计算最优的效用函数值来确定垂直切换的最佳网络^[7]。

以上算法都未考虑切换决策后, 切换执行和切换后各候选网络状态的变化, 不能有效地保证车辆终端接入网络后的 QoS 水平。根据车辆异构网络的道路动态变化特点和终端追求较高 QoS 等需求, 基于多属性的效用函数切换算法是一个理想的选择, 也是垂直切换的主要研究方向之一, 这也是本文采用最优效用函数来研究垂直切换的出发点。

当前, 马尔可夫过程在无线网络中主要应用于决策过程和性能分析。文献[8]提出异构无线网络环境下基于马尔可夫决策过程的垂直切换决策算法, 通过系统带宽和连接延时的联合优化来选择最优网络。文献[9]研究基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制, 推导出系统状态转移概率, 进而选取接纳效用最大的最佳控制策略, 能保证多样化业务的接入和切换成功率。文献[10]将马尔可夫应用于性能分析, 通过垂直切换率来反映终端用户的移动性, 用马尔可夫过程分析了异构网络的系统性能, 进而给出了异构网络系统的总吞吐量闭环表达式。文献[11]基于马尔可夫提出两个算法: 基于接收信号强度的单属性垂直切换算法和基于多属性的效用垂直切换算法。本文采用马尔可夫过程来构建垂直切换决策、执行和执行之后 3 个时刻的网络状态变化的效用函数, 重点研究构建过程中涉及到的两个关键问题: 预测切换决策时刻之后的网络状态方法和效用函数中权重值的确定问题。

针对车辆异构网络中垂直切换算法都未考虑切换决策时刻之后网络状态的动态变化, 本文提出了一种基于马尔可夫过程的车辆异构网络预测垂直切换(Markov based Vertical HandOff, M-VHO)算法。算法考虑了切换决策后网络状态的动态变化可能对车辆终端 QoS 的影响, 首先, 利用马尔可夫过程计算切换决策时刻网络状态的转移概率来预测未来网络状态的变化; 其次, 采用模糊逻辑确定评价指标权重; 最后, 比较切换决策、切换执行和切换之后时刻的总收益来优化选择最佳切换网络。本文的主要贡献可概括为:

(1) 采用马尔可夫过程来预测切换决策后无线网络状态的变化。在车辆终端切换入新网络和接入网络后的服务时间内, 由于车辆的移动性, 无线网络的状态属性处于不断变化中。因而把网络状态抽象成一个离散马尔可夫过程, 利用状态转移概率来预测切换决策后的网络状态。

(2) 基于效用函数的垂直切换算法中, 最优效用

函数的设计显得尤为重要。本文利用马尔可夫过程和模糊逻辑方法, 结合切换决策、切换执行以及切换后网络状态的变化概率, 设计了一个多状态属性的最佳垂直切换效用函数。

2 系统模型

在车辆异构无线网络中, 车辆终端用户对候选网络的使用由中心控制器(Central-controller Node, CN)协调和管理, CN 首先收集各个异构无线网络的参数信息, 进而构建候选无线网络的数据集, 通过多个车辆终端用户之间相互交换接入信息和协作垂直切换, 最终实现垂直切换过程的全局最优。

图 1 给出了基于车辆终端和中心控制器协作机制, 采用 WiMAX 和 TD-LTE 共同组成的车辆异构无线网络模型, 该模型将车辆异构无线网络中的车辆终端用户依据其不同的个性化业务和服务质量需求, 以协作方式从中心控制器和其他车辆终端获取候选网络属性参数信息, 车辆终端通过构建最佳效用函数的方式来进行优化垂直切换。

