

改善用户体验的垂直切换算法

吴利平^{①②} 王双双^{*②③} 马彬^{②③}

^①(重庆邮电大学产学研合作办公室 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)

^③(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘要: 针对由超密集异构无线网络的超高动态性而引起掉话率不断增长的问题,并考虑到以往基于模糊逻辑相关垂直切换算法的较大时间开销,该文提出一种改善用户体验的垂直切换算法。首先利用5G核心访问和移动管理功能发现终端附近的所有候选网络,同时,利用自组织网络技术的环境感知能力,随时监测网络的运行状况,主动维护网络之间的邻居关系表。然后,引入动态模糊神经网络(DFNN)算法来执行切换判决,将获取到的网络参数数据作为该系统的输入,动态生成对垂直切换有效的规则库,经学习之后,计算得到输出判决值,从而为终端选择最佳接入网络。最后,仿真结果表明,该算法能够明显改善垂直切换过程中的掉话情况,降低切换失败概率。同时,与其他同类算法的时间消耗相比,该算法能够维持在一个较低的水平。

关键词: 自组织网络;超密集;垂直切换;动态规则

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)08-2824-09

DOI: 10.11999/JEIT210523

Vertical Handoff Algorithm for Improving User Experience

WU Liping^{①②} WANG Shuangshuang^{②③} MA Bin^{②③}

^①(Cooperation Office of Industry University Research, 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)

^③(Institute of Computer Science and Technology, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the problem that the drop rate keeps increasing due to the ultra-high dynamic characteristics of ultra-dense heterogeneous wireless networks, and considering the large time cost of previous vertical handoff algorithm based on fuzzy logic correlation, a vertical handoff algorithm for improving user experience is proposed. Firstly, 5G core access and mobile management functions are used to discover all candidate networks near the terminals. At the same time, the environment awareness ability of Self-Organized Network(SON) technology is used to monitor the running status of networks at any time and maintain actively the neighbor relationship table between them. Then, the Dynamic Fuzzy Neural Network (DFNN) algorithm is introduced to execute the handover decision, and the network parameters obtained are taken as the input of the system to generate dynamically a rule base that is effective for vertical handoff. After learning, the output decision value is calculated, and the best access network for the terminal is selected. Finally, the simulation results show that the algorithm can significantly alleviate the drop of calls in the process of vertical handoff and reduce the probability of handover failure. Meanwhile, compared with other similar algorithms, it can maintain a lower time cost.

Key words: Self-Organized Network(SON); Ultra-dense; Vertical handoff; Dynamic rules

收稿日期: 2021-06-07; 改回日期: 2021-11-16; 网络出版: 2021-11-20

*通信作者: 王双双 1271755437@qq.com

基金项目: 重庆市教委科学技术研究重大项目(KJZD-M201900602), 重庆市基础研究与前沿探索项目(CSTC2018jcyjAX0432), 重庆市研究生科研创新项目(CYS20256)

Foundation Items: The Major Project of Science and Technology Research of Chongqing Education Commission (KJZD-M201900602), The Foundation Research and Advanced Exploration project of Chongqing(CSTC2018jcyjAX0432), The Project of Science Research Innovation of Chongqing Graduate Students(CYS20256)

1 引言

在当前和未来的网络环境中, 随着多种无线电接入技术(Radio Access Technologies, RATs)日益普及到世界的每一个角落, 以及手持移动设备的突飞猛进, 对保证服务质量(Quality of Service, QoS)、垂直切换性能和更高数据速率的需求不断增加^[1]。为了提供无缝覆盖, 5G蜂窝网络必须密集部署更多的小蜂窝。因此, 超密集网络成为5G蜂窝网络的核心特征, 将带来网络性能的极大改善。但不同用户接收范围内的多种RATs具有较大的差异性, 且网络的状态可能会随时发生变化, 如基站的休眠或故障, 这无疑会导致垂直切换算法决策出的目标网络不可用, 再高效的垂直切换算法都无法避免该问题带来的信令开销和时间消耗。因此在具有高动态性的超密集异构无线网络中, 如何最大化提升用户的综合性能, 降低智能算法的时间复杂度, 是本文研究的重点。

当前已有不少文献致力于研究垂直切换领域中的各种问题, 通过设计不同的切换判决算法来实现终端的无缝切换^[2,3], 减少切换失败和切换次数^[4-7], 降低切换时延^[8-10], 缓解乒乓效应并保障切换的可靠性^[11,12]。文献^[2]针对软件定义异构无线网络, 提出了一种基于移动信息和多径传输控制协议的移动感知无缝切换方法。首先通过建立回声状态网络模型, 预测用户的位置来确定下一个访问候选网络; 然后综合考虑用户偏好、服务需求和网络属性, 采用模糊层次分析法选择目标网络; 最后通过基于多径传输控制协议的切换机制实现无缝切换。文献^[4]将粒子群算法应用于多属性决策中, 克服多属性决策中权重分配时的主观性和偏差, 引入了两种不同的优化函数来生成最优权值, 在不影响垂直切换的前提下, 提高了网络的排名差异, 减少了排名异常。文献^[8]致力于减少车辆网络中用户集群切换过程中的开销, 设计了一种混合切换策略, 可在同构和异构网络之间进行自适应切换。文献^[11]提出了一种高速铁路场景下基于随机抑制的自适应切换算法。该算法在迟滞阈值与列车速度之间建立椭圆函数关系, 使迟滞阈值可以随着列车速度自适应调整, 降低了高速列车向前切换的挑战性。同时, 引入正态分布随机数抑制反向切换, 以降低乒乓切换率。但上述垂直切换算法未能全面考虑到网络环境中的不确定性因素, 容易受网络动态变化的影响, 导致更多切换性能下降的问题。

