



专题:异构网络

基于匹配博弈的车辆异构网络选择算法

张 瑞,胡 静,夏玮玮

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要:针对车辆在异构网络覆盖环境下的网络接入选择问题,基于双边匹配博弈中稳定匹配的相关概念,提出一种车辆异构网络选择博弈模型,通过用户侧与网络侧的双向选择得到异构网络选择的稳定匹配。算法首先利用层次分析法获得相应权重分配以给出满意度函数,然后将网络侧的一对多匹配转化为一对一匹配问题,在稳定匹配条件下构建多目标优化模型,并求解最优匹配结果。相关性能分析及仿真实验表明,基于稳定匹配的博弈模型相对于传统决策模型,能够使网络 and 用户侧双方的满意度最优化,从而得到双向网络选择的均衡状态。

关键词:异构网络;稳定匹配;层次分析法;满意度;网络选择

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015233

Network Selection Algorithm Based on Stable Matching Game in Vehicular Heterogeneous Network

Zhang Rui, Hu Jing, Xia Weiwei

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A gaming method of vehicular heterogeneous network selection was proposed, to solve the network access problem of vehicles in heterogeneous network coverage. Based on the concepts of stable matching in two-sided matching game, stable matching of network selection was obtained through the mutual selection between users and networks. Firstly, the corresponding weights were calculated by using AHP to obtain the satisfaction function, then, one-to-many two-sided matching problem was converted into one-to-one two-sided matching problem, and optimal matching results could be obtained by constructing the multi-objective optimization model under the condition of stable matching. The performance analysis and simulation results show that the proposed model based on stable matching optimizes the satisfaction degree of both the network and user sides, and thus the equilibrium state of two way network selection was obtained, compared to the traditional selection-making model.

Key words: heterogeneous network, stable matching, analytic hierarchy process, satisfaction degree, network selection

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61372104, No.61201175),江苏省科技成果转化专项基金资助项目(No.BA2010023)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61372104, No.61201175), The Specialized Development Foundation for the Achievement Transformation of Jiangsu Province (No.BA2010023)

论文引用格式:张瑞,胡静,夏玮玮. 基于匹配博弈的车辆异构网络选择算法. 电信科学, 2015233

Zhang R, Hu J, Xia W W. Network selection algorithm based on stable matching game in vehicular heterogeneous network. Telecommunications Science, 2015233

1 引言

随着无线通信技术的快速发展,移动接入网络的多样化和异构性将成为智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)的重要特征。在流动性大、拓扑变化快的车辆通信网络中,单一网络无法满足多种车辆应用的服务质量需求,而在异构网络环境下,车辆可根据网络特性选择适合自身需求的接入网络,从而获得较高的服务质量。因此,如何寻求最佳的车辆异构网络选择策略,使得车辆选择最合适、最有效的接入网络已成为智能交通领域的一个热点问题^[1-4]。

目前,车辆自组织网络(vehicular Ad Hoc network, VANET)是一种应用广泛的通信接入网络,它基于移动自组织网络技术,可以灵活地实现车辆间(vehicle-to-vehicle, V2V)以及车辆与路边单元间(vehicle-to-RSU, V2R)的数据通信^[5-7]。除此之外,以 3G(WCDMA/TD-SCDMA/cdma2000)、4G(TDD/FDD LTE)等通信技术为代表的通用移动通信系统(universal mobile telecommunications system, UMTS),基于 IEEE 802.11a/b/g/n/ac 标准的无线局域网(wireless local area network, WLAN)和基于 IEEE 802.16 系列标准的无线城域网也逐步成为车辆接入网络的几种主要方式^[8,9],各异构接入网络适用于不同的应用场景并提供不同质量的服务,如图 1 所示。异构网络环境下的网络选择是指在多种覆盖网络中选择一种最优的网络接入方式,使得系统在此方式下目标值(带宽、时延、服务质量等)可以达到最佳。传统的异构网络选择机制通常以用户为中心,通过考虑用户满意度或效用函数,基于某些特定性能参数的特点,采取不同的选择标准以决定网络选择判决策略^[10-13]。此

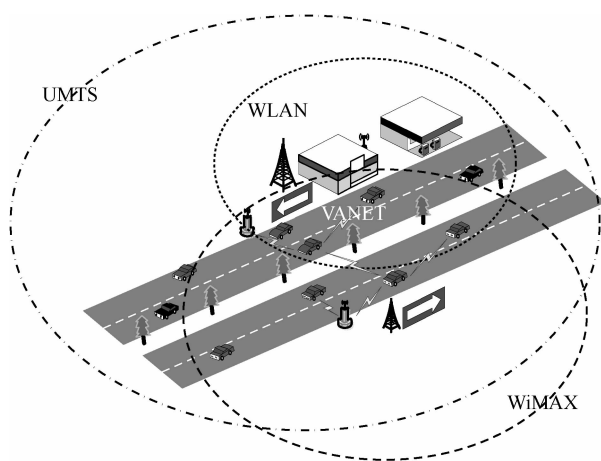


图 1 车辆异构网络接入场景示意

外,为了克服传统判决策略不够灵活的特点,参考文献[14,15]将网络选择建模为博弈问题,从网络侧以博弈方式对用户进行分配,并引入网络容量和效率等以解决可能的冲突问题;在此基础上,参考文献[16]引入了经济学模型中的定价机制来解决网络的资源分配问题。

上述研究大都只着眼于一个角度,进行网络选择时要么只考虑用户侧,要么只考虑网络侧,从而降低了网络的整体收益。因此,在限定条件下,车辆和网络如何进行有效的相互选择成为车辆异构网络一个重要的研究方向。本文提出了一种新的基于稳定匹配博弈的车辆异构网络选择算法,将网络选择过程建模为一对多双边匹配问题,通过博弈使用户侧和网络侧实现双向选择,从而达到稳定匹配提升异构网络选择整体性能的目的。

