

## 异构无线网络垂直切换技术综述

王煜炜<sup>1,2</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 房秉毅<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国联合网络通信集团有限公司研究院, 北京 100032)

**摘要:** 垂直切换是多网融合的基础, 是实现异构网络互通、支持不同接入方式无缝衔接的核心技术, 目前正在受到业界的重点关注, 并成为学术界研究的热点问题。随着无线移动通信技术向接入多元化、网络一体化和应用综合化的方向发展, 各种蜂窝移动接入、宽带无线接入和固定接入将共同接入基于 IP 的统一核心网络, 通过网络间的垂直切换, 支持用户的移动性和移动过程中业务的连续性。首先给出了垂直切换的定义和基本概念, 介绍了垂直切换的分类和基本流程, 随后详细论述垂直切换的切换判决和切换执行 2 个环节。针对切换判决, 总结了现有判决算法, 重点评述各代表算法工作原理并剖析论其特点和存在的不足。针对切换执行, 详述了现有垂直切换执行机制的工作原理和适用场景, 并分析其优缺点。最后, 对未来垂直切换技术的研究方向进行了展望。

**关键词:** 异构无线网; 垂直切换; 水平切换; 切换判决; 切换执行

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Survey on vertical handoff in heterogeneous wireless networks

WANG Yu-wei<sup>1,2</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, FANG Bing-yi<sup>3</sup>

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Unicom Research Institute, Beijing 100032, China)

**Abstract:** Vertical handoff between different access technologies is the basic requirement for convergence of different access technologies. It is also the key technology to implement interconnection of heterogeneous networks and support seamless integration of different access networks. As a result, providing efficient solutions for vertical handoff has received tremendous attention from the academia and industry all over the world. With the trend of diversity of access technologies, unification of networks and synthesis of applications, cellular mobile communication, broadband wireless access and fixed access will be connected to a unified IP-based core network. The integration of existing and emerging heterogeneous wireless networks requires the design of intelligent vertical handoff techniques to enable mobile users to switch network access points and experience uninterrupted service continuity. During the vertical handoff procedure, handoff decision is a crucial issue for an efficient mobility. The definition and key concept of vertical handoff are given and its categories are introduced. Subsequently, the authors classify the vertical handoff decision algorithms into three main categories and overview their basic principles. Especially, the features of these three categories of algorithms are analyzed and compared. Finally, future works about vertical handoff are outlined.

**Key words:** heterogeneous wireless networks; vertical handoff; horizontal handoff; handoff decision; handoff

### 1 引言

无线移动通信技术的快速发展不断为大众提供丰富多采的应用, 未来的移动通信网络将是多种

接入技术共存、相互补充、协同工作、支持终端无缝移动的全 IP 异构融合网络, 迫切需要深入研究适用于全环境覆盖的异构无线通信系统的融合与互通技术。其中, 实现异构网络互通的垂直切换技术

收稿日期: 2015-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61132001, 61120106008, 61472402, 61472404, 61272474, 61202410)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (61132001, 61120106008, 61472402, 61472404, 61272474, 61202410)

是多网融合的重要基础，目前正在受到业界的普遍关注，并成为学术界研究的热点问题。

异构无线网络中的垂直切换过程可分为网络发现、切换判决和切换执行<sup>[1]</sup>3个阶段。在整个垂直切换过程中，切换判决是一个非常重要的环节<sup>[2]</sup>。错误的切换决定会人为地降低通信效率和服务质量，甚至导致连接中断。在异构无线网络中，终端具备分属不同网络域的多个链接，因而比网络端有更多的移动相关信息。因此，异构无线网络中的切换判决和移动管理将具备更大的自主性。

本文首先给出了垂直切换的定义，介绍了垂直切换的分类。随后详细论述垂直切换的切换判决和切换执行2个环节。在切换判决方面，本文将现有的垂直切换判决算法分为3类并详细介绍其基本思想、特点和存在的不足；在切换执行方面，本文分4个层次逐一介绍各种垂直切换执行机制的工作原理和适用场景。在此基础上，展望了未来垂直切换技术研究方向。

## 2 垂直切换的基本概念

切换指的是移动主机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。当切换发生在同种网络技术下的不同接入点之间时称为水平切换 (horizontal handoff) 或系统内切换 (intra-system handoff)。当切换发生在不同网络技术接入点之间时称为垂直切换 (vertical handoff)<sup>[3]</sup>。

