

异构无线网络中基于模糊逻辑的分级垂直切换算法

马 彬 李尚儒* 谢显中

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

(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: 在异构无线网络中, 针对综合考虑网络端和用户端参数的垂直切换算法, 参数权重难以确定, 同时基于模糊逻辑的垂直切换算法存在复杂度高的问题, 该文提出一种基于模糊逻辑的分级垂直切换算法。首先, 将接收信号强度(RSS)、带宽、时延输入到1级模糊逻辑系统, 结合规则自适应匹配, 推理出QoS模糊值, 并通过QoS模糊值对网络进行初步筛选得到候选网络集; 然后通过触发机制触发2级模糊逻辑系统, 并将候选网络的QoS模糊值、网络负载率、用户接入费用输入2级模糊逻辑系统, 同时结合规则自适应匹配, 得到输出判决值, 从而选择最佳接入网络。最后, 实验结果表明, 该算法能保证网络性能的同时, 降低系统的时间开销。

关键词: 异构无线网络; 模糊逻辑; 复杂度; 自适应规则匹配; 触发机制

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0629-08

DOI: [10.11999/JEIT190190](https://doi.org/10.11999/JEIT190190)

A Hierarchical Vertical Handover Algorithm Based on Fuzzy Logic in Heterogeneous Wireless Networks

MA Bin LI Shangru XIE Xianzhong

(*Institute of Computer Science and Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

(*Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

Abstract: In the heterogeneous wireless networks, the parameter weight is difficult to determine for the vertical handover algorithm considering the parameters of the network and the user, at the same time, the vertical handover algorithm based on fuzzy logic has high complexity. Considering this problem, a hierarchical vertical handover algorithm based on fuzzy logic is proposed. Firstly, the Received Signal Strength (RSS), bandwidth and delay are input into the first-level fuzzy logic system. Combining with the rule adaptive matching, the QoS fuzzy value is inferred, and the network is initially filtered by the QoS fuzzy value to obtain the candidate network set; Then, the second-level fuzzy logic system is triggered by the trigger mechanism, and the QoS fuzzy value, network load rate and user access cost of the candidate network are input into the second-level fuzzy logic system. At the same time, the output decision value is obtained by combining the adaptive rule matching, so as to select the best access network. Finally, the experimental results show that the algorithm can guarantee the network performance while reducing the time cost of the system.

Key words: Heterogeneous wireless networks; Fuzzy logic; Complexity; Rule adaptive matching; Trigger mechanism

收稿日期: 2019-03-27; 改回日期: 2019-06-13; 网络出版: 2019-07-03

*通信作者: 李尚儒 lishangru93@163.com

基金项目: 重庆市教委科学技术研究重大项目(KJZD-M201900602), 重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K201800603), 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0432), 重庆邮电大学博士启动基金(A2015-16), 重庆市研究生教育教学改革研究重点项目(yjg182024), 重庆市高等教育教学改革研究项目(193095)

Foundation Items: The Major Project of Science and Technology Research of Chongqing Education Commission (KJZD-M201900602), The Key Project of Science and Technology Research of Chongqing Education Commission (KJZD-K201800603), The Foundation Research and Advanced Exploration Project of Chongqing (cstc2018jcyjAX0432), The Doctoral Startup Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2015-16), The Key Project of Chongqing Graduate Education&Teaching Reform (yjg182024), The Project of Chongqing Graduate Higher Education&Teaching Reform (193095)

1 引言

随着无线技术的发展,下一代无线网络将会是多种无线接入技术共同组成,可提供多种接入方式、支持终端无缝移动的异构无线网络。在这种复杂的异构网络环境下,不同类接入点之间发生的切换称为垂直切换。在垂直切换过程中,如何设计一种综合考虑网络端和用户端多参数的垂直切换算法,使用户可以选择最佳接入网络^[1],成为学术界研究的热点问题。

目前,国内外针对垂直切换技术的研究已经有很多,根据现有的采取研究方法的不同,垂直切换算法大致可以分为:基于接收信号强度(Receive Signal Strength, RSS)的切换算法^[2,3]、基于效用函数的切换算法^[4-6]、基于神经网络的切换算法^[7-9]和基于模糊逻辑的切换算法^[10-15]。在这些算法中,基于RSS和基于效用函数的算法实现简单,但前者容易造成乒乓切换,后者灵活性较低;基于神经网络的算法精确性高的同时,复杂度也高;而模糊逻辑算法能对模糊信息进行量化,准确度高。切换判决涉及多种参数,其中很多参数难以量化,同时网络动态变化,导致参数具有模糊性,因此为使网络选择更加准确,本文采用基于模糊逻辑的垂直切换算法进行切换判决。

