

基于运动趋势的自适应垂直切换算法及其性能评价

刘 敏^{1),3)} 李忠诚¹⁾ 过晓冰²⁾ 郑 坤^{1),3)}

¹⁾(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

²⁾(联想研究院 北京 100085)

³⁾(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 采用不同的无线接入技术的多种网络的融合可以提高无线传输性能,为移动用户提供随时随地的网络连接.垂直切换是异构无线网络相互融合的基础.在垂直切换过程中,切换判定是一个非常重要的环节,直接决定切换性能.文中给出了常用的迟滞电平算法和驻留定时器算法中切换判定条件的形式化表达,并对其进行了性能分析.在此基础上,提出了一种自适应的垂直切换算法,通过分析节点的运动趋势,自适应地调节切换触发条件,有效提高垂直切换性能.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.仿真实验表明,该算法的综合性能优于迟滞电平算法和驻留定时器算法.

关键词 异构无线网;垂直切换;水平切换;无线局域网;无线广域网

中图法分类号 TP393

A Movement Trend Based Self-Adaptive Vertical Handoff Algorithm and Its Performance Evaluation

LIU Min^{1),3)} LI Zhong-Cheng¹⁾ GUO Xiao-Bing²⁾ ZHENG Kun^{1),3)}

¹⁾(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾(Lenovo Corporate Research, Beijing 100085)

³⁾(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract A combination of diverse but complementary wireless access technologies will improve wireless transmission performance and provide mobile users with ubiquitous connectivity. Vertical handoff is the basic requirement for the integration of heterogeneous wireless networks. During the vertical handoff procedure, handoff decision is a crucial issue for an efficient mobility. In this paper, we obtain the mathematical expressions of handoff conditions in traditional hysteresis based and dwelling-timer based handoff algorithms, and analyze their performance. Based on this, we propose a novel vertical handoff decision algorithm, which adaptively adjusts the handoff condition by analyzing the movement trend of mobile hosts and efficiently improves handoff performance. What's more, the related computing requirement is very simple to be suitable for mobile devices with limited computing capacity. Simulations show that it can achieve a better integrative handoff performance compared with conventional hysteresis based and dwelling-timer based handoff algorithms.

Keywords heterogeneous wireless networks; vertical handoff; horizontal handoff; wireless local area networks; wireless wide area networks

1 引言

采用不同的无线接入技术的多种网络的融合可以提高无线传输性能,为移动用户提供随时随地的网络连接.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^[1].

切换指移动主机与其它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.

垂直切换作为异构无线网络相互融合的基础,是一个相当复杂的过程,要求低时延、低功耗、占用尽可能小的带宽.现有的垂直切换技术主要沿用水平切换中的算法和机制,普遍存在切换时延大、切换效率低的问题.

2 现有技术分析

异构无线网络中的垂直切换过程可分为网络发现、切换判定和切换执行^[2].在整个切换过程中,切换判定是一个非常重要的环节,也是一个重要的研究课题.

目前的垂直切换算法可分为两大类:传统算法和基于人工智能的算法^[3].

传统算法广泛应用于 GSM 等蜂窝网中,主要是通过对于一个或多个具体参数设置阈值来进行切换触发.最常用的参数是接收信号强度(RSS)、载波干扰比(CIR)、信号干扰比(SIR)、比特误码率(BER)、块差错率(BLER)、符号差错率(SER)等^[4].在异构无线网络中,虽然不同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分离信号来进行 RSS 测量.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.如果移动终端在两个基站之间不断来回切换,即意味着发生了乒乓效应.乒乓效应会严重影响终端的正常通信.为了避免切换当中的乒乓效应,可以在传统算法中引入迟滞电平(hysteresis)^[5-6]、驻留定时器(dwelling timer)^[7-8]等参数.一些切换算法通过引入更多的参数来做出更为智能的切换判断.文献[9]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.文献[10]通过计算切换成本来进行切换判断,其成本是以可用带宽和价格来衡量.文献[11]提出了一种垂直切换算法,通过预测 RSS,并计算当前应用所需带宽和候选网络的可用带宽情况来进行网络选择和切换触发.文献[12]通过估计移动节点的速度和切换延迟来动态调整 RSS 阈值.这类算法的主要问题是成本公式中的各个参数(可用带宽、链路状况等)在实际网络中都是动态变化的,很难实时测量.而相关算法或依赖于特定的网络支持,或假定成本公式中的各个参数为已知,因此实际可操作性不强.

