

异构无线网络中新的成本感知网络切换方案

马 彬,汪 栋,谢显中

(1. 重庆邮电大学计算机科学与技术学院,重庆 400065;
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: 针对异构无线网络中用户希望通过较低的花费获取最满意的网络服务的需求,本文提出了一种以用户为中心的成本感知网络切换方案. 首先,根据用户能够获取到的网络传输速率建立用户服务满足度模型,并结合归一化的网络费用,将网络切换问题转化为一个多目标优化问题. 考虑到网络阻塞是由于大量用户同时选择同一个网络导致的,将这种背景下的用户决策行为转化为 EI Farol 酒吧问题,通过求解该问题纳什均衡状态下的用户获取网络服务的概率来得到用户服务满足度的期望值. 最后,通过考虑用户服务满足度回报率将所构建的多目标优化问题转化为一个最大化问题. 仿真结果表明本文算法能够提高网络总吞吐量,降低用户切换阻塞率,使网络负载更加均衡.

关键词: 异构无线网络; 垂直切换; EI Farol; 成本感知

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)05-1227-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.031

A Novel Cost-Aware Network Handoff Scheme in Heterogeneous Wireless Network

MA Bin, WANG Dong, XIE Xian-zhong

(1. Institute of Computer Science and Technology, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing 400065, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing, 400065, China)

Abstract: In heterogeneous wireless network, most users hope to obtain the most satisfactory network services at a lower cost. This paper proposes a user-centered cost-aware network handoff scheme. Firstly, the model of user's service saturation is established according to the network transmission rate that can be obtained by the user. Secondly, combined with the normalized network cost, network handoff problem can be converted to a multi-objective optimization problem. Considering the network congestion is caused by a large number of users choose the same network at the same time, the user decision behavior in this context is transformed into EI Farol bar problem, and then we get the service saturation expectations of users from the network service probability by searching Nash equilibrium of the problem. Finally, the multi-objective optimization problem is transformed into a maximization problem by considering the reward rate of user's service saturation. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the total throughput of the network, reduce the blocking rate of the user's handoff and make the network load more balanced.

Key words: heterogeneous wireless network; vertical handoff; EI farol; cost-aware

1 引言

异构无线网络的一体化弥补了传统通信基站覆盖具有盲区的缺陷,不同类型网络共同为移动终端(Mobile Terminal, MT)提供无处不在的网络服务成为未来发展趋势. 未来网络的发展具有多密集小蜂窝覆盖的

特点^[1],使得网络切换更加必要.

当前许多文献都对异构无线网络中的切换问题进行了研究. 文献[2]利用移动车载终端的测速功能,设计权值可变的代价函数,改进了高速终端的网络发现时机. 文献[3]通过对业务分类和设定属性阈值来构建网络切换决策树,最终生成多属性判决值并做出切换

收稿日期:2017-01-20;修回日期:2017-06-21;责任编辑:蓝红杰

基金项目:国家自然科学基金(No. 61601070, No. 61271259, No. 61301123, No. 61471076);重庆市基础与前沿研究计划(No. cstc2016jcyjA0455, No. cstc2015jcyjA40047);重庆邮电大学博士启动基金(No. A2014-10, No. A2015-16);重庆市移动互联网数据应用工程技术研究中心资助

决策. 文献[4] 通过 AHP 模型和简单加权法 (SAW) 得到网络多属性评价值, 并对比了 TOPSIS 法和灰色关联分析 (GRA) 法求解问题的性能. 文献[5] 以最大化信道效率为目标, 提出一种多目标优化的方法, 提高了网络总吞吐量.

以上网络切换方案中, 大多以优化终端服务质量 (Quality of Services, QoS) 为目标, 忽视了用户对网络选择的主观评价 (Subjective Evaluation) 和用户满意度 (User Satisfaction). 文献[6] 建立了一个基本 QoE 模型来描述多媒体应用和异构无线网络的特征, 并将异构无线网络中的多媒体通信问题转化为一种随机最优化问题. 在第五节, 本文与文献[4~6] 进行了仿真性能的对比分析. 文献[7] 提出了一种在线学习方案来解决当前工作中网络状态信息不确定带来的切换效率低的问题.