当前已有不少研究者考虑异构网络中用户端和网络端相结合的最佳接入算法。文献^[4]基于效用函数的算法,综合考虑了网络端和用户端的多个参数,虽然算法过程简单,但参数权重难以确定,同时未考虑参数的模糊性。文献^[11]提出一种基于模糊逻辑的切换算法,除了考虑网络端参数数据速率和接收信号强度,还考虑了接入费用和终端速度来选择最优网络。文献^[12]提出一种利用模糊逻辑减少乒乓切换的垂直切换方案,通过将当前网络的信噪比和带宽、目标网络的信噪比和带宽、终端剩余电量输入模糊逻辑得到输出值,从而用输出值和临界值比较进行判决。以上算法都考虑了多个网络端性能参数,同时考虑了有关用户侧的参数,这使得切换更加准确,用户满意度更高,但在使用模糊逻辑时,输入参数增加会导致规则数急剧增加,同时使得推理规则的设计更为复杂,因此当参数较多时,基于模糊逻辑的垂直切换算法存在复杂度过高的问题。

针对上述问题,本文提出一种降低复杂度的基于模糊逻辑的分级垂直切换算法。在垂直切换判决时,先通过1级模糊逻辑系统和规则自适应匹配得到服务质量(Quality of Service, QoS)模糊值,并对网络进行筛选;其次,根据触发机制触发2级模糊

逻辑系统,并通过2级模糊逻辑系统和规则自适应匹配得到输出判决值;最后,比较所有候选网络的判决值选择最佳切换网络。本文的主要贡献可概括为:

(1) 设计分级的模糊逻辑系统,通过1级模糊系统的筛选和触发机制,减少2级的使用,从而降低系统的计算量。

(2) 自适应规则匹配,采用一个推理引擎,根据两级模糊系统的划分,匹配相应的规则,减少了规则数,使规则设计更为简单,从而降低系统开销。

2 模糊逻辑复杂度分析

模糊逻辑系统通常有3个模块,分别是模糊化模块,模糊推理模块和去模糊化模块。整个系统的复杂度主要集中在模糊推理模块,在模糊推理模块中,需要根据输入参数的数量和模糊等级值的数量设计相应的规则,规则的数量 l 为

$$l = c^k \quad (1)$$

其中, c 为模糊等级值的数量, k 为输入参数的数量。当输入参数增加时,规则数成指数倍增加,因此,当输入参数过多时,会使规则过多,从而导致规则设计困难和系统复杂度急剧上升,同时,规则的数量也会影响去模糊化的复杂度。本文所提的垂直切换算法主要从模糊逻辑的复杂度入手,在输入参数较多的情况下,减少模糊推理的规则数。

3 分级模糊逻辑系统

本文设计分级分阶段的方式进行切换判决,并且综合考虑了网络端和用户端,两级模糊逻辑系统分别在两个阶段中完成,2级模糊逻辑系统由触发机制来触发。选取RSS、带宽、时延,负载率、网络接入费用作为判决参数,切换算法总流程主要包括两个阶段,第1阶段网络性能参数通过1级模糊逻辑系统得到QoS模糊值,并根据QoS模糊值对网络进行筛选。在此基础上,通过触发机制判断候选集中网络的数量,若候选集中网络的个数小于等于1,则所有网络去模糊化得到QoS精确值,最终通过选择QoS最大的网络执行切换;若候选集网络个数大于1,则触发第2阶段的2级模糊逻辑系统,通过2级模糊逻辑系统得到输出值,并选择输出值最大的网络执行切换。判决算法示意图如图1所示。

3.1 模糊逻辑系统设计

本文的分级模糊逻辑系统由1级模糊逻辑系统和2级模糊逻辑系统组成,如图2所示。在1级模糊逻辑系统中,选取RSS、带宽、时延这3个重要参数作为评价接入网络的性能指标。RSS反映用户到网络接入点之间的通信质量,RSS过低时,会导致通信中断。网络的带宽是指网络所能提供的最大传