另外一类算法使用动态规划或人工智能来进行切换判断,比如模式识别^[13-14]、神经网络^[4]、模糊推理^[3,15].但是这类算法的复杂度高,对计算能力有限的移动设备并不适合,而且神经网络还需要长时间的预先学习.

3 自适应垂直切换算法

下面分别以 WiFi 和 UMTS 作为高带宽、低覆盖以及低带宽、高覆盖的无线接入技术的典型代表,来介绍本文所提出的垂直切换判定算法.该算法同样适用于其它无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)和无线广域网(Wireless Wide Area Networks, WWAN)间的垂直切换.

3.1 切换判定条件的形式化表达

考虑到实际环境中,WWAN 基本上是全覆盖的,而 WLAN 多为孤岛形式散落在 WWAN 的区域中.因此,现有的垂直切换算法一般都只检测 WLAN 的信号强度变化,作为垂直切换触发的基本条件^[9].

当节点距 AP 的距离为 d 时,节点从 WiFi 接收到的信号强度可表示为

$$RSS_{\text{WiFi}}(d) = K_1 - K_2 \log(d) + \Omega(d) \quad (1)$$

其中, K_1 和 K_2 为路径损失参数, $\Omega(d)$ 为零均值静态高斯白噪声.

令 WiFi 接收信号强度的切换阈值为 RSS_0 . 定义 $D_{\text{RSS}} = RSS_{\text{WiFi}} - RSS_0$. 假设当 $d = \varphi$ 时, $RSS_{\text{WiFi}} = RSS_0$, 即 $D_{\text{RSS}} = 0$.

在节点的运动过程中,采用常见的均匀采样来测量 D_{RSS} , 采样的时间间隔为 T .

将当前状态下用于切换判断的所有信息描述为(当前为第 N 个采样点)

$$S_N = (D_{RSS}(N), D_{RSS}(N-1), \dots, D_{RSS}(N-P+1), K, M, \phi_{N-1}) \quad (2)$$

其中, $\{D_{RSS}(N), D_{RSS}(N-1), \dots, D_{RSS}(N-P+1)\}$ 是最近 P 次 D_{RSS} 采样结果, $D_{RSS}(N)$ 是当前时刻的采样结果, K 为上次发生切换的采样点, M 为节点上次穿过符合 $d = \varphi$ 的位置的采样点, ϕ_{N-1} 为第 $N-1$ 个采样点的网络选择。

ϕ_N 表示第 N 个采样点的网络选择. 显然, ϕ_N 为 S_N 的函数. 可以令

$$\phi_N = \xi(S_N) = \begin{cases} > 0, & \text{选择 WiFi} \\ < 0, & \text{选择 UMTS} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\phi_N = 0$ 为非法状态。

因此, 有如下结论: 当 $\phi_X \cdot \phi_Y < 0 (X < Y)$ 时, 说明第 X 个采样点和第 Y 个采样点的网络选择不同, 因此 X 和 Y 之间至少存在一次切换. 特别地, 当 $Y = X + 1$ 时, 说明第 Y 个采样点发生了一次切换。

3.2 现有切换算法的性能分析

基于 ϕ_N 的定义, 可以给出迟滞电平算法(缩写为 HY)的切换条件(h_y 为 HY 算法中的迟滞电平值):

$$\begin{aligned} \phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 &\leftrightarrow (\phi_{N-1} < 0 \wedge D_{RSS}(N) > h_y) \vee \\ &(\phi_{N-1} > 0 \wedge D_{RSS}(N) < -h_y) \end{aligned} \quad (4)$$

标准的符号函数 $\text{sgn}(X) = \{-1, 0, 1\}$ 的定义如下:

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 0, & X = 0 \\ X/|X|, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

利用符号函数, HY 算法的切换条件可表示为

$$\phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 \leftrightarrow -\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot D_{RSS}(N) > h_y \quad (6)$$

据此可以得到 HY 算法中 ϕ_N 的一种表达:

$$\phi_N = \begin{cases} \phi_{N-1}, & h_y \cdot \text{sgn}(\phi_{N-1}) + D_{RSS}(N) = 0 \\ h_y \cdot \text{sgn}(\phi_{N-1}) + D_{RSS}(N), & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

同理, 可以分析得到驻留定时器算法(缩写为 DW)的切换条件(t_{DW} 为 DW 算法中的驻留定时器):

$$\begin{aligned} \phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 &\leftrightarrow -\text{sgn}(\phi_{N-1} \cdot D_{RSS}(N)) \cdot (N-M) \cdot T > t_{DW} \end{aligned} \quad (8)$$