2 匹配博弈相关概念

2.1 匹配博弈问题

匹配博弈起源于男女婚配问题及大学录取问题的相关研究^[17],在婚配问题中,每位男士最多只能与一位女士匹配,反之亦然,这种情形下的匹配称为一对一双边匹配。在大学录取问题中,每所学校可招收多名学生,而每位学生只能进入一所学校,这种情形下的匹配称为一对多双边匹配。匹配博弈的双方隶属于两个互不相交的集合,且位置不能互换,相互间只有经过双方一致同意才能形成匹配。若每一个参与者的匹配对象都是可接受的,且不存在一对匹配参与者,他们都偏好于匹配其他未匹配者,则这样的匹配为稳定匹配。Gale 等人分别于 1962 年和 1985 年证明了匹配博弈中稳定匹配的存在性以及稳定匹配就是匹配博弈的均衡点^[17,18];Roth 和 Demange 等人的研究表明,对于网络选择的匹配博弈模型,通过参与人的独立决策,最终能够收敛于稳定匹配^[19,20];Irving 等人在此基础上着重分析了一对多双边匹配中强稳定性的概念^[21,22];Martinez 等人研究了在个体理性条件下一对多双边匹配的匹配条件,并给出阻碍稳定对相关定理^[23];Wang 等人的研究进一步表明稳定匹配是一种纳什均衡状态^[24]。

车辆异构网络场景包含多种接入网络和众多车辆用户,每种接入网络都可以为多个车辆提供接入服务,而每个用户同时只能接入单一网络,那么车辆异构网络选择问题可以建模为一对多双边匹配博弈。为了便于分析,记网络侧为甲方,用户为乙方,在第 2.2 节和第 2.3 节中通过给出相关定义来阐述一对多双边匹配和稳定一对多双边匹



配的概念。

2.2 一对多双边匹配

设甲方主体集合为 $A=\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$, 其中 A_i 代表第 i 个甲方主体, $i \in I$; 乙方主体集合为 $B=\{B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_n\}$, 其中 B_j 代表第 j 个乙方主体, $j \in J$; A_i 期望匹配的乙方主体数目为 c_i , $\sum_{i=1}^m c_i=d$; 令 $I=\{1, 2, \dots, m\}$, $J=\{1, 2, \dots, n\}$, $Z=\{1, 2, \dots, d\}$ 。根据参考文献[25,26], 给出如下定义, 对一对多双边匹配的相关概念进行描述。

定义 1 多值映射 μ 称为甲方主体集合 A 与乙方主体集合 B 之间的一对多双边匹配, 当且仅当 $\forall A_i \in A, \forall B_j \in B$ 满足以下条件: $\mu(A_i) \subseteq A_i \cup B_j$; $\mu(B_j) \subseteq A_i \cup B_j$; 若 $\mu(A_i)=\{B_j, B_{j_1}, \dots, B_{j_p}\}$, 其中 $\{j_1, j_2, \dots, j_p\} \subseteq J$, 则 $\mu(B_{j_1})=A_i, \dots, \mu(B_{j_p})=A_i$; 若 $\mu(B_j)=A_i$, 则 $B_j \in \mu(A_i)$; $\mu(A_i) \cap \mu(A_p) = \emptyset, \forall p \in I, i \neq p$ 。

定义 2 在一对多双边匹配 μ 中, 若 $A_i=\mu(B_j)$, 则称主体对 (A_i, B_j) 为 μ -匹配主体对。特别地, 若 $A_i=\mu(A_i)$, 则称主体对 (A_i, A_i) 为 μ -匹配主体对; 若 $B_j=\mu(B_j)$, 则称主体对 (B_j, B_j) 为 μ -匹配主体对。

由定义 1 和定义 2 可知, 在一对多双边匹配中, $\mu(B_j)=A_i$ 与 $\mu(A_i)=B_j$ 均可表示 A_i 与 B_j 匹配, $\mu(A_i)=A_i$ 表示 A_i 未匹配, $\mu(B_j)=B_j$ 表示 B_j 未匹配, 值得注意的是, 若有 $c_i=1, i \in I$, 则一对多双边匹配就转化为一对一双边匹配, 此时 μ 为单值映射, 即每个甲方主体最多与一个乙方主体匹配。

2.3 稳定一对多双边匹配

在一对多双边匹配问题中, 设 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 为甲方主体 A_i 关于乙方主体的满意度序值向量, 其中 r_{ij} 表示甲方主体 A_i 把乙方主体 B_j 排在第 r_{ij} 位, $x_{ij} \in J$; 设 $T_j=(t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jm})^T$ 为乙方主体 B_j 关于甲方主体的满意度序值向量, 其中 t_{ij} 表示乙方主体 B_j 把甲方主体 A_i 排在第 t_{ij} 位, $t_{ij} \in I$ 。分别建立序值矩阵 $R=[r_{ij}]_{m \times n}$ 与 $T=[t_{ij}]_{m \times n}$ 。根据参考文献[27,28], 给出如下定义, 对稳定一对多双边匹配的相关概念进行描述。

定义 3 对于一对多双边匹配 μ , 若主体对 (A_i, B_j) 满足下列 4 种情况之一: $\exists A_i, A_p \in A, B_j, B_s \in B, B_s \in \mu(A_i), B_j \in \mu(A_p)$, 满足 $r_{ij} < r_{is}$ 且 $t_{ij} < t_{ps}$; $\exists A_i \in A, B_j, B_s \in B, B_s \in \mu(A_i), \mu(B_j)=B_j$, 满足 $r_{ij} < r_{is}$; $\exists A_i, A_p \in A, B_j \in B, B_j \in \mu(A_p), \mu(A_i)=A_i$ 满足 $t_{ij} < t_{pj}$; $\exists A_i \in A, B_j \in B, \mu(A_i)=A_i, \mu(B_j)=B_j$; 则称主体对 (A_i, B_j) 为 μ -阻碍稳定对。