当前的网络环境呈现为超密集态势, 文献^[12]致力于研究5G无线通信系统中超密集异构网络的选择切换, 提出了一种基于区域感知贝叶斯决策的

联合垂直切换方式, 通过各个基站的位置信息获取到候选网络的切换概率, 从而执行切换, 保障切换的可靠性。在当前环境下, 考虑到终端的动态偏好问题, 文献^[13]提出了一种基于非合作博弈的组垂直切换模型, 利用动态实时计算的多个切换决策属性及其各自的终端偏好作为博弈策略, 在纳什均衡条件下通过群策略选择最优的无线网络, 最大化用户满意度和网络收益的同时兼顾了网络的动态性。文献^[14]设计了一种混合的多业务多模式终端的网络选择算法, 综合考虑了终端偏好、服务特征和需求, 此外还考虑了网络的实时状况, 该算法最终被证实带来了更好的用户体验。由于车联网环境的高动态性, 部分文献致力于为车辆终端提供最佳的服务质量。文献^[15]提出了一种异构车联网的负载均衡和QoS感知切换方案, 定义了车辆的移动性和QoS度量, 并添加了一个新的切换触发器, 切换触发依赖当前接入网络的QoS和周围邻居网络的邻近度。文献^[16]利用不同的网络和车辆作为参与匹配的双方, 建立了一个双向匹配模型, 考虑了车辆不同的QoE需求。但随着5G的广泛商用, 网络超密集部署导致的动态性更加突出, 上述垂直切换算法带来的效用可能微乎其微, 因此需要更进一步地缓解网络超高动态性带来的切换失败、掉话等问题, 提升用户在切换过程中的体验质量。

当前研究工作在保障网络侧和用户侧性能的前提下, 往往会考虑多个网络属性, 用以切换判决。在先前的研究工作^[17]中, 利用区间二型模糊神经网络(Interval Type-2 Fuzzy Neural Network, IT2FNN)算法统一表达了网络状态的模糊性和随机性, 使得判决过程更加符合真实的决策场景。由于该类智能算法需要不断地迭代训练, 亦或是规则库庞大, 网络和终端性能的提升往往会以较大的时间开销为代价。在先前研究工作中为了减轻时间开销的负担, 重构了两阶段判决算法, 但在该类基于模糊逻辑(Fuzzy Logic, FL)的垂直切换算法中, 规则数随着参数增加呈指数倍增长的问题依旧存在。

针对上述问题, 本文提出一种改善用户体验的垂直切换算法, 引进动态模糊神经网络(Dynamic Fuzzy Neural Network, DFNN)算法执行垂直切换, 动态生成有效的规则, 极大地减小了FL规则库的规模。同时, 结合了自组织网络(Self-Organized Network, SON)技术的环境感知能力, 能够主动感知终端周围的网络环境变化, 即时采取自主应对的措施。本文的主要贡献如下:

(1) 将SON技术应用到5G网络环境下的垂直切换中, 为用户提供进一步有保障的服务, 减少切换失败, 降低切换过程中的掉话率。

(2) 引入DFNN算法, 提出一种改善用户体验的垂直切换算法, 动态调整FL的规则和参数, 在保障网络侧与用户侧性能的同时, 降低本文算法执行切换判决的时间开销。

2 自组织网络技术(SON)

随着移动宽带技术的飞速发展, 无线网络的部署和维护变得越来越复杂, 且十分耗时和昂贵。为满足终端日益增长的需求, 第3代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)提出了能够自动进行维护和运营管理的SON自组织网络技术。

2.1 功能简介

SON技术的实现主要包含3大部分。

其一为网络的自配置, 当网络中出现新的无线接入技术时, 新增网络从控制中心获取软件与一系列的参数进行自我配置, 从而使得该网络能迅速投入到工作状态。自配置可以大大减少人为参与配置的复杂过程, 降低无线网络建立时的费用和时间开销。当前, SON技术的自配置通过物理小区标识(Physical Cell Identification, PCI)码配置和邻居关系表(Neighborhood Relationship Table, NRT)的建立实现, 每个网络可自动选择PCI码并建立自己的NRT。其中PCI码是蜂窝小区识别和信道同步的标识, NRT的自配置能够主动维护网络周围的邻居关系, 包括邻居网络的检测、增加与删除等^[18]。