据此给出 DW 算法中 ϕ_N 的一种表达:

$$\begin{aligned} \phi_N = & \begin{cases} \phi_{N-1}, & t_{DW} = (N-M) \cdot T \\ t_{DW} \cdot \text{sgn}(\phi_{N-1}) + \text{sgn}(D_{RSS}(N)) \cdot (N-M) \cdot T, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

引入迟滞电平和驻留定时器的目的是为了

乒乓效应, 但是在避免乒乓效应的同时, 也延长了移动终端在信号较差的网络中所停留的时间. 为衡量垂直切换算法的优劣, 我们在文献[16]中定义了“命中率” MR (Matching Ratio) 作为垂直切换算法的一个评价指标. 下面以 UMTS 到 WiFi 的切换 ($U \rightarrow W$ 切换) 为例, 分析 HY 算法和 DW 算法的性能. WiFi 到 UMTS 的切换 ($W \rightarrow U$ 切换) 同理可得.

如果节点的运动速度为 V , 那么以 WiFi 的 AP 为圆心, 节点的速度矢量可分为径向分量 V_R 和切向分量 V_T , $V = V_R + V_T$. 考虑到切线方向的位移并不改变 D_{RSS} , 因此在以下的分析中, 节点的速度均指径向速度.

假设节点在短时间内呈现为匀速直线运动, 径向速度为 v . WiFi 的覆盖半径为 R , AP 的坐标为 $(0, 0)$. 假设当移动节点离 AP 的距离 $d = d^+$ 时, $D_{RSS} = h_y$; 当 $d = d^-$ 时, $D_{RSS} = -h_y$. 显然有 $0 < d^+ < \varphi < d^-$.

基于这些假设, 可以分别得到 HY 算法和 DW 算法发生切换的采样点.

HY 算法采样点:

$$N_{HY} = \frac{\varphi - d^+}{v \cdot T} + M \quad (10)$$

DW 算法采样点:

$$N_{DW} = \frac{t_{DW}}{T} + M \quad (11)$$

假设 $v = v_{HO}$ 时, HY 算法和 DW 算法的切换在同一时刻发生(此时 $d = d^+$), 则有

$$v_{HO} \cdot t_{DW} = \varphi - d^+ \quad (12)$$

据式(10)~式(12)可以发现:

(1) 若节点的径向速度 $v > v_{HO}$, N_{DW} 保持不变而 N_{HY} 则相应提前. 此时有 $N_{HY} < N_{DW}$, 说明径向速度更快时, 就一次切换而言, HY 算法的切换会较 DW 算法提前.

(2) 若节点的径向速度 $v < v_{HO}$, N_{DW} 保持不变而 N_{HY} 则相应推迟. 此时有 $N_{HY} > N_{DW}$, 说明径向速度更慢时, 就一次切换而言, HY 算法的切换会较 DW 算法滞后.

当节点自 WiFi 的边缘处以速度 v 匀速向圆心 AP 运动, 并最终到达 AP 时, 可以得到此过程中两种算法的命中率(MR).

HY 算法命中率:

$$MR_{HY} = 1 - \frac{\varphi - d^+}{R} \quad (13)$$

DW 算法命中率:

$$MR_{DW} = \begin{cases} 1 - \frac{v \cdot t_{DW}}{R}, & \varphi > v \cdot t_{DW} \\ 1 - \frac{\varphi}{R}, & \varphi \leq v \cdot t_{DW} \end{cases} \quad (14)$$

从式(13), (14)可以看出, HY 算法的命中率和速度无关, 而 DW 算法的命中率则随着速度的提高而线性下降, 直到达到一个下限值。

据式(12)~(14), 可以发现:

(1) 若节点的径向速度 $v > v_{HO}$, MR_{HY} 保持不变而 MR_{DW} 则下降, HY 算法的命中率会高于 DW 算法。

(2) 若节点的径向速度 $v < v_{HO}$, MR_{HY} 保持不变而 MR_{DW} 则上升, HY 算法的命中率会低于 DW 算法。

3.3 一种自适应的垂直切换算法及其性能分析

为了提高算法的整体命中率, 一种简单的做法是, 当 $v > v_{HO}$ 时, 采取 HY 算法; 而当 $v < v_{HO}$ 时, 采取 DW 算法。然而, 在实际环境中, 移动节点位置的感知依赖于节点空间坐标的确定, 而速度的计算, 更需要定期采样坐标的变化。这些定位服务不仅受周围环境的影响, 而且在精度、能量消耗方面都存在较大的问题, 目前尚无很好的解决方案。而径向速度的确定则更加困难。