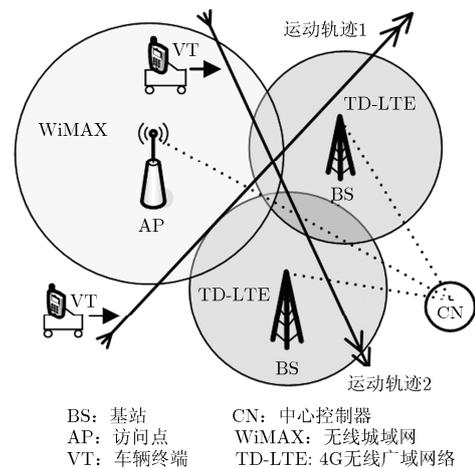


图 1 车辆异构无线网络模型图

系统模型采用动态 2 维资源分配模型。为了使算法更具通用性, 不同的接入网络的物理层, 均使用多用户正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术。在多用户车辆异构网络系统中, 把 2 维单元看作资源分配的基本单位。车辆终端在车辆异构网络中移动, 假设移动方向和速度已知的情况下, 信噪比在垂直切换决策、切换执行和切换之后时刻的变化是确定的, 因此无线网络状态转移概率可以直接抽象为可用 2 维单元数的转移概率来表示。若某一无线网络的新进入车辆终端到达率服从参数为 λ 的泊松分布, 即单位时间到达 k 个新用户的概率为: $P_a(x=k)=(\lambda^k / k!)e^{-\lambda}$ 。

车辆终端接入网络服务时间服从参数为 μ 的负指数分布, 单位时间服务的平均用户数为 μ , 即离去率服从参数为 $c\mu$ 的泊松分布, 其概率为: $P_b(x=k) = (\mu^k / k!)e^{-c\mu}$, 其中, c 为无线网络中正在接受服务的用户数。假设 i, j, l 分别为垂直切换决策时刻、切换执行时刻和切换之后可用 2 维单元数, 则无线网络的状态转移概率为

$$\left. \begin{aligned} P(j, i) &= \sum_{n=i-j}^i P_a(x=n+j-i)P_a(x=n), \quad j < i \\ P(j, i) &= \sum_{n=0}^i P_a(x=n+j-i)P_a(x=n), \quad j \geq i \\ P(l, j) &= \sum_{n=j-l}^j P_b(x=n+l-j)P_a(x=n), \quad l < j \\ P(l, j) &= \sum_{n=0}^j P_b(x=n+l-j)P_a(x=n), \quad l \geq j \end{aligned} \right\} (1)$$

3 预测垂直切换算法

在车辆终端接入网络后的服务时间内, 由于车辆的移动性和其它车辆的接入或切换, 网络状态属性不断变化。假如将服务时间离散为一个个采样时刻, 下一时刻的网络状态只与前一时刻的网络状态有关, 且网络状态变化与时刻无关。当已知车辆终端切换决策时刻的网络状态属性, 则切换执行及其后服务时间内每个采样时刻的网络状态是被抽象为离散的马尔可夫过程。利用状态转移概率可以预测出车辆终端服务时间内任意采样时刻的网络状态。为了更好地优化垂直切换的 QoS, 考虑了车辆终端切换决策时刻、切换执行时刻及切换之后时刻的网络状态变化。

3.1 马尔可夫过程

假设车辆异构网络中有 M 个候选网络、 N 个状态属性(通过对车辆异构网络中垂直切换过程的分析, 接收信号强度、网络带宽、时延、数据速率、服务费用和终端能耗是决定车载终端服务质量的 6 个重要参数, 因此本文选为网络的状态属性), V_n^m 为 m 网络的状态属性 n 的取值, 网络状态空间 \mathbf{C} 定义为: $\mathbf{C} = \{V_1^1 \times V_2^1 \times \dots \times V_N^1, V_1^2 \times V_2^2 \times \dots \times V_N^2, \dots, V_1^M \times V_2^M \times \dots \times V_N^M\}$, 把每个状态属性在其取值范围内离散化, 即: $V_n^m = \{1, 2, 3, \dots, v_n^m\}$ 。其中 v_n^m 是离散化后的最大值, $m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。设 T 为车辆终端的服务时间, X_n 为网络在 n 时刻的状态, 则 $\{X_n, n \in T\}$ 是时间和状态均离散的马尔可夫随机过程, 且对于任意的整数 $n \in T$ 和任意的 $X_n \in \mathbf{C}$ 满足: $P[X_{n+1} | X_0, X_1, \dots, X_n] = P[X_{n+1} | X_n]$ 。即当前时刻的网络状态, 决定着下一时刻的网络状态, 和前一时刻的网络状态无关, 上述随机过程

