

基于双向匹配模型的异构网络垂直切换算法

马彬* 邓红 谢显中

(重庆邮电大学宽带接入网络研究所 重庆 400065)

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘要: 针对当前垂直切换判决算法存在的单一性,即切换判决时以用户或网络单方面为中心,没有充分考虑两者对切换判决的综合影响,导致垂直切换性能不佳的问题,该文提出一种基于双向匹配模型的垂直切换算法。该算法的主要思想是:首先分别以用户和网络为中心,设计各自的评估模型,用于评估双方对彼此的偏好顺序,并建立相应的排序值矩阵;其次利用排序值信息,基于一对多双向匹配模型对用户侧和网络侧的双向匹配行为进行建模和求解,以获得最优匹配解;最后根据最优匹配结果,进行垂直切换。仿真表明,该文设计的评估模型是合理的,并且所提出的算法能较好地兼顾用户侧的高性价比需求和网络侧的低阻塞率需求。

关键词: 异构无线网络; 垂直切换; 双向匹配; 排序值

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)02-0421-09

DOI: 10.11999/JEIT170300

Two-sided Matching Model Based Vertical Handover Algorithm in Heterogeneous Wireless Networks

MA Bin DENG Hong XIE Xianzhong

(Institute of Broadband Access Networks, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Most of the existing vertical handover algorithms are only based on user centric or network centric, which do not fully consider the common impact of the two sides on the handover decision. In order to solve this problem, a two-sided matching model based vertical handover algorithm in heterogeneous wireless networks is proposed. The handover performance is improved from the following aspects: first, two evaluation models of user centered and network centered are respectively proposed based on quality of service revenue and the blocking rate. And the ranking value of the two sides is evaluated further. Then, based on the ranking value, a one-to-many two-sided matching model is used to model the two-sided matching behavior of users and networks. In this way, users can access suitable networks. Simulation results show that the proposed evaluation models are in accordance with the practical network scenario, and the proposed algorithm can better balance the demand of users and networks.

Key words: Heterogeneous wireless networks; Vertical handover; Two-sided matching; Ranking value

1 引言

近年来,随着移动通信系统的飞速发展,已经逐渐形成多种无线接入技术与传统的蜂窝网络并存

的异构网络环境。由于不同的接入网络在覆盖范围、用户体验、业务类型等方面存在较大差异,当多模终端(Multi-mode Terminal, MT)在异构网络中移动时,如何保证满足用户服务质量(Quality of Service, QoS)需求的同时,优化整个网络系统的性能,成为了学术界的研究热点之一^[1]。

然而,现有的以用户为中心的垂直切换算法,大多建立在多个判决属性综合考虑的基础之上,将垂直切换判决过程抽象为多属性决策过程^[1]。具体而言,可以细分为以下3类:(1)阈值判定法^[2,3]:移动节点将接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)作为垂直切换的主要参考标准,当其满足某种

收稿日期:2017-04-05; 改回日期:2017-09-13; 网络出版:2017-11-01

*通信作者:马彬 mab_cqupt@sina.com

基金项目:国家自然科学基金(61471076, 61601070),重庆市基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA40047, cstc2016jcyjA0455),重庆邮电大学博士启动基金(A2014-10, A2014-105, A2015-16)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61471076, 61601070), The Foundation and Advanced Research Program of Chongqing (cstc2015jcyjA40047, cstc2016jcyjA0455), The Doctoral Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2014-10, A2014-105, A2015-16)

条件时做出切换决策。(2)基于模糊逻辑^[4,5]或人工神经网络^[6]的算法:将网络参数的样本值输入到模糊推理系统(Fuzzy Inference System, FIS)或神经网络中进行处理,并根据系统输出进行切换判决。(3)基于效用函数的算法^[7-9]:移动用户将影响网络接入选择的多个参数通过自定义函数的方式,对各候选网络的效用值进行计算和排序,并选择最优者作为接入网络。代表性文献[2]采用阈值判定法并引入切换计时器,在一个计时周期 T 内,如果 RSS 一直保持增加,即 $RSS_{\text{new}} > RSS_{\text{old}}$, 则发生切换。文献[4]选择带宽、时延、抖动和误码率作为 FIS 的输入变量,研究了 QoS 感知的基于模糊规则的多因素切换判决机制。文献[9]考虑切换决策之后网络状况的动态变化对移动终端的服务质量的影响,通过比较切换决策、切换执行和切换之后时刻的基于效用函数的总收益来优化选择最佳切换网络。

以上各类算法都是以用户为中心的策略,在垂直切换时并没有充分考虑网络侧的情况,从而不能有效保证终端接入网络后系统的性能。随着研究的深入,鉴于博弈论具有处理竞争问题的优势,在异构网络中可以较好地平衡网络之间的收益,从而为以网络为中心的策略研究提供了一个方向^[10-12]。代表性文献[10]应用拍卖博弈对垂直切换问题进行建模和分析,将网络作为提供服务的竞价者,用户作为各网络服务的购买者。在得到两个网络价格竞争结果的基础上,推导出异构网络之间的价格竞争结果。文献[11]对 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access), WLAN(Wireless Local Area Networks)和 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)3种网络之间的竞争进行非合作博弈研究,网络的收益因业务类型的不同而不同,各个网络分别以最大化自己的收益为目的进行博弈。文献[12]研究了单一的接入网络因资源有限而不能满足用户服务的情况,采用特征函数来描述网络收益,并对网络之间的博弈行为进行分析,不同网络之间可以相互结盟,作为一个统一的网络为用户提供服务。通过分析可得,博弈论虽然较好地解决了网络之间的利益取向均衡问题,却少有考虑用户侧的 QoS 满意度。而且博弈论需要通过多次迭代求解纳什均衡,计算的时间复杂度相对较高。

针对上述问题,本文提出一种基于双向匹配模型的异构网络垂直切换算法。在垂直切换判决时,算法首先根据用户侧和网络侧的评估模型分别对彼此进行评估和排序;然后基于排序值信息建立双向匹配模型,并通过求解该模型得到最优解;最后用户根据最优匹配结果接入到最合适的网络中。本文