重新分析 HY 和 DW 算法的切换条件, 可将式(6)所表示的 HY 算法的切换条件重新表示为

$$\phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 \leftrightarrow -\frac{\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot D_{RSS}(N)}{h_y} > 1 \quad (15)$$

同样, 式(8)所表示的 DW 算法的切换条件也可以表示为

$$\phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 \leftrightarrow -\frac{\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot D_{RSS}(N) \cdot (N-M) \cdot T}{t_{DW}} > 1 \quad (16)$$

因此, 可提出一个新的垂直切换算法, 其切换触发条件为

$$\begin{aligned} \phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 &\leftrightarrow -\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot \\ &\left(\frac{\text{sgn}(D_{RSS}(N)) \cdot (N-M) \cdot T}{t_{DW}} + \frac{D_{RSS}(N)}{h_y} \right) > 1 \end{aligned} \quad (17)$$

较 HY 和 DW 算法而言, 此算法在命中率上有较大的提升。不过, 其命中率的提升是以早切换为代价的。因此在实际环境中, 该算法的乒乓效应要比 HY 算法和 DW 算法都严重。

为了进一步提高切换性能, 针对该算法做如下改进。

首先, 在判断标准上, 引入动态乒乓效应退避因子 PF_N , 注意此值和时间相关, 其定义如下:

$$PF_N = \begin{cases} 1, & (N-K) \cdot T > PP_Length \\ PF_{N-1} + STEP, & \phi_{N-1} \cdot \phi_{N-2} < 0 \text{ 且} \\ & I_{N-1} \leq PP_Length \\ PF_{N-1}, & \text{其它} \end{cases} \quad (18)$$

其中, PP_Length 为乒乓效应定义中两次切换间的时间间隔阈值。

I_N 为最近两次切换的时间间隔, 定义为

$$I_N = \begin{cases} (N-K) \cdot T, & \phi_N \cdot \phi_{N-1} < 0 \\ I_{N-1}, & \phi_N \cdot \phi_{N-1} > 0 \end{cases} \quad (19)$$

在引入 PF_N 的基础上, 式(17)中的切换条件变为

$$\begin{aligned} \phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 &\leftrightarrow -\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot \\ &\left(\frac{\text{sgn}(D_{RSS}(N)) \cdot (N-M) \cdot T}{t_{DW}} + \frac{D_{RSS}(N)}{h_y} \right) > PF_N \end{aligned} \quad (20)$$

此时算法的网络选择如图 1 所示 ($STEP=2$)。

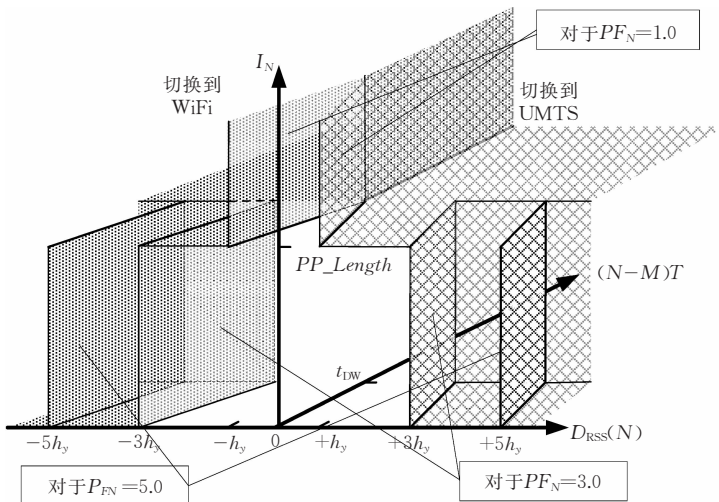


图 1 基于 PF_N 的网络选择

就式(20)的实际物理意义而言,除了长期运动区域信息外,只考虑了节点当前的位置信息,而并未对节点的运动趋势做出分析.针对此不足,我们提出了以短期内的运动趋势来动态调整切换条件的改进算法 SAVA(Self-Adaptive VHO Algorithm),其切换条件为

$$\phi_{N-1} \cdot \phi_N < 0 \leftrightarrow -\text{sgn}(\phi_{N-1}) \cdot \left(\frac{\text{sgn}(D_{\text{RSS}}(N)) \cdot (N-M) \cdot T}{t_{\text{DW}}} + \frac{TD_{\text{RSS}}(N)}{h_y} \right) > PF_N \quad (21)$$