这些考虑到 QoE 的工作普遍具有 QoE 模型不统一, 评价指标主观性过强等缺点. 依赖于在线解决, 降低了算法的适用范围. 为了更好的保障网络切换中的用户体验, 本文提出了一种新的成本感知网络切换方案. 该方案基于网络数据传输速率建立用户服务满足度 (User Service Saturation, USS) 模型, 并结合归一化的网络花费 (Network cost, NC) 来构建用户选择网络时的两个优化目标: 最大化 USS 和最小化 NC. 另一方面, 考虑到大量用户通信场景下, 网络易发生阻塞. 我们将用户在可能发生网络阻塞的情况下选择是否接入该网络的问题转化为 EI Farol 酒吧问题 (EI Farol Bar problem, EFBP)^[8], 以降低大量用户通信场景下的网络阻塞概率. 本文的主要贡献总结如下:

(1) 建立了一个更加客观的用户体验模型: 用户服务满足度 (USS), 用于评价用户业务需求的满足程度, 并结合归一化的网络花费, 构建了用户服务满足度回报率模型. (2) 研究了在可能发生网络阻塞情况下的用户选择网络的决策行为与收益, 通过将该问题转化为 EI Farol 酒吧问题, 并给出纳什均衡状态下的用户获取网络服务的期望概率. (3) 分析证明了通过优化 USS 回报率能够在多项式时间复杂度内得到原多目标优化问题的一个帕累托最优解.

2 服务满足度模型及系统建模

2.1 服务满足度模型

用户服务满足度与用户获取到的网络传输速率和用户对数据传输速率的需求有关. 首先将时间划分为等长的时隙 (time slot), 假设用户 i 在单位时间内的 k 个时隙的数据传输速率需求为 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}\}$, 用户 i 能够从网络 j 获取的最大传输速率为 η_j .

定义 1 用户 i 接入网络 j 在单位时间内的用户服务满足度为

$$USS_{ij} = \sum_{p=1}^k \left(\frac{\eta_j}{v_{ip}} + o_p \right) \quad (1)$$

其中 $o_p = \begin{cases} 1, & \text{当 } \eta_j > v_{ip}, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$ 式 (1) 中项 $\frac{\eta_j}{v_{ip}}$ 表示网络对用户

在每个时隙的速率需求的满足程度, 项 o_p 表示用户

2.2 系统切换模型

考虑在网络通信场景中有 n 个网络 $B = (N_1, N_2, \dots, N_n)$, m 个用户 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$. 在时刻 t , 网络与用户的连接关系矩阵为

$$C(t) = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & \cdots & u_m \\ \begin{matrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11}(t) & c_{12}(t) & \cdots & c_{1m}(t) \\ c_{21}(t) & c_{22}(t) & \cdots & c_{2m}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1}(t) & c_{n2}(t) & \cdots & c_{nm}(t) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

其中

$$c_{ji}(t) = \begin{cases} 1, & \text{在时刻 } t, \text{ 用户 } i \text{ 连接在网络 } j \text{ 中,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

在时刻 t , 描述网络对用户的覆盖关系矩阵为

$$A(t) = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & \cdots & u_m \\ \begin{matrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} A_{11}(t) & A_{12}(t) & \cdots & A_{1m}(t) \\ A_{21}(t) & A_{22}(t) & \cdots & A_{2m}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1}(t) & A_{n2}(t) & \cdots & A_{nm}(t) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

其中

$$A_{ji}(t) = \begin{cases} 1, & \text{在时刻 } t, \text{ 用户 } i \text{ 处在网络 } j \text{ 的覆盖中,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (5)$$

可以知道对于用户 u_i , 只能接入到一个网络中, 或者没有接入到任何网络. 因此 $\sum_{j=1}^n c_{ji}(t)$ 应满足以下约束条件

$$0 \leq \sum_{j=1}^n c_{ji}(t) \leq 1 \quad (6)$$

对于网络 N_j , 接入进来的用户数 $\sum_{i=1}^m c_{ji}(t)$ 应该满足以下约束条件

$$0 \leq \sum_{i=1}^m c_{ji}(t) \leq \min \left(\sum_{i=1}^m A_{ji}(t), \chi_j \right) \quad (7)$$

其中 χ_j 为网络 N_j 可接入的最大用户数.

假设连接在同一个网络下的用户获得等分的带宽, 则在时刻 t 处于网络 j 下的用户能够分得的带宽为

$$ubw_j(t) = \frac{bw_j}{\sum_{i=1}^m c_{ji}(t)} \quad (8)$$

在时刻 t 用户 i 从网络 j 接收到的信号强度可表达为

$$RSS_{ij}(t) = \rho_j - \kappa_j \lg(d_{ij}(t)) + \zeta \quad (9)$$

其中 $d_{ij}(t)$ 为在时刻 t 用户 i 到网络 j 的距离, ρ_j 为网络 j 的发送功率, κ_j 为网络路径损失因子, ζ 为服从参数为 $(0, \sigma^2)$ 的高斯随机变量. 用户的信噪比 (SNR) 可近似为

$$SNR_{ij}(t) = \frac{RSS_{ij}(t)}{I(x)} \quad (10)$$

其中 $I(x)$ 为干扰信号强度. 根据香农公式可以得到在时刻 t 用户 i 能够从网络 j 获取的最大数据传输速率为

$$S_{ij}(t) = ubw_j \log_2(1 + SNR_{ij}(t)) \quad (11)$$

在做切换判决时, 用户 i 需根据当前时刻 t 最近的前 k 个时隙的数据传输速率需求 $V_i(t) = \{v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{ik}(t)\}$ 来预测能够从网络 j 获取到的. 根据式 (1) 可以得到在时刻 t 用户 i 能够从网络 j 获取的 USS 为

$$\varphi_{ij}(t) = \sum_{p=1}^k \left(\frac{S_{ij}(t)}{v_{ip}(t)} + o_{ijp} \right) \quad (12)$$