的主要贡献为:

(1)根据用户侧的性价比需求和网络侧的阻塞率需求,分别设计两种不同的评估模型。在垂直切换过程中,用户侧希望以最低的服务费用获得最优的网络服务,即选择性价比最高的网络作为目标网络;而网络侧则希望在消耗一定网络资源的情况下,最大限度地减少接入用户的阻塞率,以增加网络内可容纳的用户数量。因此,本文基于性价比和阻塞率分别设计两种不同的评估方案。

(2)提出一种基于双向匹配模型求解最优匹配结果的垂直切换算法。考虑到用户侧希望接入性价比最高的网络,而网络侧希望选择阻塞率最小的用户。加之在某一时刻,用户只能连接到一个特定的网络,而网络则可以同时接入多个用户。所以,本文通过建立并求解一对多双向匹配模型,可以获得用户侧与网络侧的折中最优解,从而兼顾用户侧的性价比需求和网络侧的阻塞率需求。

2 用户和网络的评估模型

2.1 系统模型

本文的参考网络场景由无线接入网络集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 和终端用户集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 构成,其中包括 m 个基站(Base Station, BS)或接入点(Access Point, AP),以及 n 个用户。为便于理解,如图 1 给出了代表性的接入网分布模型,它是一个由 LTE(Long Term Evolution)和 WLAN 重叠覆盖构成的异构网络。模型中的 2 个 BS 和 3 个 AP 以紧耦合的方式相连,也就是说这两种不同类型的网络通过同一个核心网(Core Network, CN)直接相连。

如果用户 $f_j (f_j \in F, j = 1, 2, \dots, n)$ 处于网络 $e_i (e_i \in E, i = 1, 2, \dots, m)$ 的覆盖范围内,则称该网络 e_i 为用户 f_j 的可接入网络。假设基站 e_i 可接入的最大用户数为 c_i , 则系统的最大用户容量为 $\sum_{i=1}^m c_i = d$, 即系统的最大用户容量 d 等于系统中各个 BS(或 AP)可容纳的用户数之和。可以通过关联矩阵 $A(t)$ 来表

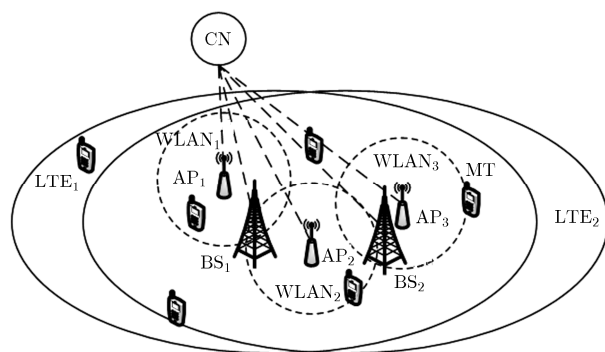


图 1 异构无线网络系统模型

示 t 时刻网络与用户之间的可接入关系：

$$\mathbf{A}(t) = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_n \\ \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \cdots & a_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}(t) & a_{m2}(t) & \cdots & a_{mn}(t) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中, $a_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻用户 } f_j \text{ 可接入网络 } e_i \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 。

对于网络 e_i , 其覆盖范围内的用户数为 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(t)$, 应该满足 $0 \leq \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \leq n$; 同理, 对于用户 f_j , 其可接入的网络数为 $\sum_{i=1}^m a_{ij}(t)$, 应该满足 $0 \leq \sum_{i=1}^m a_{ij}(t) \leq m$ 。

在某一时刻, 用户 f_j 可能同时具有多个可接入网络, 但它至多只能连接到其中的一个网络, 而网络 e_i 则可以同时接入多个用户。可以通过连接矩阵 $\mathbf{B}(t)$ 来表示 t 时刻网络与用户之间的连接关系

$$\mathbf{B}(t) = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_n \\ \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} b_{11}(t) & b_{12}(t) & \cdots & b_{1n}(t) \\ b_{21}(t) & b_{22}(t) & \cdots & b_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1}(t) & b_{m2}(t) & \cdots & b_{mn}(t) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

其中, $b_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻用户 } f_j \text{ 连接到网络 } e_i \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 。

对于网络 e_i , 在 t 时刻服务的用户数为 $\sum_{j=1}^n b_{ij}(t)$, 应该满足 $0 \leq \sum_{j=1}^n b_{ij}(t) \leq \min(c_i, \sum_{j=1}^n a_{ij}(t))$, 在 t 时刻可能存在的两种极端情况: (1)当网络 e_i 的覆盖范围内没有用户时, 即 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(t) = 0$, 则 $\sum_{j=1}^n b_{ij}(t) = 0$ 。(2)当网络 e_i 的覆盖范围有 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(t)$ 个用户时, 如果 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \leq c_i$, 则 $\sum_{j=1}^n b_{ij}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)$, 否则 $\sum_{j=1}^n b_{ij}(t) = c_i$, 因为网络 e_i 服务的用户数不能超过其网络容量。对于用户 f_j , 当前连接的网络数为 $\sum_{i=1}^m b_{ij}(t)$ 应该满足 $0 \leq \sum_{i=1}^m b_{ij}(t) \leq \min(1, \sum_{i=1}^m a_{ij}(t))$, 因为终端在任意时刻至多只能接入到一个网络中。

在异构网络中, 终端需要进行垂直切换的情形主要有以下两种: (1)主动切换: 终端根据个人偏好或者服务质量需求, 主动发起切换; (2)被动切换: 由于终端地理位置变化或接入技术变化, 引起接入点的变化, 导致会话质量的下降而不得不进行切换。

根据用户是否需要切换, 可以将其分为两类: 切换用户和非切换用户。进一步, 通过向量 $\mathbf{H}(t) = [h_{11}(t) \ h_{12}(t) \ \cdots \ h_{1n}(t)]$ 来表示网络 e_i 覆盖范围内用户 f_j 的类型, 其中,

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻用户 } f_j \text{ 为切换用户} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