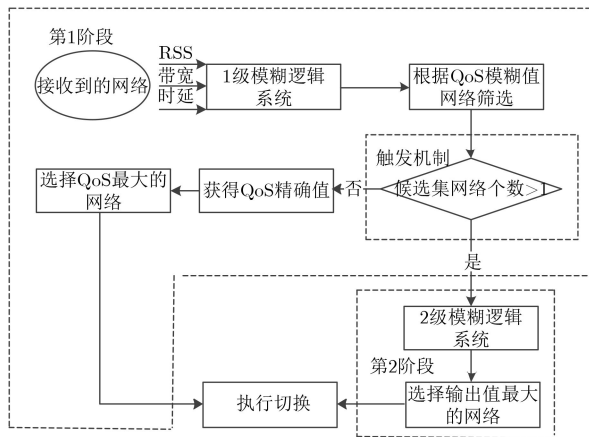


图1 判决算法示意图

输速率，时延是数据从发送端到传输端所需的时间。1级模糊逻辑在得到QoS模糊值的同时，也对网络进行初步筛选，以减少整个算法的计算量，同时保证候选网络中网络的性能。1级模糊逻辑系统主要包括模糊化、模糊推理这两个模块。在2级模糊逻辑系统中，可选择任意提高用户满意度的参数，

本文选用网络负载率和网络接入费用作为判决参数，来提高用户的满意度，同时可以平衡网络负载。由于不同网络的接入费用不同，而费用是影响大部分用户满意度的直接因素，本文定义费用上限为1元，负载率表示当前网络接入的终端数与网络最大可容纳终端数的比值，若网络负载率过高，会导致网络资源的竞争，降低用户的服务体验。负载率表示为

$$P = \lambda / \eta \quad (2)$$

其中， P 为当前网络负载率， λ 为当前网络接入的终端数， η 为网络最大可容纳终端数。2级模糊逻辑系统主要包括模糊化、模糊推理、去模糊化这3个模块。

(1)模糊化模块：模糊化是将精确的参数值用模糊语言集合进行描述，通过隶属度函数将其映射为 $[0,1]$ 区间上的值，该值称为隶属度，表示参数属于此模糊集合的程度，值越大，说明参数属于此集合的程度越高。RSS、带宽、时延、负载率、费用通过隶属度函数进行模糊化，本文模糊逻辑系统的输入参数和输出隶属度函数如图3所示，输入参数

