

## 异构无线网络中垂直切换算法的评测与改进\*

刘敏<sup>1,3+</sup>, 李忠诚<sup>1</sup>, 过晓冰<sup>2</sup>, 张德魁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 计算技术研究所, 北京 100080)

<sup>2</sup>(联想研究院, 北京 100085)

<sup>3</sup>(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

### Evaluation and Improvement of Vertical Handoff Algorithms in Heterogeneous Wireless Networks

LIU Min<sup>1,3+</sup>, LI Zhong-Cheng<sup>1</sup>, GUO Xiao-Bing<sup>2</sup>, ZHANG De-Kui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Lenovo Corporate Research, Beijing 100085, China)

<sup>3</sup>(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62600707, Fax +86-10-62533449, E-mail: liumin@ict.ac.cn, <http://www.ict.ac.cn>

**Liu M, Li ZC, Guo XB, Zhang DK. Evaluation and improvement of vertical handoff algorithms in heterogeneous wireless networks. *Journal of Software*, 2007,18(7):1652-1659. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1652.htm>**

**Abstract:** Vertical handoff is the basic requirement for convergence of different access technologies and has received tremendous attention from the academia and industry. In recent years, many research works have focused on vertical handoff decision algorithms. However, the evaluation scenarios in different papers are quite different. Thus it is difficult to compare different algorithms in a fair way. This paper analyzes the general motion models of mobile nodes and identifies a set of novel performance evaluation models. Equipped with the models, this paper analyzes the performance of two types of decision algorithms: Hysteresis based algorithm and dwelling-timer based algorithm. Based on the above, a novel vertical handoff decision algorithm, self-adaptive vertical handoff algorithm (SAVA) is presented. Simulations show that SAVA can achieve better performance compared with the conventional methods.

**Key words:** heterogeneous wireless network; vertical handoff; horizontal handoff; performance evaluation

**摘要:** 垂直切换作为多网融合的基础,受到了学术界和工业界的广泛关注.目前,相关工作主要集中于垂直切换算法的研究.但由于各种算法用于自身验证的仿真评测环境各不相同,因此无法公平地予以对比.从节点运动模型出发,提出了一组适合垂直切换算法的仿真评价模型.基于所提出的仿真评价模型,对常用的迟滞电平算法和驻留定时器算法进行了性能分析.在此基础上,提出了一种自适应垂直切换算法(self-adaptive vertical handoff algorithm,简称SAVA).仿真实验结果表明,该算法能够有效地提高垂直切换的性能.

**关键词:** 异构无线网;垂直切换;水平切换;性能评价

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90604016 (国家自然科学基金)

Received 2006-02-23; Accepted 2006-08-17

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

目前,通过移动和无线通信系统接入 Internet 的方式分为两大类:一类是无线广域网技术,如 CDMA(code division multiple access),GPRS(general packet radio service),EDGE(enhanced data rate for GSM evolution)等;一类是无线局域网技术,如 WLAN(wireless local area network),Bluetooth,HomeRF 等.WLAN 等无线局域网技术可提供较高的带宽,但其物理覆盖范围非常有限.而 GPRS,CDMA 等无线广域网技术虽然覆盖面积大,但所提供的带宽却较低.未来的 4G 网络将不再由单一的接入方式构成.而是采用不同的无线接入技术的多种网络的融合<sup>[1]</sup>.

切换是移动通信研究的重要内容,指移动节点的位置发生改变时,与其他主机间的当前连接从一个接入点转移到另一个接入点的机制和过程.异构无线网络中的切换分为水平切换(horizontal handoff)和垂直切换(vertical handoff).水平切换指的是移动主机在基于同一种链路层技术的不同接入路由器间的切换,而垂直切换则是指在不同的网络接口间的切换.目前的切换技术多针对水平切换,而垂直切换由于其特殊性和复杂性尚缺乏详尽和深入的研究.