为了能给用户提供宽带、全球通用、即时和高移动性的多媒体无线通信服务，需要集成宽带互联网和各种无线通信系统来创建一种异构的支持多种接入方式的融合网络。在这种融合网络中，多种多样的空中接口技术将集成到基于 IP 的核心网络并形成一种重叠结构。在垂直切换中，无线网络的重叠主要指高层网络与低层网络的重叠。网络重叠是实现无缝垂直切换的前提条件。

根据切换发起和执行的实体，可将目前常用的切换机制分为3种<sup>[4]</sup>，分别是移动设备控制的切换、网络控制的切换和移动设备辅助的切换。移动设备控制的切换由移动设备检测信号强度并触发切换过程。网络控制的切换相应的判决和控制都由网络实体而不是由终端设备来完成。移动设备辅助的切换是由移动设备来测量相邻基站的信号强度，而由网络决定是否进行切换。在异构无线网络间的垂直切换中，由于只有移动设备知道自己配置了哪些网

络接口，而且即使当前网络知道这些相关信息，也不可能控制移动设备将要移入的另外一种无线网络，所以更适宜采用移动设备控制的切换<sup>[5]</sup>。移动设备控制的切换对网络设备的要求比较低，网络结构简单，但是也存在无法实时获得网络负载情况、相邻接入点容量、ISP策略等全局信息的问题<sup>[6]</sup>。

## 3 垂直切换的分类

和水平切换一样，垂直切换也可分为软切换和硬切换、前向切换和后向切换等。本部分从切换方向、切换必要性、切换粒度3个维度，重点讨论垂直切换所特有的分类方式。

### 3.1 上行切换和下行切换

在无线重叠网络中，垂直切换可分为上行切换和下行切换<sup>[7]</sup>。

下行切换指移动终端从大蜂窝切换到小蜂窝（例如从 TD-SCDMA 向 WLAN 的切换），此类切换对时间要求不高，移动终端不需要立即进行下行垂直切换，因为移动终端可能短时间内就会离开该无线网络（小蜂窝）。

上行切换指移动终端从小蜂窝切换到蜂窝（例如从 WLAN 向 TD-SCDMA 的切换），此类切换对时间要求高，如果接收到的信号强度迅速衰减的话，移动终端需要尽快进行上行垂直切换，否则可能会出现连接中断。

### 3.2 可预见切换和不可预见切换

垂直切换又可分为可预见切换和不可预见切换<sup>[3]</sup>。可预见切换是指那些移动设备总是希望执行切换的场景。在这种情况下，切换是必然的，所以称其为可预见切换。这种切换通常是由网络接口的可用性、网络带宽情况等物理事件所自动触发的；反之，如果移动设备当前连接的是 TD-SCDMA 网络，虽然检测到了良好的 WLAN 信号，但可能根据应用程序的需要或其他原因，希望继续停留在 TD-SCDMA 网络。也就是说，移动设备虽然进入了 WLAN 覆盖区域，却不敢保证切换一定要发生，所以称其为不可预见切换。

### 3.3 终端级切换和业务流级切换

按切换粒度来分，垂直切换可以分为为终端级切换 (terminal handoff) 和业务流级切换 (flow handoff)。终端级切换是指切换基于终端整体，即一次性且同时将移动终端上正在进行的所有业务流都进行网络更换。而业务流级切换则可以针对单

个业务流进行切换,即指只针对移动终端上正在进行的部分/特定业务流进行网络更换,其余业务流仍继续从原网络传输。在很多情况下,当移动终端的多个网络接口同时可用时,业务流级切换具有终端级切换不可替代的优势。

## 4 垂直切换的基本流程

垂直切换过程可分为网络发现、切换判决和切换执行<sup>[1]</sup>3个环节。网络发现是指移动设备搜寻可用网络的过程。切换判决是指移动设备决定何时进行切换,以及切换到哪个网络的过程。而切换执行,则是指将数据分组传送到新的无线链路上,从而真正实现移动用户到新的接入点的重路由的过程。

### 4.1 网络发现

移动设备在网络发现阶段的任务是搜寻可达网络。装备了多个网络接口的移动设备必须激活这些接口来接收由不同网络广播的服务通告。最简单的发现可达网络的方法是使这些网络接口一直处于激活状态。然而,即使在接收不到任何网络的时候,激活的接口也会不断消耗移动设备的电量。因此,不能让接口一直激活。能量消耗和发现时间是网络发现方案所需考虑的最重要的2个方面。移动设备上的网络接口可以周期性地被激活来接收服务通告。激活频率直接影响网络发现时间。

