

# 基于区间标记判决的稳健垂直切换算法研究

马 彬<sup>1,2</sup>, 汪思霖<sup>1</sup>, 谢显中<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 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)

**摘 要:** 在异构 5G 网络中, 针对切换算法稳健性差引起的切换准确率低的问题, 提出一种基于区间标记判决的稳健垂直切换算法. 首先, 引入中位值平均滤波法, 获取更准确的网络参数. 其次, 基于参数波动特征分析, 提出区间标记判决算法, 保证候选网络筛选通过率和准确率的同时, 提高区间标记判决算法的稳健性. 再次, 根据移动终端传输层需求, 结合终端运动趋势, 分别使用不同权值的效用函数获得最佳目标网络. 最后, 仿真结果表明, 该算法能够有效提升切换触发和网络筛选的准确率, 降低切换失败率和乒乓效应, 提高系统吞吐量, 并能够根据移动终端的需求选择最佳目标网络.

**关键词:** 异构 5G 网络; 垂直切换; 中位值平均滤波; 区间标记判决

**中图分类号:** TN915      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)05-0891-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.008

## Research on Robust Vertical Handoff Algorithm Base on Interval Mark Decision

MA Bin<sup>1,2</sup>, WANG Si-lin<sup>1</sup>, XIE Xian-zhong<sup>2</sup>

(1. Institute of Computer Science and Technology, 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)

**Abstract:** In heterogeneous 5th generation network, a robust vertical handoff algorithm based on interval mark decision is proposed to solve the problem of low handoff accuracy, which is caused by poor robustness of current vertical handoff algorithms. Firstly, the median average filter method is employed to obtain more accurate network attribute values. Secondly, based on parameter fluctuation characteristic analysis, an interval mark decision algorithm is proposed to ensure the pass rate and accuracy of candidate network screening, moreover, the robustness of the handoff process is also effectively improved. Thirdly, according to the transmission layer requirements and motion trend of the mobile terminals, the optimum target network is obtained by using utility functions with different weights. Finally, the simulations show that the proposed algorithm can effectively improve the accuracy of handoff triggering and network screening while reducing the failed handoff and the ping-pong effect. Not only that, the total network throughput is also improved. Meanwhile, it chooses the best target network according to the requirements of mobile terminals.

**Key words:** heterogeneous 5G network; vertical handoff; median average filter; interval mark decision

## 1 引言

随着 5G 网络技术的商用, 势必与现存的无线网络技术并存, 融合成异构无线网络, 共同为移动终端提供无处不在的无缝移动网络服务. 但不同的网络技术各有其优势, 可为不同需求的移动终端提供适合的网络

服务. 当移动终端在异构网络中移动时, 如何在保证移动终端需求的前提下, 提高网络切换准确性成为该领域研究的热点问题.

目前垂直切换技术在增强切换准确性方面的研究已经取得了一些成果, 如: 文献 [1] 中提出采用驻留定时器算法, 通过第二次检测提升切换触发的准确性, 以

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-08-08; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划重大项目 (No. KJZD-M201900602); 重庆市教委科学技术研究重点项目 (No. KJZD-K201800603); 重庆市自然科学基金 (No. CSTC2018jcyjAX0432); 重庆市研究生科研创新项目 (No. CYS19252)

降低由噪声引起的不必要切换. 文献[2]中, 提出了一种基于决策树的稳健垂直切换算法, 其主要采用卡尔曼滤波算法提高网络参数的精准性, 并对落入波动区间内的网络参数进行二次检测, 进一步提高参数的精准性. 然后采用量化误警率与漏警率的方式, 选择服务质量更好的目标网络, 提升切换的准确性. 文献[3]中提出一种面向终端个性化服务的模糊逻辑切换算法, 根据不同的终端需求采用不同的隶属度函数进行模糊逻辑推理, 选择目标网络. 以达到准确切换的同时, 也满足移动终端需求. 文献[4]中也提出了基于模糊逻辑的垂直切换算法, 与文献[3]不同的是其使用 Kalman 滤波算法获取更准确的网络参数, 进一步提升决策阶段的准确性. 文献[5]提出一种基于马尔科夫预测的垂直切换算法, 通过预测切换决策之后网络状态的动态变化, 增强网络切换的准确性.