## 1 现有技术分析

根据切换发起和执行的实体,可将目前常用的切换判断机制分为 3 种<sup>[2]</sup>,分别是:移动设备控制的切换(mobile-controlled handoff,简称 MCHO)、网络控制的切换(network-controlled handoff,简称 NCHO)和移动设备辅助的切换(mobile-assisted handoff,简称 MAHO).IEEE 802.11 的 WLAN 内使用 MCHO 方式,由移动设备检测 AP(access point)信号强度并触发切换过程.NCHO 用于电路交换语音网络,其切换判断和控制都由网络实体来完成.目前的移动通信网络中多采用 MAHO 方式,比如 GPRS 网络,是由移动设备来测量相邻 BS(base station)的信号强度,而由网络决定是否进行切换.在垂直切换中,由于只有移动节点(mobile node,简称 MN)知道自己配置了哪些网络接口,而且即使网络知道这些相关信息,也不可能控制 MN 将要移入的另外一种无线网络.所以 MAHO 方式并不适用于垂直切换,MCHO 方式会更为有效<sup>[3]</sup>.

在无线网络中,信号质量及其他相关链路层信息在切换触发中有着重要的意义.在大多数移动语音和数据网络中都使用从服务连接点和邻近连接点接收的信号强度 RSS(received signal strength)作为切换算法的判定指标<sup>[2]</sup>.为了避免切换当中的乒乓效应,许多切换算法也引入了一些额外的参数,如迟滞电平(hysteresis)、驻留定时器(dwelling timer)和求平均的窗口等.在异构无线网络中,虽然这些网络的无线接入技术不同,但是所有的网络都使用以恒定发射功率发射的信号来进行 RSS 测量,以用于切换判断.因此,绝大多数现有的垂直切换算法都将 RSS 作为基本的判断指标<sup>[4-7]</sup>.

一些切换算法通过引入更多的参数作出更为智能的切换判断.文献[3]提出了一种基于带宽的垂直切换判定算法,除了 RSS 外,将 WLAN 中的剩余带宽也作为一个切换判定指标.但是,该机制依赖于 IEEE 802.11e 中所定义的 QBSS(QoS basic service set)来进行带宽估计,不适用于不支持 QBSS 的 WLAN.文献[8,9]通过神经网络和模糊推理作出更为准确的垂直切换判断.但是这类算法的复杂度大,对计算能力有限的移动设备并不适合,而且神经网络需要预先学习.

为了综合评价垂直切换算法的性能,需要定制合理的、有典型性的仿真评价模型.目前相关算法的性能分析主要是基于 Linux 平台上开源的移动 IP 软件来搭建实验床,或是仿真节点单向恒速穿越 WLAN 的切换过程,与实际的网络环境相差甚远,无法体现不同的节点运动方向和运动速度对算法性能的影响,也无法衡量算法产生乒乓效应的可能性.此外,在评价指标方面也主要采用切换延迟、切换中的丢包率、吞吐量等水平切换中的常见参数,无法体现垂直切换的特点和需求.事实上,垂直切换与水平切换有着本质的区别.垂直切换时,允许节点同时拥有两种网络连接.大部分情况下,移动节点可以在不断开原有连接且新连接符合 QoS 需要的情况下触发切换操作.在这种情况下,整个切换的时间开销会成为一个常数,而切换后的报文平均传输时延等 QoS 参数也完全可以在切换前获得.对于实时应用或者本身带宽需求非常小的应用,移动节点可以选择持续使用无线广域网连接.因此,在文献[3]中仅保留了吞吐量作为垂直切换的性能评价指标.

## 2 垂直切换算法仿真评价模型

下文的论述分别以 WiFi(wireless fidelity)和 GPRS 作为无线局域网技术以及无线广域网技术的典型代表,来介绍本文所提出的垂直切换仿真评价模型和判定算法.相关模型和算法同样适用于其他无线局域网接入技术和无线广域网接入技术间的垂直切换.

### 2.1 移动节点运动特征分析

考虑到实际环境中,GPRS 基本上是全覆盖的,而 WLAN 多为孤岛形式散落在 GPRS 的区域中.由 GPRS 和 WiFi 组成的异构无线网中不外乎如下两种区域:

区域 I(只在 GPRS 覆盖区域中);

区域 II(在 WiFi 和 GPRS 覆盖的重叠区域),区域 II 又可分成如下两种子区域,即为

区域 II.W(WiFi 提供的 QoS 高于 GPRS 提供的 QoS);

区域 II.G(GPRS 提供的 QoS 高于 WiFi 提供的 QoS).