$\{X_n, n \in T\}$ 为马尔可夫过程。设某一网络有 c_1, c_2, \dots, c_l 总共 l 种状态, c_i 为网络选择时刻的网络状态, 则如图 2 为该网络状态变化的马尔可夫模型。

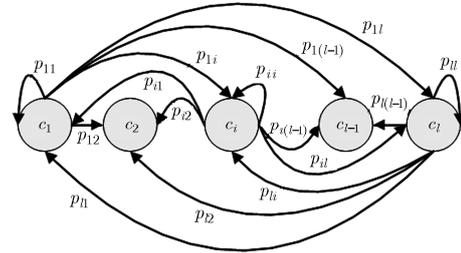


图2 马尔可夫模型

3.2 网络状态转移概率

已知垂直切换决策时刻的各异构网络状态, 用马尔可夫过程来预测下一时刻(垂直切换执行时刻)的网络状态:

$$p[c' | c, m] = p[v_1^{m'}, v_2^{m'}, \dots, v_N^{m'} | v_1^m, v_2^m, \dots, v_N^m] \quad (2)$$

假设各个网络状态属性之间都相互独立, 其中 $m = 1, 2, \dots, M$ 。状态转移概率与时刻无关, 为齐次马尔可夫过程。 $c \in V_1^m \times V_2^m \times \dots \times V_N^m$ 为当前时刻的网络状态, $c' \in V_1^m \times V_2^m \times \dots \times V_N^m$ 为垂直切换执行时刻的网络状态。设网络 m 有 l 种状态, 则该网络的状态转移矩阵为

$$\mathbf{P}^m = \begin{bmatrix} p_{11}^m & p_{12}^m & \dots & p_{1l}^m \\ p_{21}^m & p_{22}^m & \dots & p_{2l}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{l1}^m & p_{l2}^m & \dots & p_{ll}^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

同理, 可以通过垂直切换执行时刻的网络状态信息来预测切换执行后服务时间内的状态变化和状态转移矩阵。

3.3 模糊逻辑确定属性权重

本文选取了多个属性参数来构建效用函数进行联合优化, 因此对于每个属性权重的确定, 反映了各个属性参数在计算效用值, 进行综合决策过程中重要程度, 直接影响多属性决策的结果。异构网络中各个网络参数值之间没有直接可比性, 因此需要首先对属性参数进行归一化操作, 使不同网络参数具备可比性。同时, 属性参数值对于判决的重要程度而言, 带有典型的模糊不确定性, 如数据传输速率为 50 kb/s 和 51 kb/s 对判决的重要程度应该相近。因此, 本文采用模糊不确定性处理工具——模糊逻辑理论来确定属性权重^[12]。通过模糊逻辑推理器, 如果属性的输出值越大, 该属性对综合决策的作用越大, 权重就应该越高。

(1) 决策属性归一化 不同无线网络的各个属性的取值范围和单位均不相同, 因此, 为保证接入的公平性和有效性, 采用网络的归一化属性来做垂直切换决策。而无线网络的属性可以分成效益型和成本型, 其中效益型属性越大越好, 如常用的属性参数可用带宽、信噪比等均属这类; 成本型属性越小越好, 如常用的丢包率、能耗等均属这类。

效益型属性:

$$\text{cost}_n^m = \frac{v_n^m - \min(V_n^m)}{\max(V_n^m) - \min(V_n^m)} \quad (4)$$

成本型属性:

$$\text{cost}_n^m = \frac{\max(V_n^m) - v_n^m}{\max(V_n^m) - \min(V_n^m)} \quad (5)$$

(2) 模糊逻辑规则库构建 该文基于异构无线网络的特性, 根据模糊逻辑理论获得优化权值。因此, 依据三角模糊隶属函数, 把每个属性参数都定义有 3 个模糊逻辑等级{低、中、高}, 相应的每个等级赋予一个等级值{1, 2, 3}^[12], 进而构建一个模糊逻辑规则库。