以上算法主要通过降低噪声干扰增强判决的准确性, 但均未考虑算法的稳健性对判决准确性的影响. 在切换判决时, 由于噪声干扰无法完全消除, 参数在阈值处会产生微小波动, 从而引起判决结果的变化, 降低判决结果的准确性. 本文从增强判决稳健性出发, 提出一种基于区间标记判决的稳健垂直切换算法, 以解决由参数波动和绝对阈值引起的切换算法稳健性差的问题.

本文主要贡献如下:

(1) 采用中位值平均滤波算法降低噪声, 更加快速和准确的获取网络参数值.

(2) 根据噪声服从高斯分布的特性, 提出区间标记判决算法, 降低由噪声干扰和绝对阈值引起的判决结果变动次数, 增强筛选过程中的稳健性.

## 2 垂直切换算法流程图

基于区间标记判决的稳健垂直切换算法执行过程, 如图 1 所示, 可以分为三个阶段: (1) 切换触发阶段: 由接收信号强度 (Received Signal Strength) 低于设定阈值触发切换. (2) 网络筛选阶段: 首先对网络参数进行滤波处理, 然后通过区间标记判决算法筛选生成网络候选集. (3) 切换决策阶段: 判断当前是否生成候选集, 若候选集已经生成, 则通过二次采集 RSS 预测移动终端在各个候选网络中的持续时间, 然后根据移动终端的需求以及移动终端运动趋势, 采用不同的效用函数选择目标网络并切换到该网络, 若没有生成候选集则不执行切换.

## 3 参数定义与处理

### 3.1 网络参数

(1) 信号强度表示为:

$$RSS(L) = \rho - \eta \lg(L) + \mu_1 \quad (1)$$

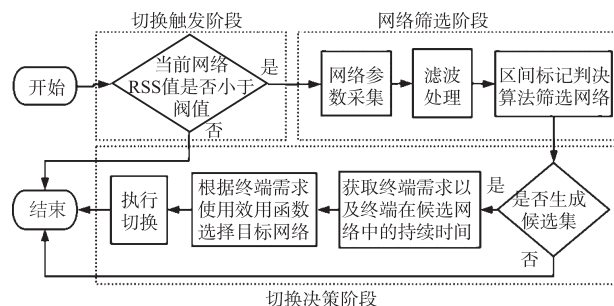


图1 垂直切换算法流程图

其中,  $\rho$  表示基站无线信号发射功率,  $\eta$  是路径损耗因子,  $L$  为移动终端到网络接入点的距离,  $\mu_1$  则是均值为 0, 方差为  $\sigma_1$  的高斯白噪声.

(2) 误码率表示为:

$$BER(L) = Q(\sqrt{SNR(L)}) \quad (2)$$

其中  $SNR(L) = \frac{RSS(L)}{N(k)}$ ,  $N(k)$  为网络环境中的干扰信号强度,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ . 误码率要求是: RSS 最低值与干扰信号均值的信噪比能够提供最低的网络服务质量, 并且其值会随环境变化产生波动.

(3) 网络阻塞概率表示为:

$$Pb(A) = \delta \frac{A}{q} \quad (3)$$

其中,  $A = \bar{k}s$ ,  $\bar{k}$  表示平均网络服务请求发起次数,  $s$  指网络服务时长.  $\bar{k}$  是满足均值为  $\mu_{rs} = \gamma \cdot m$ , 方差为  $\sigma_{rs} = \sqrt{\mu_{rs}}$  的高斯分布. 其中,  $m$  为连接到当前网络的移动终端数量,  $\gamma$  为连接到当前网络的终端发起网络服务请求的概率,  $\mu_{rs}$  为当前请求网络服务的终端数量的均值,  $\sigma_{rs}$  为其方差.  $s$  是满足平均服务时长为  $\mu_{st}$ , 方差为  $\sigma_{st}$  的高斯随机变量.  $q$  为网络信道数量,  $\delta$  为常数 ( $\delta > 0$ ).

### 3.2 中位值平均滤波法

滤波算法通过对同一个网络进行连续若干次网络参数采集, 删除其中的最大值和最小值, 然后计算剩下数值平均值. 接收信号强度的采集样本为  $RSS_{i,j}$ , 表示移动终端范围内的第  $i$  个网络的第  $j$  次接收信号强度采样. 干扰信号采集样本为  $N_{i,j}$ . 算法 1 如下:

#### 算法 1 中位值平均滤波算法

输入: 连续  $m$  次采集第  $i$  个网络的  $RSS_{i,j}$  和  $N_{i,j}$

输出: 得到过滤噪声后的  $RSS_i$  和  $N_i$

① 计算 RSS 与噪声的最大最小值

$$RSS_{i,\max} = \max\{RSS_{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m\}$$

$$RSS_{i,\min} = \min\{RSS_{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m\}$$

$$N_{i,\max} = \max\{N_{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m\}$$

$$N_{i,\min} = \min\{N_{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m\}$$

