

基于模糊理论的 5G 异构网络切换算法研究

胡 漾

(湖南天辰建设有限责任公司,湖南长沙 410007)

【摘要】随着 4K 视频、AR、VR 移动业务的快速发展,4G 宏站已无法满足大众对网速的需求,需要新建大量 5G 小基站(如微微基站、毫微微基站、毫米波基站)混搭于 4G 宏站网络中。但小基站覆盖范围小,会导致手机频繁切换,因此设计一种基于模糊逻辑的高效 5G 异构网络切换算法非常重要,以此来降低 UE 的掉线率及减少其在 5G 异构网络中的切换次数。通过仿真对比发现:文章中提出的切换算法与现有切换算法相比在掉线率和切换次数上有良好表现。

【关键词】5G;模糊理论;切换算法

【doi:10.3969/j.issn.2095-7661.2021.02.004】

【中图分类号】TN929.5

【文献标识码】A

【文章编号】2095-7661(2021)02-0013-05

Research on Handover Algorithm of 5G Heterogeneous Network Based on Fuzzy Theory

HU Yang

(Hunan Tianchen Construction Co. Ltd., Changsha, Hunan, China 410007)

Abstract: With the rapid development of 4K video, AR and VR mobile services, 4G macro stations can no longer meet the demand for network speed. Therefore, many 5G small base stations will be built, such as PicoCell, FemtoCell and millimeter wave base stations. However, the small coverage of small cells will lead to frequent handovers of mobile phones. Therefore, it is very important to design an efficient handover algorithm for 5G heterogeneous networks based on fuzzy logic, so as to reduce the dropping rate of UE and the handover times in 5G heterogeneous networks. Through simulation comparison, it is found that the handover algorithm proposed in this paper has good performance in dropping rate and handover times compared with existing handover algorithms.

Keywords: 5G; fuzzy theory; handover algorithm

1 研究基础

随着移动通信技术的快速发展及大量新业务的出现,以前一个地区少有的几个宏基站已无法承受移动用户的快速增长需求,因此越来越多的小型基站(如微微蜂窝站、微蜂窝站)开始扩建。虽然如此多的小型基站解决了移动用户的基本需求,但密集分布的小型基站因其传输功率低、覆盖范围小,使得基站系统在判断是否需切换并保持高连接质量已成为一个棘手问题。

切换控制算法一般采用切换触发时延(TTT)和切换迟滞(HOM)两个参数来进行。当 $RSRP_n \geq RSRP_s + HOM$,并满足切换触发时延,将触发 UE(用户设备)进行切换。HOM 是为防止频繁切换设定的一

个值, $RSRP_s$ 、 $RSRP_n$ 分别代表服务小区及邻小区参考信号接收功率。当 HOM 取值太大时,即使接收信号很差,UE 仍需连接到原小区,从而导致 UE 掉线;反之,当 HOM 太小时,UE 切换概率增加,小区负担会加重,网络吞吐量会降低。TTT 为 UE 在多长时间接收基站小区功率都满足 $RSRP_n \geq RSRP_s + HOM$ 条件才触发切换的时间参数,以限制 UE 的切换次数。本文提出的切换算法中的 TTT 是一个固定值,重点对 HOM 值进行设计调整。

为保持良好连接,减少频繁切换次数,设置合适的 HOM 值已成为解决问题的关键。本文采用模糊逻辑方法来调整 HOM 的值,该模糊逻辑方法以隶属度函数和预先设计的规则为基础,通过规则生成介于

【收稿日期】2021-04-16

【作者简介】胡漾(1984-),男,湖南长沙人,湖南天辰建设有限责任公司一级建造师(通信与广电工程),研究方向:通信项目管理。

[0, 1] 间的模糊值, 通过隶属度函数对应公式来生成 HOM 值。规则是由设计者的经验和数据观察制定, 规则设置得越好, 则小区的选择性能越好。本文只使用了 9 条模糊规则, 但在解决无线链路失败 (RLF) 掉线、降低切换尝试以减轻小区及用户终端负担方面有很好的表现。

本文提出的切换算法主要目标是最小化 RLF, 因断开连接是 UE 使用中的关键问题, 每个人都不希望在通话或上网时频繁断开连接。第二个目标是减少切换尝试, 同时不增加 RLF 次数。本文采用模糊逻辑算法来解决小区切换问题, 模糊逻辑算法的优点是制定的规则和准则容易被人们理解, 且易于控制。其算法在小区选择问题上几乎没有特定的模式、模型, 但具有一些区别性特征, 即模糊性略有不同, 因此适合使用模糊逻辑方法。