假设 $S_i(t)$, $T_i(t)$ 分别表示 t 时刻网络 e_i 内的切换用户数和非切换用户数, 则

$$\left. \begin{aligned} S_i(t) &= \sum_{j=1}^n [a_{ij}(t) \cdot h_{ij}(t)] \\ T_i(t) &= \sum_{j=1}^n [a_{ij}(t) \cdot [1 - h_{ij}(t)]] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 用户侧的评估模型

在垂直切换过程中, 用户侧希望以最低的费用获得最优的网络服务, 即选择性价比最高的网络作为目标网络。因此, 本节中终端用户基于服务质量与费用的比值来评估不同的可接入网络。

因为不同的接入网络在发射功率、覆盖半径、可用带宽、资源管理机制等方面存在差异, 这将导致终端用户接收到的来自BS(或AP)的接收信号强度(RSS)、可用带宽、时延等判决参数的差异较大, 从而引起对网络性能统一评估的困难。为了保证参数计算和比较的有效性和精确性, 首先需要对相关参数进行归一化处理。接入网络的参数可以分成两类: 效益型和成本型。其中效益型参数越大越好, 如RSS、可用带宽等; 成本型参数越小越好, 如时延、抖动等。这两类参数的归一化方法如下:

效益型参数:

$$\bar{u}_{ik} = \frac{u_{ik} - u_{ik}^{\min}}{u_{ik}^{\max} - u_{ik}^{\min}} \quad (4)$$

成本型参数:

$$\bar{u}_{ik} = \frac{u_{ik}^{\max} - u_{ik}}{u_{ik}^{\max} - u_{ik}^{\min}} \quad (5)$$

其中, u_{ik} 表示接入网络 e_i 的实际参数值, $u_{ik}^{\max}$ 和 $u_{ik}^{\min}$ 分别表示网络 e_i 可为用户提供的最大和最小参数值, $\bar{u}_{ik}$ 表示参数 u_{ik} 的归一化值, 且 $0 \leq \bar{u}_{ik} \leq 1$ 。

对于用户 f_j , 评估模型的效用函数关于其所获得的网络参数单调递增。因为网络需要满足用户的QoS需求, 所以当用户获得的参数小于QoS需求的临界值时, 用户对网络资源的需求强烈, 此时效用函数的斜率关于用户获得的网络资源单调递增, 反之亦然。根据上述分析, 本节引入机器学习中通用的S函数^[13]来评估不同接入网络的服务质量。

$$Q_i = \frac{N}{1 + \exp \left\{ -\gamma \sum_{k=1}^K [w_k (\bar{u}_{ik} - U_{ik})] \right\}} \quad (6)$$

式中, Q_i 为网络 e_i 的效用值; N, γ 为常数, N 为服务质量修正因子, γ 的大小主要影响效用函数斜率的取值; w_k 表示由层次分析法^[14]求得的第 k 个参数的权值(一共有 K 个参数), $0 < w_k < 1, \sum_{k=1}^K w_k = 1, k = 1, 2, \dots, K$; U_{ik} 表示用户业务对参数 k 的 QoS 需求。

进一步, 根据接入网络 e_i 的服务质量 Q_i 与费用 p_i 的比值, 可以通过建立基于性价比 Q_i/p_i 的模型来评估各个接入网络。

2.3 网络侧的评估模型

在垂直切换过程中, 网络侧希望在消耗一定网络资源的情况下, 最大限度地增加网络中接入的用户数量以提高自身收益, 这就需要用户切换引起的阻塞率尽可能小。因此, 本节中网络基于阻塞率来评估不同的切换用户。

对于网络内某个特定的切换用户 f_j , 他切换所引起的阻塞率与其他切换用户的切换行为有关。所以, 对该用户的阻塞率的评估需要依赖于他对其他切换用户行为的推断。为了推断出其他切换用户的垂直切换行为, 首先需要研究切换用户之间的关系。

在异构网络中, 每个切换用户可能同时具有多个可接入网络, 因而可以基于任意两个切换用户的可接入网络集进行研究。通常, 成对的切换用户之间的关系可以分为两类: 独立关系和关联关系。假设 (f_i, f_j) 为任意一对切换用户, 他们在 t 时刻的可接入网络集分别为 $\mathbf{F}_i(t)$ 和 $\mathbf{F}_j(t)$ 。如果 $|\mathbf{F}_i(t) \cap \mathbf{F}_j(t)| = 0$, 则 f_i 和 f_j 相互独立, 否则两者相互关联。如果 f_i 和 f_j 相互独立, 则两者的网络选择行为互不影响。因而, 在切换过程中只需要考虑相互关联的用户。

为了量化用户之间的关联程度, 定义关联度为: 一对切换用户 (f_i, f_j) 从 $\mathbf{F}_i(t)$ 和 $\mathbf{F}_j(t)$ 中选择目标网络时, 被选择的网络正好是 f_i 和 f_j 的可接入网络集的交集的概率。用 $L(f_i, f_j)$ 表示 (f_i, f_j) 的关联度, 假设 $|\mathbf{F}_i(t) \cap \mathbf{F}_j(t)| = x$, 如图2所示, 则可计算出 $L(f_i, f_j)$:

$$L(f_i, f_j) = \frac{x}{|\mathbf{F}_i(t)| + |\mathbf{F}_j(t)| - x} \quad (7)$$

特别地, 若 $x = 0$, 则 $L(f_i, f_j) = 0$; 若 $L(f_i, f_j) = 1$, 则 $|\mathbf{F}_i(t)| = |\mathbf{F}_j(t)|$ 。如果 f_i 和 f_j 是关联的, 则 $L(f_i, f_j) \in (0, 1]$ 。所以, 式 (7) 中 x 的值域为 $[0, \min(|\mathbf{F}_i(t)|, |\mathbf{F}_j(t)|)]$ 。