② 计算 RSS 和噪声的累加和

$$SUM_{i,rss} = \left( \sum_{j=1}^m RSS_{i,j} \right) - RSS_{i,max} - RSS_{i,min}$$

$$SUM_{i,noise} = \left( \sum_{j=1}^m N_{i,j} \right) - N_{i,max} - N_{i,min}$$

③计算均值

$$RSS_i = SUM_{i,rss} / (m - 2)$$

$$N_i = SUM_{i,noise} / (m - 2)$$

本实验对比了原始数据 (No Process)、卡尔曼滤波算法 (Kalman)、中位值滤波算法 (Median) 和中位值平均滤波算法 (Median Average Filter, MAF) 的时间消耗以及滤波效果. 如图 2, 展示了时间消耗对比, 其中 MAF 算法的时间消耗低于 Kalman 滤波算法和 Median 滤波算法. 如图 3 对比了滤波效果, 其中 MAF 的方差低于 Kalman 滤波算法和 Median 滤波算法的方差. 证明了 MAF 算法在低于 Kalman 滤波算法的时间消耗下, 能更有效降低噪声干扰.

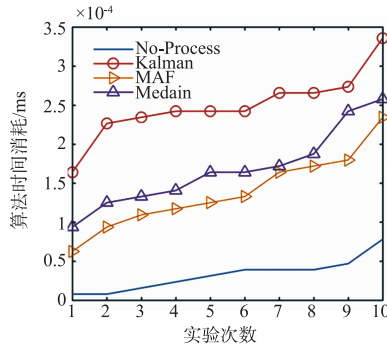


图2 算法时间消耗对比

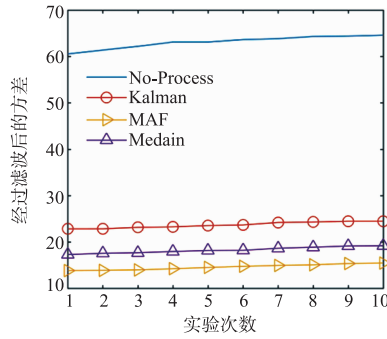


图3 算法滤波效果对比

## 4 区间标记判决算法

该算法根据网络参数在阈值附近的波动特征, 将每个网络参数分为三个区间. 分别是完全满足阈值区间、波动区间、完全不满足阈值区间. 对参数值落入每个区间对应的标记分别为“优”、“中”、“差”. 然后通过综合各参数的标记, 确定当前网络是否满足要求.

### 4.1 参数区间设置

(1) RSS 区间设置

RSS 在阈值  $\varepsilon_1$  处满足方差为  $\sigma_1$  的随机高斯分布,

则波动区间设置为  $[\varepsilon_1 - n\sigma_1, \varepsilon_1 + n\sigma_1]$ . 其中,  $n$  为区间调整因子. 据此 RSS 区间设置如下:

$$\begin{cases} RSS_i > \varepsilon_1 + n\sigma_1, & \text{标记值“优”} \\ RSS_i \geq \varepsilon_1 - n\sigma_1, RSS_i \leq \varepsilon_1 + n\sigma_1, & \text{标记值“中”} \\ RSS_i < \varepsilon_1 - n\sigma_1, & \text{标记值“差”} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 误码率区间设置

令  $t = \sqrt{\text{SNR}(L)}$ , 且  $Q(t_0) = \varepsilon_2$ , 则  $t_0 = \sqrt{\text{SNR}(L_0)}$ , 其中  $\varepsilon_2$  为误码率阈值. 由高斯分布的性质,  $\text{SNR}(L)$  满足方差为  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的随机高斯分布. 则  $t = \sqrt{\text{SNR}(L)}$  在  $L_0$  处满足均值为  $t_0$ , 方差为  $\sigma_{ber}$  的高斯分布. 其中  $\sigma_{ber}$  是通过均值为  $\text{SNR}(L_0)$ , 方差为  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的高斯分布进行开方运算, 然后统计开方之后数值的方差得到. 则  $t$  变量在  $t_0$  处的波动区间为  $[t_0 - n\sigma_{ber}, t_0 + n\sigma_{ber}]$ , 误码率波动区间设置为:

$$\begin{cases} BER_i < Q(t_0 + n\sigma_{ber}), & \text{标记值“优”} \\ BER_i \geq Q(t_0 + n\sigma_{ber}), BER_i \leq Q(t_0 - n\sigma_{ber}), & \text{标记值“中”} \\ BER_i > Q(t_0 - n\sigma_{ber}), & \text{标记值“差”} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 冲突率区间设置