假设用户 i 从网络 j 获取预期服务满足度的概率为 $\delta_{ij}(t)$, 则在时刻 t 用户 i 从网络 j 获取到的 USS 的期望为

$$\alpha_{ij}(t) = \varphi_{ij}(t) \cdot \delta_{ij}(t) \quad (13)$$

用 β_j 表示接入网络 j 的归一化花费. 则对于用户 i 来说, 在做网络切换选择时考虑的优化目标可表示为

$$\theta_1 = \text{maximize } \alpha_{ij}(t) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \text{minimize } \beta_j \quad (15)$$

式 (14) 表明用户在选择网络时应该考虑最大化服务满足度, 式 (15) 则表明应该选择网络花费最低的网络. 上述优化目标满足的约束条件为

$$1 \leq j \leq n \quad (16)$$

$$A_{ji} = 1 \quad (17)$$

$$S_{ij}(t) \geq r_i(t) \quad (18)$$

式 (16) 和式 (17) 表明用户 i 需考虑所有能够覆盖到他网络, 式 (18) 表示网络 j 需满足在切换时刻用户 i 对网络传输速率的基本需求.

3 获取预期服务满足度的概率

3.1 EIfarol 酒吧问题模型的构建

将用户选择是否接入共同覆盖网络的问题转化为 EI Farol 酒吧问题时, 需注意以下三个方面: 该网络覆盖下的切换用户数大于该网络的空闲信道数; 用户成功接入该网络的回报大于不接入该网络时的收益; 如果网络发生阻塞, 则每个接入进来的用户将得到一个负的回报.

假设用户 i 在网络切换时, 其可选网络包含网络 j , 同时网络 j 还是其他 $\Theta_j(t)$ 个切换用户的可选网络. 则

网络 j 可能发生阻塞的条件为

$$\Theta_j(t) + 1 + \sum_{i=1}^m c_{ji}(t) > x_j \quad (19)$$

式 (19) 表明当已接入网络 j 的用户数与接入网络 j 的潜在用户数之和大于网络 j 的最大服务数时, 网络 j 可能会阻塞. 假设用户 i 当前接入的网络为 $\Delta_i(t)$, $1 \leq \Delta_i(t) \leq n$, 则在时刻 t 用户 i 的决策行为与对应的回报可表示为如下两种情况:

(1) 如果选择留在当前网络, 能够获取的带宽资源为 $ubw_{\Delta_i(t)}(t)$, 如果用户 i 在时刻 t 没有接入到任何网络, 定义 $ubw_{\Delta_i(t)}(t) = 0$.

(2) 如果选择切换到网络 j , 记 $H_j(t)$ 为时刻 t 切换到网络 j 的用户总数, 当 $H_j(t) \leq \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)$ 时, 用户 i 获得的回报为 $ubw_j(t)$; 当 $H_j(t) > \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)$ 时, 用户 i 获得的回报为 $-[ubw_{\Delta_i(t)}(t) + ubw_j(t)] < 0$, 用户 i 会损失切换前获取的带宽资源 $ubw_{\Delta_i(t)}(t)$, 并且由于网络阻塞损失掉了期望获取的带宽资源 $ubw_j(t)$.

3.2 用户获取预期服务满足度的概率

在经典的 EI Farol 酒吧问题中, 没有一种均衡是在所有参与者选择同一种纯策略下形成的, 但是当所有参与者采取某种一致性的行为时, 可以通过某种混合策略来达到均衡^[8], 假设用户 i 采用某种混合策略使得自身回报期望值与当前网络提供的回报相等, 则在该均衡状态中用户 i 做出切换到网络 j 与留在当前网络的决策获得的回报均为 $ubw_{\Delta_i(t)}(t)$, 即有以下表达式

$$\begin{aligned} & ubw_j(t) \cdot \Pr[H_j(t) \leq \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] - \\ & [ubw_{\Delta_i(t)}(t) + ubw_j(t)] \cdot \Pr[H_j(t) > \chi_j - \\ & - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] = ubw_{\Delta_i(t)}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \Pr[H_j(t) \leq \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] + \\ & \Pr[H_j(t) > \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] = 1 \end{aligned} \quad (21)$$