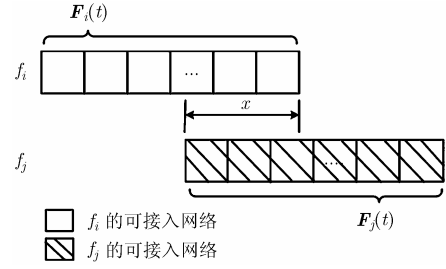


图2 f_i 和 f_j 的关联关系

对于某个切换用户 f_j , 因为他并不知道其他切换用户的网络选择行为, 所以为了评估可接入网络的阻塞率, f_j 需要对 f (f 表示除 f_j 外的其他所有切换用户) 的网络选择行为进行推断。假设在 t 时刻, 网络 e_i 是切换用户 f_j 的可接入网络。如果 f_j 试图切换到网络 e_i 却发生阻塞, 需要同时满足两个条件: (1) 在切换过程中, 用户 f_j 选择网络 e_i 作为目标网络; (2) 在用户 f_j 试图接入网络 e_i 之前, 网络 e_i 已经满载。假设用户 f_j 基于2.2节中的评估模型进行网络选择, 那么性价比越高, 被选为目标网络的概率越大。因此, 网络 e_i 被选为目标网络的概率可表示为 $\rho_{ij}(t)$ 。

$$\rho_{ij}(t) = \frac{Q_{ij}(t)/p_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^m \left\{ a_{ij}(t) \cdot [Q_{ij}(t)/p_{ij}(t)] \right\}} \quad (8)$$

因为 t 时刻网络 e_i 的覆盖区域内有 $S_i(t)$ (包括用户 f_j) 个切换用户, 用 $\beta_j(r_i(t))$ 表示同时有 $r_i(t)$ 个切换用户选择网络 e_i 作为目标网络的概率, 则根据参考文献[15]可以计算 $\beta_j(r_i(t))$:

$$\beta_j(r_i(t)) = \frac{[S_i(t) - 1]!}{[r_i(t)]! \cdot [S_i(t) - 1 - r_i(t)]!} \cdot \rho_{ij}(t) \cdot [1 - \rho_{ij}(t)]^{S_i(t) - 1 - r_i(t)} \quad (9)$$

如果用户 f_j 试图切换到网络 e_i 却发生阻塞, 这就意味着此时网络 e_i 已经满载, 所以 $r_i(t)$ 应满足 $c_i - T_i(t) \leq r_i(t) \leq S_i(t) - 1$ 。那么切换用户 f_j 在 t 时刻对网络 e_i 的阻塞率 $P_{ij}(t)$ 可表示为

$$P_{ij}(t) = \sum_{r_i(t)=c_i-T_i(t)}^{S_i(t)-1} \beta_j(r_i(t)) \quad (10)$$

3 双向匹配模型的建模和求解

3.1 双向匹配模型的建模

在某一时刻 t , 网络 e_i 可以同时接入多个用户, 而用户 f_j 可能同时具有多个可接入网络, 但它至多只能连接到其中的一个网络, 所以, 切换用户 f_j 和网络 e_i 的选择过程可以抽象为一对多的双向匹配模型^[16]。

在双向匹配模型中, 存在着两方集合: 一方为

接入网络集 $\mathbf{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ，另一方为终端用户集 $\mathbf{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。其中， $e_i (e_i \in \mathbf{E}, i = 1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个网络， $f_j (f_j \in \mathbf{F}, j = 1, 2, \dots, n)$ 为第 j 个用户。用 v_i 表示 t 时刻网络 e_i 内实际可接入的用户数，则在匹配结果中，网络 e_i 匹配的用户数为 v_i ；用户 f_j 匹配的网络数为 1。假设 $\mathbf{Y}_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{in}]$ 为网络 e_i 给出的关于终端用户集 $\mathbf{F}$ 的排序值向量，其中 y_{ij} 表示网络 e_i 把用户 f_j 排在第 y_{ij} 位； $\mathbf{Z}_j = [z_{1j} \ z_{2j} \ \dots \ z_{mj}]^T$ 为用户 f_j 给出的关于接入网络集 $\mathbf{E}$ 的排序值向量，其中 z_{ij} 表示用户 f_j 把网络 e_i 排在第 z_{ij} 位。排序值向量 $\mathbf{Y}_i$ 和 $\mathbf{Z}_j$ 的计算基于第2节的评估模型：用户 f_j 的切换阻塞率越低，排序值 y_{ij} 越靠前；接入网络 e_i 的性价比越高，排序值 z_{ij} 越靠前。为了方便分析，可进一步根据 $\mathbf{Y}_i$ 和 $\mathbf{Z}_j$ 分别建立排序值矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 和 $\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n}$ 。

图3所示为代表性的一对多双向匹配模型，其中网络 e_i 和用户 f_j 之间有线相连表示它们之间能进行相互匹配，实线表示最终的匹配结果。定义：在一对多双向匹配 μ 中，若 $e_i = \mu(f_j)$ ，则称匹配对 (e_i, f_j) 为 μ -匹配对。则图中， e_2 和 f_n 匹配， e_m 和 f_1 匹配， e_1 和 f_2 及 f_3 匹配，则 μ -匹配对为 (e_1, f_2) ， (e_1, f_3) ， (e_2, f_n) ， $\dots$ ， (e_m, f_1) 。进一步，一对多双向匹配 μ 可以表示为 $\mu = \{(e_1, f_2), (e_1, f_3), (e_2, f_n), \dots, (e_m, f_1)\}$ 。特别地，假设 μ -匹配对的数目为 g ，若 $g = m$ ，则称 μ 为网络完全匹配；若 $g = n$ ，则称 μ 为用户完全匹配；若 $g = m = n$ ，则称 μ 为双向完全匹配。

对于集合 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 之间的一对多双向匹配 μ ，假设 $\alpha_\mu = \sum_i \sum_j \{y_{ij} | (e_i, f_j) \in \mu\}$ 是 μ 网络侧关于用户的排序值之和， $\beta_\mu = \sum_i \sum_j \{z_{ij} | (e_i, f_j) \in \mu\}$ 是 μ 用户侧关于接入网络的排序值之和， $\Psi_s = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_\tau\}$ 为 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 之间所有一对多双向匹配构成的集合。若 $\alpha_{\mu_E} = \arg \min_{k \in [1, \tau]} \alpha_{\mu_k}$ ， $\mu_E \in \Psi_s$ ，则称 μ_E 为