(3) 计算属性参数的权值 将高的属性参数归一化后输入到模糊推理器, 模糊推理器根据逻辑规则库将输出对应级别的模糊逻辑量: 高, 归一化属性参数权值选择器根据得到的高模糊逻辑量级别选择相应的高等级值。模糊逻辑推理器的逻辑规则库的定义为: 输入参数|参数值 \rightarrow 输出逻辑量|等级值。因此, 属性参数 n 的权重为: $w_n = l_n / \sum_{n=1}^N l_n$, 其中, l_n 是模糊逻辑器输出的等级值。 $0 \leq w_n \leq 1$, $\sum_{n=1}^N w_n = 1$ 。

3.4 效用函数及垂直切换算法

前面详细介绍了切换算法中网络在不同状态下转移的概率(也即预测了切换执行和切换之后两个状态的转移概率)和每个参数权重的确定方法。所提垂直切换算法是一个多属性的决策函数, 构建效用函数成为该算法的核心工作, 本文采用加权求和的方法来构建。

定义 $\alpha(s, m)$ 为 m 网络在 s 状态下车辆终端所能得到的收益, 采用加权求和的方法计算:

$$\alpha(s, m) = \sum_{i=1}^N w_i \alpha_i(s, m) \quad (6)$$

$\alpha_1(s, m), \alpha_2(s, m), \dots, \alpha_N(s, m)$ 分别是 N 个网络状态属性带来的收益, $0 \leq w_1, w_2, \dots, w_N \leq 1$ 是它们相应的权重, 且满足 $w_1 + w_2 + \dots + w_N = 1$ 。定义垂直切换决策时刻、切换执行时刻及切换之后收益之和为无线网络总收益, 由式(2)和式(6)可得到 m 网络的总收益函数为

$$v_m(s) = \alpha(s, m) + \sum_{s' \in S} P[s'|s, m] \alpha(s, m) + \sum_{s'' \in S} P[s''|s', m] \left[\sum_{s' \in S} P[s'|s, m] \alpha(s, m) \right] \quad (7)$$

当用户有 m 个候选无线网络时, 总收益值越大, 不仅说明垂直切换决策时刻该网络性能最优, 也一定程度上说明在车辆终端切换入无线网络后, 该无线网络依旧能保证 QoS, 且很好地避免了乒乓效应。所以, 本算法在垂直切换决策时, 选择总收益值最大的无线网络作为切换网络, 即

$$m = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} (v_i) \quad (8)$$

式(7)为垂直切换效用函数值的计算表达式。从算法设计与实验过程来看, 所提算法的时间复杂度为 $O(M \times N)$ 。其中 M 为选取综合计算的状态时刻数, 本文选取了 3 个时刻网络状态来计算收益, 即其值为 3; N 为选取的属性参数个数, 本文为 6。因此算法的复杂度往往直接由 N 决定。在理想状态下, N 值越大, 算法考虑属性参数越多, 效用值体现终端 QoS 越好, 但时间复杂度也相应提高。同时, 本文算法的空间复杂度主要体现在两个方面, 预测概率计算需要的矩阵辅助空间和属性参数权重辅助空间。对于车载终端而言, 当属性参数选取适当(即在时间复杂度和属性参数个数折中的情形下), 空间复杂度处于一个可接受的范围。

4 实验结果及分析

4.1 参数设置

为了评估本文所提出的垂直切换算法性能, 采用 Matlab+NS2 仿真工具搭建了一个车辆异构无线网络系统实验平台, 实验仿真场景可以参见图 1。并与基于预测网络信息的垂直切换算法^[7](Predictive Network Information based Vertical Handoff, PNIVH)和基于神经模糊的垂直切换判决算法^[4](Neuro-Fuzzy based Vertical Handoff Decision Algorithm, NF-VHDA)两个算法进行对比。假设 WiMAX 和 TD-LTE 的 2 维资源单元总数分别为 213 和 106, 小区半径分别为 3.0 km 和 1.5 km。为了降低实验的复杂度, WiMAX 和 TD-LTE 均采用一致的 1024 个子载波的 OFDM 调制, 帧长 5 ms, 符号周期为 0.2 ms, 一个 2 维资源单元由 48 个连续子载波与 10 个符号周期组成。仿真过程中, 假设用户按照图 1 中两个具有代表性的运动轨迹进行移动, 并且车辆速度设为 20 m/s。在整个网络覆盖区域按照泊松分布陆续到达新用户, 到达率 $\lambda = 1 \sim 10$, 服务时间的均值为 50 s。