其二为网络的自优化, 根据监测终端和基站, 了解网络运行状况, 对网络参数进行自我调整优化, 能够提升网络性能和质量。SON自优化主要包括减轻能耗、均衡移动负载以及降低无线接入技术之间干扰等的优化功能, 通过各网络实时检测周边环境、监测终端的切换时机、监控网络的负载状态等措施来调整优化参数。

其三为网络的自治愈, 当网络中出现故障的时候, 系统可以自动检测出故障的位置, 即时做出应对措施, 从而降低因为网络故障对用户体验产生的不良影响。

2.2 技术架构

SON技术可以分为分布式架构、集中式架构以及混合式架构, 其各有优势与劣势。图1(a)展示了SON技术的分布式架构, 其中SON的功能模块由独自的网络实现, 每个单独的网络不仅需要检测和搜集相关信息, 还要承担决策以及与上层移动管理实体、其他邻居网络之间的信息交互协调任务。分布式架构的特点是可以提高各独立网络之间的参数优化效率, 而无须担心中心网络故障带来的大面积故障。

图1(b)所显示的是SON技术的集中式架构, 其SON技术的功能主要由上层移动管理实体实现, 各独立网络仅需要实现相关信息的检测和搜集, SON技术则需要完成与上层移动管理实体的协调工作。这种架构方式实现较为简单, 也不可避免地会因中心网络故障而造成整个系统失去效用, 且在具有超高动态性的超密集网络环境下, 集中控制时更需要频繁地交互和更新信息, 会产生较大的信令开销, 给网络带来一定的负担。

图1(c)为SON技术的混合式架构, 其中存在一个或多个中心网络, 中心网络和各网络都具备自主管理的能力, 同时也可根据需要进行与周围网络相互协调。该架构下的SON技术较为灵活, 但设计过程较前两者更为复杂。

3 系统模型

3.1 网络场景

随着4G移动管理实体(Mobility Management Entity, MME)的功能被分解, 5G网络由核心访问和移动管理功能(core Access and Mobility management Function, AMF)从终端接收所有连接和会话的相关信息, 其仅负责处理连接和移动管理任务。在本文的超密集异构无线网络环境中, 终端与候选网络之间的信息交互由AMF协调和管理。

考虑到当前网络环境的超高动态性, 为避免集中控制所带来的较大信令开销, 遂在垂直切换过程中引入采用分布式架构的SON自组织网络技术, 在

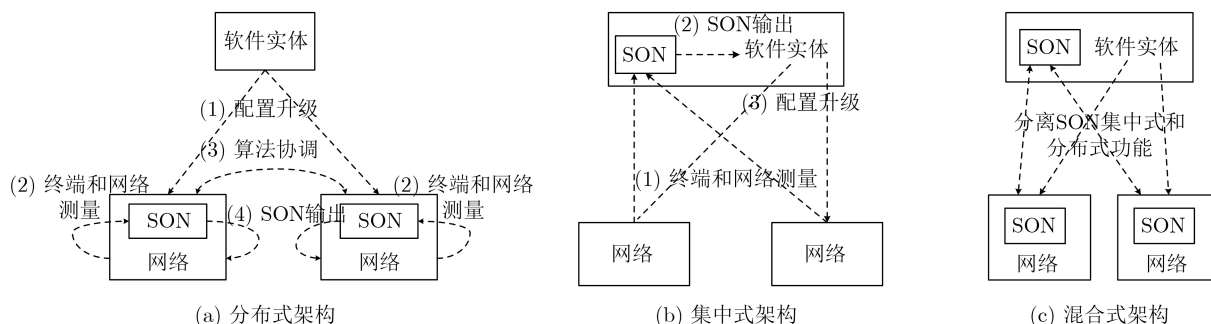


图1 SON技术架构

极具不确定性和超高动态性的网络环境中结合SON技术来辅助切换。为便于观察，图2给出了结合SON技术的网络场景示意图，该场景由5G宏基站、微基站与WiFi接入点异构而成，依据终端接收范围内所有候选网络的状态参数信息，利用DFNN算法来执行垂直切换判决。

3.2 算法流程

本文算法的实现过程如图3所示。在网络发现阶段，AMF发现终端附近的所有候选网络，并获取其参数数据。若检测到网络环境中的某个基站突然故障或休眠，SON技术将利用其具备的自配置功能主动维护终端附近的网络邻区关系；若当前网络环境临时增加新的接入点，SON技术则为该网络获取相关连接信息，从而使得该网络能够正常运转，同时在邻区关系表中增加该网络的相关参数数据。同时，SON技术会随时监测终端位置及网络运行状况，对网络进行适时的调整与优化，确保网络的性能和QoS，并能够在网络出现轻微故障的时机，找准故障发生的位置，即时做出应对措施。此时每个