由式(3), 令  $\text{Pb}(A_0) = \varepsilon_3$ , 其中  $\varepsilon_3$  为冲突率阈值. 其中  $A = \bar{k}s$ , 则  $A$  在  $A_0$  处满足均值为  $A_0$ , 方差为  $\sigma_{cst} =$

$\sqrt{\frac{\sigma_{st}^2 \cdot \sigma_{rs}^2}{\sigma_{st}^2 + \sigma_{rs}^2}}$  的高斯分布. 所以,  $A$  的波动区间设置为  $[A_0$

$- n \cdot \sigma_{cst}, A_0 + n \cdot \sigma_{cst}]$ , 冲突率区间设置如下:

$$\begin{cases} Pb_i < \text{Pb}(A_0 - n\sigma_{cst}), & \text{标记值“优”} \\ Pb_i \geq \text{Pb}(A_0 - n\sigma_{cst}), Pb_i \leq \text{Pb}(A_0 + n\sigma_{cst}), & \text{标记值“中”} \\ Pb_i > \text{Pb}(A_0 + n\sigma_{cst}), & \text{标记值“差”} \end{cases} \quad (6)$$

### 4.2 算法步骤

在算法中为了便于表示和区分, 使用数值代表标记. 其中, 2.1 表示标记“优”, 2 表示标记“中”, 0 表示标记“差”. 当综合数值大于等于  $mr = 6.2$  时, 说明该网络至少满足两个“优”一个“中”的要求. 算法 2 如下:

#### 算法 2 区间标记判决算法

输入: 网络参数向量  $RSS, BER, Pb$

输出: 目标网络候选集

$N = \text{length}(RSS)$

$\text{sign}[N] = 0$

FOR  $i = 1$  TO  $N$

IF  $RSS_i > \varepsilon_1 + n \cdot \sigma_1$

$\text{sign}_i = \text{sign}_i + 2.1$

```

ELSE IF  $RSS_i \geq \varepsilon_1 - n\sigma_i$  &&  $RSS_i \leq \varepsilon_1 + n\sigma_i$ 
     $sign_i = sign_i + 2$ 
ELSE
     $sign_i = sign_i + 0$ 
END IF
对误码率和阻塞率的区间标记与  $RSS$  标记相同
END FOR
FOR  $i = 1$  TO  $N$ 
    IF ( $sign_i \geq mr$ )
        进入网络候选集
    END IF
END FOR

```

### 4.3 算法性能分析

通过对算法通过率、稳健性、准确率方面进行综合分析,得到算法的最佳参数值.当参数阈值为 $\varepsilon$ ,则 $\varepsilon$ 处的高斯分布如图4所示,其中, $n$ 为波动区间大小调整因子,波动区间内的累计分布概率与 $n$ 的大小有关.为了便于计算,将三个网络参数的高斯分布看作标准高斯分布.分别计算区间标记判决(Interval Mark Decision)1优2中模式(IMD1)和2优1中模式(IMD2)两种模式在阈值处的通过率:

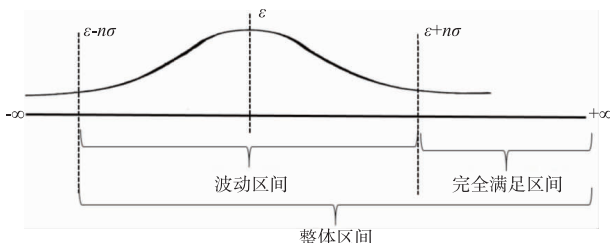


图4 阈值处的波动区间示意图

将波动区间和完全满足阈值区间作为一个整体区间,计算三个参数值都落入整体区间的概率,再减去三个参数值均落入波动区间的概率,得到IMD1的通过率:

$$P_{\text{IMD1}}(n) = P^3(\varepsilon - n\sigma \leq X) - P^3(\varepsilon - n\sigma \leq X \leq \varepsilon + n\sigma) = \left[ \int_{-n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt \right]^3 - \left[ 2 \times \left( \int_{-n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt - 0.5 \right) \right]^3 \quad (7)$$