2 模糊逻辑算法

2.1 传统切换策略

传统的切换策略是比较服务小区及邻小区的 RSRP 信号强度。RSRP 定义为小区特定参考信号功率的线性平均值, 它是 5G 系统的关键性指标。切换触发基于 UE 测量邻小区 RSRP 信号强度高于当前服务小区 RSRP 信号强度一个 HOM 值, 并报告给 gNB, 且在一段时间内保持不变, 则启动切换, 即:

$$RSRP_n \geq RSRP_s + HOM \quad (1)$$

公式(1)中 $RSRP_n$ 和 $RSRP_s$ 分别代表邻小区和服务小区 RSRP 强度, HOM 是滞后余量。通过 HOM 的约束, 减少频繁切换, 从而节省 UE 的功耗并减轻小区负担。

2.2 模糊逻辑

模糊逻辑是一种模仿人脑对不确定部分的推理思维方式, 切换决策高效^[1-2]。因为它可以收集数据、分析数据, 并通过对数据的分析来做出让 UE 停留在现有服务小区还是切换到其邻小区的判断。模糊逻辑的第一步是模糊化, 将浅显明了的非模糊输入值通过隶属度函数转换为模糊语言值(如低、高), 这些模糊语言值的范围为 [0, 1](如将非模糊输入值 80 转换为高 0.8、非模糊输入值 10 转换为低 0.1)^[3]。隶属度函数为了将非模糊输入值转换为模糊语言值, 首先, 设置每种语言值范围, 即数据库的范围。如图 1 所示, 采用梯形隶属度函数将非模糊输入值转换为模糊语言输出值。隶属度函数除了可采用梯形, 还可采用三角形等其他形状。梯形隶属度函数非常适合用于切换决策, 因为它易于快速转换输入值。

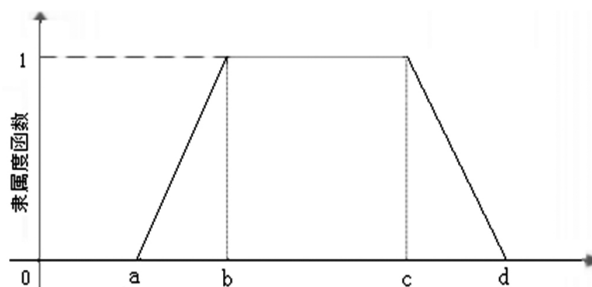


图 1 梯形隶属度函数

梯形隶属度函数 f 可以用 (a, b, c, d) 表示, 其数学形式如下:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } (x < a) \text{ or } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{if } b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-d}, & \text{if } c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

利用隶属度函数将输入值转换为语言输出值时, 可能有多个输出值, 此时需依据规则库, 包含所有可能输入, 根据输入生成输出。然后根据输入, 应用 IF-THEN 规则处理隶属度函数输出。例如, 隶属度函数有两输入 A 和 B, A、B 输出分别为 A_i^1 、 B_i^1 , 利用公式(3)的 IF-THEN 规则从 p 个规则库中获取单个 S 。

$$\text{IF } A \text{ is } A_i^1 \text{ and IF } B \text{ is } B_i^1 \text{ THEN output is } S \text{ for } i=1, 2, \dots, p \quad (3)$$

应用规则库后, 下一步行动是推理工具。当前一步结束时, 将触发许多规则, 这些规则的值在 [0, 1] 之间, 且相同语言值的总和为 1。确定哪个规则将被触发要用到推理工具, 一般推理工具使用 max-min 方法来确定要触发哪些规则^[4]。

推理工具将计算每条规则并选择最有可能触发的规则。因 max-min 方法具有较低复杂度, 计算时间短, 非常适合于动态切换决策。在此步骤中, 选择每个规则的最小输入值来计算规则的语言输出值, 然后通过从相同语言值中取最大值来合并每个大体相同语言值, 最后最大值代表该规则的大体相同语言值输出^[5]。因此, 在推理工具结束后, 输出的数量与不同语言值的数量一样多。该步骤的输出如下:

$$y_k = \max_k [\min[\text{input}(1)_k, \text{input}(2)_k]] \text{ for } k = 1, 2, \dots, r \text{ rules} \quad (4)$$