其中,

$$TD_{\text{RSS}}(N) = |D_{\text{RSS}}(N)| \cdot MA_N \quad (22)$$

MA_N 表征了节点的运动趋势,可以用线性拟合的方法得到,也可以用如下方法利用最近 P 次 D_{RSS} 的采样结果对 D_{RSS} 的趋势进行简单估算:

$$MA_N = \begin{cases} 1, & \forall i \in N-P+2..N, D_{\text{RSS}}(i-1) < D_{\text{RSS}}(i) \\ -1, & \forall i \in N-P+2..N, D_{\text{RSS}}(i-1) > D_{\text{RSS}}(i) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (23)$$

$TD_{\text{RSS}}(N)$ 和 MA_N 的关系如图 2 所示.

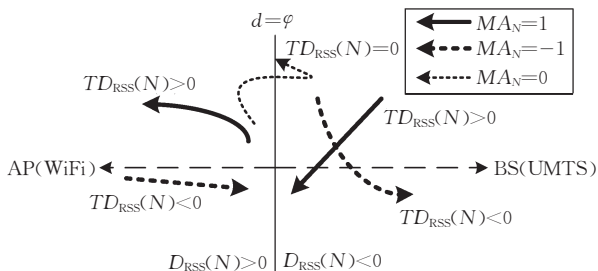


图 2 $TD_{\text{RSS}}(N)$ 和 MA_N 的对应关系

因此,当节点运动趋势不明时(MA_N 为 0),切换只考虑节点的长期运动区域; MA_N 为 1 意味着 D_{RSS} 测量值递增,也就是节点正向 AP 方向移动,此时 $U \rightarrow W$ 切换所需满足的时间阈值会自适应地下调,而 $W \rightarrow U$ 切换所需满足的时间阈值会自适应地上升; MA_N 为 -1 意味着 D_{RSS} 测量值递减,也就是节点正向 AP 的相反方向移动,此时 $W \rightarrow U$ 切换所需满足的时间阈值会自适应地下调,而 $U \rightarrow W$ 切换所需满足的时间阈值会自适应地上升.

SAVA 算法中的 ϕ_N 可以定义为

$$\eta_N = PF_N \cdot \text{sgn}(\phi_{N-1}) + \frac{\text{sgn}(D_{\text{RSS}}(N)) \cdot (N-M) \cdot T}{t_{\text{DW}}} + \frac{TD_{\text{RSS}}(N)}{h_y}, \quad \phi_N = \begin{cases} \phi_{N-1}, & \eta_N = 0 \\ \eta_N, & \text{其它} \end{cases} \quad (24)$$

SAVA 算法通过分析节点的运动趋势,自适应地调节切换触发条件,有效地提高了垂直切换的性能,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 性能评测

4.1 仿真评价模型

本文采用文献[16]中所提出的一个评价模型对 SAVA 进行 NS2 仿真试验,如图 3 所示.

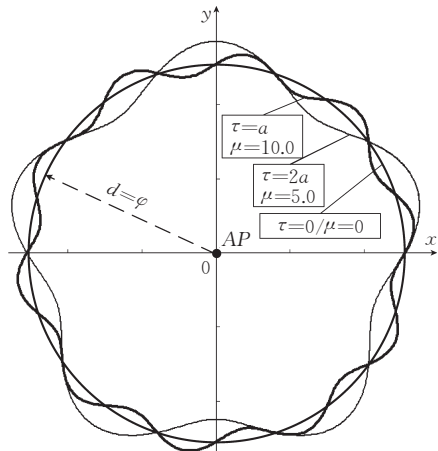


图 3 评价模型示意图

此模型中节点的运动方程为

$$\rho = \varphi + \tau \sin \mu \theta \quad (25)$$

其中, (ρ, θ) 是极坐标, τ 为正弦函数的振幅, $2\pi/\mu$ 为正弦函数的周期.

图 3 中显示了 τ, μ 取不同值时节点的运动轨迹.节点按此轨迹进行匀速无停留运动.

我们在文献[17-18]中利用其它模型对 SAVA 进行了数值仿真.