根据节点运动特征,可以将具体的切换场景分为两类:穿越场景和漫游场景.前者为移动节点自区域 I 穿越区域 II.G 进入区域 II.W,而后再经区域 II.G 进入区域 I.后者是指移动节点长时间在 II.W 和 II.G 的边缘区域中漫游.需要指出的是,这两类场景虽有联系,但侧重点有所不同.穿越场景有着比较简单而清晰的运动轨迹,反映了一次切换的性能.借助此场景,容易理解切换触发条件的实质物理意义,并可分析单个环境参数/运动参数(例如速度、方向)对切换触发位置的影响.而漫游场景则利用对移动区域或者移动轨迹的一系列限制,迫使节点处于不断的切换场景中,集中反映了连续切换中切换算法的综合性能.

### 2.2 仿真评价模型

本文定义了两种典型的仿真评价模型,来综合评判垂直切换算法的性能.前一种模型用于穿越场景,后一种模型用于漫游场景.

在穿越场景中,为了简化并且抽象运动本质,假定节点的移动为匀速直线运动,速度和方向不定.进一步分析可知,节点的速度矢量可分为切向分量和径向分量(以 AP 为圆心)两种.其中,切向速度对切换触发没有影响.综上,可以将穿越场景归纳为,节点以区域 II.G 和区域 I 交界位置上的某点为起始点向着 AP 做匀速直线运动,直到再次到达区域 II.G 和区域 I 的交界位置,在此过程中记录并对比不同速率下的 G→W 切换(GPRS 到 WiFi 的切换)和 W→G 切换(WiFi 到 GPRS 的切换)触发的位置.因此,定义评价模型 1 如下:

评价模型 1:穿越模型.

假设节点到 AP 的距离  $d=R$  时,节点在区域 II.G 和区域 I 的边界上,则评价模型 1 中移动节点的运动方程为

$$\begin{cases} \theta = \frac{v}{\max v} \pi & 0 \leq t \leq 2R/v, 0 < \theta \leq \pi \\ \rho = R - vt \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(\rho, \theta)$  是极坐标,  $v$  是节点的运动速率,  $t$  是运动时间,  $\max v$  是  $v$  的上限.在一次实验中,  $v$  取为  $(0, \max v)$  间的一个常数,节点的运动为自起点  $(R, \theta)$  到终点  $(-R, \theta)$  的匀速直线运动.令  $v$  取不同的值,可以得到节点在不同运动速率下的 G→W 切换和 W→G 切换的触发位置.图 1 在同一个极坐标系里,显示了当  $v$  取不同值时,评价模型 1 中节点的运动轨迹.其目的是在同一张图里记录和对比不同运动速率对垂直切换算法的影响(切换触发位置的变化).

评价模型 2:漫游模型.

在模型 2 中定制了一个处于区域 II 中的边长为  $a$  的正方形区域,移动节点在该区域中自 A 点开始,经过连续的随机直线运动,最终到达 B 点,运动过程中无停留,如图 2 所示.

我们在文献[10]中修正了 NS2 中随机直线运动的定义,描述如下:

节点随机选择运动速率和运动时间,运动速率  $v$  满足  $(0, \max v)$  中的均匀分布,运动时间  $t$  满足  $(0, 2a/\max v)$  中的均匀分布.而后节点随机地在正方形区域内选择目标点,并以  $v$  向目标点做匀速直线运动,直到  $t$  超时.如果

节点在  $t$  超时前到达目标点,则重新随机选择目标点,并以  $v$  向新的目标点做匀速直线运动,直到  $t$  超时.若  $t$  超时,节点将重新随机生成运动速率和运动时间.通过计算可知,节点速率的期望值为  $\max v/2$ .在实际的模型仿真时,我们选择了两档速率,分别是  $\max v=2\text{m/s}$  和  $\max v=20\text{m/s}$ .其中, $\max v=2\text{m/s}$  时速率的期望为  $1\text{m/s}$ ,代表了人的步行速度.而  $\max v=20\text{m/s}$  时的速率期望为  $10\text{m/s}(36\text{km/h})$ ,代表了城市交通工具的平均速度.

正方形区域的位置满足节点在随机运动时,在 WiFi 信号佳的范围内停留时间的期望,与在 GPRS 信号佳的范围内停留时间的期望正好相等.假定正方形的一条对角线的延长线穿过圆心.设正方形顶点的坐标为  $\{(u,u),(u+a,u),(u+a,u+a),(u,u+a)\}$ ,通过蒙特卡洛(Monte Carlo)方法可以得到常见  $\varphi,a$  的  $u$  数值解.