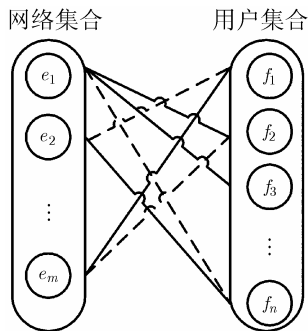


图3 一对多双向匹配模型示意图

集合 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 之间的网络侧最优匹配；若 $\beta_{\mu_F} = \arg \min_{k \in [1, \tau]} \beta_{\mu_k}$ ， $\mu_F \in \Psi_s$ ，则称 μ_F 为主体集合 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 之间的用户侧最优匹配。

3.2 双向匹配模型的求解

3.2.1 一对多双向匹配转化为一对一双向匹配 为了求解上述问题，首先需要将一对多双向匹配模型转化为一对一双向匹配模型，其具体实现如下：

对于网络 e_i ，假设它在某时刻需要匹配的用户 f_j 的数目为 v_i ， $V = \sum_{i=1}^m v_i$ 表示系统中所有接入网络的匹配总数，故可将网络 e_i 视为与其具有同样偏好的 v_i 个虚拟网络，记为 $e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^{v_i}$ ，其中 $e_i^q (q = 1, 2, \dots, v_i)$ 最多只能匹配一个用户。由虚拟网络构成的网络集记为 $\tilde{\mathbf{E}} = \{e_1^1, e_1^2, \dots, e_1^{v_1}, e_2^1, e_2^2, \dots, e_2^{v_2}, \dots, e_m^1, e_m^2, \dots, e_m^{v_m}\}$ ，其中，网络 e_i^q 关于终端用户集 $\mathbf{F}$ 的排序值向量记为 $\mathbf{Y}_i^q = \mathbf{Y}_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{in}]$ 。为便于分析，将网络集重新写为 $\tilde{\mathbf{E}} = \{\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_V\}$ 。

对于用户 f_j ，由于网络主体集为 $\tilde{\mathbf{E}} = \{\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_V\}$ ，故 f_j 关于 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的排序值向量扩展为 V 维向量。设 f_j 关于 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的排序值向量为 $\tilde{\mathbf{Z}}_j = [\tilde{z}_{1j} \ \tilde{z}_{2j} \ \dots \ \tilde{z}_{Vj}]^T = [\tilde{z}_{1j}^1 \ \dots \ \tilde{z}_{1j}^{v_1} \ \tilde{z}_{2j}^1 \ \dots \ \tilde{z}_{2j}^{v_2} \ \dots \ \tilde{z}_{mj}^1 \ \dots \ \tilde{z}_{mj}^{v_m}]^T$ ，其中 $\tilde{z}_{ij}^q$ 为用户 f_j 关于网络 e_i^q 的排序值， $\tilde{z}_{ij}^q$ 与原模型中用户 f_j 关于网络 e_i 的排序值相等，即 $\tilde{z}_{ij}^q = z_{ij}$ 。

接下来仍然以图3为例，进一步说明如何将一对多双向匹配转化为一对一双向匹配。在图3中， e_1 和 f_2 及 f_3 匹配，将这种匹配关系用图4表示。依据以上分析，则可将 e_1 “分解”为与其具有同样偏好的虚拟网络 e_1^1 和 e_1^2 ， e_1^1 匹配 f_2 ， e_1^2 匹配 f_3 ，可将此过程表示为图5。

为了便于分析，基于排序值向量 $\tilde{\mathbf{Y}}_s (s \in \{1, 2, \dots, V\})$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_j (j \in \{1, 2, \dots, n\})$ 分别构建排序值矩阵 $\tilde{\mathbf{Y}} = (\tilde{y}_{sj})_{V \times n}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}} = (\tilde{z}_{sj})_{V \times n}$ 。其中， $\tilde{\mathbf{Y}}$ 为接入网络集 $\tilde{\mathbf{E}}$ 关于终端用户集 $\mathbf{F}$ 的排序值矩阵， $\tilde{\mathbf{Z}}$ 为终端用户集 $\mathbf{F}$ 关于接入网络集 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的排序值矩阵。可将本文的一对多双向匹配模型转化为如下一对一双向匹配模型：网络主体集为 $\tilde{\mathbf{E}} = \{\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_V\}$ ，其中 $\tilde{e}_s$ 表示第 s 个接入网络， $s \in \{1, 2, \dots, V\}$ ；终端用户集为 $\mathbf{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ，其中 f_j 表示第 j 个用户， $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

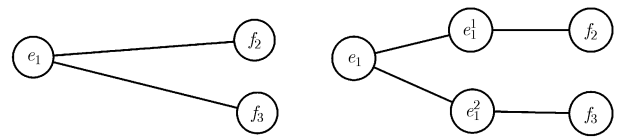


图4 转换前双向匹配问题示意图 图5 转化后双向匹配问题示意图

3.2.2 一对一双向匹配求解 为求解转化后的一对双向匹配模型, 引入 0-1 变量 x_{sj} , 其中 $x_{sj} = \begin{cases} 1, & \mu(\tilde{e}_s) = f_j \\ 0, & \mu(\tilde{e}_s) \neq f_j \end{cases}$, $x_{sj} = 1$ 表示接入网络集 $\tilde{E}$ 与用户 f_j

是存在 μ -匹配对, 否则 $x_{sj} = 0$ 。由于用户或网络给出的排序值代表其偏好顺序, 排序值越小, 偏好度越高。故可以分别以用户的排序值之和最小、网络的排序值之和最小作为优化目标, 建立如式(11)的多目标优化模型

$$\text{Min } M_1 = \sum_{s=1}^V \sum_{j=1}^n \tilde{y}_{sj} x_{sj} \quad (11a)$$

$$\text{Min } M_2 = \sum_{s=1}^V \sum_{j=1}^n \tilde{z}_{sj} x_{sj} \quad (11b)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{s=1}^V x_{sj} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{sj} \leq 1 \end{cases} \quad (11c)$$

$$(11d)$$

在模型式(11)中, 两个目标函数式(11a)和式(11b)的含义分别是使一对双向匹配的用户侧的排序值之和以及网络侧的排序值之和尽可能小。而该模型的约束条件中, 式(11c)和式(11d)的含义分别为每个用户最多只能与一个网络匹配, 每个网络也最多只能与一个用户匹配。