独立的网络不仅需要获取相关信息，还要实现与上层AMF、周围邻居网络之间的信息交互。

在切换判决阶段，将候选网络的接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)、剩余可用带宽(Remaining available Band Width, RBW)、时延(Delay, D)、丢包率(Packet Loss Rate, PLR)和误码率(Bit Error Rate, BER)作为DFNN的输入参数，经模糊推理、去模糊化之后得到输出值，选择该值最大的网络作为目标网络。若该网络突然发生故障，SON自组织网络技术将立即监测故障发生的位置并进行即时修复，修复成功则目标网络不变，否则将选择次优网络作为目标网络。

在切换执行阶段，将终端与当前网络之间的连接转移到决策出的目标网络上，为终端提供最佳的服务，确保良好的用户体验。

4 动态模糊神经网络

本节详细介绍了垂直切换判决过程中所引入的DFNN算法。该算法基于神经网络(Neural Network, NN)的架构完成了FL的推理过程，实现了参数训练和规则生成的同步进行。在学习训练的过程中，逐步生成对切换判决有效的规则，能够在考虑多个网络参数、保障终端切换性能的同时，极大地改善该类基于模糊神经网络算法的时间消耗问题。下文具体介绍DFNN的结构和规则生成准则。

4.1 DFNN的结构

本文所设计的DFNN结构如图4所示，表现为一个多输入单输出的5层前馈神经网络，具有FL推理的实际物理含义，输入感知到的候选网络参数集，利用动态生成的规则进行模糊推理，经过去模糊化处理，得到每个候选网络的实际判决值，从而为每个终端选择最佳接入网络，保障通信过程的无缝连接。

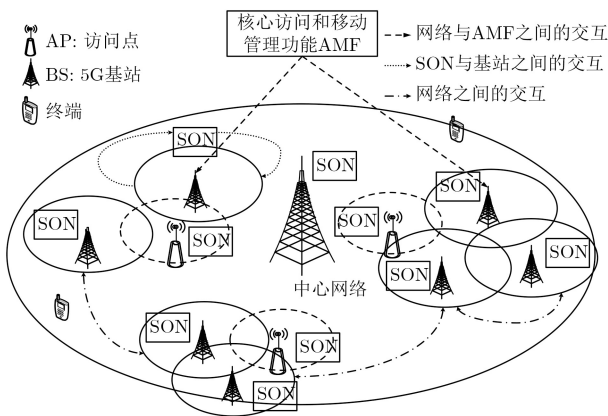


图2 网络场景图

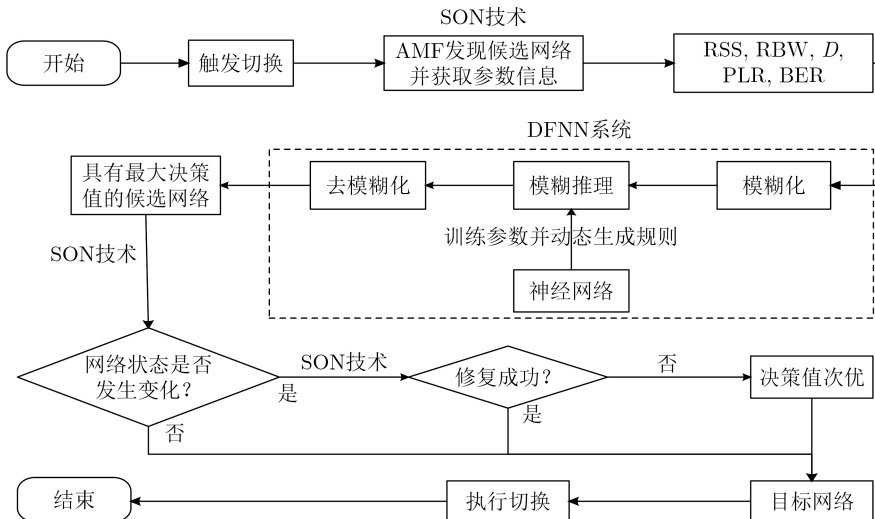


图3 算法示意图

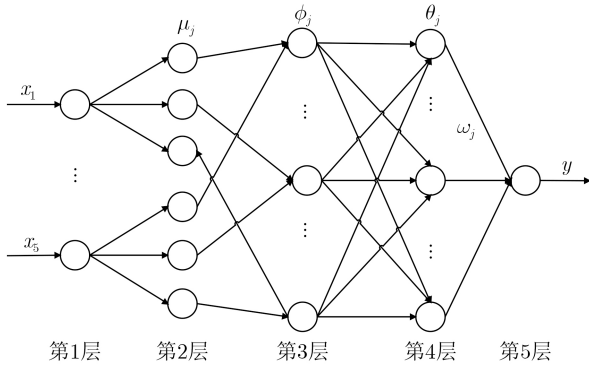


图4 DFNN的结构模型

第1层为输入层, 包含5个输入参数 x_i , $i = 1, 2, \dots, 5$, 分别表示候选网络的RSS, RBW, D , PLR和BER。

第2层为模糊化层, 每个节点分别表示具有不同均值和标准差的隶属函数, 进行输入参数的模糊化。采用高斯型隶属函数将上述网络参数的精确值转换为模糊量, 模糊等级设置为“低”、“中”、“高”。其隶属函数表示为

$$\mu_i^k = \exp\left(-\frac{(x_i - m_i^k)^2}{(\sigma_i^k)^2}\right) \quad (1)$$

其中, $k = 1, 2, 3$ 分别表示模糊等级“低”、“中”、“高”, m_i^k 表示第 i 个参数第 k 个模糊级别对应隶属函数的中心, 即均值, σ_i^k 为第 i 个参数第 k 个模糊级别对应隶属函数的宽度, 即标准差。