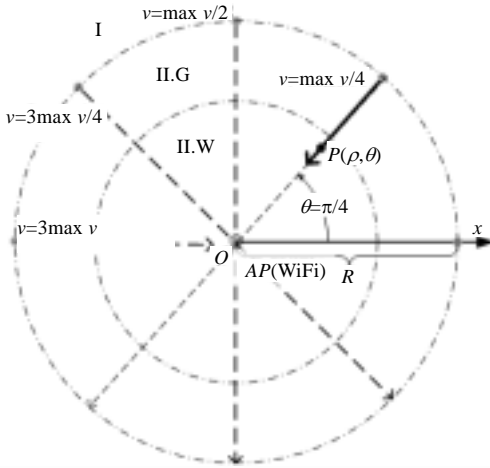


Fig.1 Evaluation model 1 illustration

图 1 评价模型 1 的示意图

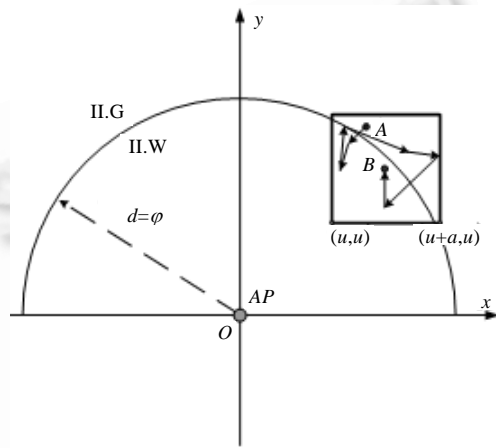


Fig.2 Evaluation model 2 illustration

图 2 评价模型 2 的示意图

### 3 现有垂直切换算法的性能评测与分析

基于所提出的仿真评价模型,本文对标准的迟滞电平算法<sup>[2,6]</sup>(hysteresis based algorithm,简称 HY)和驻留定时器算法<sup>[2,3]</sup>(dwelling-timer based algorithm,简称 DW)进行了性能评测和分析.在仿真实验中,选择 RSS 作为切换算法的判定指标,认为当 GPRS 和 WiFi 网络的 RSS 相等时,两种网络所提供的 QoS 相同. $D_{RSS}$  是指 WiFi 和 GPRS 的接收信号强度差( $D_{RSS}=RSS_{WiFi}-RSS_{GPRS}$ ), $h_y$  为 HY 算法中的迟滞电平值.

若无特别说明,仿真模型的默认参数如下:WiFi 的覆盖半径为  $R=150\text{m}$ ,AP 的坐标为  $(0,0)$ .假设当移动节点与 AP 的距离  $d=d^+$  时, $D_{RSS}=h_y$ ;  $d=d^-$  时, $D_{RSS}=-h_y$ ;  $d=\varphi$  时, $D_{RSS}=0$ .显然有  $\varphi = \sqrt{d^+d^-}$ ,且  $0 < d^+ < \varphi < d^-$ .在仿真实验中,设  $d^+=120\text{m}$ , $d^-=135\text{m}$ ,则由计算可得  $\varphi=127.279\text{m}$ .模型 2 中的采样频率  $F=20$  次/s.DW 算法中的驻留定时器  $t_{dw}$  设为 5s.

#### 3.1 仿真评测指标

为了衡量垂直切换算法的优劣,我们在文献[11,12]中定义了“命中率”和“平均乒乓次数”两个评价指标.

“命中”是指根据算法选择的网络为节点当前最佳的网络选择.“命中率(matching ratio,简称 MR)”是指单位时间内算法累计命中的时间长度.就本质而言,命中率反映了链路的服务质量(QoS),命中率越高,说明该算法提供的 QoS 越好.

“乒乓效应”是指移动节点连续两次垂直切换的时间间隔比较短(本文中设为短于 10s).“平均乒乓次数(average ping-pong number,简称 APN)”是指在单位时间内发生乒乓效应的次数.平均乒乓次数反映了切换算法的稳定性.平均乒乓次数越少,说明该算法的稳定性越好,越能保持较长时间的网络连接.

3.2 模型1的仿真结果

图 3 和图 4 分别显示了 HY 和 DW 算法在模型 1 中的切换触发位置.在这一部分仿真中,假定移动节点的采样为实时响应,即 RSS 采样间隔为 0.当衡量指标发生变化时,切换算法可以立即触发相应的切换操作.