除命中率外,本文选择平均吞吐率(总吞吐量/仿真时间)作为垂直切换性能的另外一个评价指标.具体的仿真参数如下:WiFi 的覆盖半径为 $R=150\text{m}$, $T=50\text{ms}$, $\varphi=127.279\text{m}$. $\text{RSS}_0=1.5118\text{E}-10$, HY 算法中的 $h_y=1.8888\text{E}-11$, DW 算法中的 t_{DW} 为 5s. SAVA 算法中的 $\text{STEP}=2$, $\text{PP_Length}=10\text{s}$, $P=5$. 假定环境中无背景流量,仿真运行一个 UDP/CBR 流(速率为 2.67Mbps),并假定一次切换需要 2s 的时间开销.

4.2 仿真结果及性能分析

分别令 $\{\tau, \mu\}$ 为 $\{15, 5\}$, $\{15, 20\}$, $\{7.5, 5\}$ (τ 的单位为 m),在不同的速度 ($v=1 \sim 6\text{m/s}$) 下对三种算法进行仿真.假定 UMTS 接入带宽为 2M, WiFi

为 IEEE 802.11b(最大速率 11Mbps),衰减模型为 TwoRayGround. 图 4~图 6 分别给出了在节点运动

一圈(绕 AP 运动一周,回到出发点)后 HY、DW 和 SAVA 算法的性能指标.

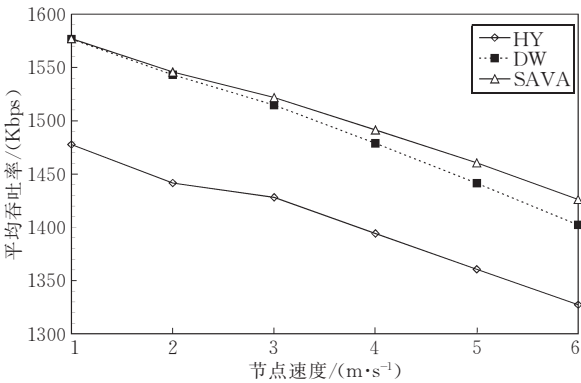


图 4 $\tau=15\text{ m}, \mu=5$ 时不同速度下 SAVA 与 HY, DW 的性能对比

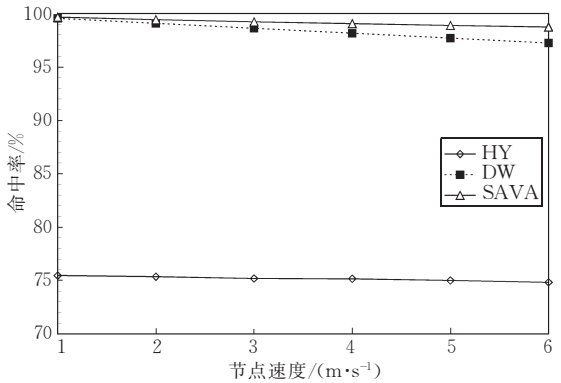
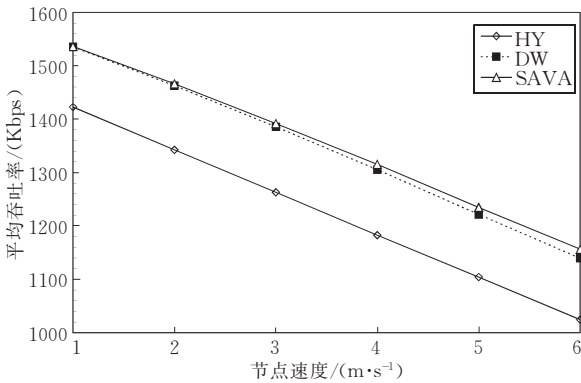
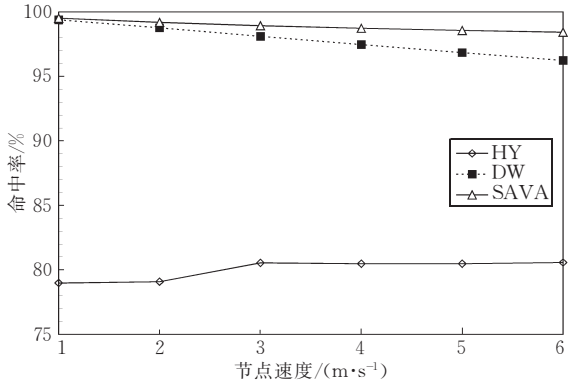