一般而言, $V \neq n$, 故可以采用简单加权法^[17]求解上述多目标优化模型式(11)。设 $M_1^{\min}$ 和 $M_2^{\min}$ 分别为单独考虑目标 M_1 和 M_2 时所得的单目标最优值, $M_1^{\max}$ 和 $M_2^{\max}$ 为相应的单目标最劣值, 则基于最大-最小值法将 M_1 和 M_2 分别归一化为 $\widehat{M}_1$ 和 $\widehat{M}_2$ 。设 θ_1 和 θ_2 分别表示目标 M_1 和 M_2 的权重, 表征了双方在匹配决策中的相对重要程度, 且 $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 1$, $\theta_1 + \theta_2 = 1$, 则模型式(11)可以转化为如式(12)的单目标优化模型

$$\text{Min } M = \theta_1 \widehat{M}_1 + \theta_2 \widehat{M}_2 \quad (12a)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{s=1}^V x_{sj} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{sj} \leq 1 \end{cases} \quad (12b)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{sj} \leq 1 \\ x_{sj} \in \{0,1\}, s = \{1,2,\dots,V\}, j = \{1,2,\dots,n\} \end{cases} \quad (12c)$$

模型式(12)中的目标函数和约束条件均为线性的, 因此可采用整数规划方法^[18]进行求解。

4 仿真结果与复杂度分析

本文以图 1 所示的代表性异构网络环境为例, 使用 MATLAB 进行仿真。具体的仿真参数设置如

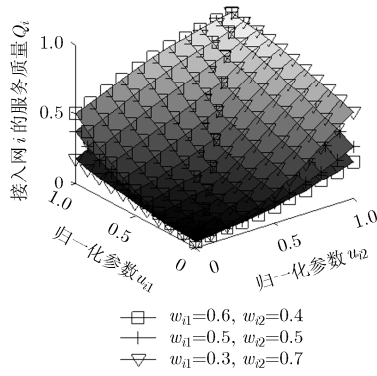
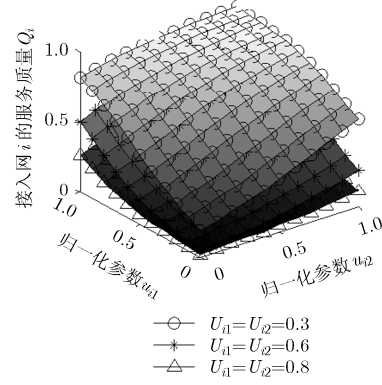
下: 实验场景内分布有 2 个 LTE 和 3 个 WLAN, LTE 和 WLAN 的覆盖半径分别为 1000 m 和 150 m, LTE 的载波频率是 2000 MHz, WLAN 的载波频率是 2500 MHz, 发射功率分别为 45 dBm 和 35 dBm。为了降低实验的复杂度, 首先在仿真区域随机产生了 150 个终端, 每个终端的移动速度均为 10 m/s, 每隔一段时间终端随机改变运动方向。此外, 系统中终端发起呼叫是随机的, 并且这些终端业务的呼叫到达率和离开率均服从参数为 λ 的泊松分布, 平均服务时间为 40 s。假设用户的业务模型包括实时业务和非实时业务两种, 且业务生成间隔为 1 s。本文选取了 RSS、可用带宽、时延、抖动、丢包率和服务费用这 6 个判决参数。

将本文提出的算法与基于代价函数的网络选择策略^[19](Cost Function based Network Selection strategy, CFNS)、基于未来负载预测的自适应负载均衡算法^[20](Adaptive Load Balancing algorithm based on Future Load Predicting, ALB-FLP)和基于层次分析法与简单加权法的多参数切换算法^[14](multi-criteria vertical handoff decision algorithm using Analytic Hierarchy Process and Simple Additive Weighting, AHP-SAW)3 种算法进行对比分析。其中, CFNS 算法是以用户为中心的策略, 该算法重点关注接入网络后用户的 QoS 满意度。ALB-FLP 算法是以网络为中心的策略, 在进行网络选择时通过预测网络未来的负载情况, 让用户接入到负载较轻的网络中。AHP-SAW 算法虽然选择了用户侧和网络侧的参数共同进行切换判决, 在一定程度上兼顾了两方的性能, 但是仅通过简单的效用函数进行网络选择, 灵活性较低。

4.1 用户侧评估模型的影响分析

为了验证用户侧评估模型的合理性, 图6给出了当用户需求量一定时, 即 $U_{i1} = U_{i2} = 0.6$, 不同的权值 w_i 对接入网络服务质量 Q_i 的影响, 图7给出了当权值一定时, 即 $w_{i1} = 0.4, w_{i2} = 0.6$, 不同的用户 QoS 需求量 U_i 对接入网络服务质量 Q_i 的影响。图中示例选择了两个判决参数, 即 $K = 2$, 同时设定 $\gamma = 5$, 以降低实验复杂度。

从图6可以得出, 随着判决参数的权重 w_i 增加, 网络接入服务质量 Q_i 也随之增加。其增长速度与 w_i 的取值有关: w_i 越大, 表示该参数 u_i 在切换判决时的相对重要程度越大, 网络接入服务质量 Q_i 随该参数值的增长也就越快, 反之亦然。从图7可以看出, 当判决参数的权重 w_i 一定时, 接入网络服务质量 Q_i 的曲面图中, 拐点出现的坐标点因 QoS 需求量 U_i 的不同而不同。此外, 当网络状况一定时, 用户业务