假设用户的业务模型可以分成实时业务和非实

时业务,并且速率均假设在 50~120 kb/s 这个区间,且业务生成间隔均服从均值为 1 s 的泊松分布。同时,通过对车辆异构网络中垂直切换过程的分析和研究,本文选取接收信号强度、网络带宽、时延、数据速率、服务费用和终端能耗等 6 个决定终端 QoS 的属性参数。

4.2 负载率和阻塞率性能分析

本文首先从负载率和阻塞率两个性能指标来分析所提算法。其中负载率是描述网络工作状态的重要指标,它是一个百分数。如网络的额定容量是 100 Mbps,而在某一时刻,网络上的数据量仅有 20 Mbps,那么它的负载率就是 20%。阻塞率是指在一个时间周期内,切换被阻塞占有所有触发量的比例,它也是一个百分数,其也能一定程度上说明网络的工作状态。

实验分析中本文的 M-VHO 算法和 PNIVH 算法均只考虑了可用 2 维资源单元数。图 3 和图 4 分别显示了 M-VHO 算法与 PNIVH 算法的平均负载率的性能对比。随着新车辆终端的到达, WiMAX 和 TD-LTE 无线网络的负载率逐步增加直到满负载状态。图 3 中, TD-LTE 无线网络中 M-VHO 算法的负载率始终低于 PNIVH 算法。因为本文算法考虑了垂直切换决策时刻之后的无线网络可用 2 维资源单元数的动态变化,实验中设定的 TD-LTE 无线网络和 WiMAX 无线网络新车辆终端到达率分别为 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$, TD-LTE 单位时间内到达的平均用户数是 WiMAX 的两倍,在车辆终端垂直切换决策时刻与之后时刻 TD-LTE 网络的用户数大幅度动态变化愈大,因此 M-VHO 算法根据网络状态的动态变化判定 TD-LTE 无线网络更易拥塞,切换到 WiMAX 无线网络。图 4 显示了 WiMAX 网络中 M-VHO 算法的负载率始终高于 PNIVH,说明 M-VHO 算法优先选择网络状态动态变化可能性更小的 WiMAX 无线网络。

图 5 显示了车辆终端在不同到达率下的平均阻塞率。随着车辆终端到达率的动态变化,单位时间内到达的用户数逐渐增多,3 种算法的车辆终端平均阻塞率都呈递增趋势。在 $\lambda \leq 3$ 时,无线网络的容量能够保证新车辆终端的接入,因此阻塞率接近或等于零。当 $\lambda > 3$ 时,各算法均出现阻塞, M-VHO 算法阻塞率相对于 NF-VHDA 算法平均降低了大约 0.4%。这是由于 NF-VHDA 算法还综合了接收信号强度,在要求高信号强度的同时很难再保证较低的阻塞率;另一方面, M-VHO 算法只考虑可用 2 维资源单元,因此 NF-VHDA 算法的阻塞率高于 M-VHO 算法。PNIVH 算法阻塞率处于 NF-VHDA

和 M-VHO 算法之间。在 $\lambda \leq 7$ 时, M-VHO 平均阻塞率略低于 PNIVH 算法,随着用户到达率的增加,两算法间阻塞率的差距越大,在 $\lambda = 10$ 时, M-VHO 算法阻塞率低于 PNIVH 算法 12.6%。这是因为本文算法考虑了可用 2 维资源单元和阻塞率的动态变化,且当车辆终端到达率愈大,两类网络之间到达率差距也愈大,愈能体现本文算法的优势。