定义 4 对于一对多双边匹配 μ , 若不存在 μ -阻碍稳定对, 称 μ 为稳定匹配, 反之则称 μ 为不稳定匹配。设 μ -

匹配主体对 (A_i, B_j) 的数目为 λ , 若 $\lambda=d$, 则称 μ 为甲方完全匹配, 若 $\lambda=n$, 则称 μ 为乙方完全匹配, 若 $\lambda=d=n$, 则称 μ 为双方完全匹配。

由定义 3 和定义 4 可知, 若 μ 既为甲方完全匹配, 又为乙方完全匹配, 则 μ 为双方完全匹配, 可进一步推知: 稳定匹配 μ 必为甲方完全匹配或者乙方完全匹配, 因为若 μ 既不为甲方完全匹配, 又不为乙方完全匹配, 则一定至少存在一个主体对 (A_i, B_j) , 其中 $\mu(A_i)=A_i, \mu(B_j)=B_j$, 此时 (A_i, B_j) 为 μ -阻碍稳定对, 故 μ 为不稳定匹配。

定义 5 对于集合 A 和 B 的一对多双边匹配 μ , 设 $\alpha_\mu = \sum_i \sum_j \{r_{ij} | (A_i, B_j) \in \mu\}$, $\beta_\mu = \sum_i \sum_j \{t_{ij} | (A_i, B_j) \in \mu\}$, 则称 α_μ 为 μ 的甲方序值和, β_μ 为 μ 的乙方序值和。

定义 6 设 $\Psi_e = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_\tau\}$ 为集合 A 和 B 之间的所有稳定一对多双边匹配所构成的集合, 若 $\alpha_{\mu_k} = \min\{\alpha_{\mu_l} | k = \{1, 2, \dots, \tau\}\}$, $\mu_k \in \Psi_e$, 则称 μ_k 为甲方最优稳定匹配; 若 $\beta_{\mu_k} = \min\{\beta_{\mu_l} | k = \{1, 2, \dots, \tau\}\}$, $\mu_k \in \Psi_e$, 则称 μ_k 为乙方最优稳定匹配。

由定义 5 和定义 6 可知, 在双方主体集合间所有的稳定一对多双边匹配中, 甲方的最优稳定匹配是使甲方序值和最小的匹配, 乙方的最优稳定匹配是使乙方序值和最小的匹配。由于序值越小, 其对应的满意度越高, 因此也可认为甲方最优稳定匹配是使甲方满意度最高的稳定匹配, 乙方最优稳定匹配是使乙方满意度最高的稳定匹配。

3 基于匹配博弈的网络选择算法

3.1 系统模型

为实现车辆在任何地区任何时间灵活、高效地接入网络, 车联网中的异构网络场景通常包含多个接入网络, 例如公众 WLAN、3G/4G 移动蜂窝网络、车载 Ad Hoc 网络 (VANET)、WiMAX 网络等, 每种类型的接入网络都能为用户 (车辆) 提供接入服务, 车辆可以接入任何单一网络但不限制于特定网络。这样, 网络侧和用户侧构成互不相交的两个主体集合, 分别由 $A=(A_i | i=1, 2, 3, 4)$ 和 $B=(B_j | j=1, 2, \dots, n)$ 表示, 其中 A_i 代表上述 4 种接入网络, B_j 代表位于覆盖区的车辆用户。由第 2 节分析可知, 车辆异构网络的接入选择为一对多双边匹配博弈过程, 如图 2 所示, 用户集合和网络集合之间在一定的决策条件下进行双向的相互选择, 同时用户侧和网络侧由于都有各自的需求及目标, 每个决策或动作都可以被认为是理性的。假设某个时刻在异构网络的多重覆盖区域内存在多个车辆用户, 为了便于分析,

认为车辆可选择接入的网络集合是相同的,每个车辆用户每时刻只能接入单一网络,而每个接入网络每时刻能够接入多个车辆用户。在此场景下,影响网络和用户双方选择的因素有很多,在用户侧,车辆需要根据自身的参数及需求选择一个最优的接入网络,同样网络侧也需要根据自身的信道及资源状态来选择合适的车辆用户。同时,每种因素对接入选择的影响程度也不同,因此需要确定每个因素的权重系数,进而综合考虑得到各主体元素的满意度序值。本文所提出的网络选择算法核心思想是在稳定匹配的条件下,通过层次分析法给出网络侧和用户侧的满意度序值矩阵,并利用此序值矩阵求解出使得双方主体满意度都尽可能大的一对多双边匹配结果。