在无线局域网(WLAN, wireless local area networks)和无线广域网(WWAN, wireless wide area networks)所组成的异构无线网络中,一般可认为WWAN是全覆盖的,因此垂直切换中网络发现阶段的任務主要是发现可用的WLAN,这与WLAN间水平切换中网络发现的过程相同,因此下文不再详述此部分细节。

### 4.2 切换判决

切换判决阶段的任務是根据所获得的切换判定指标来判断是否需要进行切换,以及应该选择哪个目标网络。在整个切换过程中,切换判决是一个非常关键的环节,错误的切换决定会人为地降低通信效率和服务质量,甚至导致连接中断。传统的切换判决算法基于一些可以表征网络信号质量的参数来触发切换,如信号强度、新网络区域的资源可用情况等。切换算法对相关参数进行周期性地检测,当监测值低于预设的阈值时触发切换。

### 4.3 切换执行

切换执行的目的是将数据分组传送到新的无线链路上,从而真正将移动用户的传输路径重新定向到新的网络接入点。这就要求网络将移动用户的路由信息传送到目标接入路由器,以便完成后继报文的转发。由于下一代异构无线网络包含了多种网络技术和标准,数据分组的重路由过程也将涉及不同的接入网络。

异构无线网络和同时具有多种网络接口的多宿移动主机的出现,使利用多种无线网络的重叠来提高传输性能成为可能,同时也促进了在各个层次(网络层、传输层、应用层)实现透明的无缝切换的研究工作的开展。

## 5 现有垂直切换判决算法分析

现有的垂直切换判决算法可分为3类,分别是传统的切换判决算法、基于人工智能的切换判决算法和基于成本函数的切换判决算法。

### 5.1 传统的垂直切换判决算法

第一类垂直切换判决算法是传统算法,主要的判决指标是接收信号强度(RSS, received signal strength)或者综合考虑RSS和其他链路参数(如网络负载等)。

在垂直切换的被迫切换情况下,移动设备有可能恰恰处于一个临界区域,信号强弱等切换触发条件接近一个阈值,在一个范围之内抖动。这很可能造成移动设备在几个网络之间来回切换,也就是所谓的乒乓效应,从而造成系统性能的下降和资源的浪费。现有的垂直切换判决算法一般都认为WWAN信号恒定,而只检测WLAN的信号强度变化,作为垂直切换判决的基本条件<sup>[8]</sup>。因此,垂直切换中的迟滞电平算法实际上是通过为WLAN的RSS设置切换阈值,在此基础上为上行切换和下行切换设置WLAN的RSS相对于此切换阈值的迟滞电平来实现<sup>[9]</sup>。

Bing等<sup>[10]</sup>提出了一个基于RSS和移动终端与BS/AP间距离的垂直切换判决算法。由于异构网络中来自不同接入技术的RSS无法相互对比,该算法为2种接入技术设置了不同的RSS切换阈值。但是,该文并未解决如何得到移动终端与BS/AP间距离的问题。

Hatami等<sup>[11]</sup>提出在异构网络环境中使用驻留定时器来提高WLAN的利用率,即使移动终端已

经处于过渡区域, 尽可能久地停留在具有高数据传输的无线网络仍有助于提高用户可获得的吞吐量。然而该文并未指明如何选择合适的驻留定时器值。

Mohanty 等<sup>[12]</sup>提出了一种跨层的切换管理协议 (CHMP, cross-layer handoff management protocol), 利用对移动终端的速度和切换时延的估测来动态调整 RSS 切换阈值, 从而改进层次化移动 IP (HMIP, hierarchical mobile IP) 的性能。移动终端通过向网关外地代理 (GFA, gateway foreign agent) 发送一个含无效 mobile-GFA authentication Extension 的 HMIP 注册消息来探测系统内切换的延迟, 向家乡代理 HA 发送一个含无效 mobile-home authentication extension 的 HMIP 注册消息来探测系统间切换的延迟。通过比较 HMIP 认证请求的发送时间和 HMIP 认证应答的接收时间, 移动终端可以估计自己连上新 BS 的切换时延。Mohanty 等<sup>[12]</sup>将 CHMP 和固定 RSS 阈值的切换算法进行了性能对比, 但是没有分析因为速度和切换时延估测所引入的时间开销和信令开销有多大。该协议可支持水平切换和垂直切换, 但是没有针对垂直切换进行专门的分析。

Liu 等<sup>[13]</sup>给出了异构无线网络中切换判决条件的形式化表达, 基于该表达对已有的迟滞电平算法和驻留定时器算法的性能进行了定量分析。在此基础上, 提出了一种自适应垂直切换判决算法 (SAVA, self adaptive VHO algorithm)。该算法采用 RSS 作为唯一的算法输入, 根据 RSS 的变化趋势分析节点运动特征, 综合考虑节点的长期运动区域和短期运动趋势, 自适应地调整切换触发条件, 有效提高垂直切换性能。