第3层为模糊推理层, 称为T-范数层, 利用动态生成的模糊规则进行模糊推理。其中每个节点分别代表一个可能的模糊规则中的IF部分, 因此该层节点数反映的是模糊规则的数目。每个节点的输出为

$$\phi_j = \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - m_i^k)^2}{(\sigma_i^k)^2}\right) \quad (2)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, M$ 表示规则数。可以看出, 该层每个节点代表了一个隶属函数单元。

第4层为归一化层, 与第3层为全互连。每个节点的输出为

$$\theta_j = \frac{\phi_j}{\sum_{j=1}^M \phi_j} \quad (3)$$

第5层为输出层, 表示输出变量, 是每个网络所有参数信息的融合

$$y = \sum_{j=1}^M \omega_j \cdot \theta_j \quad (4)$$

其中, ω_j 是第 j 条规则的连接权, 初始设置为随机值。

4.2 规则产生准则

DFNN架构的形成主要依赖两个准则: 决策系统的误差和隶属函数的可容纳边界。显然, 若动态生成的规则数太少, 切换判决系统将无法完全涵盖所有网络参数的输入-输出状态空间, DFNN将不能体现出一个很好的决策性能。若规则数太多, 不仅会额外增加判决系统的复杂性, 而且将极大地增加计算的时间开销, 降低垂直切换判决的效率, 并使得DFNN的泛化性能变差。因此, 动态生成的新规则是否被接纳有较大可能取决于系统的输出误差。其中误差函数计算为

$$e(t) = \frac{1}{2}[y(t) - y_d(t)]^2 \quad (5)$$

其中, $y(t)$ 和 $y_d(t)$ 分别表示 t 时刻的实际输出值和训练数据值。

若

$$e > k_e \quad (6)$$

则增加一条新规则, 其中

$$k_e = \max[e_{\max} \times \beta, e_{\min}] \quad (7)$$

e_{\max} 是初始设置好的最大误差, e_{\min} 是预期收敛的精度, β ($0 < \beta < 1$)是收敛常数。

从隶属函数来看, 一个高斯型隶属函数具有良好的局部特性, 因为其输出表现为一个正态分布, 输出值随着与均值距离的增加而呈现单调递减的趋势。当网络参数的隶属函数选取高斯型隶属函数时, 具有不同均值和标准差的高斯隶属函数将划分所有的网络输入参数。如果一个新的网络参数值位于某个现存的隶属函数覆盖范围, 或称为可容纳边界内, 则该新参数值可以用现有的隶属函数代表, 而无需DFNN产生新的高斯隶属函数。

因此计算第 i 个参数和该参数第 k 个模糊级别对应隶属函数的中心之间的距离, 即

$$d_{ik} = \frac{1}{2}(x_i - m_i^k)^2 \quad (8)$$

那么

$$d_{\min} = \arg \min(d_{ik}) \quad (9)$$

若

$$d_{\min} > k_d \quad (10)$$

则增加一条新的模糊规则, 否则该组网络参数可以由现有的最近的隶属函数单元表示, k_d 表示可容纳边界的有效半径:

$$k_d = \max[d_{\max} \times \gamma, d_{\min}] \quad (11)$$

其中, d_{\max} 是输入参数与对应隶属函数均值的最大距离, d_{\min} 为最小距离, γ ($0 < \gamma < 1$)是衰减常数。

5 仿真实验与分析

5.1 方案设计

宏基站、微基站的超密集部署成为5G新模式。终端数目的急剧增加、毫秒级的端到端时延导致了基站数的大幅提升；同时由于5G频段的上移，网络覆盖范围大大减少，信号穿透能力减弱，但目前大多数数据流量来自室内的热点区域。因此，大量的微基站成了宏基站的有效补充，平衡了负载，使得网络吞吐量有了较大的提升。然而，基站数目并非越密集越好，基站过密的时候，基站、网络之间的干扰会大大增强；在两个或者多个基站的信号覆盖交叉区域，部分终端会频繁切换基站，引起较差的用户体验。