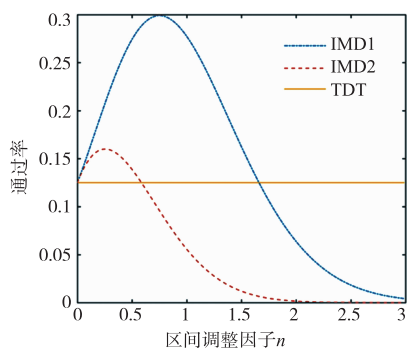


图5 通过率分析

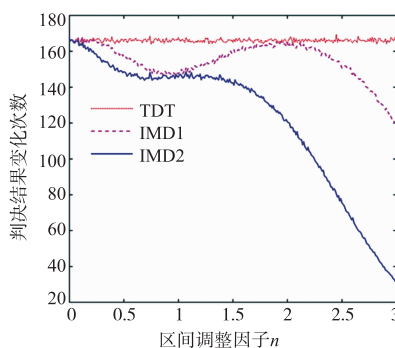


图6 区间标记判决算法稳健性分析

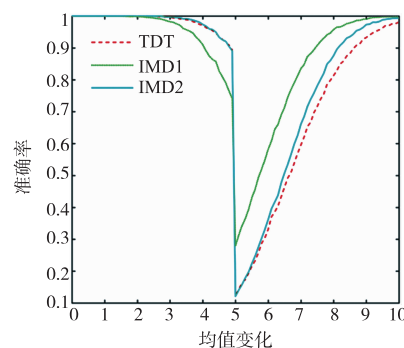


图7 区间标记判决算法准确率分析

其中 $\Phi(t)$ 为服从参数 $(0,1)$ 的标准高斯分布函数.

同理可得IMD2的通过率如下:

$$P_{\text{IMD2}}(n) = P^3(\varepsilon - n\sigma \leq X) - P^3(\varepsilon - n\sigma \leq X \leq \varepsilon + n\sigma) - 3[P^2(\varepsilon - n\sigma \leq X \leq \varepsilon + n\sigma) \times P(\varepsilon + n\sigma \leq X)] = \left[ \int_{-n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt \right]^3 - \left[ 2 \left( \int_{-n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt - 0.5 \right) \right]^3 - 3 \left[ \left( 2 \left( \int_{-n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt - 0.5 \right) \right)^2 \times \left( \int_{n\sigma}^{\infty} \Phi(t) dt \right) \right] \quad (8)$$

传统决策树(Traditional Decision Tree, TDT)通过率计算.由于其为绝对阈值判决,则其在阈值 $\varepsilon$ 处的通过率为:

$$P_{\text{TDT}} = P^3(\varepsilon \leq X) = \left[ \int_0^{\infty} \Phi(t) dt \right]^3 \quad (9)$$

通过式(7),式(8)和式(9)得区间调整因子 $n$ 与阈值处通过率关系,如图5所示,IMD1的通过率呈倒U型,并在区间调整因子 $n=0.75$ 时取得最大值. IMD2通过率也呈倒U型,在 $n=0.25$ 时得到最大值. TDT通过率为常函数.如图6分析对比了区间调整因子 $n$ 与判决结果变化次数的关系,判决结果的变化次数是指:第 $s$ 次的判决结果与 $s-1$ 次判决结果不同时,记为一次变化,且判决结果变化次数越低算法越稳定.整体来看IMD2的变化次数整体最低,IMD1的判决结果变化次数略高于IMD2, TDT的变化次数最高.该实验说明区间标记判决算法能够增强判决算法的稳健性.

$n$ 的选取条件是:在保证其筛选通过率的前提下,增强算法的稳定性.首先,为了保证算法的通过率,在图5中选取通过率大于等于0.125时 $n$ 值的范围.然后在该范围内的图6中选取变化次数最小值,则IMD1取得区间调整因子 $n_1=0.95$ ,IMD2取得 $n_2=0.59$ .

如图7对比了算法的准确率,IMD1在满足阈值的情况下能够提高准确率.但在低于阈值时,其准确率低于TDT的准确率. IMD2在不满足阈值时准确率略高于TDT算法准确率,在满足阈值的情况下其准确率也随着均值增加逐渐高于TDT的准确率.