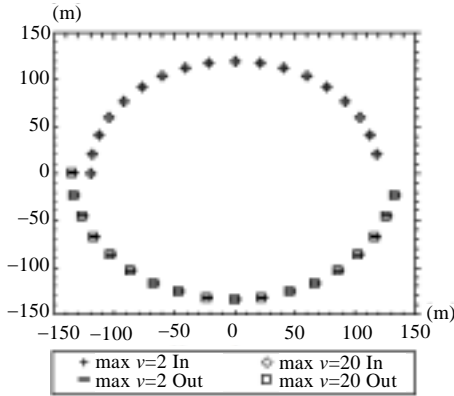


Fig.3 Handoff triggering location of HY in model 1  
图 3 HY 算法在评价模型 1 中的切换触发位置

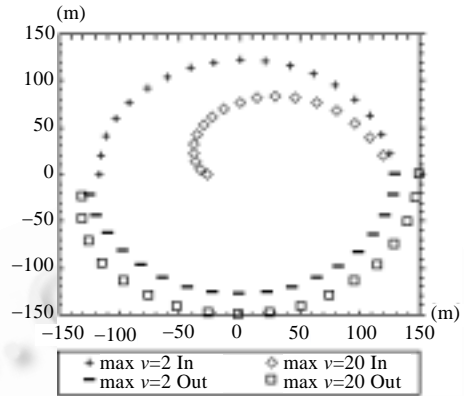


Fig.4 Handoff triggering location of DW in model 1  
图 4 DW 算法在评价模型 1 中的切换触发位置

根据公式(1)和 HY 算法的定义,可以得到 HY 算法在模型 1 中的切换触发条件为

$$\begin{aligned} \rho_{IN} &= d^+, & 0 < \theta \leq \pi \\ \rho_{OUT} &= -d^-, & 0 < \theta \leq \pi \end{aligned} \tag{2}$$

其中,  $\rho_{IN}$  表示 G→W 切换的触发位置,  $\rho_{OUT}$  表示 W→G 切换的触发位置.显然, HY 算法的切换触发与节点的运动速率  $v$  无关.

同样,可以得到 DW 算法在模型 1 中的切换触发条件为

$$\begin{aligned} \rho_{IN} &= \varphi - \frac{\max v \cdot t_{dw} \theta}{\pi}, & 0 < \theta \leq \text{Min} \left( \frac{2\pi \varphi}{\max v \cdot t_{dw}}, \pi \right) \\ \rho_{OUT} &= \begin{cases} -\varphi - \frac{\max v \cdot t_{dw} \theta}{\pi}, & 0 < \theta \leq \text{Min} \left( \frac{(R-\varphi)\pi}{\max v \cdot t_{dw}}, \pi \right) \\ -R, & \frac{(R-\varphi)\pi}{\max v \cdot t_{dw}} < \theta \leq \pi \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

由公式(3)可知, DW 的切换触发条件与  $\theta$  有关,因此将会随着  $v$  的改变而改变.

就实质而言, HY 算法是根据节点的位置来判断是否触发切换(节点与 AP 间的距离是决定 RSS 的唯一因素),而 DW 算法则是根据节点在某一区域内的停留时间来判断是否触发算法.图 3 和图 4 中的仿真结果与两种算法理论上的切换触发结果非常一致.

从图 4 可以看到,当  $\max v=20\text{m/s}$  时,随着  $\theta$  的增大, DW 算法在模型 1 中的 W→G 切换触发点将分布在  $R=150\text{m}$  的圆周上(与公式(3)相一致).这是因为,当节点的运动速率非常高时,受  $t_{dw}$  的限制, DW 算法无法在区域 II.G 内触发 W→G 切换,而是在区域 I 内发现 WiFi 信号消失时进行强制切换.

3.3 模型2的仿真结果

模型 2 中正方形运动区域的边长设为  $a=50\text{m}$ .通过蒙特卡洛方法可以得到,当  $u=64.61\text{m}$  时,节点在 GPRS 信号佳的范围和 WiFi 信号佳的范围内停留时间的期望值相等.分别取  $\max v=2\text{m/s}$  和  $20\text{m/s}$ ,生成大量的节点随机运动轨迹(>1000000 段直线运动轨迹),最后得到的仿真结果见表 1.为了比较,本文也给出了“即时切换(instant handoff,简称 Instant HO)”的测量结果.即时切换是指当  $D_{RSS}<0$  时立即选择 GPRS 网络,而当  $D_{RSS}>0$  时立即选择 WiFi 网络.