公式(4)为 y 输出, 存在 y 输出相同的语言值。最后一步是去模糊化, 利用每个不同输出的语言值来计算最终的 HOM 值。通过去模糊化, 将 [0, 1] 间的推理工具输出模糊语言值转换为一个单一明确数。

2.3 推荐算法

本文推荐算法中, 只有 SINR 和 ΔSINR (随变 SINR) 两个模糊输入。第一个输入参数为 UE 服务小

区的 SINR, 标记为 ρ SINR。服务小区的 SINR 值高表示连接质量好。相反, SINR 值低表示质量差。根据 3GPP 规定, 如果服务小区的 SINR 值低于 -8 dB 且持续 1 秒钟, 则连接将中断。因此, SINR 在连接中起着重要作用, SINR 值高代表有更好的吞吐量。对于 ρ SINR, 设计服务小区 SINR 的三个梯形集: 低 $[-8, -8, -7, -6]$ dB, 正常 $[-7, -6, -4, 1]$ dB 和高 $[-4, 1, 70, 70]$ dB, 所以其 SINR 值输入范围为 $[-8, 70]$ 。在本文模糊算法中, 由于测量小区的 $\text{SINR} \geq -8$ dB, 因此当服务小区的 SINR 值低于 -8 dB 时, 不运行模糊算法, 直接将其 HOM 值设置为 100。

当 $\text{SINR} \leq -8$ dB, 且持续时间超过 1 秒钟时将断开连接, 也即如 3GPP 协议所述的当某服务小区的 $\text{SINR} \leq -8$ dB 时, 切换将失败。故如果某服务小区的 SINR 值在 1 秒内不能恢复到 -8 dB 以上, UE 将放弃无用的切换。因为, 尝试进行无用的切换将增加切换尝试, 从而导致服务小区负载的增加。由于模糊特性, ρ SINR 区间的隶属度函数有些重叠, 它可使 HOM 值输出平滑而不会引起剧烈变化。

考虑到 SINR 值变化, 故将 SINR 表示为 Δ SINR, 即本文提出的算法在过去 200 ms 内的 SINR 值变化量, 因为在 3GPP 仿真设置中, 开始进行切换则需进行 200 ms 的切换尝试。通过观察过去 200 ms 内 SINR 值的变化及第一个模糊输入服务小区的 SINR 值, 以预测此后 SINR 值对应小区是否需断开连接。图 2 为 SINR 和 Δ SINR 的隶属度范围, Δ SINR 输入范围为 $[-10, 7]$, 其变化范围 $[-10, 7]$ 可涵盖过去 200 ms 内 SINR 值的所有变化。对于 Δ SINR, 同样设计了 Δ SINR 的三个梯形集: 好 $[0, 0, 7, 7]$ dB, 弱 $[-4, 5, 4, 0, 0]$ dB, 很差 $[-10, -10, -4.5, -4]$ dB。

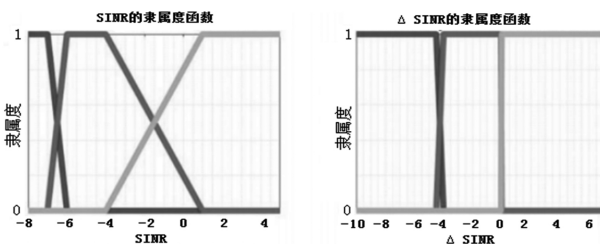


图 2 SINR 和 Δ SINR 的隶属度范围图

这两个输入由推理引擎组合, 通过预设规则生成以 μ HOM 形式的 HOM 输出。且同样定义了 μ HOM 的两个梯形集: 低 $[-1, -1, 1, 1]$ dB 和高 $[2, 2, 4, 4]$ dB。

通过观察模拟结果, 对两个输入和一个输出进行多次调整, 最初, 在 ρ SINR、 Δ SINR 和输出 μ HOM 中只有两个梯形集合。以 ρ SINR 为例, 最初的范围是 $(-8 \ 1)$ 和 $(1 \ 70)$ 。在测试 SINR 范围时, 发现输入 $(0.09, -8.20)$ 的 HOM 值应低于 2.4。否则, 如果输出 HOM、 μ HOM 值过高, 则会发生一些断连, 因此将