表 1 基站坐标

无线网技术	基站坐标 1 (m)	基站坐标 2 (m)	基站坐标 3 (m)
5G	(950, 1150)	(2200, 750)	(2050, 1750)
5G_MC	(1500, 800)	(2000, 1600)	(2700, 1750)
WLAN	(400, 900)	(1750, 950)	(2150, 1450)

表 2 网络参数设置

无线网技术	路径损失 (dBm)	噪声偏差 $\sigma$ (dBm)	覆盖半径 (m)	接入带宽 (Mbps)
5G	51	6	500	15
5G_MC	52	8	200	55
WLAN	47	8	200	25

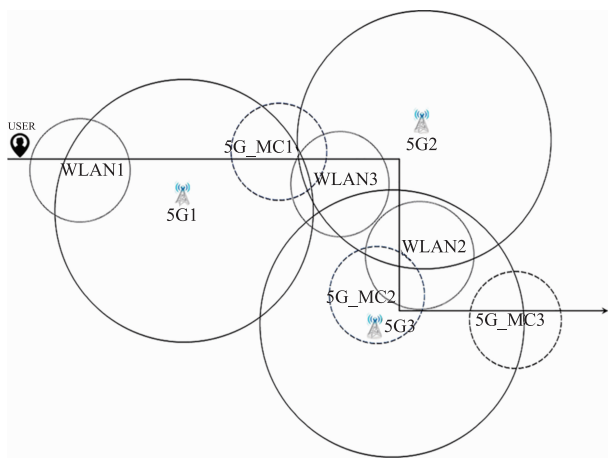


图9 异构5G网络仿真场景

仿真中对比了本文提出的基于区间标记判决的稳健垂直切换算法 (Robust Vertical Handoff Algorithm Based on Interval Mark Decision, IMD-RVHA), 其中 IMD-RVHA1 为宽带需求优先, IMD-RVHA2 为稳定性需求优先. 基于传统决策树的垂直切换算法 (Vertical Handoff Algorithm based on Traditional Decision Tree, TDT-VHA), 基于卡尔曼滤波的垂直切换算法 (Vertical Handoff Algorithm based on Kalman Filter, KF-VHA) 和基于模糊逻辑垂直切换算法 (Vertical Handoff Algorithm based on Fuzzy Logic, FL-VHA) 在切换准确性、网络切换次数等方面性能. 网络环境参数设置如表 2 所示.

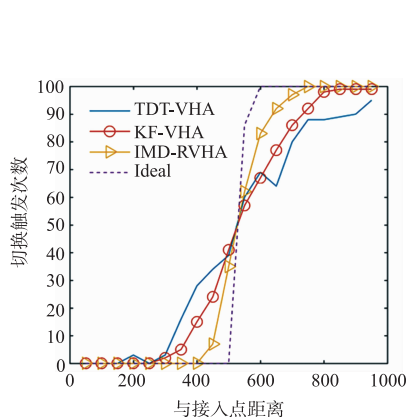


图10 切换触发次数

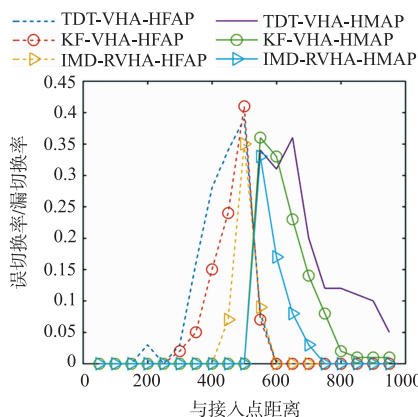


图11 误切换率和漏切换率

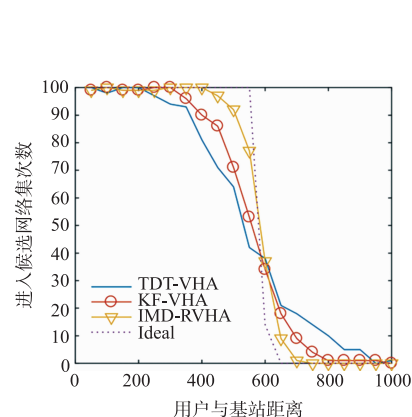


图12 进入候选集次数

其他参数  
RSS 阈值  $\varepsilon_1 = -110$  dBm, 误码率阈值  $\varepsilon_2 = 0.006$ , 阻塞阈值  $\varepsilon_3 = 0.07$ , 干扰信号强度  $N(k) = -117 + \mu(k)$ , 其中  $\mu(k)$  服从参数为  $(0, 6)$  的随机高斯分布. 移动终端默认移动速度  $1$  m/s.