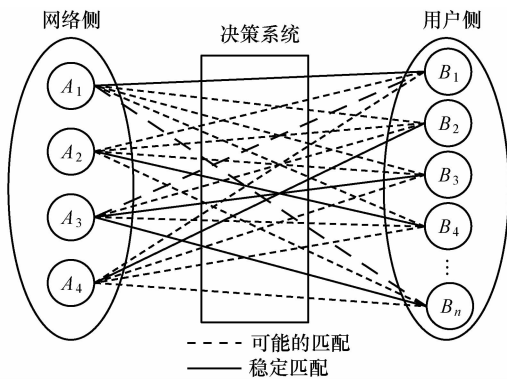


图 2 车辆异构网络的一对多双边匹配模型

3.2 层次分析法

根据车辆所处网络环境的网络资源和用户需求,本文选取如下参数作为网络选择的综合判决指标:用户侧的判决参数包括车辆的移动速度(v)、业务服务质量(q)、可承受价格(ε)、占用网络带宽(δ),并进一步使用误码率(α)、时延(τ)和平均重传次数(θ)来表征业务服务质量;同样,网络侧的判决参数包括可支持的速度(nv)、可提供的服务质量(nq)、服务价格($n\varepsilon$)和可用网络带宽($n\delta$),并且用误码率($n\alpha$)、时延($n\tau$)和平均重传次数($n\theta$)来表征可提供的服务质量。将网络侧和用户侧主体集合中的元素 A_i 和 B_j 表示为参数形式 $\bar{A}_i = (A_i^m, A_i^q, A_i^{\varepsilon}, A_i^{\delta})$ 和 $\bar{B}_j = (B_j^v, B_j^q, B_j^{\varepsilon}, B_j^{\delta})$,其中 $q = (\alpha, \tau, \theta)$, $nq = (n\alpha, n\tau, n\theta)$, $\bar{A}_i$ 和 $\bar{B}_j$ 中的元素分别代表相应主体元素的各状态参数值。一般来说,每个参数对于接入选择的影响程度不同,用户满意度 S_{ij}^v 和 S_{ij}^q 分别表示网络 A_i 选择用户 B_j 和用户 B_j 选择网络 A_i 时各自的偏好值,即博弈模型的效用函数。

$$S_{ij}^i = \sum_{\bar{A}_i \in \{A_i^m, A_i^q, A_i^{\varepsilon}, A_i^{\delta}\}} W_{\bar{A}_i} S_{\bar{A}_i} \quad (1)$$

$$S_{ij}^j = \sum_{\bar{B}_j \in \{B_j^v, B_j^q, B_j^{\varepsilon}, B_j^{\delta}\}} W_{\bar{B}_j} S_{\bar{B}_j} \quad (2)$$

其中, $w_{A_i^{nq}} S_{A_i^{nq}} = \sum_{k \in \{n\alpha, n\tau, n\theta\}} w_{A_i^k} S_{A_i^k}$, $w_{B_j^q} S_{B_j^q} = \sum_{k \in \{\alpha, \tau, \theta\}} w_{B_j^k} S_{B_j^k}$ 。网络 A_i 选择用户 B_j 和用户 B_j 选择网络 A_i 时关于各参数的满意度偏好值 S_{A_i} 和 S_{B_j} 分别按如下方式计算:

$$S_{A_i^m} = \begin{cases} 1, & A_i^m \geq B_j^v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{A_i^{nq}} = \begin{cases} 1, & A_i^{nq} \geq B_j^q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{A_i^{\varepsilon}} = \begin{cases} -\frac{A_i^{\varepsilon} - B_j^{\varepsilon}}{B_j^{\varepsilon}}, & A_i^{\varepsilon} \leq B_j^{\varepsilon} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{A_i^{\delta}} = \begin{cases} \frac{A_i^{\delta} - B_j^{\delta}}{A_i^{\delta}}, & A_i^{\delta} \geq B_j^{\delta} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{B_j^v} = \begin{cases} 1, & B_j^v \leq A_i^m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{B_j^q} = \begin{cases} \frac{B_j^q - A_i^{nq}}{B_j^q}, & B_j^q \geq A_i^{nq} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{B_j^{\varepsilon}} = \begin{cases} \frac{B_j^{\varepsilon} - A_i^{\varepsilon}}{B_j^{\varepsilon}}, & B_j^{\varepsilon} \geq A_i^{\varepsilon} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$S_{B_j^{\delta}} = \begin{cases} -\frac{B_j^{\delta} - A_i^{\delta}}{A_i^{\delta}}, & B_j^{\delta} \leq A_i^{\delta} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $w_{\bar{A}_i}$ 和 $w_{\bar{B}_j}$ 分别为网络侧和用户侧各判决参数的影响权重,为了达到最优化的选择,本文采用层次分析法来赋予不同的权重系数^[29,30]。

(1) 建立层次结构模型

分析网络选择问题,根据有关参数的属性划分不同的层次,一般将问题分为目标层、准则层和方案层,同一层中的参数从属于上层参数同时支配下层参数。本文建立的层次结构模型如图 3 所示,由于网络侧和用户侧的判决参数一致,故均可按此分层模型计算权重值。

(2) 构造判断矩阵

对图 3 的层次模型,设全部判决参数变量 $X = \{x_1, x_2, \dots,$

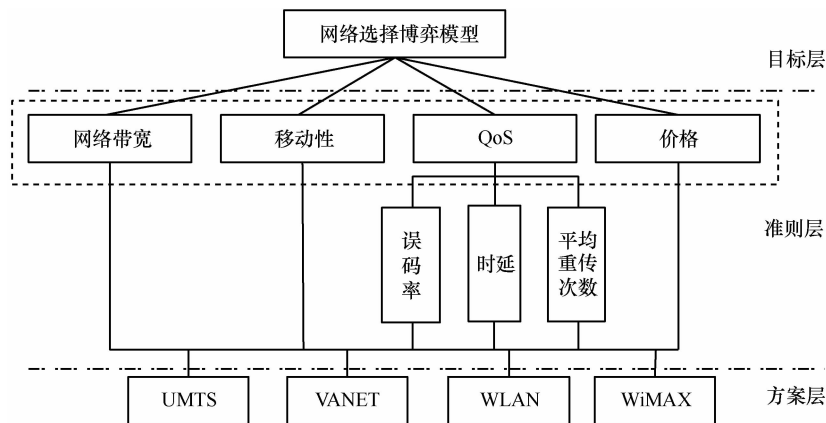


图3 异构网络选择的层次结构模型

$x_m\}$, 每次选取两个变量 x_i 和 x_j , 两两比较其相对重要程度, 得到两两比较判断矩阵。

$$Q=(a_{ij})_{m \times m} \quad (11)$$

其中, Q 中元素应满足 $a_{ij}>0, a_{ij}=\frac{1}{a_{ji}} (i,j=1,2,\dots,m)$ 。

经大量实验得出, 关于 a_{ij} 通常以 1~9 作为标度得到的结果最优, 见表 1。

表 1 判断矩阵中标度及含义

x_i/x_j	相等	较强	强	很强	绝对强
a_{ij}	1	3	5	7	9

(3) 计算权重

通常利用方根法计算判决参数的权重, 首先计算矩阵每一行元素乘积。

$$W_i = \prod_{j=1}^m a_{ij} \quad (12)$$

W_i 的 m 次方根 $\bar{W}_i = \sqrt[m]{W_i}$, 对向量 $W=(\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_m)^T$ 进行归一化处理, 即:

$$u_i = \bar{W}_i / (\sum_{i=1}^m \bar{W}_i) \quad (13)$$

则 $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为各判决参数的权重值。

(4) 一致性检验

由于判断矩阵 Q 的确定具有主观性, 因此需对其进行一致性检验, 分别计算矩阵的一致性指标 C_i 和随机一致性比率 C_R 。

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (14)$$

$$C_R = \frac{C_i}{R_1} \quad (15)$$

其中, R_1 为平均随机一致性指标, 其值在参考文献[6]

中给出。当 $C_R < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性可以接受, 否则需要进行调整以满足一致性。

由上述步骤可以确定网络选择过程中网络和用户两方各判决参数的权重值, 进而求得相应用效函数。当网络 A_i 获得关于所有用户 B_j 的满意度 S_{ij}^i 时, 将这些满意度值由大到小进行排序, 可得网络 A_i 关于用户的满意度序值向量 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 其中 r_{ij} 表示 A_i 网络把用户主体 B_j 排在第 r_{ij} 位; 同理可得用户关于网络的满意度序值向量 $T_j = (t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jm})^T$, 其中 t_{ij} 表示用户 B_j 把网络主体 A_i 排在第 t_{ij} 位。

3.3 一对多双边匹配模型求解

为了求解一对多双边匹配问题, 首先将其转化为一对一双边匹配问题。由于网络主体集合中的元素所期望匹配的用户主体数目为 c_i , 故可将看作 c_i 个虚拟网络主体 $A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^{c_i}$, 且虚拟主体 A_i^q 与 A_i 均有相同的满意度序值, 每个虚拟主体最多只能匹配一个用户主体。将由虚拟主体所表示的网络主体集合记作 $\tilde{A} = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_d\}$, $d = \sum_{i=1}^m c_i$, 其中的满意度序值向量记作 $\tilde{R}_z = \{\tilde{r}_{z1}, \tilde{r}_{z2}, \dots, \tilde{r}_{zn}\}$, 有:

$$\tilde{r}_{zs} = \begin{cases} r_{1s}, 1 \leq z \leq c_1 \\ r_{2s}, c_1 + 1 \leq z \leq c_1 + c_2 \\ \vdots \\ r_{ms}, c_1 + \dots + c_{m-1} + 1 \leq z \leq c_1 + \dots + c_m \end{cases}, s \in j \quad (16)$$

对于用户主体集合中的元素 B_j , 需将其关于网络主体集合的满意度序值向量扩展为 d 维, 可得 B_j 关于 $\tilde{A}$ 的满意度序值向量为 $\tilde{T}_j = (\tilde{t}_{j1}, \tilde{t}_{j2}, \dots, \tilde{t}_{jd})^T = (\tilde{t}_{1j}^1, \dots, \tilde{t}_{1j}^{c_1}, \tilde{t}_{2j}^1, \dots, \tilde{t}_{2j}^{c_2}, \dots, \tilde{t}_{mj}^1, \dots, \tilde{t}_{mj}^{c_m})^T$, 其中 $\tilde{t}_{ij}^q$ 为 B_j 关于网络主体 A_i^q 的满意度序值, 且与原一对多双边匹配中 B_j 关于网络主体 A_i 的满意度序值相同, 即 $\tilde{t}_{ij}^q = t_{ij}$ 。为便于分析, 分别建立满意度序值矩阵 $\tilde{R} = [\tilde{r}_{zj}]_{d \times n}$ 和 $\tilde{T} = [\tilde{t}_{zj}]_{d \times n}^{[27]}$, 则可将原一对多双边匹配

问题表示为如下一对一双边匹配问题。

网络主体集合为 $\tilde{A} = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_d\}$, 其中 $\tilde{A}_z$ 表示第 z 个网络主体, $z \in Z$; 用户主体集合为 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$, 其中 B_j 表示第 j 个用户主体, $j \in J$ 。网络主体集合 $\tilde{A}$ 关于用户主体的满意度序值矩阵为 $\tilde{R}$, 用户主体集合 B 关于网络主体的满意度序值矩阵为 $\tilde{T}$ 。

对上述一对一双边匹配问题, 可建立多目标优化函数, 同时考虑网络和用户主体的满意度以及稳定匹配条件, 通过最优化模型求解稳定匹配结果。首先引入变量:

$$e_{zj} = \begin{cases} 1, \mu(\tilde{A}_z) = B_j \\ 0, \mu(\tilde{A}_z) \neq B_j \end{cases} \quad (17)$$

由定义 3 和定义 4 可知, 在稳定一对一双边匹配 μ 中, 若 $\mu(\tilde{A}_z) \neq B_j$, 为使 $(\tilde{A}_z, B_j)$ 不构成 μ -阻碍稳定对, 必须至少满足以下两个条件中的一个:

- $\mu(\tilde{A}_z) = B_s$, 其中 $B_s \in B, \tilde{r}_{zs} < \tilde{r}_{zj}$;
- $\mu(\tilde{A}_p) = B_j$, 其中 $\tilde{A}_p \in \tilde{A}, \tilde{t}_{pj} \leq \tilde{t}_{zj}$ 。