4.3 丢包率和乒乓效应分析

图 6 显示 3 种算法车辆终端平均丢包率的对比。可看出, M-VHO 算法的平均丢包率大大低于 NF-VHDA 算法和 PNIVH 算法,这是由于 PNIVH 算法主要关注的是用户的服务质量,而接收信号强度是非常重要的服务参数,而 NF-VHDA 也考虑了接收信号强度,但是所占的比重相对较小。图中还可看出 M-VHO 算法的平均丢包率相对于 NF-VHDA 算法降低了大约 145%,相对于 PNIVH 算法降低了大约 220%,这是由于本算法考虑了用户的动态高速移动性,并采用马尔可夫过程预测了车辆终端垂直切换决策时刻、切换执行时刻及切换之后车辆终端接收信号强度和信噪比的变化,而 NF-VHDA 算法和 PNIVH 算法仅仅考虑了车辆终端垂直切换决策时刻的信噪比,因此 M-VHO 算法得到的平均丢包率远低于 NF-VHDA 算法和 PNIVH 算法。

如图 7 所示,分别采用不同的算法实验仿真 20 次。20 个移动车辆终端发生垂直切换的平均次数,在 PNIVH 算法下是 19.50 次;在 NF-VHDA 算法下是 15.75 次;而采用该文所提出的 M-VHO 算法,是 10.65 次。这一现象说明,本文提出的算法在垂直切换次数上明显较前两种算法少。进一步说明所提算法,能够大量地降低不必要垂直切换,“乒乓效应”得到较好的抑制。分析原因,本文算法综合考虑了各异构无线网络的多种状态属性后做出切换决策,同时基于马尔可夫过程,预测了垂直切换决策时刻之后的网络状态变化情况,较已有算法能有效降低无谓的垂直切换,频繁切换的“乒乓效应”得以抑制。

从丢包率和平均切换次数两个角度验证了所提算法优势在于综合考虑了多个网络属性参数在多个时刻的动态变化,从而可以减少数据间的冲突,降低整个车辆终端的丢包率;同时,可以明显减少终端在网期间的平均切换次数,避免出现“乒乓效应”。