为了验证本文所提算法的性能，利用MATLAB仿真平台进行相关评价指标的对比分析，无线网络均采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术，以满足使用许可和非许可频段终端的数据速率需求。5G宏基站的覆盖范围内包含200个5G微基站，其地理位置服从泊松分布，且环境中均匀分布有20个WiFi接入点。用户随机分布在宏基站范围内，用户的移动速度均为恒定5 km/h，运动轨迹由有规律的随机点拟合而成。将本文所提算法与基于模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)的垂直切换算法^[19]、基于神经网络(Neural Network, NN)的垂直切换算法^[20]进行实验比较，同时包含了先前研究工作中基于IT2FNN的垂直切换算法^[17]。本文算法考虑了RSS, RBW, D , BER, PLR 5个网络状态参数来作为垂直切换判决的依据，将平均切换失败率、掉话率、满意用户占比以及算法的时间开销作为垂直切

换算法的性能评估指标。其中无线网络的相关参数设置如表1所示。

5.2 平均切换失败率分析

切换失败的概率作为一个衡量垂直切换算法精准与否的关键指标，本文利用切换失败率这个性能评价指标来分析所提算法，反映的是切换失败的次数与总切换次数的比值，为一个百分数。图5比较了4种垂直切换算法的平均切换失败率随着用户数增多而变化的曲线，可以看出4种算法的平均切换失败率均逐步上升。首先NN算法和FNN算法的平均切换失败率呈现出一个较为同步的上升趋势，均明显高于本文所提算法和IT2FNN算法。而在用户数达到40时，本文所提算法的平均切换失败率略微高于IT2FNN算法，总体表现出一个平缓上升的趋势。这是因为本文所提算法在不断学习训练的过程中仅生成对切换判决有利的规则，而弃掉那些冗余且无效的规则，缩短了决策的时间，使得部分终端能够及时切换到目标网络，实现无缝切换。同时结合SON技术，进一步为终端提供了有保障的服务，减少了切换失败。

5.3 平均掉话率分析

如图6所示，呈现了5种垂直切换算法的平均掉话率随着用户数增多而不断上升的趋势。在终端数目达到20时，本文所提算法与其他4种算法的平均掉话率逐渐拉开了差距，这一现象体现了本文所提算法在降低平均掉话率上的优势。为了说明本文结合SON自组织网络技术的必要性，将本文所提算法与不结合SON技术的DFNN算法作了平均掉话率指标的对比，可以看出，本文算法整体低于未结合SON技术的DFNN算法，在用户数达到50时，DFNN算法的平均掉话率逐渐高于NN算法与FNN算法，这

表 1 网络仿真参数

网络	覆盖半径(m)	发送功率(dBm)	路径损失(dBm)	总带宽(Mbit/s)	时延(ms)
宏基站	全覆盖	50	54	10	1
微基站	150	33	34	10	随机
WiFi	100	25	30	60	20

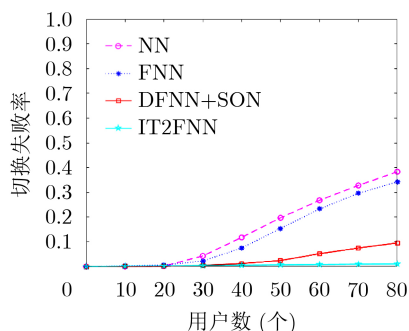


图 5 平均切换失败率

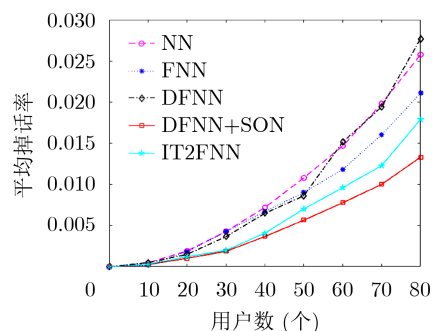


图 6 平均掉话率

是因为DFNN算法动态生成规则时,相比会产生额外感知环境的时间开销,此时会有基站休眠或故障的发生,导致掉话率的轻微增加,而结合了SON自组织技术的DFNN算法,却能够始终维持一个较低的掉话率。因为SON技术能随时感知到基站的突发情况并即时修复,保障了终端通信的持续进行,降低了切换过程中的掉话。

5.4 满意用户占比分析

切换过程中的掉话和阻塞是影响终端体验的两个重要因素,本文将各终端单位时间内的切换掉话与阻塞次数占切换触发量的比值作为一个关键指标,将该指标值小于0.01的终端定义为满意用户。图7对比了4种算法的满意用户占比情况,其表示满意用户占当前用户总数的比值。分析对比可以发现,随着用户到达增多,4种垂直切换算法的满意用户占比均呈现一个下降的趋势,在用户数少于20时,FNN算法和本文所提算法的满意用户占比十分接近1,因为FNN算法和本文所提算法均侧重考虑了用户的使用体验,FNN算法考虑到了用户的各种偏好指标和网络条件的影响。随着用户数的逐渐增加,FNN算法的满意用户占比下降趋势接近甚至低于NN算法,因为随着用户数的增加,利用FNN算法决策所需的时间开销会进一步增加,且FNN系统在学习训练的过程中存在随机设定的参数值,会致使满意用户的占比下降略微明显。总体看来,本文所提算法与IT2FNN算法的满意用户数量均高于另外2种算法,可以观察到采用本文算法得到的满意用户数相比IT2FNN算法处于一个略高的水平。这是因为该算法不仅综合考虑了网络的信号质量、可用带宽以及丢包等因素,而且在执行切换判决的过程中,结合了SON技术的自配置、自优化和自愈功能,主动维护网络周围的NRT,即时发现故障并加以处理,缓解了切换过程中的掉话和阻塞问题。