由式 (20) 和式 (21) 可以得到纳什均衡状态中网络不发生阻塞的概率为

$$\begin{aligned} & \Pr[H_j(t) \leq \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] \\ & = \frac{2ubw_{\Delta_i(t)}(t) + ubw_j(t)}{ubw_{\Delta_i(t)}(t) + 2ubw_j(t)} \end{aligned} \quad (22)$$

$$ubw_{\Delta_i(t)}(t) < ubw_j(t) \quad (23)$$

式 (23) 表明在时刻 t 网络 j 不发生阻塞时提供给用户 i 的回报大于其当前网络提供的回报. 当用户 i 采用任何能使得式 (22) 成立的概率 P 选择接入网络 j , 即可得到一个混合策略纳什均衡, 这样的概率 P 应该满足的方程式为

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{H_j'(t)-c_{ji}(t)} C_{H_j'(t)}^k \cdot p^k \cdot (1-p)^{H_j'(t)-k} \\ & = \Pr[H_j(t) \leq \chi_j - \sum_{i=1}^m c_{ji}(t)] \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $C_{H_j'(t)}^k = \frac{H_j'(t)!}{k! \cdot (H_j'(t)-k)!}$, $H_j'(t)$ 为参与选择是否切换到网络 j 的用户总数, 显然有 $H_j(t) \leq H_j'(t)$. 用户 i 通过考虑式 (22) 给出的从网络 j 处获取服务的概率来得到从网络 j 获取的服务满足度期望值, 则有

$$\delta_{ij}(t) = \frac{2ubw_{\Delta_i(t)}(t) + ubw_j(t)}{ubw_{\Delta_i(t)}(t) + 2ubw_j(t)} \quad (25)$$

通过式 (13) 和式 (25) 可以得到用户 i 在网络切换时考虑的优化目标 θ_1 . 该节, 将网络负载情况考虑到用户的优化目标中, 能够降低用户的切换阻塞率.

4 成本感知网络切换方案

4.1 算法过程

很多工作已经研究到了多目标优化问题^[9,10], 对于大多数的多目标优化问题找不到这样一个解, 能够使得每一个优化目标同时达到最优. 在本节中, 通过考虑用户服务满足度的回报率将两个优化目标 θ_1 & θ_2 转化为一个优化目标 θ_3 , 然后求解单目标优化问题 θ_3 来得到原多目标优化问题的解.

用户服务满足度的回报率表示用户付出的单位网络费用能够得到的服务满足度, 采用归一化的网络费用 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ 表示各网络接入成本. 由于用户希望单位网络花费得到的服务满足度最高, 因此可以得到如下最大化 USS 回报率的目标函数

$$\theta_3 = \text{maximize} \frac{\alpha_{ij}(t)}{\beta_j} \quad (25)$$

定理 1 转化而来的最大化问题 θ_3 的解是原多目标优化问题 θ_1 & θ_2 的帕累托最优解.

证明 当用户 i 在时刻 t 做出的网络切换选择结果为网络 j 时, 假设网络 j 不是原多目标优化问题 θ_1 & θ_2 的帕累托最优解, 则最少存在一个网络 a 满足以下三种情形之一.

情形 1 网络 a 在保持目标 θ_1 的条件下, 优化了目标 θ_2 , 则有

$$\begin{cases} \alpha_{ia}(t) = \alpha_{ij}(t) \\ \beta_a < \beta_j \end{cases}, \Rightarrow \frac{\alpha_{ia}(t)}{\beta_a} > \frac{\alpha_{ij}(t)}{\beta_j} \quad (26)$$

情形 2 网络 a 在保持目标 θ_2 的条件上, 优化了目标 θ_1 , 则有

$$\begin{cases} \alpha_{ia}(t) > \alpha_{ij}(t) \\ \beta_a = \beta_j \end{cases}, \Rightarrow \frac{\alpha_{ia}(t)}{\beta_a} > \frac{\alpha_{ij}(t)}{\beta_j} \quad (27)$$

情形 3 网络 a 优化了目标 θ_1 的同时优化了目标

θ_2 , 则有

$$\begin{cases} \alpha_{ia}(t) > \alpha_{ij}(t) \\ \beta_a < \beta_j \end{cases}, \Rightarrow \frac{\alpha_{ia}(t)}{\beta_a} > \frac{\alpha_{ij}(t)}{\beta_j} \quad (28)$$

综合考虑上面三种情形, 可以得到网络 j 不是最大化问题 θ_3 的最优解, 这与前面假设网络 j 是最大化问题 θ_3 的最优解相矛盾. 因此, 不存在这样的网络 a 能够在网络 j 的基础上进行帕累托改进, 即网络 j 是原多目标优化问题 θ_1 & θ_2 的帕累托最优解. 定理 1 得证. 成本感知网络切换方案的执行过程如图 1 所示.