## 6.2 判决准确性分析

如图 10 展示了终端切换触发的次数与接入点距离之间的关系, 图中可看出在三种切换算法中, 本文提出的 IMD-RVHA 最接近理想值结果. 图 11 中, 展示了切换误警概率 (Handoff False Alarm Probability) 和切换漏警概率 (Handoff Missed Alarm Probability), 其中 IMD-RVHA 的 HFAP 和 HMAP 相对于 TDT-VHA 和 KF-VHA 都是最低的. 验证了 IMD-RVHA 算法有更高的准确率, 能更准确的触发切换.

图 12 展示了网络进入候选集次数与终端和基站距离之间的关系, 随着距离的变化, IMD-RVHA 进入候选集的情况与理想情况下最接近, 说明该算法能够更准确的筛选候选网络. 图 13 中, 展示了终端和接入点之间的距离与漏警次数 (Number of Missed Alarms, MAN) 和误警次数 (Number of False Alarms, FAN) 之间的关系. 相对于 KF-VHA, IMD-RVHA 的 MAN 和 FAN 进一步降低, 并且其误警区间和漏警区间也更小. 本实验说明本文提出的 IMD-RVHA 算法能够降低干扰信号对网络筛选的影响, 提升网络筛选阶段的准确性.

### 6.3 稳定性分析

图 14 展示了各算法的切换次数,相对于其他三种切换算法,本文算法下的两种模式均具有较低的切换次数.其中 IMD-RVHA2 模式相对于 IMD-RVHA1 有更低的网络切换次数.图 15 展示了移动终端在切换过程中的切换失败率,其中 IMD-RVHA2 的切换失败率最低,其次是 FL-VHA 和 IMD-RVHA1,切换失败率较高的

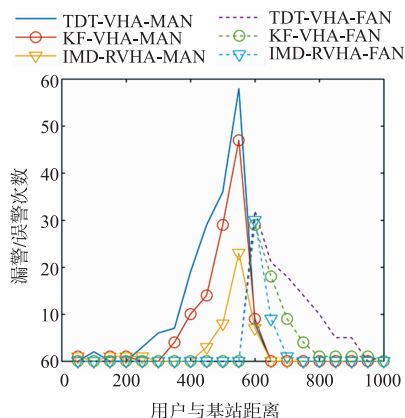


图13 漏警次数/误警次数

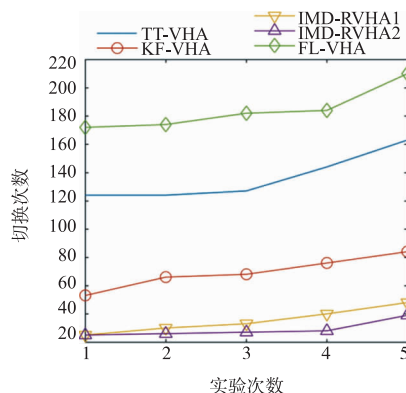


图14 切换次数对比

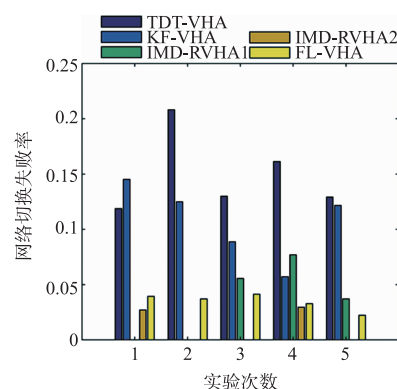


图15 网络切换失败率

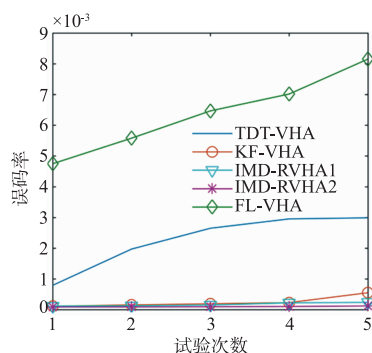


图16 误码率对比

### 6.4 系统吞吐量分析

系统总吞吐量是度量一个切换算法的效能的重要指标.图 17 展示了仿真环境中总吞吐量与终端数量的关系,各切换算法的吞吐量随着用户数量的上升而增加.其中 IMD-RVHA1 在五种切换算法中的吞吐量最高,说明该算法能够充分利用系统资源,保持较高的吞吐量.该实

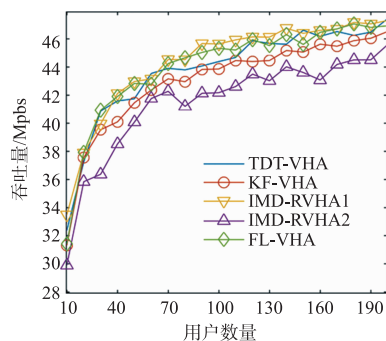


图17 吞吐量对比

是 KF-VHA 和 TDT-VHA.图 16 给出了切换过程中的平均误码率,算法 IMD-RVHA2,IMD-RVHA1,KF-VHA 的误码率值依次处于较低值,而 TDT-VHA 和 FL-VHA 的误码率则较高.综合以上实验分析,本文提出的切换算法能够降低切换次数,切换失败率以及误码率,提升网络服务的稳定性.