则稳定匹配的约束条件可表示为^[14,15]:

$$e_{zj} + \sum_{s: \tilde{r}_{zs} < \tilde{r}_{zj}} e_{zs} + \sum_{p: \tilde{t}_{pj} \leq \tilde{t}_{zj}} e_{pj} \geq 1, z \in Z, j \in J \quad (18)$$

主体元素的满意度序值越小, 代表其满意度越高, 因此以网络和用户主体的序值和最小为目标函数, 可建立如下多目标优化模型:

$$\min Y_1 = \sum_{z=1}^d \sum_{j=1}^n \tilde{r}_{zj} e_{zj}, \min Y_2 = \sum_{z=1}^d \sum_{j=1}^n \tilde{t}_{zj} e_{zj} \quad (19)$$

为了便于求解此模型, 可采用基于隶属函数的线性加权法和法将其转化为单目标优化问题^[16]。定义 $Y_1^{\min}$ 和 $Y_2^{\min}$ 分别为 Y_1 和 Y_2 的单目标最优值, $Y_1^{\max}$ 和 $Y_2^{\max}$ 为相应的单目标最劣值, 则两目标的隶属函数分别为:

$$\mu_{Y_1} = \frac{Y_1 - Y_1^{\min}}{Y_1^{\max} - Y_1^{\min}}, \mu_{Y_2} = \frac{Y_2 - Y_2^{\min}}{Y_2^{\max} - Y_2^{\min}} \quad (20)$$

多目标优化模型(19)可转化为如下单目标优化模型:

$$\min \bar{Y} = \omega_1 \mu_{Y_1} + \omega_2 \mu_{Y_2} \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n e_{zj} \leq 1, z \in Z \\ \sum_{z=1}^d e_{zj} \leq 1, j \in J \\ e_{zj} + \sum_{s: \tilde{r}_{zs} < \tilde{r}_{zj}} e_{zs} + \sum_{p: \tilde{t}_{pj} \leq \tilde{t}_{zj}} e_{pj} \geq 1, z \in Z, j \in J \end{cases} \quad (22)$$

其中, ω_1 和 ω_2 分别为目标 μ_{Y_1} 和 μ_{Y_2} 的权重, $\omega_1 \geq 0$, $\omega_2 \leq 1$, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 反映了双方主体在匹配决策过程中的偏重

程度。在实际车辆异构网络的接入选择问题中, 考虑到网络侧和用户侧双方博弈的公平性, 一般取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。由于式(21)(目标函数)和式(22)(约束条件)均为线性, 故可通过整数规划方法对此优化模型进行求解, 若网络选择问题的主体规模较大, 也可采用智能优化算法或启发式搜索来求解匹配结果。

4 仿真分析及结果

本文通过仿真实验对所提算法的正确性和有效性进行验证, 仿真场景为图 1 中的异构网络重叠覆盖区, 区域内有多个车辆用户, 且存在 UMTS、WiMAX、WLAN 以及 VANET 4 种网络, 不同网络的状态参数各不相同, 考虑在此场景下, 车辆和网络进行双向网络选择的情况。根据参考文献[31]所进行的相关研究, 假设有 n 个车辆用户均匀分布在异构网络覆盖区域, 其运行速度均为 40 km/h, 车辆用户有 4 种类型的业务服务需求: 会话类业务、流媒体业务、交互类业务和背景类业务, 不同业务类型的典型应用和 QoS 特性见表 2。

表 2 车辆用户的业务需求分类

业务类型	典型业务	QoS 特性
会话类	语音通信	时延低, 信道带宽小
	视频通信	时延低, 信道带宽大
交互类	互联网浏览和搜索	一定的可靠性, 相对低的时延, 下行速率高
流媒体	视频流媒体点播; FTP 文件传输	可靠性高, 信道带宽大, 允许一定的时延
背景类	电子邮件、SMS	可靠性高, 允许时延

在某网络选择时刻, 为获得稳定双边匹配, 需要对网络和用户双方的参数进行分析, 假设每个用户随机分配表 2 中的 4 种业务之一, 首先给出车辆用户的业务需求和各网络的状态信息, 见表 3 和表 4。

在给定用户业务和网络状态参数后, 对网络和用户双方主体的满意度偏好值进行分析, 采用层次分析法分别对双方主体的参数权重进行计算。需要注意的是, 在计算层次结构中的第二层权重时, 需区分不同的用户业务和网络类型, 根据业务对 QoS 的需求等相关信息调整判决参数的比较矩阵。以会话类业务为例, 最终所求得的网络侧和用户侧参数判断矩阵见表 5 和表 6。

采用层次分析法获得相应参数权重后, 可计算得到网络和用户各主体的满意度及排序后的序值向量, 图 4 和图 5 分别给出了在不同业务类型条件下, 用户选择网络和



表3 用户业务需求参数

业务类型	承受价格 ε	占用带宽 $n\delta/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	误码率 $n\alpha$	时延 $n\tau/\text{ms}$	平均重传次数 $n\theta$
会话类	1	1	0.06	10	0.5
交互类	0.8	1.5	0.07	15	0.8
流媒体	1	2	0.08	15	1.2
背景类	0.7	2	0.08	25	1.5

表4 网络状态信息参数

网络类型	支持速度 $nv/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	服务价格 $n\varepsilon$	可用带宽 $n\delta/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	误码率 $n\alpha$	时延 $n\tau/\text{ms}$	平均重传次数 $n\theta$
UMTS	120	0.9	2	0.02	5	0.4
WiMAX	120	0.5	5	0.04	6	0.6
WLAN	20	0.3	10	0.08	10	0.9
VANET	120	0.1	1	0.09	8	1.5