Table 1 Performance evaluation of vertical handoff algorithms in model 2

表 1 模型 2 中垂直切换算法的性能评价

	max v=2m/s			max v=20m/s		
	HY	DW	Instant HO	HY	DW	Instant HO
WiFi MR (%)	79.8	90.1	100	79.9	57.7	100
GPRS MR (%)	78.1	90.1	100	78.1	58.4	100
Overall MR (%)	79.0	90.1	100	79.0	58.1	100
APN (/100s)	0.004 4	0.14	0.30	7.2	1.1	19.6

由表 1 可以看出,在速度较低时,HY 算法的命中率较低(与 DW 算法相比,约低 11.1%).此时,这两种算法的乒乓效应均比较少.然而,当节点的平均运动速率达到 10m/s(36km/h)时,结论却发生了质的变化.首先,虽然 HY 算法在高速运动时其命中率没有太大的变化,与低速运动基本持平,但其乒乓效应已经上升到无法正常通信的程度.经统计,每 100s 内平均发生乒乓效应 7.2 次,即每 10s 内发生约 0.72 次.当链路的 RTT(round trip time)值较大或切换需要的时间较长时,这意味着节点将处于乒乓效应的恶性循环中.与之相比,DW 算法的乒乓效应并不是很严重,还处于一个可以接受的程度(1.1 次/100 秒),但其总命中率却下降为 58.1%.

#### 4 自适应垂直切换算法

##### 4.1 自适应垂直切换算法:SAVA(self-adaptive vertical handoff algorithm)

从上一节的仿真评测结果来看,DW 算法在低速环境下可以取得较高的性能.但是,该算法受节点运动速度的影响较大,在模型 2 的高速运动场景下命中率过低.其根本原因是 DW 算法中的  $t_{dw}$  是一个固定值.而且 DW 算法只是根据节点当前状态的持续时间作出切换判断,而未能预测节点的运动趋势.针对 DW 算法的这些问题,本文提出了一种自适应垂直切换算法 SAVA,其基本思想是:通过分析移动节点的运动趋势,自适应地调整切换触发条件,从而在不增加乒乓效应的前提下,获得更高的命中率.

首先,设定 SAVA 中的切换触发条件为

$$t \geq pp\_factor \times t_{dw} \tag{4}$$

其中,  $t$  为当前状态的持续时间,  $pp\_factor$  是乒乓效应退避因子,其初始值为 1.0.若当前的切换间隔  $ho\_interval \leq PP\_Length$ ,  $pp\_factor$  自增  $STEP$ ;当  $ho\_interval > PP\_Length$  时,  $pp\_factor$  恢复为初始值.  $PP\_Length$  为乒乓效应定义中两次垂直切换间的时间间隔阈值.

我们在基于公式(4)中的切换判定条件的算法验证中发现,虽然该算法的性能较现有的固定值 DW 算法有所提高,但是仍有不足.分析其原因,是由于该算法为了避免乒乓效应,要求当前状态持续一个较长的时间(当  $ho\_interval > PP\_Length$  时为  $t_{dw}$ ;否则为  $(1+num \times STEP)t_{dw}$ ,  $num$  为连续发生乒乓效应的次数).根据这么长的时间内节点的所在位置进行切换判定,使得算法命中率提高不大.

为了提高算法命中率,首先将公式(4)中的切换触发条件重新表示为  $Timer\_factor \geq pp\_factor$ ,其中,  $Timer\_factor = t/t_{dw}$ .同时增加一个变量  $D_{RSS\_factor}$  来表征节点短期内的运动趋势.因此,算法的切换触发条件修正为

$$HO\_factor = Timer\_factor + \alpha \cdot D_{RSS\_factor} = \frac{t}{t_{dw}} + \alpha \frac{TD_{RSS}}{h_y} \geq pp\_factor \tag{5}$$

其中,  $\alpha$  为  $D_{RSS\_factor}$  的权重,  $TD_{RSS}$  是对  $D_{RSS}$  的一个趋势预测.

$TD_{RSS}$  的计算方法如下:

假定  $\bar{D} = \{D_{RSS}(1), D_{RSS}(2), \dots, D_{RSS}(N)\}$  为最近  $N$  次  $D_{RSS}$  的采样结果,其中  $D_{RSS}(N)$  是最近一次采样结果.分析这  $N$  次数据可以对  $D_{RSS}$  的发展趋势作一个预测.