5.5 算法时间开销分析

本文算法旨在不以时间开销为代价的前提下,为终端提供最佳的服务体验。图8对比了4种垂直切换算法的具体时间消耗与到达用户数之间的关系。其中FNN算法的时间开销随着终端到达数的增多上升较快,而本文算法的时间开销明显低于另外3种算法。这是因为FNN算法考虑较多网络参数时,其规则库较为庞大,且还需要NN来不断地训练隶属函数的参数及相应的权重值,不可避免地会产生较大的时间开销。而IT2FNN算法重构了两阶段判决算法,筛选了候选网络,时间消耗低于FNN算法,但该算法也需要经过NN的不断训练,使得

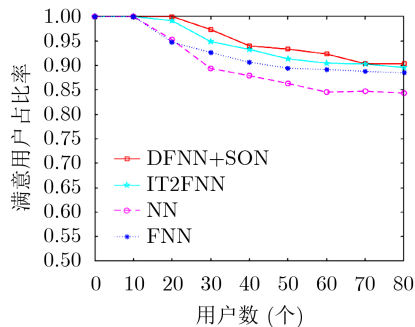


图7 满意用户占比情况

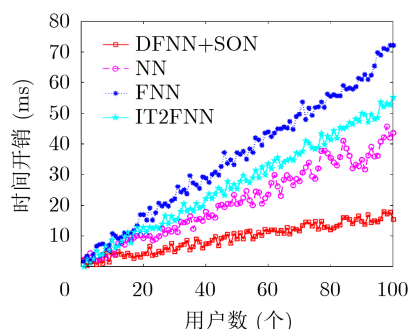


图8 算法的时间开销

时间开销略高于NN算法以及本文算法。本文所提算法FL规则库的数目远远小于FNN算法,因为本文算法在形成DFNN架构时,仅仅生成了系统所需的规则,用以垂直切换。

6 结论

考虑到先前研究工作中基于区间二型模糊神经网络的垂直切换算法,为避免非常大的时间消耗,重构了两阶段智能判决算法,但是该类基于FL的垂直切换算法中,规则数随参数增加呈指数倍增长的问题并没有得到改善。因此本文提出一种改善用户体验的垂直切换算法,引入DFNN算法,动态生成FL的规则库,降低本文算法的时间开销,提升算法的执行效率,减少切换失败;同时将SON自组织网络技术结合到超密集异构无线网络环境下的垂直切换过程中,利用其自行发现故障并即时修复的能力,降低终端切换过程中的掉话率,保障终端的通信质量,提升用户垂直切换过程中的体验质量。本文所提算法在执行决策的过程中,动态生成对判决有效的规则,减少冗余,能够大大降低算法的时间消耗。但执行模糊推理时,所采用的为一型模糊逻辑系统,在表达网络参数的模糊性时,并不能很好地体现出值设定时的随机性,因此结合文献[17]与本文所提算法,考虑在未来的研究工作中可将本文所提算法的一型模糊逻辑系统替换为二型模糊逻辑系统,做进一步的垂直切换算法研究,为用户的切换质量提供保障。