表5 网络侧参数主判断矩阵

Q	nv	nq	$n\varepsilon$	$n\delta$	u
nv	1	0.33	1	0.14	0.002 3
nq	3	1	3	2	0.882 5
$n\varepsilon$	1	0.33	1	5	0.080 9
$n\delta$	7	0.5	0.2	1	0.034 3

表6 用户侧参数主判断矩阵

Q	v	q	ε	δ	u
v	1	5	7	5	0.980 3
q	0.2	1	2	0.5	0.001 2
ε	0.14	0.5	1	0.17	0.000 1
δ	0.2	2	6	1	0.013 5

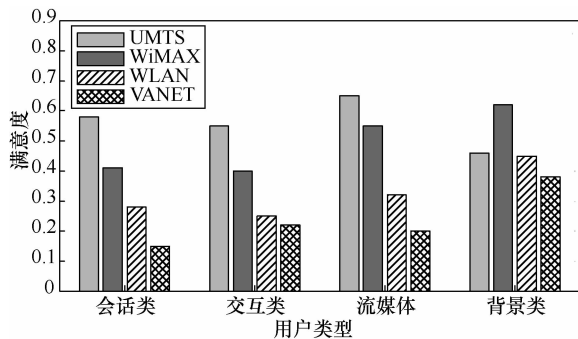


图4 用户选择网络的满意度偏好值

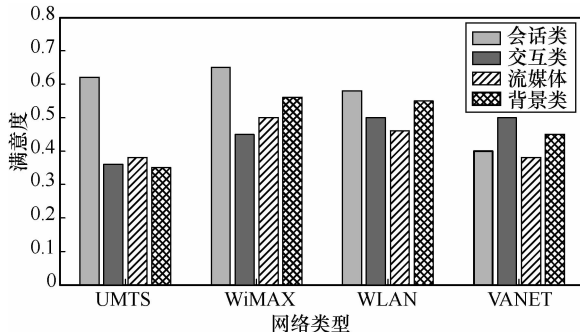


图5 网络选择用户的满意度偏好值

网络选择用户的满意度偏好值。算法利用此满意度序值向量,通过求解最优化模型得到网络选择的稳定匹配结果。

为了分析基于匹配博弈的网络选择算法的性能,将算法与参考文献[10]和参考文献[14]中的两种经典算法进行了仿真对比,其中一种算法是由用户主导进行网络接入决策,另一种是由网络主导进行网络接入决策,比较结果如图6和图7所示。可以看到所提算法的平均满意度位于两

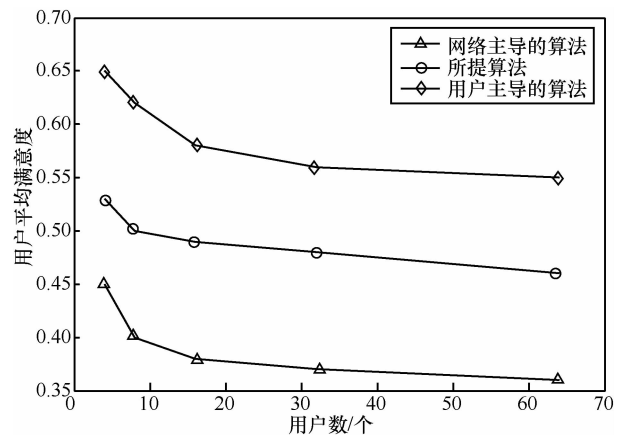


图6 算法的用户平均满意度

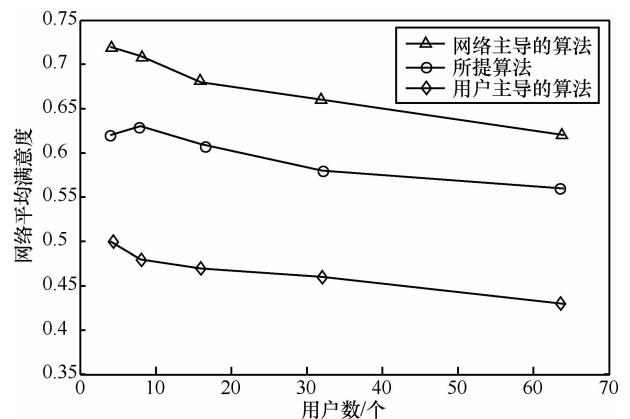


图7 算法的网络平均满意度

种经典算法之间,表明其综合考虑了网络方的利益以及用户的服务体验,在用户主导和网络主导的两种算法中找到一个均衡点,得到了使网络和用户双方满意度最优化的网络接入模式,提高了网络资源的利用率。

5 结束语

本文提出了一种适用于车辆异构网络场景的网络选择算法,不同于传统的仅考虑用户侧或网络侧的选择判决策略,该算法基于一对多双边匹配博弈模型和层次分析法,充分考虑车辆移动性、业务服务质量需求、服务价格和网络带宽等影响车辆异构网络选择的因素,获得相应权重分配,以给出满意度函数,并构建多目标优化模型,将一对多匹配转化为一对一匹配问题,通过用户侧与网络侧的双向选择得到网络选择博弈模型的稳定匹配。通过仿真验证表明,基于稳定匹配的博弈模型相对传统决策模型能够使网络和用户侧双方的满意度最优化,从而达到博弈的均衡状态。该算法可以充分提高资源的利用率,实现负载均衡,在同时存在多个可选网络的车辆异构网络环境中具有一定的实用前景。