SINR 的边缘模糊化为 $(-8 \ -8 \ -4 \ 1)(-4 \ 1 \ 70 \ 70)$, 以减少断开连接次数和切换尝试次数, 通过测试, 发现 $(-4 \ 1)$ 发生了一些切换尝试, 并且在该区域几乎没有断连。通过对该区域进行重叠, 以使输出 HOM 变得模糊, 有时可能会略高于 2.4。低于 -8 dB 的输入直接设置为 100 dB HOM 输出。当将 ρ SINR 调整为 $(-8 \ -8 \ -4 \ 1)(-4 \ 1 \ 70 \ 70)$ 时, 会发现当 SINR 值高于 -7 , 且 Δ SINR 值约为 -1 时会发生乒乓切换, 因此将集合调整为 $(-8 \ -8 \ -7 \ -7)(-7 \ -7 \ -4 \ 1)$ 和 $(-4 \ 1 \ 70 \ 70)$ 。经过测试, 将 -7 的边缘模糊化为 $(-8 \ -8 \ -7 \ -6)(-7 \ -6 \ -4 \ 1)$ 和相同边缘 $(-4 \ 1 \ 70 \ 70)$, 以防止 μ HOM 急剧变化, 并在断连和切换尝试方面具有更好表现。

制定了 9 条模糊规则, 规则数量 9 是两个输入 3×3 的组合。思路如下: 如果 ρ SINR 为低, 而 Δ SINR 为下降, 则应将 μ HOM 设置为低, 以减少发生断连的次数; 如果 ρ SINR 为低且 Δ SINR 为良好, 则将 μ HOM 设置为高, 代表服务小区信号改善, 此时可设置较高的 μ HOM 值以减少切换尝试的次数; 如果 ρ SINR 为正常, 而 Δ SINR 为下降, 代表服务小区现在不安全, 此时需将 μ HOM 设置为低, 以减少发生断连的次数; 如果 ρ SINR 为正常, 而 Δ SINR 为弱化或者好, 代表服务小区现在安全, 此时可设置高的 μ HOM 值以减少切换尝试的次数; 最后, 如果 ρ SINR 为高, 无论 Δ SINR 情况如何, 代表服务小区现在都非常安全, 此时可将 μ HOM 设置为 High 来减少切换尝试的次数。9 条规则汇总如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

规则编号	ρ SINR	Δ SINR	μ HOM
1	Low	Sinking	Low
2	Low	Weakening	Low
3	Low	Good	High
4	Normal	Sinking	Low
5	Normal	Weakening	High
6	Normal	Good	High
7	High	Sinking	High
8	High	Weakening	High
9	High	Good	High

以下算法为基于模糊逻辑的切换算法, 用于解决切换决策问题:

If $\text{RSRP}_n > \text{RSRP}_s$, then

Put $[\rho \text{ SINR}, \Delta \text{ SINR}]$ to the fuzzy sets

Calculate the value of the degree for each fuzzy rule

By the fuzzy rule table and membership function, calculating the output of every triggered rule

Use the min method to compute the altitude of k

rule with same y output linguistic value: $y_k = \min [\rho \text{ SINR}_k, \Delta \text{ SINR}_k]$

Integrate the y_k into a single fuzzy set by max method: $\mu \text{ HOM}_y = \max_k [y_k]$

Transform the $\mu \text{ HOM}_y$ into a crisp value HOM used Center Of Gravity

If $\text{RSRP}_n > \text{RSRP}_s + \text{HOM}$ and $p \geq t$ (t is Time-to-Trigger), then

Do handover

Else

$P + = 1$ time slot

End if

Else

Do Not Anything

End if

3 仿真

3.1 仿真设置和仿真模型

仿真参数设置如表 2 所示, 仿真区域为大小 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 区域, 在此区域中随机均匀放置 100 个 SgNB, 2 个 gNB 固定位于上下角以覆盖所有模拟区域, 还有 50 个 UE, 其移动模型采用 Random waypoint/Manhattan, 模拟行人在街上人行道行走, 针对 gNB 和 SgNB 路径损耗传播模型为 OkumuraHata/ITU-R P.1238。所有仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真表

参数设置	设置值
仿真区域大小 (m)	1000*1000
载波频率 (GHz)	2
发射功率 (gNB/SgNB) (dBm)	43/20
gNB/SgNB/UE 数量	2/100/50
gNB/SgNB 路径损耗模型	Okumura-Hata/ITU-R P.1238
UE 噪声系数 (dB)	15
gNB/SgNB/UE 天线高度 (m)	30/3/1.5
移动模型	Random waypoint/Manhattan
TTT (ms)	80
切换准备时间/切换执行时间 (ms)	80/40
一次仿真时间 (s)	900
仿真掉话次数	20
最低停留时间 (s)	1