图6 不同 w_i 对QoS变化的影响图7 不同 T_i 对QoS变化的影响

对网络参数的需求量 U_i 越高, 接入网络的服务质量 Q_i 值就越低, 表征用户对该网络的满意度也越低。

因为2.1节中用户侧的评估模型是基于性价比来建立的, 所以图8仿真分析了网络中不同的服务质量 Q_i 、不同的服务费用 p_i 与性价比之间的关系, 实验过程中将服务费用归一化到区间 $(0, 4]$ 中。可以看出, 性价比与用户所获得的服务质量 Q_i 成正比, 与所需的服务费用 p_i 成反比。当服务质量 Q_i 一定时, 所需的服务费用 p_i 越高, 则选择该网络的性价比越低; 当服务费用 p_i 一定时, 所提供的服务质量 Q_i 越高, 则选择该网络的性价比越高。

4.2 网络侧评估模型的影响分析

为了验证网络侧评估模型的合理性, 如图9、图10所示分别分析了切换用户数 $S_i(t)$ 和性价比 Q_i/p_i 对网络 e_i 的阻塞率的影响, 以及切换用户数 $S_i(t)$ 和网络容量 c_i 对网络 e_i 的阻塞率的影响。从图9可以看出, 当网络 e_i 的性价比一定时, 其覆盖范围内的切换用户数越多, 引起的阻塞率越高; 反之亦然。这是因为用户的切换行为之间会相互影响, 当网络趋于满载时, 切换用户数越多, 越容易引发阻塞。另外, 当切换用户数一定时, 网络的性价比越高, 该网络越容易发生阻塞。因为网络的性价比越高, 其覆盖范围内的用户选择该网络作为目标网络的概率越大, 越容易发生阻塞。由图10可得, 当网络 e_i 的容量 c_i 一定时, 其覆盖范围内的切换用户数越多, 引起的阻塞率越高; 反之亦然。另外, 当切换用户数一定时, 网络容量 c_i 越大, 表明该网络能同时服务的用户数越多, 所引起的阻塞率也就越小。

4.3 系统性能的分析

当采用4种不同的算法进行垂直切换时, 用户所接入的目标网络的性价比曲线, 如图11所示。可以看出, 本文算法的性价比虽然略低于CFNS算法, 但始终高于AHP-SAW算法和ALB-FLP算法。这说明本文算法在改善系统其他性能的同时, 很大程

度上保证了用户的性价比需求, 没有造成用户体验的大幅度下降。其中, CFNS算法的性价比最高, 本文算法和AHP-SAW算法次之, ALB-FLP算法最低。这是因为CFNS算法是以用户为中心的策略, 它进行网络选择时只关注用户侧的QoS满意度, 可以获得较好的性能。而ALB-FLP算法是以网络为中心的策略, 它始终让用户接入到负载较轻的网络中去, 忽略了用户的服务质量体验。AHP-SAW算法虽然在一定程度上兼顾了用户侧和网络侧的性能, 但是只通过简单的效用函数进行网络排序和选择, 灵活性较低, 性能也相对较差。

图12为4种算法的阻塞率曲线。可以看出, 当 $\lambda \leq 0.3$ 时, 4种算法的阻塞率都很小, 接近于0; 当 $\lambda > 0.3$ 时, 随着系统呼叫到达率的增加, 4种算法的阻塞率也不同程度地增加。但是在相同到达率的情况下, 本文算法的阻塞率始终相对较低。这是因为当用户进行垂直切换时, 本文算法评估了用户的切换行为对网络阻塞率的影响, 只允许阻塞率较低的用户接入, 从而有效减小了切换阻塞率。

4.4 时间复杂度的分析

本文算法的时间复杂度与系统中的候选网络数量 m 、终端用户数 n 、判决参数个数 K 、考虑的业务类型 l 等有关。其中, m, n, K, l 等的数值越大, 计算的时间复杂度越高。在本文中, $m = 5, n > 150, K = 6, l = 2$, 涉及这些参量的数值计算对MATLAB软件来说计算量比较小, 而且在算法实现中的目标函数和约束条件都是线性的, 可以采用经典的整数规划方法进行求解, 并不涉及繁复的迭代计算, 所以本文算法的时间复杂度相对较低。