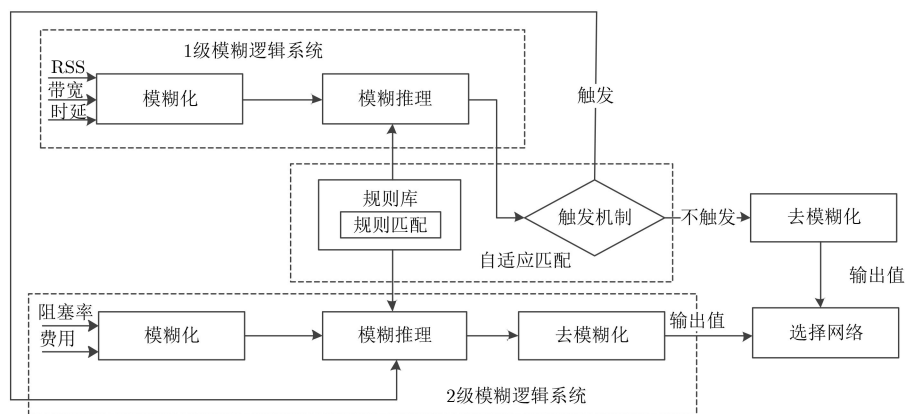


图2 分级模糊逻辑系统

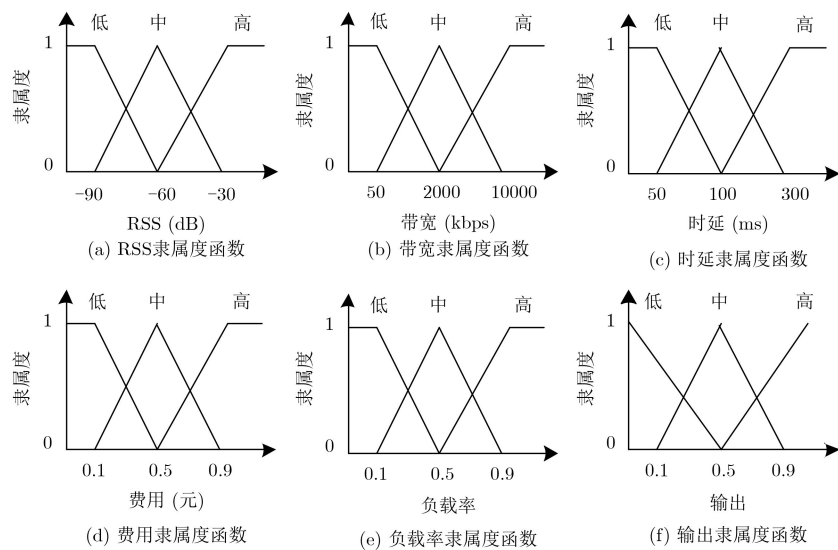


图3 模糊逻辑隶属度函数

的隶属度函数通过梯形和三角形隶属度函数相结合的方式设计,输出隶属度函数采用三角形隶属度函数,将5个参数和模糊推理后得到的输出都定义有3个模糊逻辑等级{低、中、高}。三角型隶属度函数如图4所示, α 和 γ 分别为模糊集的上、下限, β 为隶属度函数 $\mu(x)$ 峰值所对应的输入参数 x 的取值。三角型隶属度函数的隶属度计算式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}, & \alpha < x \leq \beta \\ \frac{\gamma-x}{\gamma-\beta}, & \beta < x \leq \gamma \\ 0, & x > \gamma \end{cases} \quad (3)$$

梯形隶属度函数如图5所示,隶属度计算式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq g \\ \frac{h-x}{h-g}, & g < x \leq h \\ 0, & x > h \end{cases} \quad (4)$$

其中, a 和 h 分别为模糊集合的上、下限, b 和 g 分别为隶属度函数 $\mu(x)$ 峰值所对应的 x 取值的上、下限。根据图3(a)~3(e)设计的各输入参数隶属度函数,通过式(3),式(4),可得到相应的隶属度。

(2)模糊推理模块:本文为降低系统开销,采用一个推理引擎,根据参数的模糊逻辑等级构建模糊规则,将1级模糊系统的规则和2级模糊系统的规则构建在同一个规则库中,推理时采用规则自适应匹配。通过模糊推理,最终得到网络的QoS模糊值。推理规则使用“If...and...,Then...”语句的形式,为保证网络的性能,同时为区分参数的重要

性,在设计推理规则时,以RSS的重要性最高,网络端性能参数的重要性高于用户端参数为构建原则,表1为部分模糊规则,示例:“If RSS为低and带宽为低and时延为低,Then QoS为低”。

表1 部分模糊规则示例

If	and	and	Then	If	and	and	Then
RSS	带宽	时延	QoS	QoS	负载率	接入费用	判决值
低	低	低	低	低	低	低	低
低	中	低	低	低	低	中	低
低	高	低	低	低	低	高	低
中	中	中	中	中	低	低	高
中	中	高	低	中	中	中	中
高	高	低	高	高	低	低	高
高	高	中	高	高	中	低	高
高	低	高	低	高	高	中	中

(3)去模糊化模块:去模糊化是将模糊推理后得到的模糊值转换为精确值。本文在2级模糊系统和不触发2级模糊系统的后续算法中有去模糊化模块,均采用重心法来完成去模糊化工作。根据模糊推理,在图3(f)设定的输出隶属度函数的基础上,可以得到不同的隶属度函数曲线,重心法通过计算隶属度函数曲线与横坐标所围面积的重心对应的横坐标得到精确值,精确值为

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^c \mu(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^c \mu(y_j)} \quad (5)$$

式中, Y_i 表示第 i 个网络去模糊化后的精确值,即第 i 个网络的QoS精确值或2级模糊逻辑系统的第 i 个网络的输出精确值。 y_j 为第 j 个隶属度函数曲线与横坐标所围面积的重心对应的横坐标, $\mu(y_j)$ 为对应第 j 个重心的隶属度,范围在 $[0, 1]$, c 为模糊等级数。