3.2 性能指标

图 3 是 3GPP 描述的切换过程, 主要目的是减少连接失败。连接失败可发生在图 3 切换步骤中 T310 倒计时任何时刻, 或切换准备时间已结束但 T310 开始进入倒计时, 或切换到目标小区的执行时间已准备

就绪, 但目标小区 $\text{SINR} \leq 8$ 。

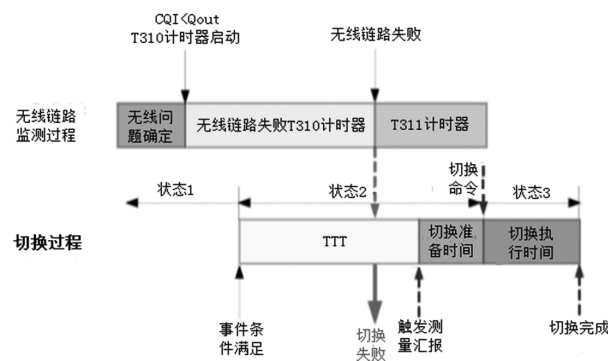


图 3 切换过程图

以上三种情况将导致连接失败, UE 掉线。因此, 第一个性能指标是连接失败率 (CFR), 它表示 UE 可能每分钟断连的次数。

$$CFR = \frac{N_{CF}}{N_{UE} \times \text{simulation time (minute)}} \quad (5)$$

第二个目标是减少切换尝试次数, 但不增加 CFR。所以有切换尝试率 (HAR) 指标, 它表示 UE 可每分钟启动切换尝试的次数。图 3 中切换尝试发生在测量报告上报引起的触发, 服务小区向 UE 发送消息, 表明切换已准备好。过多的切换尝试将给服务小区和 UE 造成负担, 服务小区将频繁发送切换命令。

$$HAR = \frac{N_{HA}}{N_{UE} \times \text{simulation time (minute)}} \quad (6)$$

最后一个指标是乒乓切换率 (PPR), PPR 表示 UE 每分钟发生的切换次数。乒乓切换意味着 UE 连接到小区, 切换到新小区 B 并切换回原小区 A 的时间少于最小停留时间。最小停留时间是 UE 建立与服务小区可靠连接的时间加上有效数据传输的时间。在本文仿真设计中 PPR 设置为 1 秒。

$$PPR = \frac{N_{PP}}{N_{UE} \times \text{simulation time (minute)}} \quad (7)$$

3.3 算法仿真比较

在本文中, 比较两种固定 HOM 和三种不固定 HOM 算法, 五种算法基本情况如下: (1) 设置 $\text{HOM} = 0$ 时, 则希望 UE 连接到具有最高 RSRP 的小区 (TTT 将阻止 UE 立即切换到具有最高 RSRP 的小区); (2) $\text{HOM} = 3$, 偏移值 3 与 $\text{HOM} = 0$ 不同, HAR 较低, 但 CFR 较高; (3) 基于模糊逻辑的自适应迟滞 (AHM) 算法, 使用模糊逻辑方法设置 HOM 值; (4) 路由迟滞 (RHA) 算法, 因该方法知道 UE 的行进路线, 所以可选择最合适小区进行连接, 因此是最佳的解决方法; (5) PFA (极坐标) 算法, 算法解决效果一般。

首先, 通过图 4 来看目标连接失败, 可看到本文推荐算法连接失败率是五种算法中次低的, 且不同移动性模型导致连接失败的数量大不相同。且随着小区

数目的增加,连接失败也增加,因为一个区域中小区越多,对其他小区的干扰也会越多,这将使信号恶化,从而使连接失败增加。基于不同数量小区,本文提出的模糊算法在具有 100 个 SgNB 的 manhattan 模型

中,其失败率只有最高连接失败率的 0.267 倍,与除 RHA 之外的其他三种算法相比,其数量仍然很少,只有固定 HOM = 0 值的 0.446 倍,在具有 100 个 SgNB 的 manhattan 模型中,失败率是倒数第二低。