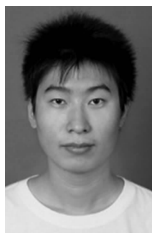
参考文献

- Ren Z, Fertl P, Liao Q, *et al.* Street-specific handover optimization for vehicular terminals in future cellular networks. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden, Germany, 2013
- Ahmed A, Boulahia L M, Gaïti D. Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: a state-of-the-art and a classification. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 776~811
- Kaveh S, Alireza A, Victor C M L. Optimal distributed vertical handoff strategies in vehicular heterogeneous networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(3): 534~544
- Ma B, Deng H, Xie X Z, *et al.* An optimized vertical handoff algorithm based on Markov process in vehicle heterogeneous network. China Communications, 2015, 12(4): 106~116
- Li Y, Zhao M, Wang W. Intermittently connected vehicle-to-vehicle networks: detection and analysis. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, USA, 2011
- Yang Q, Zheng J, Shen L. Modeling and performance analysis of periodic broadcast in vehicular Ad Hoc networks. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, USA, 2011: 5790~5794
- 吴怡, 杨琼, 吴庆祥等. 基于自组织映射神经网络的 VANET 组网算法. 通信学报, 2011, 32(12): 136~145
Wu Y, Yang Q, Wu Q X, *et al.* Networking algorithm based on self-organizing map neural network for VANET. Journal of Communications, 2011, 32(12): 136~145
- P802.11pD11.0. IEEE Unapproved DraftStd, IEEE Draft Standard for Amendment to Standard Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Networks-Specific Requirements-Part II: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications -Amendment6: Wireless Access in Vehicular Environments, 2010
- Araniti G, Campolo C, Condoluci M, *et al.* LTE for vehicular networking: a survey. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5):148~157
- Cai X J, Chen L, Sofia R, *et al.* Dynamic and user-centric network selection in heterogeneous networks. Proceedings of IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, New Orleans, Louisiana, USA, 2007: 538~544
- Pei X, Jiang T, Qu D, *et al.* Radio-resource management and access-control mechanism based on a novel economic model in heterogeneous wireless networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 3047~3056
- Song Q, Jamalipour A. Network selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(3): 42~48
- Chen Y, Yang N, Chang C. A utility function-based access selection method for heterogeneous WCDMA and WLAN networks. Proceedings of IEEE Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Los Alamitos, California, 2007
- Vatev J H. Linear programming brings marital bliss. Operations Research Letters, 1989, 8(3): 1~23
- Roth A E, Rothblum U G, John H, *et al.* Stable matchings, optimal assignments and linear programming. Mathematics of Operations Research, 1993, 18(4): 803~828
- Chen Y W, Wang C H, Lin S J. A multi-objective geographic information system for route selection of nuclear waste transport. Omega, 2008, 36(3): 363~372
- Gale D, Shapley L. College admissions and the stability of marriage. American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9~15
- Gale D, Sotomayor M. Some remarks on the stable matching problem. Discrete Applied Mathematics, 1985, 11(3): 223~232
- Roth A E, Oliveira Sotomayor M A. Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis. London: Cambridge University Press, 1992



- 20 Gabrielle D, Myrna W. Group Formation in Economics: Networks, Clubs, and Coalitions. London: Cambridge University Press, 2005
- 21 Irving R W, Manlove D F, Scott S. The hospitals/residents problem with ties. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, 1851(1): 259~271
- 22 Irving R W, Manlove D F, Scott S. Strong stability in the hospitals/residents problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2607(1): 439~450
- 23 Martinez R, Masso J, Neme A, *et al.* The blocking lemma for a many-to-one matching model. *Journal of Mathematical Economics*, 2010, 46(5): 937~949
- 24 王烨, 李雨生. 稳定匹配问题中的纳什均衡. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2013, 41(1): 155~158
Wang Y, Li Y S. Nash equilibrium in stable matching problems. *Journal of Tongji University (Natural, Science)*, 2013, 41(1): 155~158
- 25 Roth A E. On the allocation of residents to rural hospitals: a general property of two-sides matching markets. *Econometrica*, 1986, 54(2): 425~427
- 26 李铭洋, 樊治平, 乐琦. 考虑稳定匹配条件的一对多双边匹配决策方法. *系统工程学报*, 2013, 28(4): 454~463
Li M Y, Fan Z P, Le Q. Decision analysis method for one-to-many two-sided matching considering stable matching condition. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(4): 454~463
- 27 Roth A E. The evolution of the labor market for medical interns and residents: a case study in game theory. *Journal of Political Economy*, 1984, 92(6): 991~1016
- 28 Roth A E, Sotomayor M. The college admissions problem revisited. *Econometrica*, 1989, 57(3): 559~570
- 29 梁立涛, 纪阳, 张平. 基于模糊层次分析法的异构系统网络选择算法. *北京邮电大学学报*, 2007, 30(2): 71~75
Liang L T, Ji Y, Zhang P. A network selection algorithm based on fuzzy analytic hierarchy process in heterogeneous systems. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2007, 30(2): 71~75
- 30 徐鹏, 方旭明, 向征等. 异构网络选择的一种新博弈模型. *电讯技术*, 2011, 51(2): 27~33
Xu P, Fang X M, Xiang Z, *et al.* A novel game model for heterogeneous network selection. *Telecommunication Engineering*, 2011, 51(2): 27~33
- 31 默罕莫德·默森, 毛云川, 张瑞等. 一种适用于车联网的无线接入多模网关系统. *电信科学*, 2014, 30(4): 74~81
Mohamed M, Mao Y C, Zhang R, *et al.* A wireless access multimode gateway system applied in internet of vehicle. *Telecommunications Science*, 2014, 30(4): 74~81

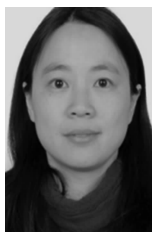
[作者简介]



张瑞,男,东南大学移动通信国家重点实验室博士生,主要研究方向为移动自组织网络、无线定位、短距离无线通信等。



胡静,女,博士,东南大学移动通信国家重点实验室副研究员,主要研究方向为短距离无线通信、泛在网络等。



夏玮玮[通讯作者],女,博士,东南大学移动通信国家重点实验室副教授,主要研究方向为异构网络融合与短距离无线通信。