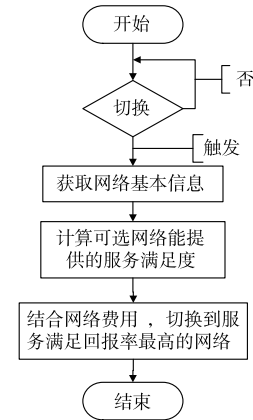


图1 网络切换方案流程图

4.2 时空复杂度评估

为了得到本文所提算法的时空复杂度, 首先通过伪代码的形式给出成本感知网络切换方案的执行步骤如算法 1 所示, 然后对算法伪代码进行分析, 得到算法的时空复杂度.

算法 1 成本感知网络切换方案执行步骤

输入: $N_i(t)$, 用户 i 在 t 时刻的可选网络集合, 用 n_{ij} 表示 $N_i(t)$ 中任一网络, $n_{ij} \in N_i(t)$; Con_{ij} , 当前连接的用户总数; χ_{ij} , 网络的最大服务数; $\theta_{ij}(t) + 1$, 网络覆盖下被触发切换的用户数; $RSS_{ij}(t)$, 网络的接收信号强度; $I_{ij}(t)$, 干扰信号强度; β_j , 网络的归一化花费.

输出: n_{ij} , 切换目标网络.

01: pointer = 0, maxReRate = 0;

02: for $\forall n_{ij} \in N_i(t)$ do

03: 据式 (8) 计算 $ubw_j(t)$, 根据式 (10) 计算 $SNR_{ij}(t)$, 根据式 (11) 计算 $S_{ij}(t)$;

04: 据式 (12) 迭代计算 k 次得到 $\varphi_{ij}(t)$, $\varphi_{i\Delta_i(t)}(t)$;

05: 据式 (25) 计算 $\delta_{ij}(t)$;

06: 据式 (13) 计算 $\alpha_{ij}(t)$;

07: 据式 (26) 计算 θ_{3ij} ;

08: if $\theta_{3ij} > \text{maxReRate}$ then

09: maxReRate $\rightarrow \theta_{3ij}$; pointer $\rightarrow n_{ij}$;

10: end;

11: end;

12: return pointer;

假设可选网络集合 $N_i(t)$ 包含 n 个网络,步骤 03 中计算可分得的带宽资源、信噪比,最大传输速率均为单次数值计算,因此执行步骤 03 的时间复杂度为

$$O(1) + O(1) + O(1) = O(1) \quad (30)$$

执行步骤 04 的时间复杂度为

$$[O(1) + O(1)] \cdot O(k) = O(k) \quad (31)$$

执行步骤 05、06 和 07 的计算均为单次数值计算,步骤 08 ~ 10 为条件判断和赋值语句. 因此执行步骤 05 ~ 10 的时间复杂度为

$$O(1) + O(1) + O(1) + O(1) + O(1) = O(1) \quad (32)$$

算法总共需要重复执行 n 次步骤 03 ~ 10,因此算法整体时间复杂度为

$$[O(1) + O(k) + O(1)] \cdot O(n) = O(nk) \quad (33)$$

下面分析执行算法 1 的空间复杂度. 保存可选网络集 $N_i(t)$ 中 n 个网络的基本信息,这部分数据的存储需要耗费的空间复杂度为 $O(n)$,存储 k 个时隙的业务对数据传输速率的需求,耗费空间复杂度为 $O(k)$. 算法执行过程只需要保留最终结果,空间复杂度为 $O(1)$. 因此,算法的整体空间复杂度为

$$O(n) + O(k) + O(1) = O(n+k) \quad (34)$$

综上,本文算法能够在多项式时间复杂度和线性空间复杂度内给出一个最优的网络切换选择结果.

5 仿真结果分析

5.1 仿真参数设置

在图 2 所示仿真场景中包含一个 3G 网络、一个 4G 网络和两个 WLAN 网络. 各网络固定分布在一个 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的矩形区域内,网络与用户的位置通过一个二维坐标 (x, y) 给出. 各网络坐标如下:3G 网络为 $(300, 310)$,4G 网络为 $(795, 815)$,WLAN1 网络为 $(450, 560)$,WLAN2 网络为 $(540, 430)$. 用户最大的移动速度为 5m/s ,一个时隙长度设定为 1s ,记录的时隙数量 $|V_i(t)| = 20$. 干扰信号强度 $I(x) = -130 + u(x)\text{dbm}$, $u(x)$ 为服从参数 $(0, 10)$ 的高斯随机分布. 各网络的仿真参数设置如表 1 所示.