3.2 网络筛选

第1阶段在1级模糊逻辑推理后,为进一步减少系统的计算量,同时保证候选网络的性能,对网络进行初步筛选。在网络筛选阶段需要对1级模糊系统得到的QoS模糊值进行判断,QoS模糊值语言变量为{高,中,低}。此时,推理后得到该网络的模糊值集合为 $X = \{\mu_1 A_1, \mu_2 A_2, \mu_3 A_3\}$, A_1, A_2, A_3 分别表示模糊等级值低、中、高, μ_1, μ_2, μ_3 分别表示低、中、高等级值的隶属度集合。若该网络的QoS模糊值全部为低,即 $\mu_2=0$ 且 $\mu_3=0$,此时 $X = \{\mu_1 A_1\}$,表示网络的性能过低,不能给用户提供较好的服务。假设终端接收到的网络个数为 R ,若此时 R 个

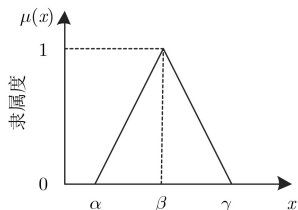


图4 三角形隶属度函数

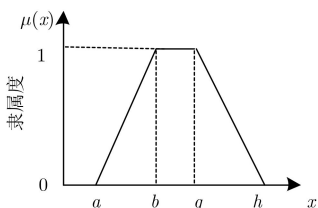


图5 梯形三角形隶属度函数

网络全部性能过低,则当前终端接收到的网络都不能为用户提供较好的服务,因此不产生候选网络集。若该网络的QoS模糊值不全为低,即 $\mu_2 \neq 0$ 或 $\mu_3 \neq 0$,表示网络性能达标,生成候选网络集,并将该网络放入候选集。

3.3 自适应匹配

自适应匹配分为规则自适应匹配和触发机制两部分,规则自适应匹配是在1级和2级模糊逻辑系统的推理模块,共建一个规则库,在规则库中根据1级和2级的输入参数设计对应的规则。两级模糊逻辑系统在模糊推理时,分别在规则库中自适应匹配相应的规则,即1级模糊系统匹配规则库中1级相应参数所构建的规则,2级模糊系统匹配2级相应参数构建的规则。

当1级模糊逻辑系统的模糊推理完成后,进入触发机制,采用触发机制自适应匹配后续相应的算法,触发机制通过判断网络筛选后候选集中网络的个数来完成。假设有 M 个候选网络,若未生成候选网络集,即 $M=0$,为保障终端仍能有网络连接,此时匹配到去模糊化模块。若有候选集生成,即 $M=1$,此时候选集中只有一个候选网络,但出现此情况的概率较小,因此为避免增加结构的复杂度,将这种特殊情况与 $M=0$ 合并,均匹配到去模糊化模块,分别对 R 个网络的QoS模糊值去模糊化得到网络的QoS精确值。网络的QoS精确值集合为 $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_N\}$, N 为集合中网络个数, $N = R$ 。通过比较网络的精确值,选择QoS最大的网络作为目标网络 T 执行切换,从而保证终端能有网络连接。

$$T = \max \{Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_N\} \quad (6)$$

若生成了候选网络集且候选集中网络不唯一,则自动触发第2阶段的2级模糊逻辑系统。2级模糊逻辑系统得到精确输出值 F ,候选网络集的输出值集合为 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_M\}$,选择输出值最大的候选网络作为目标网络 T 执行切换,即

$$T = \max \{F_1, F_2, \dots, F_M\} \quad (7)$$

4 仿真结果与分析

4.1 系统模型和仿真参数设置

本文采用LTE和WLAN两种接入技术组成的

异构无线网络环境,无线接入网络均采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术。为验证本文算法的性能,以如图6所示的拓扑结构搭建仿真场景,并在MATLAB平台进行仿真。仿真场景中,有3个WLAN和1个LTE, WLAN的半径均为150 m, LTE半径为800 m。用户随机分布在仿真区域内。仿真中,假设终端在垂直切换决策时刻 t 获得的候选网络的参数如表2所示。

仿真中对比了本文算法与现有基于模糊逻辑的垂直切换算法^[12](Vertical HandOver algorithm based on Fuzzy Logic, FL-VHO)以及基于多属性判决的垂直切换算法^[4](Vertical HandOver algorithm based on Multi-Attribute decision, MA-VHO)。

接收信号强度表示为

$$RSS(d) = \rho - \eta \lg(d) - \varepsilon \quad (8)$$

其中, ρ 是网络的发送功率, d 是终端到接入点的距离, η 是路径损失因子, ε 是服从均值为0、标准差为 $\sigma([6, 8])$ 的高斯随机变量,本文 ε 设为6 dB。