5 结束语

本文在异构无线网络环境下, 提出了一种基于双向匹配模型的垂直切换算法。该算法重点关注用户侧的高QoS和低服务费用需求, 以及网络侧的低

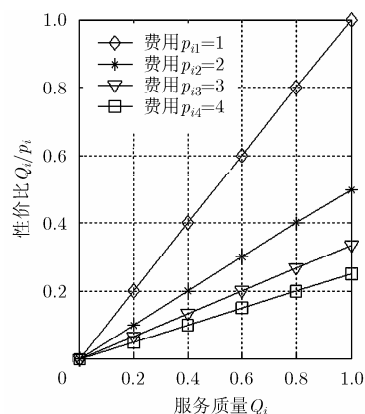


图 8 不同QoS、不同价格与性价比的关系

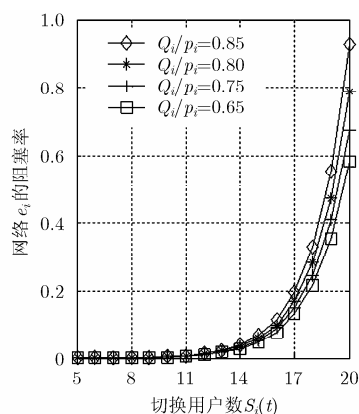


图 9 网络性价比对阻塞率的影响

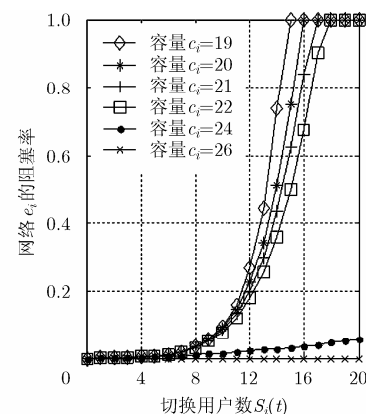


图 10 网络容量对阻塞率的影响

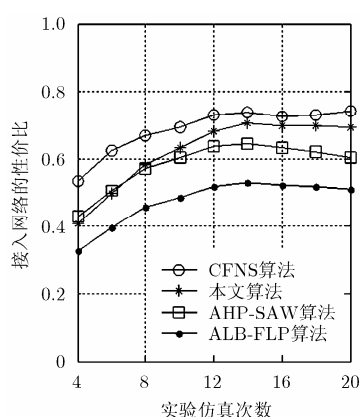


图 11 不同切换算法的性价比

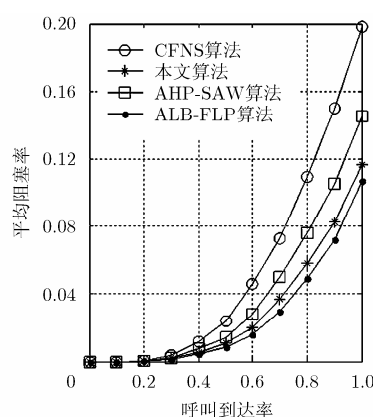


图 12 切换的平均阻塞率

阻塞率需求, 将两者的双向选择行为建模为双向匹配模型, 并通过求解该模型得到双向匹配的折中最优解。仿真结果验证了本文设计的模型的合理性, 并且相较于现有算法, 本文算法能较好地实现高性价比和低阻塞率的最佳折中, 改善垂直切换的综合性能。

参考文献

- [1] GOUDARZI S, WAN H H, ANISI M H, *et al.* MDP-based network selection scheme by genetic algorithm and simulated annealing for vertical-handover in heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 92(2): 399–436. doi: 10.1007/s11277-016-3549-5.
- [2] HAIDER A, GONDAL I, and KAMRUZZAMAN J. Dynamic dwell timer for hybrid vertical handover in 4G coupled networks[C]. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, 2011: 1–5. doi: 10.1109/VETECS.2011.5956636.
- [3] WANG L S and KUO G S. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks — A tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, 15(1): 271–292. doi: 10.1109/SURV.2012.010912.00044.
- [4] VASU K, MAHESHWARI S, MAHAPATRA S, *et al.* QoS-aware fuzzy rule-based vertical handoff decision algorithm incorporating a new evaluation model for wireless heterogeneous networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012: 322. doi: 10.1186/1687-1499-2012-322.
- [5] WU J S and HUEY R S. Improved joint radio resource management usage grey fuzzy control in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Internet Technology*, 2015, 16(5): 777–788. doi: 10.6138/JIT.2015.16.5.20130319.
- [6] ALOTAIBI N M and ALWAKEEL S S. A neural network based handover management strategy for heterogeneous networks[C]. 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications, Miami, FL, 2015: 1210–1214. doi: 10.1109/ICMLA.2015.65.
- [7] NING Z L, SONGQ Y, and LIUY J. Markov-based vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2014, 40(2): 456–472. doi: 10.1016/j.compeleceng.2013.10.012.
- [8] YU C H, MA D, WANG F, *et al.* A novel vertical handoff algorithm based on differential pre-decision and improved utility-function method[J]. *International Journal of Future*

- Generation Communication and Networking*, 2016, 9(3): 87–96. doi: 10.14257/ijfgen.2016.9.3.09.
- [9] 马彬, 谢显中, 廖晓峰. 车辆异构网络中预测垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 874–880. doi: 10.11999/JEIT140845.
- MA B, XIE X Z, and LIAO X F. Prediction vertical handoff algorithm in vehicle heterogeneous network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 874–880. doi: 10.11999/JEIT140845.
- [10] KONKA J. Auction-based network selection in a market-based framework for trading wireless communication services [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 1365–1377. doi: 10.1109/TVT.2013.2280344.
- [11] KHAN M S Z, ALAM S, and KHAN M R H. A network selection mechanism for fourth generation communication networks[J]. *Journal of Advances in Information Technology*, 2010, 1(4): 189–196. doi: 10.4304/jait.1.4.189-196.
- [12] ANTONIOU J, KOUKOUTSIDIS I, JAHÖ E, *et al.* Access network synthesis game in next generation networks[J]. *Elsevier Computer Networks*, 2009, 53(15): 2716–2726. doi: 10.1016/j.comnet.2009.06.006.
- [13] ILIEV A, KYURKCHIEV N, and MARKOV S. On the approximation of the step function by some sigmoid functions[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2017, 133(4): 223–234. doi: 10.1016/j.matcom.2015.11.005.
- [14] BHOSALE S and DARUWALA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm using analytic hierarchy modeling and simple additive weighting in an integrated WLAN/WiMAX/UMTS environment — A case study[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2014, 8(1): 35–57. doi: 10.3837/tiis.2014.01.003.
- [15] LI Q, JIE L, and CORINNE T. A user centered multi-objective handoff scheme for hybrid 5G environments[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, 5(3): 380–390. doi: 10.1109/TETC.2016.2551042.
- [16] 乐琦, 樊治平. 基于不完全序值信息的双边匹配决策方法[J]. 管理科学学报, 2015, 18(2): 23–35.
- YUE Q and FAN Z P. Decision method for two-sided matching based on incomplete ordinal number information[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(2): 23–35.
- [17] REIMANN O, SCHUMACHER C, and VETSCHERA R. How well does the OWA operator represent real preferences [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258(3): 993–1003. doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.037.
- [18] BORRERO J S, GILLEN C, and PROKOPYEV O A. A simple technique to improve linearized reformulations of fractional (hyperbolic) 0-1 programming problems[J]. *Operations Research Letters*, 2016, 44(4): 479–486. doi: 10.1016/j.orl.2016.03.015.
- [19] SHEN W and ZENG Q A. Cost-function-based network selection strategy in integrated wireless and mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3778–3788. doi: 10.1109/TVT.2008.917257.
- [20] 潘甦, 张磊, 刘胜美. 基于未来负载预测的无线异构网络自适应负载均衡算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6), 1384–1390. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.06.24.
- PAN S, ZHANG L, and LIU S M. Adaptive load balancing algorithm based on future load predicting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(6): 1384–1390. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.06.24.
- 马 彬: 男, 1978 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为异构无线网络、认知无线电网络等.
- 邓 红: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为异构无线网络中无线资源管理.
- 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.