表 1 网络仿真参数设置

网络	3G	4G	WLAN1	WLAN2
覆盖半径 (km)	7	50	0.25	0.25
发送功率 (dbm)	40	43	20	20
路径损失因子 (dbm)	39	33	54	54
网络总带宽 (MHz)	5	20	20	20
最大服务用户数量 (个)	10	20	10	10
用户基本带宽需求 (Mbps)	2	4	3	3
网络归一化费用	5	9	6	8

本文对比了所提成本感知切换算法 (Proposed-VHO) 与最近研究工作中的基于多属性判决的垂直切换算法 (MA-VHO)^[4],基于多目标优化方法的分布式

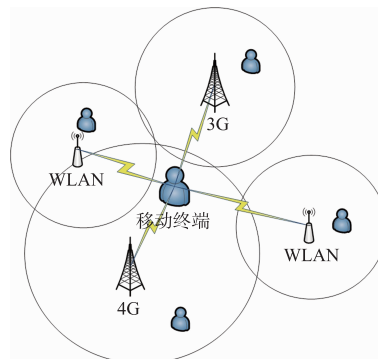


图2 仿真场景图

网络切换方案 (MOD-SH)^[5] 和 QoE 感知的多媒体调度切换方案 (QEMS-SH)^[6].

5.2 用户服务满足度与回报率

图 3 中显示两个 WLAN 网络的服务满足度最高,其次是 4G 网络,3G 网络的服务满足度最低. 由于两个 WLAN 网络的带宽资源相对丰富,且覆盖范围较小,因此处于 WLAN 网络中的用户通常能够获得更大的带宽,从而服务

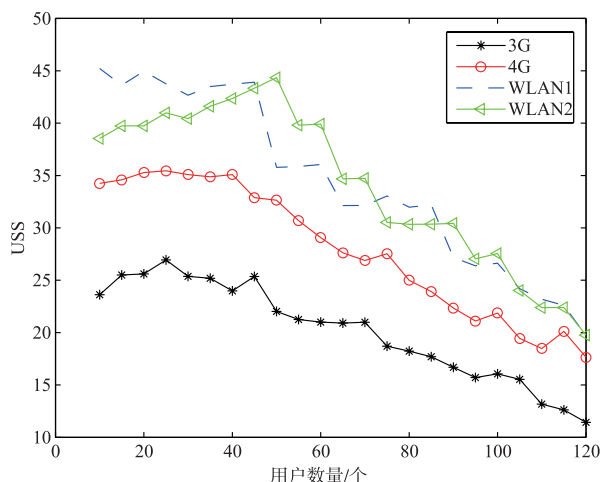


图3 用户服务满足度

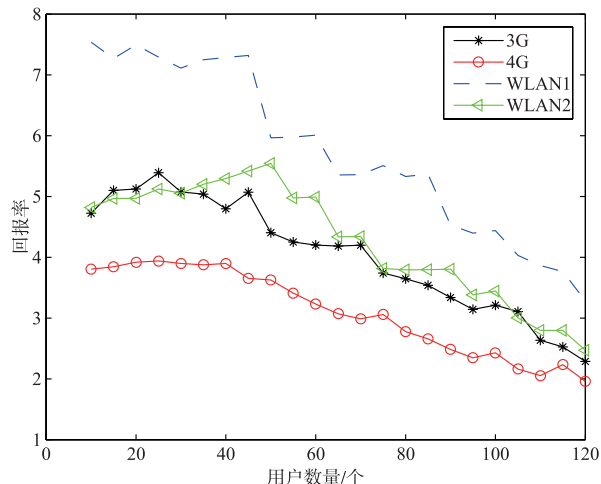


图4 用户服务满足度回报率

满足度也就更高. 在图 4 的仿真结果中, WLAN1 网络的服务满足度回报率最高, WLAN2 网络与 3G 网络服务满足度回报率相近, 4G 网络的服务满足度回报率最低.

5.3 网络负载率

图 5 中每个网络的负载率是在用户数量为 40 的场景下得到的, 此时用户总数小于网络信道总数 50, 图 6 中每个网络的负载率是在用户数量为 100 的场景下得到的, 此时用户总数大于网络信道总数. 综合考虑图 5 和图 6 仿真结果, 可以得到 Proposed-VHO 算法的各网络负载率差异性更小, 即网络负载更加均衡.