验说明本文提出的算法在带宽优先模式下能够充分利用系统资源,终端能够获得更高的网络带宽.

## 7 结束语

本文提出一种基于区间标记判决的稳健垂直切换算法,解决了异构 5G 网络中垂直切换算法稳健性差的问题.算法采用中位值平均滤波法获取更精准的网络参数.同时在网络筛选阶段采用区间标记判决算法,提高判决的稳健性,减小网络信息波动对判决产生的影响.并且根据终端传输层的需求,选择满足移动终端需求的目标网络.仿真表明本文算法可以提高网络切换的准确性,并维持较高的吞吐量.下一步工作将考虑进一步优化切换算法在切换过程中的稳健性.

### 参考文献

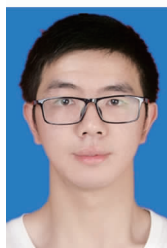
- [1] 朱辉.改进的异构无线网垂直切换算法[J].西安邮电大学学报,2012,17(1):38-41.  
Zhu Hui. Improvement of vertical handoff algorithm on heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, 2012, 17(1): 38-41. (in Chinese)
- [2] Ma B, Wang D, Chen S G, et al. Modeling and analysis for vertical handoff based on the decision tree in a heterogeneous vehicle networks [J]. IEEE Access, 2017, 5: 8812-8824.
- [3] 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.
- Ma Bin, Zhang Wen-jing, et al. Individualization service oriented fuzzy vertical handover algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(6): 1284 - 1290. ( in Chinese)
- [4] Kustiawan I, Chi I. Handoff decision using a kalman filter and fuzzy logic in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 ( 12 ): 2258 - 2261.
- [5] 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, (4): 874 - 880.
- Ma Bin, Xie Xian-zhong, et al. Prediction vertical handoff algorithm in vehicle heterogeneous network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, (4): 874-880. ( in Chinese)
- [6] Wang S, Fan C, Hsu C, et al. A vertical handoff method via self-Selection decision tree for internet of vehicles [J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(3): 1183 - 1192.
- [7] Chao Liu, Yong Sun, Peng Yang, et al. A two-step vertical handoff decision algorithm based on dynamic weight compensation [A]. 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops [C]. Budapest: IEEE, 2013. 1031 - 1035.
- [8] Qiang L, Li J, et al. A user centered multi-objective handoff scheme for hybrid 5G environments[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2017, 5(3): 380 - 390.
- [9] BO S, LIN L, FENG D. The multi-attribute vertical handoff algorithm based on node mobility [A]. 2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science [C]. Beijing: IEEE, 2014. 1146 - 1149.
- [10] Bhattm C, Ahluwalia H S, et al. Travelling distance prediction based handoff optimization in wireless networks [A]. International Conference on Intelligent Computing and Control Systems [C]. Madurai: 2017. 947 - 952.
- [11] Li J, Li X, Zhang R. Cross-layer collaboration handoff mechanism based on multi-attribute decision in mobile computation offloading [J]. Soft Computing, 2019, 23 (1): 323 - 341.
- [12] 马彬, 汪栋, 谢显中. 异构无线网络中新的成本感知网络切换方案[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1227 - 1233.
- MA Bin, WANG Dong, XIE Xian-zhong. A novel cost-aware network handoff scheme in heterogeneous wireless network[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1227 - 1233. ( in Chinese)

#### 作者简介



马彬 男, 1978 年出生, 教授. 主要研究方向异构无线网络, 认知无线电网络等.  
E-mail: mab\_cqupt@sina.com



汪思霖(通讯作者) 男, 1995 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向异构无线网络.  
E-mail: wangsl\_email@163.com



谢显中 男, 1966 年生, 教授. 主要研究方向认知无线电、干扰对齐与 MIMO 技术、绿色通信等.  
E-mail: xiexzh@cqupt.edu.cn