首先,定义布尔变量 Approach:  $(\forall i \in 2 \dots N, D_{RSS}(i-1) < D_{RSS}(i)) \vee (\forall i \in 1 \dots N-1, D_{RSS}(i) > D_{RSS}(i+1))$ .只有当最近  $N$  次  $D_{RSS}$  测量值为递增或递减时, Approach 返回为真.

若 Approach 为真,则  $TD_{RSS} = |D_{RSS}(N)|$ ;否则,  $TD_{RSS} = 0.0$ .

因此,当节点运动趋势不明时(即 Approach 为假),则切换条件公式(5)等同于公式(4); $D_{RSS}$  测量值递增意味着节点正向 AP 方向移动,此时,G→W 切换所需满足的时间阈值会自适应地地下调; $D_{RSS}$  测量值递减意味着节点正向 AP 的相反方向移动,此时,W→G 切换所需满足的时间阈值会自适应地地下调。

SAVA 算法综合考虑了节点的长期运动区域和短期运动趋势,而且所涉及的运算均为初等计算,算法简单,适用于低能量、低运算能力的移动设备。

### 4.2 SAVA算法的性能评测

基于本文所提出的性能评价模型,我们对 SAVA 算法的有效性进行了仿真实验,并与 HY 和 DW 算法进行了性能对比。仿真环境参数与第 3 节相同,另外,设 SAVA 算法中的  $STEP=2, PP\_Length=10s, \alpha=1.0$ 。

根据公式(1)和 SAVA 算法的定义,可以得到 SAVA 算法在模型 1 中的切换触发条件为

$$\begin{aligned} 2\max v \cdot t_{dw} \theta \ln \rho_{IN} + \pi \lambda \rho_{IN} - 2\max v \cdot t_{dw} \theta \ln d^+ - \pi \lambda \phi &= 0, \\ 2\max v \cdot t_{dw} \theta \ln(-\rho_{OUT}) + \pi \lambda \rho_{OUT} - 2\max v \cdot t_{dw} \theta \ln d^+ + \pi \lambda \phi &= 0, \end{aligned} \quad \lambda = \ln d^- - \ln d^+ \quad (6)$$

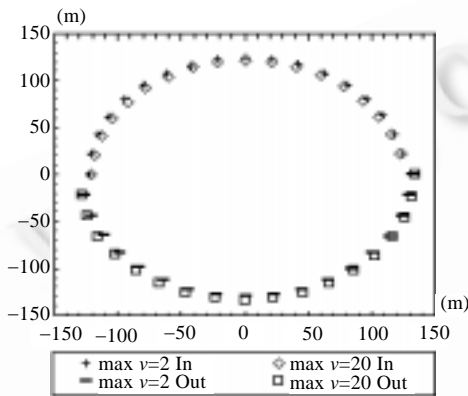


Fig.5 Handoff triggering location of SAVA in model 1  
图 5 SAVA 算法在评价模型 1 中的切换触发位置

图 5 显示了 SAVA 算法在模型 1 中的仿真结果。由图 5 可知,节点运动速率对 SAVA 算法的影响非常小。

表 2 则显示了 SAVA 在模型 2 中两种不同速度下的仿真结果。为了与现有的评测指标对比,我们在模型 2 中增测了链路的 UDP(user datagram protocol)和 TCP(transmission control protocol)的平均吞吐量。假定环境中无背景流量,分别仿真运行一个 UDP/CBR(速率为 1Mbps)和一个 TCP 流(RTT 为 2.5s),并假定一次切换需要 2s 的时间开销,主要用于地址注册等相关移动 IP 协议操作,以此作为切换的时间代价。

由表 2 可知,在低速时,SAVA 算法进一步提高了命中率(高出 DW 算法近 2.8%),同时,其乒乓效应的发生频率比 HY 算法更低。而在运动速度较高时,SAVA 算法的性能虽有一定程度的下降(总命中率约为 70%),但其乒乓效应的发生频率仍然在一个上层应用可以接受的范围内,TCP 的吞吐量也证实了这一点,SAVA 的 TCP 吞吐量比 HY 算法高 75%。较之现有的切换判定算法,SAVA 可以有效地改善较高速度下的切换性能。