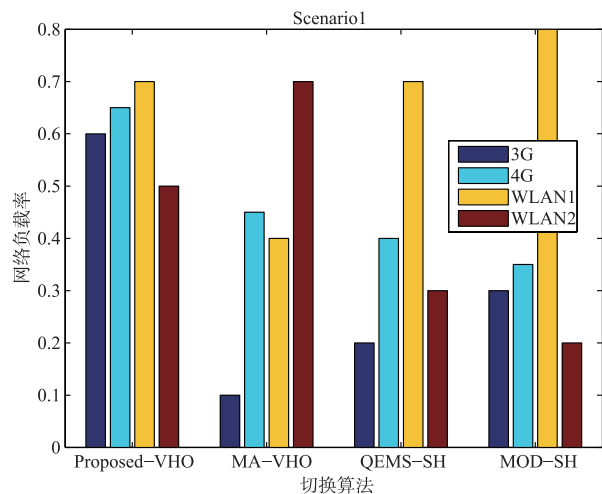


图5 网络负载率

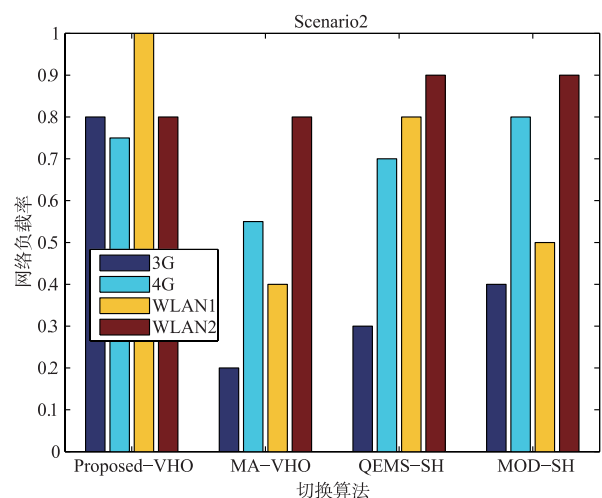


图6 网络负载率

5.4 网络总吞吐量与用户平均切换阻塞率

图 7 中, Proposed-VHO 算法网络总吞吐量性能表现最佳, 其次是 MOD-SH 算法和 QEMS-SH 算法, MA-VHO 算法网络总吞吐量最低. 图 8 中的仿真实验表明了 Proposed-VHO 算法能够降低用户平均切换阻塞率.

5.5 时间复杂度

前文中理论分析出 Proposed-VHO 算法具有的多项

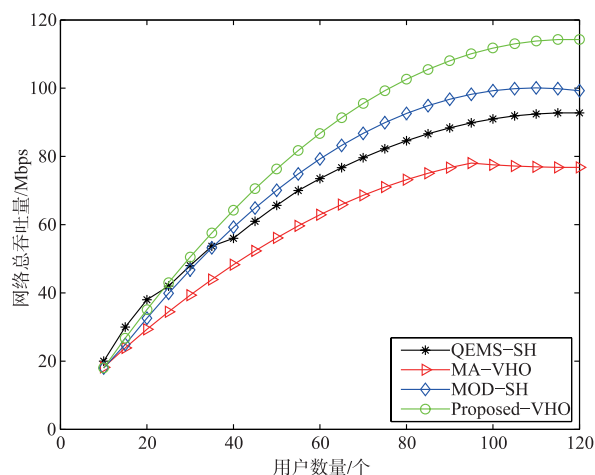


图7 网络总吞吐量

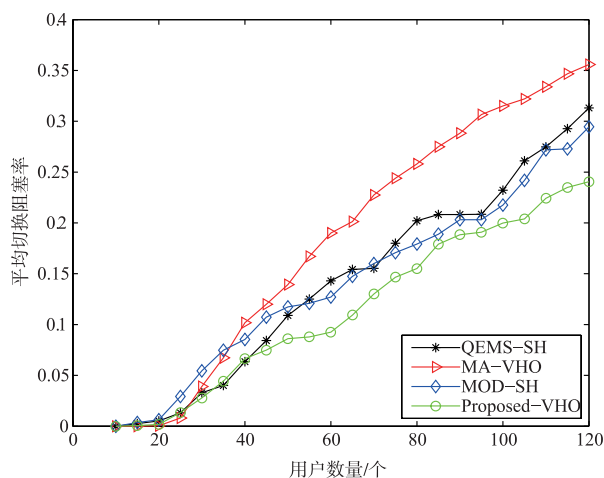


图8 用户平均切换阻塞率

式时间复杂度, 其中为网络数量, 为算法在计算 USS 时记录的时隙数量. 图 9 和图 10 分别测试了在不同时隙数量和网络数量下的计算时间, 可以得到 Proposed-VHO 算法的计算时间与时隙数量和网络数量均成正比关系, 这一实验结果也证实了关于时间复杂度的理论分析结果. 另一方面, 在图 10 和图 11 对比了 Proposed-VHO 算法与另两种算法的计算时间开销, 仿真结果表明了 Proposed-VHO 算法在执行效率上的优越性, 这与 Proposed-VHO 算法决策流程简单、运行高效有关.