图 5 $\tau=15\text{ m}, \mu=20$ 时不同速度下 SAVA 与 HY, DW 的性能对比

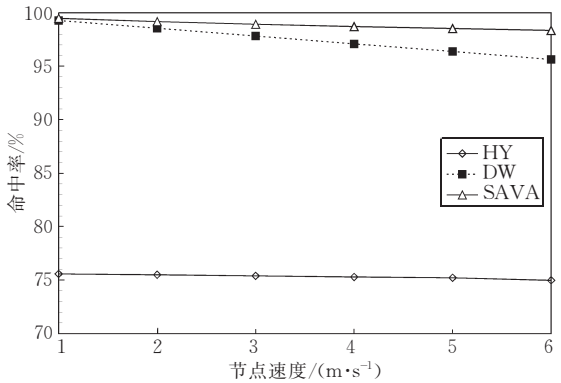
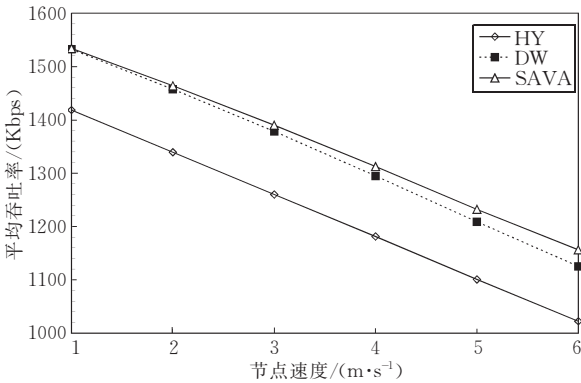


图 6 $\tau=7.5\text{ m}, \mu=5$ 时不同速度下 SAVA 与 HY, DW 的性能对比

从仿真结果可知,当节点在仿真环境中做振幅较大($\tau=15\text{m}$)而频率较低($\mu=5$)的规律性曲线运动时,当节点运动速度较低时,SAVA 算法与 DW 算法平均吞吐率相仿,均比 HY 算法提升了约 7%;随着速度上升,三种算法的平均吞吐率均有所下降,但 SAVA 仍优于另外两种算法. 当速度 $v=6\text{m/s}$ 时,SAVA 的平均吞吐率比 HY 提升了 7.5%,比 DW 提升了 1.7%. HY 算法的命中率不受节点运动速度的影响;DW 算法的命中率虽然高于 HY 算法,但会随运动速度的提高而下降. SAVA 算法的命中

率受速度影响非常小,且优于 HY 算法和 DW 算法.

当提高波动频率($\mu=20$)时,虽然三种算法的性能较之频率较低时有所下降,但是 SAVA 算法仍比 HY 及 DW 获得更好的性能. 在降低振幅($\tau=7.5\text{m}$)后,也同样获得了类似的结论. 综上三种仿真环境,SAVA 算法的综合性能优于 HY 算法和 DW 算法.

5 结 论

本文基于对常用的迟滞电平算法和驻留定时器

算法的分析,提出了一种自适应的垂直切换算法.该算法综合考虑了节点的当前位置信息、长期运动区域和短期运动趋势,性能优于现有切换算法,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.

致 谢 作者感谢澳大利亚卧龙岗大学(University of Wollongong)的 Eryk Dutkiewicz 教授对本文的建议!

参 考 文 献

- [1] Gustafsson E, Jonsson A. Always best connected. *IEEE Wireless Communications*, 2003, 10(1): 49-55
- [2] Stevens-Navarro E, Wong V W S. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks//*Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference*. Melbourne, Australia, 2006: 947-951
- [3] Hou J, O'Brien D C. Vertical handover-decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated radio-and-ow system. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(1): 176-185
- [4] Pahlavan K, Krishnamurthy P, Hatami A. Handoff in hybrid mobile data networks. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(2): 34-47
- [5] Zhang N, Holtzman J M. Analysis of handoff algorithms using both absolute and relative measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1996, 45(1): 174-179
- [6] Marichamy P, Chakrabarti S, Maskara S L. Performance evaluation of handoff detection schemes//*Proceedings of the IEEE Region 10 Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific*. Taj Residency, Bangalore, 2003: 643-646
- [7] Park H, Yoon S, Kim T, Park J, Do M, Lee J. Vertical handoff procedure and algorithm between IEEE 802.11 WLAN and CDMA cellular network. Lee J and Kang C-H. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 2524*. Berlin: Springer, 2003: 103-112
- [8] Ylianttila M, Pande M, Makela J, Mahonen P. Optimization scheme for mobile user performing vertical handoffs between IEEE 802.11 and GPRS/EDGE networks//*Proceedings of the 44th Annual IEEE Global Telecommunications Conference*.