Table 2 Performance evaluation of SAVA in model 2

表 2 模型 2 中 SAVA 算法的性能评测

	max v=2m/s			max v=20m/s		
	HY	DW	SAVA	HY	DW	SAVA
WiFi MR (%)	79.8	90.1	92.9	79.9	57.7	71.8
GPRS MR (%)	78.1	90.1	92.8	78.1	58.4	68.3
Overall MR (%)	79.0	90.1	92.9	79.0	58.1	70.1
APN (/100s)	0.004 4	0.14	0.004 3	7.2	1.1	1.4
UDP throughput (KB/s)	60.5	65.3	66.9	50.3	45.6	49.1
TCP throughput (KB/s)	14.3	13.8	14.3	2.8	5.0	4.9

## 5 结束语

本文提出了一组适合垂直切换算法的仿真评价模型。通过对常用的迟滞电平算法和驻留定时器算法的评述与分析,提出了一种自适应垂直切换算法(SAVA)。仿真实验表明,该算法能够有效提高垂直切换的性能。在下一步的工作中,我们将扩展垂直切换算法的仿真评价模型,使之适用于多节点的移动场景。同时,将 SAVA 算法和可用带宽测量算法相结合,在不依赖于特殊网络支持(如 IEEE 802.11e 中所定义的 QBSS)的情况下,将 WLAN 中

的可用带宽作为切换判定指标的一个补充.

### References:

- [1] Gustafsson E, Jonsson A. Always best connected. IEEE Wireless Communications, 2003,10(1):49–55.
- [2] Pahlavan K, Krishnamurthy P, Hatami A. Handoff in hybrid mobile data networks. IEEE Personal Communications, 2000,7(2): 34–47.
- [3] Lee CW, Chen LM, Chen MC, Sun YS. A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005,23(11):2118–2128.
- [4] Ylianttila M, Pande M, Makela J, Mahonen P. Optimization scheme for mobile user performing vertical handoffs between IEEE 802.11 and GPRS/EDGE networks. In: Proc. of the GLOBECOM. 2001. 3439–3443. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7633/20837/00966320.pdf>
- [5] Sharma S, Baek I, Dodia Y, Chiueh TC. OmniCon: A mobile IP-based vertical handoff system for wireless LAN and GPRS links. In: Proc. of the ICPPW. 2004. 330–337. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9249/29348/01328035.pdf>
- [6] Buddhikot M, Chandranmenon G, Han S, Lee YW, Miller S, Salgarelli L. Integration of 802.11 and 3rd-generation wireless data networks. In: Proc. of the INFOCOM. 2003. 503–512. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8585/27205/01208701.pdf>
- [7] Guo Q, Zhu J, Xu XH. A seamless handover control scheme of wireless heterogeneous network and its simulation analysis. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004,38(12):2026–2029 (in Chinese with English abstract).
- [8] Tripathi N. Generic adaptive handoff algorithms using fuzzy logic and neural networks [Ph.D. Thesis]. VA Polytechnic Inst. and State University, 1997.
- [9] Guo Q, Zhu J, Xu XH. An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous network. In: Proc. of the ICC 2005. Vol.4, 2005. 2769–2773. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9996/32112/01494852.pdf>
- [10] Liu M, Li ZC, Guo XB, Lach HY. Design and evaluation of vertical handoff decision algorithm in heterogeneous wireless networks. In: Proc. of the ICON. 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4087640/4065007/04087734.pdf>
- [11] Liu M, Li ZC, Guo XB, Dutkiewicz E, Zhang DK. Performance evaluation of vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks. In: Proc. of the GLOBECOM. 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4150629/4150630/04151322.pdf>
- [12] Liu M, Li ZC, Xu G, Zhang DM, Ma J. Performance evaluation models and metrics for vertical handoff algorithms in heterogeneous wireless networks. Journal of System Simulation, 2007,19(2):277–281 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献:

- [7] 郭强,朱杰,徐向华.一种无线异构网无缝切换控制方案及其仿真分析.上海交通大学学报,2004,38(12):2026–2029.
- [12] 刘敏,李忠诚,徐刚,张冬梅,马建.异构无线网络中的垂直切换仿真评价模型及评价指标.系统仿真学报,2007,19(2):277–281.



刘敏(1976 - ),女,河南郑州人,博士生,副研究员,主要研究领域为移动切换,网络测量.



过晓冰(1977 - ),男,硕士,主要研究领域为普适计算,设备协同.



李忠诚(1962 - ),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络.



张德魁(1971 - ),男,博士,主要研究领域为普适计算,设备协同.