4.4 垂直切换最佳性能分析

图 8 为新车辆终端到达率不断增加的情况下,终端得到的平均收益值,定义为单位时间内网络状

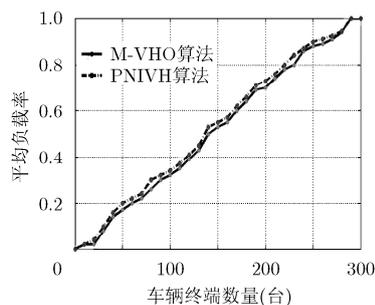


图3 TD-LTE无线网络平均负载率

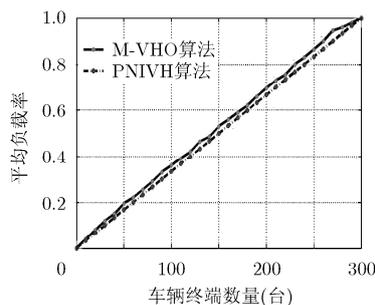


图4 WiMAX无线网络平均负载率

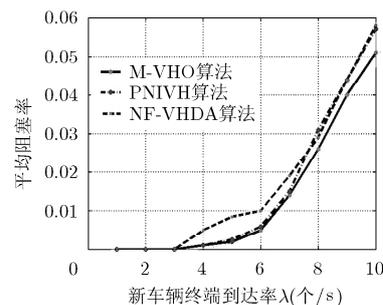


图5 车辆终端平均阻塞率

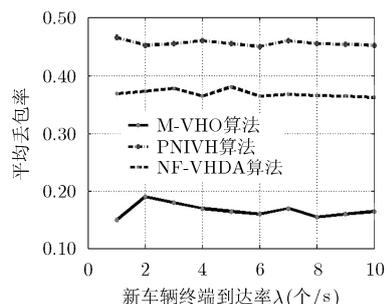


图6 异构网络平均丢包率

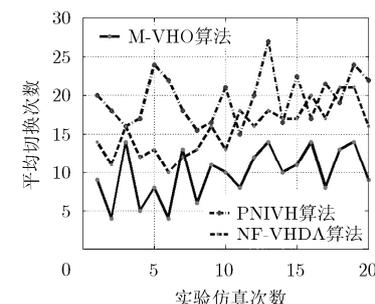


图7 车辆终端平均切换次数

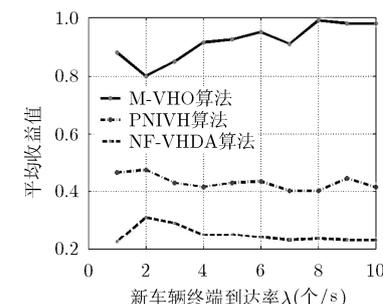


图8 车辆终端平均收益值

态属性所带来的收益值。通过图中3条曲线的对比，NF-VHDA算法和PNIVH算法的平均收益值均小于本文的M-VHO算法，说明本文算法采用马尔可夫过程成功预测了垂直切换决策时刻之后的网络状态属性变化情况，更合理地选择了最佳切换网络。

5 结束语

本文提出了基于马尔可夫过程的车辆异构网络预测垂直切换算法。利用马尔可夫过程来预测切换决策时刻之后网络状态的动态变化并采用模糊逻辑确定评价指标权重。实验结果证明该算法可保证较高负载均衡的情况下，有效提高车辆终端的平均阻塞率及业务丢包率，降低乒乓效应，保证车辆用户接入切换网络的QoS。但算法仅考虑了垂直切换决策、切换执行和切换之后时刻的网络状态变化，下一步考虑结合车辆终端的安全需求来联合优化收益函数。

参考文献

[1] Xie X Z, Rong B, Zhang T, *et al.* Improving physical layer multicast by cooperative communications in heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 58-63.

[2] Liu M, Li Z C, Guo X B, *et al.* Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(7): 846-857.

[3] 马彬, 谢显中. 支持云计算的无线移动网络安全垂直切换算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(9A): 16-23.

Ma B and Xie X Z. Security vertical handoff algorithm to support cloud computing in wireless mobile networks[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9A): 16-23.

[4] Singhrova A and Prakash N. Vertical handoff decision algorithm for improved quality of service in heterogeneous wireless networks[J]. *IET Communications*, 2012, 6(2): 211-223.

[5] Faisal K, Mehdodniya A, Islam A, *et al.* Dynamic target wireless network selection technique using fuzzy linguistic variables[J]. *China Communications*, 2013, 10(1): 1-16.

[6] Nasser N, Guizani S, and Al-Masri E. Middleware vertical handoff manager: a neural network-based solution[C]. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*, Glasgow, United Kingdom, 2007: 5671-5676.

[7] Guo Y S, Tang Z, Libda A, *et al.* A QoS-aware vertical handoff algorithm based on predictive network information[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2012, 19(8): 2187-2193.

[8] Stevens-Navarro E, Lin Y, and Wong V W S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(2): 1243-1254.

[9] 邓强, 陈山枝, 胡博, 等. 异构无线网络中基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制的研究[J]. *通信学报*, 2010, 31(12):

- 27-36.
Deng Qiang, Chen Shan-zhi, Hu Bo, *et al.*. Research of service-differentiated admission control based on Markov decision processes in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(12): 27-36.
- [10] 施政, 朱琦. 基于马尔科夫过程的异构网络性能分析与优化[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2224-2229.
Shi Zheng and Zhu Qi. Performance analysis and optimization based on markov process for heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(9): 2224-2229.
- [11] Ning Z L, Song Q Y, Liu Y J, *et al.*. Markov based vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(2): 456-472.
- [12] 谢显中, 肖博仁, 马彬, 等. 代价函数权值可变的速率自适应的异构无线网络垂直切换算法[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2417-2421.
Xie Xian-zhong, Xiao Bo-ren, Ma Bin, *et al.*. Cost function weight-variable and speed-adaptive vertical handoff algorithm for a vehicle terminal in heterogeneous wireless networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(10): 2417-2421.
- 马彬: 男, 1978年生, 副教授, 博士生, 研究方向为异构无线网络、认知无线网络等.
- 谢显中: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信网络、感知无线电技术等.
- 廖晓峰: 男, 1964年生, 博士, 教授, 长江学者, 博士生导师, 主要研究方向为无线网络、神经网络、混沌技术等.