4.2 时间开销分析

时间复杂度是垂直切换算法的一个重要指标,在现有基于模糊逻辑的垂直切换算法中,整个算法所需的时间主要是模糊推理的时间。本文算法与基于模糊逻辑的算法时间开销对比如图7所示,图中两条曲线分别代表本文算法和基于模糊逻辑算法的时间消耗,共进行100次仿真实验,本文算法所消耗的时间均小于FL-VHO算法。这是因为本文在使用模糊逻辑算法时,采用了分级的结构,降低了模

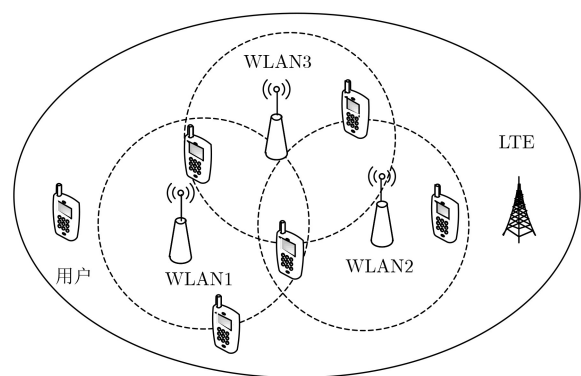


图6 异构无线网络系统模型

表2 候选网络的参数值

网络	带宽(kbps)	时延(ms)	发送功率(dBm)	路径损失(dBm)	接入费用(元)
LTE	310	48	30	33	0.6
WLAN1	4100	105	20	54	0.1
WLAN2	6900	180	20	54	0.4
WLAN3	6500	80	20	54	0.5

糊推理规则数, 本文算法与FL-VHO算法的均考虑了5个参数, FL-VHO算法需要构建 $3^5 = 243$ 条规则, 而本文则只需构建 $3^3 + 3^3 = 54$ 条规则, 大幅度减少了规则数, 因此复杂度降低, 算法的时间消耗降低。

图8表示在网络数量增加时, 本文算法与基于模糊逻辑的时间开销对比, 当网络数量增多, 两种算法的时间开销都在增大, 但本文算法的时间开销始终低于FL-VHO算法, 并且在网络数为40时, FL-VHO算法的时间大约为本文算法的2倍, 在网络数为100时, FL-VHO算法的时间大约为本文算法的4倍, 因此本文算法的时间随用户量增加的趋势较FL-VHO算法缓慢, 这是因为本文在分阶段的算法过程中, 对网络进行了筛选, 并通过触发机制减少了不必要的计算, 同时, 由于规则数的减少, 也使模糊系统在模糊推理后的其它模块的时间消耗有所降低。

4.3 用户满意度分析

图9对比了本文算法和的未考虑用户端参数的基于模糊逻辑算法(Vertical HandOver algorithm based on Fuzzy Logic Without considering user parameters, FLW-VHO)的用户满意度, 用户满意度通过网络性价比体现, 定义为单位费用所得到的服务质量, 即QoS精确值与网络费用的比值。由图可以看到, 通过100次仿真实验, 本文算法的用

户满意度总体高于FLW-VHO算法的满意度。这是因为, 本文在2级模糊逻辑系统中, 考虑了网络的费用, 这使得判决的结果是基于网络端和用户端, 而FLW-VHO未考虑费用这一用户侧参数, 这使得判决结果全部依赖于网络端, 若此时网络性能较好, 但费用很高, 从而网络性价较低, 用户满意度则较低。

4.4 切换阻塞率和吞吐量分析

图10对比了在用户数量增多的趋势下, 4种算法的切换阻塞率性能。可以看到, 当用户数为20时, FLW算法就开始发生阻塞, 而其他3种算法在用户数为40时, 开始发生阻塞, 这是因为FLW算法未考虑网络的负载, 导致阻塞过早的产生。随着用户数的增加, 4种算法的阻塞率都在增大。在相同用户数的情况下, 本文算法和FL-VHO算法的负载率基本相同, 均低于其他2种算法。这是因为本文在2级模糊逻辑系统中, 考虑了切换时刻网络的负载率, 使得切换决策可以均衡负载, 增加了各个网络的利用率, 从而降低了切换阻塞率, 而MA-VHO算法虽考虑了网络的负载率, 但其所占权重较小, 因此在网络判决时, 对其影响较小。