ence. San Antonio, Texas, 2001: 3439-3443

- [9] Lee C W, Chen L M, Chen M C, Sun Y S. A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(11): 2118-2128
- [10] McNair J, Fang Z. Vertical handoffs in fourth-generation multinetwork environments. *IEEE Wireless Communications*, 2004, 11(3): 8-15
- [11] Chang B J, Lin S Y, Liang Y H. Minimizing roaming overheads for vertical handoff in heterogeneous wireless mobile networks//*Proceedings of the 2006 International Wireless Communication and Mobile Computing Conference*. Vancouver, British Columbia, Canada, 2006: 957-962
- [12] Mohanty S, Akyildiz I. F. A cross-layer (layer 2+3) handoff management protocol for next-generation wireless systems. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(10): 1347-1360
- [13] Pollini G P. Trends in handover design. *IEEE Communications Magazine*, 1996, 34(3): 82-90
- [14] Maturino-Lozoya H, Munoz-Rodriguez D, Tawfik H. Pattern recognition techniques in handoff and service area determination//*Proceedings of the 44th IEEE Vehicular Technology Conference*. Stockholm, Sweden, 1994, 1: 96-100
- [15] Guo Q, Zhu J, Xu X. An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous network//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Seoul, Korea, 2005, 4: 2769-2773
- [16] Liu M, Li Z C, Guo X B, Dutkiewicz E, Zhang D K. Performance evaluation of vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks//*Proceedings of the 49th Annual IEEE Global Telecommunications Conference*. San Francisco, USA, 2006, WLC14-1: 1-5
- [17] Liu M, Li Z C, Guo X B, Dutkiewicz E, Wang M H. SAVA: A novel self-adaptive vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks//*Proceedings of the 49th Annual IEEE Global Telecommunications Conference*. San Francisco, USA, 2006, WLC14-4: 1-5
- [18] Liu Min, Li Zhong-Cheng, Guo Xiao-Bing, Zhang De-Kui. Evaluation and improvement of vertical handoff algorithms in heterogeneous wireless networks. *Journal of Software*, 2007, 18(7): 1652-1659(in Chinese)

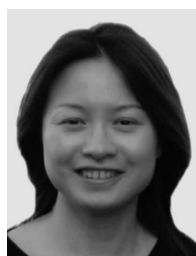
(刘敏,李忠诚,过晓冰,张德魁.异构无线网络中垂直切换算法的评测与改进.软件学报,2007,18(7):1652-1659)

LIU Min, born in 1976, Ph.D. candidate, associate professor. Her research interests include mobile IP, handoff and network measurement.

LI Zhong-Cheng, born in 1962, Ph. D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests focus on next generation Internet.

GUO Xiao-Bing, born in 1977, M. S. His research interests include pervasive computing and device collaboration.

ZHENG Kun, born in 1978, Ph. D. candidate. His research interests include transport layer architectures, protocols and performance analysis of wireless networks.



Background

A combination of diverse but complementary wireless access technologies will improve wireless transmission performance and provide mobile users with ubiquitous connectivity. In heterogeneous wireless networks, handoff can be separated into horizontal handoff and vertical handoff. A horizontal handoff is made between different access points using the same network interface. A vertical handoff is a handoff between access networks with different wireless technologies.

Vertical handoff is the basic requirement for the integration of heterogeneous wireless networks. Compared with horizontal handoff, vertical handoff involves different wireless network technologies varying widely in terms of bandwidth, delay, coverage area, power consumption, etc. While significant work has been done on horizontal handoff mechanisms in homogeneous networks, there is not much literature available on vertical handoff in heterogeneous wireless networks.

During the vertical handoff procedure, handoff decision is the most important step that affects the normal working of communication. An incorrect handoff decision may degrade the QoS of traffic and even break off current communication.

With the support of the National Basic Research Program of China(973 Program) under grant No. 2007CB310702 and the National Natural Science Foundation of China under grant No. 90604016, the authors have done research on performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks.

In this paper, the authors obtain the mathematical expressions of handoff conditions in the traditional handoff algorithms, and analyze their performance. Based on this, a novel vertical handoff decision algorithm has been proposed, which adaptively adjusts the handoff condition by analyzing the movement trend of mobile hosts and efficiently improves handoff performance. Simulations show that it can achieve a better integrative handoff performance compared with the conventional handoff algorithms. At present, with the support of the China Next Generation Internet (CNGI) project from the National Development and Reform Commission of China, the authors are developing the handoff management system based on the proposed algorithm and mobile IPv6 in heterogeneous wireless networks formed by wireless local area networks and wireless wide area networks.