6 总结

本文提出了一种以用户为中心的成本感知网络切换算法, 用于增强用户在异构无线网络中的服务质量和改善用户体验, 在多项式时间复杂度和线性空间复杂度内得到了一个所构建的多目标优化问题的帕累托最优解. 仿真结果表明本文所提算法能够提高网络通信系统的总吞吐量, 降低用户切换阻塞概率, 使网络负载更加均衡.

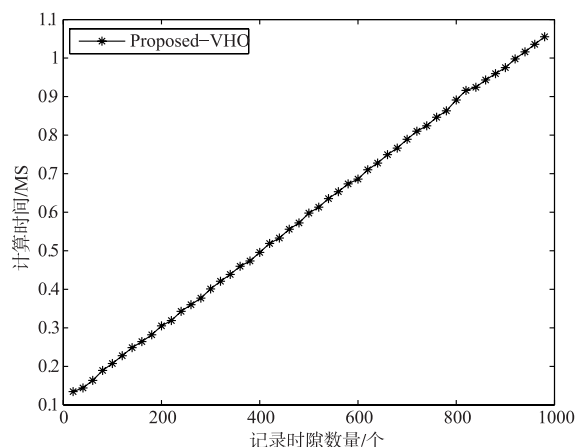


图9 算法计算时间开销

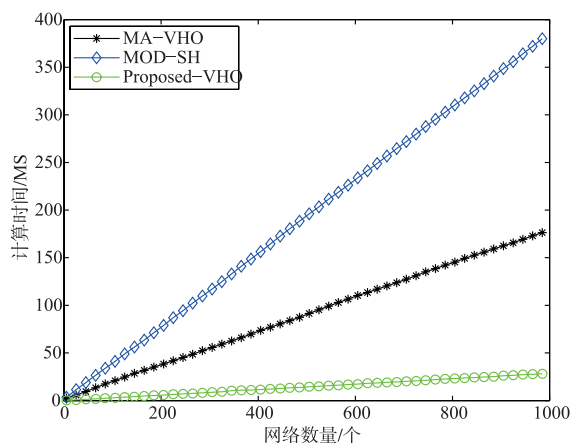


图10 算法计算时间开销

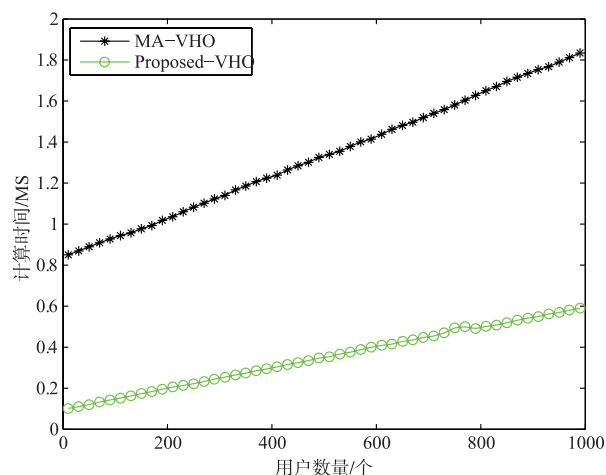


图11 算法计算时间开销

参考文献

- [1] Jose Marcos Camara Brito. Trends in wireless communications towards 5G networks-the influence of e-health and IoT applications [A]. 2016 International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech) [C]. Split, Croatia: IEEE, 2016. 1-7.
- [2] 谢显中, 肖博仁, 马彬, 等. 代价函数权值可变的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. (in Chinese)
- [3] Shangguang Wang, et al. A vertical handoff method via self-selection decision tree for internet of vehicles [J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(3): 1183-1192.
- [4] N P Singh · Brahmjit Singh. Vertical handoff decision in 4G wireless networks using multi attribute decision making approach [J]. Wireless Netw, 2014, 20: 1203-1211.

- [5] Li Qiang, et al. A novel distributed network selection scheme for heterogeneous wireless network environments [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(3): 575-586.
- [6] Setton Pierre. Quality of experience aware multimedia communications over heterogeneous wireless networks [J]. IET Networks, 2016, 5(2): 37-43.
- [7] Qihui Wu, et al. Traffic-aware online network selection in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 381-397.
- [8] AM Bell, WA Sethares. Avoiding global congestion using decentralized adaptive agents [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11): 2873-2879.
- [9] C A Coello Coello. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(1): 28-36.
- [10] Kalyanmoy Deb. Multi-objective Optimization [M]. Search Methodologies, Springer US, 2014. 403-449.

作者简介



马 彬 男, 1978 年出生, 四川人. 博士, 重庆邮电大学教授. 主要研究方向为认知无线网络, 异构无线网络, 不确定智能算法等.



汪 栋 (通信作者) 男, 1992 年生于湖北黄冈, 硕士研究生, 研究方向为异构无线网络.
E-mail: wangdcqupt@163.com