图11为4种算法的网络总吞吐量与用户数的关系, 可以看到, 随用户数的增加总吞吐量也在增加, 当用户数大于20时, FLW-VHO算法的总吞吐量增加趋势逐渐变慢, 当用户数大于30时, 总吞吐

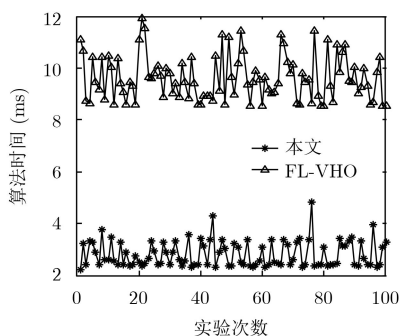


图7 算法时间开销

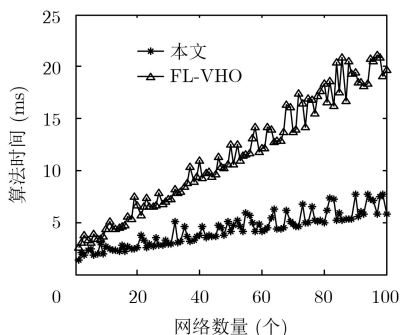


图8 算法时间开销随网络数量的变化

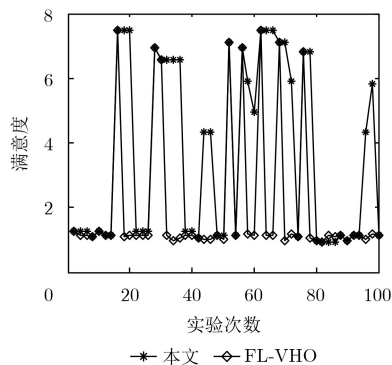


图9 用户满意度

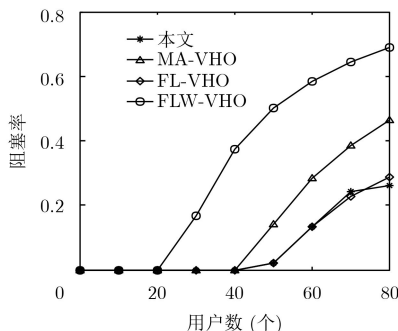


图10 切换阻塞率

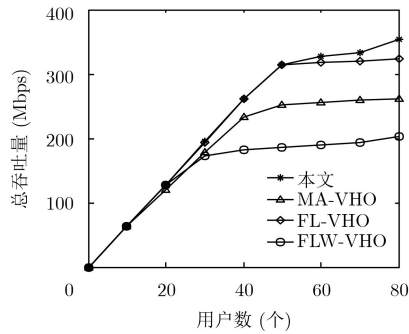


图 11 网络总吞吐量

量增加趋势明显变慢, 这是因为FLW-VHO算法在用户数为20时开始发生阻塞。当用户数大于50时, 本文算法的总吞吐量增加趋势明显变慢, 并且在用户数相同时, 本文算法的总吞吐量在4种算法中最高。这是因为垂直切换时, 本文算法在2级模糊逻辑中考虑了负载, 使得切换在平衡负载的同时, 降低了阻塞, 从而使数据可以持续传输, 而FLW-VHO算法考虑的参数较少, 未考网络的负载, 阻塞率最高, 网络利用率低, 造成总吞吐量最低。MA-VHO算法未充分考虑网络负载, 阻塞率低于FL-VHO算法, 高于FL-VHO和本文算法, 因此总吞吐量低于FL-VHO和本文算法, 高于FLW-VHO算法。

5 结论

本文提出一种基于模糊逻辑的分级垂直切换算法, 算法通过两个阶段将网络端和用户端相结合, 采用分级的方式和规则自适应匹配, 减少模糊推理的规则数, 并通过网络筛选和触发机制, 优化算法的时间复杂度。实验结果表明, 该算法能保证网络性能的同时, 大幅度降低系统的时间复杂度。