参 考 文 献

- [1] KULACZ L and KLIKS A. Reliability of bio-inspired ultra-dense networks[C]. 2020 Baltic URSI Symposium (URSI), Warsaw, Poland, 2020: 15–18. doi: [10.23919/URSI48707.2020.9254015](https://doi.org/10.23919/URSI48707.2020.9254015).
- [2] TONG Haonan, WANG Tao, ZHU Yujiao, *et al.* Mobility-aware seamless handover with MPTCP in software-defined HetNets[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(1): 498–510. doi: [10.1109/TNSM.2021.3050627](https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3050627).
- [3] ALJERI N and BOUKERCHE A. A two-tier machine learning-based handover management scheme for intelligent vehicular networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 94: 101930. doi: [10.1016/j.adhoc.2019.101930](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101930).
- [4] ALMUTAIRI A F, AL-GHARABALLY M, and SALMAN A A. Particle swarm optimization application for multiple attribute decision making in vertical handover in heterogenous wireless networks[J]. *Journal of Engineering Research*, 2021, 9(1): 176–187. doi: [10.36909/jer.v9i1.10331](https://doi.org/10.36909/jer.v9i1.10331).
- [5] HASAN M M, KWON S, and OH S. Frequent-handover mitigation in ultra-dense heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 1035–1040. doi: [10.1109/TVT.2018.2874692](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2874692).
- [6] 马彬, 王梦雪, 谢显中. 超密集异构无线网络中基于位置预测的切换算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(12): 2899–2907. doi: [10.11999/JEIT190751](https://doi.org/10.11999/JEIT190751).
MA Bin, WANG Mengxue, and XIE Xianzhong. Handoff algorithm based on location prediction in ultra-dense heterogeneous wireless network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 2899–2907. doi: [10.11999/JEIT190751](https://doi.org/10.11999/JEIT190751).
- [7] 马彬, 汪思霖, 谢显中. 基于区间标记判决的稳健垂直切换算法研究[J]. 电子学报, 2020, 48(5): 891–898. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.008).
MA Bin, WANG Silin, and XIE Xianzhong. Research on robust vertical handoff algorithm base on interval mark decision[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(5): 891–898. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.008).
- [8] LIN Yan, ZHANG Zhengming, HUANG Yongming, *et al.* Heterogeneous user-centric cluster migration improves the connectivity-handover trade-off in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 16027–16043. doi: [10.1109/TVT.2020.3041521](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3041521).
- [9] THUMTHAWATWORN, T, TILLAPART P, and SANTIPRABHOB P. Adaptive multi-fuzzy engines for handover decision in heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 93(4): 1005–1026. doi: [10.1007/s11277-017-3963-3](https://doi.org/10.1007/s11277-017-3963-3).
- [10] 马彬, 李尚儒, 谢显中. 异构无线网络中基于模糊逻辑的分级垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 629–636. doi: [10.11999/JEIT190190](https://doi.org/10.11999/JEIT190190).
MA Bin, LI Shangru, and XIE Xianzhong. A hierarchical vertical handover algorithm based on fuzzy logic in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 629–636. doi: [10.11999/JEIT190190](https://doi.org/10.11999/JEIT190190).
- [11] CHEN Yong, NIU Kaiyu, and WANG Zhen. Adaptive handover algorithm for LTE-R system in high-speed railway scenario[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 59540–59547. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3073917](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073917).
- [12] 谭晓衡, 谢朝臣, 郭坦. 基于区域感知贝叶斯决策的5G超密集异构网络联合垂直切换技术研究[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 582–588. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.010).
TAN Xiaoheng, XIE Chaochen, and GUO Tan. Research of joint vertical handoff technology based on area sensing bayesian decision in Ultra-Dense HetNet for 5G[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 582–588. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.010).
- [13] GOYAL P, LOBIYAL D K, and KATTI C P. Dynamic user preference based network selection for vertical handoff in heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 98(1): 725–742. doi: [10.1007/s11277-017-4892-x](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4892-x).
- [14] YU Hewei, MA Yanan, and YU Jingxi. Network selection algorithm for multiservice multimode terminals in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 46240–46260. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2908764](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908764).
- [15] ALJERI N and BOUKERCHE A. Load balancing and QoS-aware network selection scheme in heterogeneous vehicular networks[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020: 1–6. doi: [10.1109/ICC40277.2020.9149168](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149168).
- [16] SI Qi, CHENG Zhipeng, LIN Yuhui, *et al.* Network selection in heterogeneous vehicular network: a one-to-many matching approach[C]. 2020 IEEE 91st Vehicular

- Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 2020: 1–5. doi: [10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129074](https://doi.org/10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129074).
- [17] 马彬, 王双双, 陈海波. 基于区间二型模糊神经网络的垂直切换算法[J]. 电子学报, 2021, 49(5): 928–935. doi: [10.12263/DZXB.20200850](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200850).
- MA Bin, WANG Shuangshuang, and CHEN Haibo. Vertical handover algorithm based on interval type-2 fuzzy neural network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(5): 928–935. doi: [10.12263/DZXB.20200850](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200850).
- [18] 张长青. TD-LTE自组织网络SON技术分析和建议[J]. 移动通信, 2012, 36(22): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2012.22.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2012.22.012).
- ZHANG Changqing. Analysis and suggestions on SON technology of TD-LTE Ad Hoc network[J]. *Mobile Communication*, 2012, 36(22): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2012.22.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2012.22.012).
- [19] LIANG Gen, YU Hewei, and GUO Xiaoxue. Joint access selection and bandwidth allocation algorithm supporting user requirements and preferences in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 23914–23929. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2899405](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899405).
- [20] MAHIRA A G and SUBHEDAR M S. Handover decision in wireless heterogeneous networks based on feedforward artificial neural network[M]. BEHERA H S and MOHAPATRA D P. *Computational Intelligence in Data Mining*, Singapore: Springer, 2017, 556: 663–669. doi: [10.1007/978-981-10-3874-7_63](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3874-7_63).
- 吴利平: 女, 1979年生, 讲师, 研究方向为无线网络资源分配、高等教育管理等.
- 王双双: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为异构无线网络中的垂直切换.
- 马彬: 男, 1978年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为异构无线网络、认知无线电网络等.

责任编辑: 余蓉