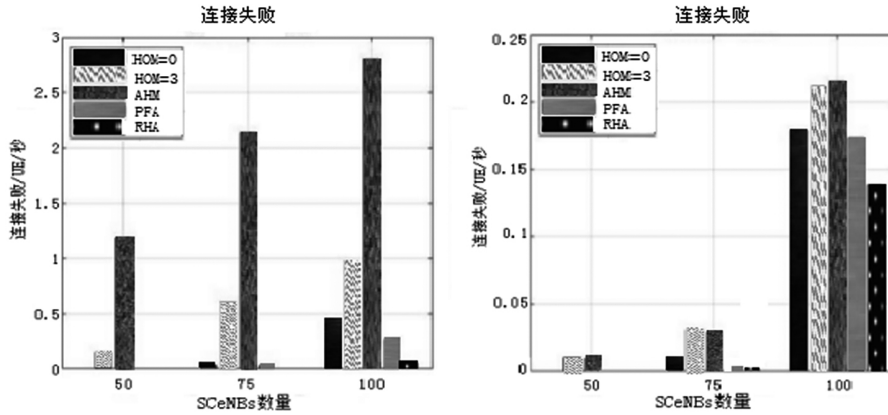


图 4 连接失败仿真图(左 / 右移动性模型对应为 anhattan/random waypoint)

从图 5 切换尝试仿真结果可看出:除了 RHA 之外,虽然切换尝试的次数大不同,但是不同切换算法选择不同移动模型导致的切换尝试次数排序不变。结

果还表明,随着小区数量的增加,切换尝试次数也随之增加,可能是因为 UE 具有更多的目标小区选择。

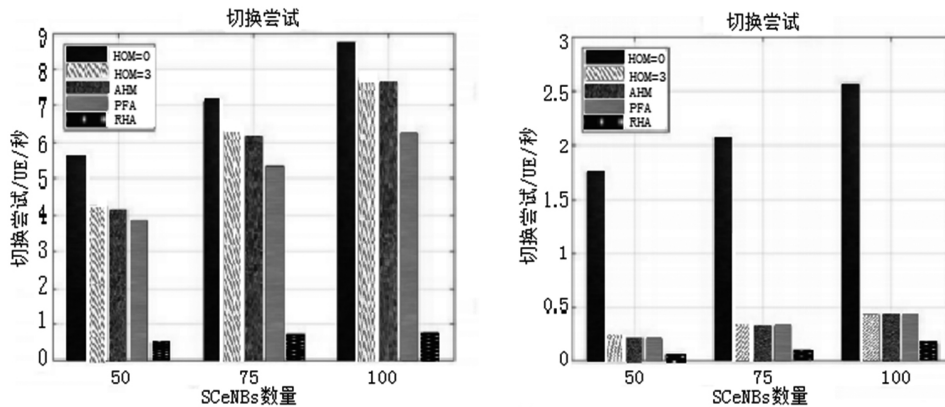


图 5 切换尝试仿真图(左 / 右移动性模型对应为 manhattan/random waypoint)

最后比较指标是乒乓切换率,仿真结果为:除了 HOM = 0 以外,另外四种几乎没有乒乓切换。另外,乒乓切换效应在密集分布小区环境中不是问题,有时为了防止 UE 断线,乒乓切换效应无法避免。仿真结果显示:采用 RHA 算法,其每分钟的乒乓切换次数为 0.0001 次。

4 总结

随着 5G 技术的发展,切换策略变得越来越重要。在本文中,考虑了 SgNB 和 gNB 网络中的切换决策问题,每个 UE 只能同时连接到一个小区,并且该 UE 不会干扰其它 UE。本文提出的切换算法是通过采用模糊逻辑方法来实时调整切换的 HOM 值,让 UE 连接到合适的小区。仿真结果表明:除考虑最佳 RHA 方法外,本文算法的 CFR 最低,HAR 最低,几乎消除了乒乓切换效应。在 100 个小区环境中,采用 random waypoint 移动性模型,每个 UE 每分钟只有 0.1733 次

连接失败,而采用 mahattan 移动性模型,只有 0.267 次。在 75 个小区环境中,采用 random waypoint 和 mahattan 移动性模型,连接失败次数分别降低到 0.00353 次和 0.0304 次,意味着本文算法可以保持较高的连接质量。

【参考文献】

[1]王继博,杨蕾,齐东元.基于差分预测和模糊逻辑的垂直切换机制研究[J].计算机应用研究,2020(S2):284-286.

[2]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(3):629-636.

[3]梅玉鹏,刘毅,李国燕.一类不确定网络切换模糊系统的非脆弱控制[J].控制工程,2021(2):229-236.

[4]温强.LTE-R 系统中模糊预测越区切换方案研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.

[5]蔡卫红,欧红玉.LTE 系统下行链路 FDRX 节能机制研究[J].湖南邮电职业技术学院学报,2020(3):5-8.