参考文献

- [1] BHOSALE S and DARUWALA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm using hierarchy modeling and additive weighting in an integrated WLAN/WiMAX/UMTS environment-A case study[J]. *KSEE Transactions on Internet and Information Systems*, 2014, 8(1): 35–57. doi: [10.3837/tiis.2014.01.003](https://doi.org/10.3837/tiis.2014.01.003).
- [2] HAIDER A, GONDAL I, and KAMRUZZAMAN J. Dynamic dwell timer for hybrid vertical handover in 4G coupled networks[C]. The 73rd IEEE Vehicular Technology Conference, Yokohama, Japan, 2011: 1–5. doi: [10.1109/VETECS.2011.5956636](https://doi.org/10.1109/VETECS.2011.5956636).
- [3] NING Zhaolong, SONG Qingyang, LIU Yejun, et al. Markov-based vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(2): 456–472. doi: [10.1016/j.compeleceng.2013.10.012](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.10.012).
- [4] SINGH N P and SINGH B. Vertical handoff decision in 4G wireless networks using multi attribute decision making approach[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(5): 1203–1211. doi: [10.1007/s11276-013-0670-1](https://doi.org/10.1007/s11276-013-0670-1).
- [5] GOUDARZI S, HASSAN W 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](https://doi.org/10.1007/s11277-016-3549-5).
- [6] LAHBY M and SEKKAKI A. Optimal vertical handover based on TOPSIS algorithm and utility function in heterogeneous wireless networks[C]. 2017 International Symposium on Networks, Computers and Communications, Marrakech, Morocco, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ISNCC.2017.8072023](https://doi.org/10.1109/ISNCC.2017.8072023).
- [7] ALOTAIBI N M and ALWAKEEL S S. A neural network based handover management strategy for heterogeneous networks[C]. The 14th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, Miami, USA, 2015: 1210–1214. doi: [10.1109/ICMLA.2015.65](https://doi.org/10.1109/ICMLA.2015.65).
- [8] NURJAHAN, RAHMAN S, SHARMA T, et al. PSO-NF based vertical handoff decision for ubiquitous heterogeneous wireless network[C]. 2016 International Workshop on Computational Intelligence, Dhaka, Bangladesh, 2016: 153–158. doi: [10.1109/IWCI.2016.7860357](https://doi.org/10.1109/IWCI.2016.7860357).
- [9] ALSAMHI S H and RAJPUT N S. An intelligent hand-off algorithm to enhance quality of service in high altitude platforms using neural network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 82(4): 2059–2073. doi: [10.1007/s11277-015-2333-2](https://doi.org/10.1007/s11277-015-2333-2).
- [10] KALEEM F, MEHBODNIYA A, ISLAM A, et al. Dynamic target wireless network selection technique using fuzzy linguistic variables[J]. *China Communications*, 2013, 10(1): 1–16. doi: [10.1109/CC.2013.6457526](https://doi.org/10.1109/CC.2013.6457526).
- [11] CEKEN C and ARSLAN H. An adaptive fuzzy logic based vertical handoff decision algorithm for wireless heterogeneous networks[C]. The 10th IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference, Clearwater, USA, 2009: 1–9. doi: [10.1109/WAMICON.2009.5207312](https://doi.org/10.1109/WAMICON.2009.5207312).
- [12] TSAI K L, LIU Hanyun, and LIU Yuwei. Using fuzzy logic to reduce ping-pong handover effects in LTE networks[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(5): 1683–1694. doi: [10.1007/s00500-015-1655-z](https://doi.org/10.1007/s00500-015-1655-z).
- [13] 马彬, 张文静, 谢显中. 面向终端个性化服务的模糊垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1284–1290. doi: [10.11999/JEIT160839](https://doi.org/10.11999/JEIT160839).

MA Bin, ZHANG Wenjing, and XIE Xianzhong. Individualization service oriented fuzzy vertical handover algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information*

- Technology*, 2017, 39(6): 1284–1290. doi: [10.11999/JEIT.160839](https://doi.org/10.11999/JEIT.160839).
- [14] LI Limin, MA Lin, XU Yubin, *et al.* Motion adaptive vertical handoff in cellular/WLAN heterogeneous wireless network[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 341038. doi: [10.1155/2014/341038](https://doi.org/10.1155/2014/341038).
- [15] KUSTIAWAN I and CHI Kuanghui. Handoff decision using a kalman filter and fuzzy logic in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(12): 2258–2261. doi: [10.1109/lcomm.2015.2495212](https://doi.org/10.1109/lcomm.2015.2495212).
- 马 彬: 男, 1978年生, 教授, 主要研究方向为异构无线网络、认知无线网络等.
- 李尚儒: 男, 1993年生, 硕士生, 主要研究方向为异构无线网络.
- 谢显中: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线和移动通信技术.