Chang 等<sup>[14]</sup>提出了一种自适应垂直切换算法, 首先基于多项式回归预测 RSS, 而后基于马尔可夫决策过程来选择目标网络。其中 Chang 等<sup>[14]</sup>预测 RSS 的思路和 Liu 等的研究工作<sup>[13]</sup>类似, 都是基于过去几次的 RSS 采样结果来判断 MN 是向接近目标网络的方向移动还是向远离目标网络的方向移动。Chang 等研究工作<sup>[14]</sup>中的马尔可夫决策过程要求首先对业务流进行分类, 并且要确定各类业务在每个网络中的网络报酬 (network reward) 和到达率。

Liu<sup>[9]</sup>提出了一种基于 RSS 预测的垂直切换判决算法 (MMRE, motion model-based RSS estimation), 并详细分析了该算法的性能和各参数对切换触发的影响。在此基础上, Liu 等进一步<sup>[15]</sup>对 MMRE

算法进行改进, 提出了一种基于速度感知的垂直切换判决算法 (A-MMRE, adaptive motion model-based RSS estimation algorithm)。MMRE 和 A-MMRE 中均假设 WWAN 为全覆盖, 定义当前接收到的 WLAN 信号强度与切换阈值的差值为  $D_{RSS}$ , 并用  $F(N)$  作为第  $N$  个采样点对未来  $D_{RSS}$  的预测。在 MMRE 的  $F(N)$  的估算中, 当前时刻的信息权重最大, 而历史信息的影响随相应采样点距离当前时刻的时间间隔的增长而降低, 具体权重由速度因子  $\omega$  来调节, 提升了判决算法的时效性。

图 1 所示为当节点运动速率为 10 m/s 时, 在 100 s 的随机运动轨迹下 A-MMRE 算法和 MMRE 算法 (测量样本数  $P=2$ , 速度因子  $\omega=0.5$ ) 中  $F(N)$  的分布情况。

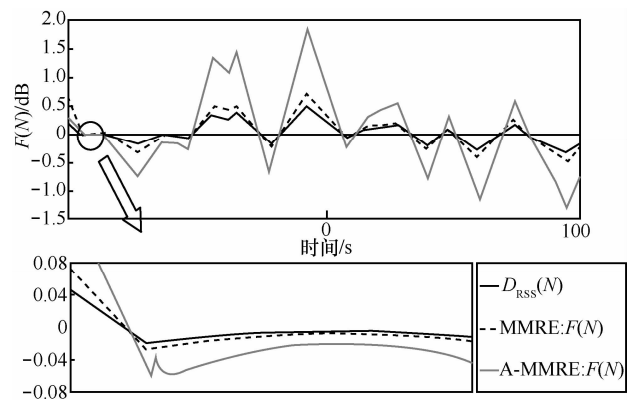


图 1 A-MMRE 算法和 MMRE 算法 ( $P=2, \omega=0.5$ ) 中  $F(N)$  的变化情况

由图 1 可以看到, 在  $D_{RSS}$  变化不明显的情况下, A-MMRE 通过动态调整  $\omega(N)$ , 在与  $D_{RSS}$  变化趋势相一致的前提下扩大了  $F(N)$  的变化幅度, 从而确保提前预测  $D_{RSS}$  变化趋势和尽早触发切换。

Liu 等<sup>[16]</sup>定义了水平切换和垂直切换判决条件的通用形式化表达, 并对传统的迟滞电平算法和驻留定时器算法进行了扩展, 提出了改进算法 E-HY 和 E-DW, 使其可以应用于水平、垂直切换并存的复杂环境, 并分析了改进算法的性能。在此基础上, 提出了一种新的普适切换算法 GHO。该算法在切换判决条件中同时引入了位置因子和时间因子 2 种影响因子, 可在异构网络环境中实时选择目标接口和目标网络, 自动触发相应的水平切换和垂直切换。

Shafiee 等<sup>[17]</sup>提出了一种车载网络中优化垂直切换 (VHO) 策略, 并在不同场景下验证了其有效性。其目标主要是最小化数据传输的时间以及最小化传输代价。在最小化传输代价与时间条件下, 当

速率较低时,进行 VHO 将会是较好的选择。当速率较高,此时应避免进行 VHO 操作,保持在原有网络中。该决策算法主要考虑用户当前的移动速率,并且考虑到此时传输与时间代价。相比于以前的集中式决策算法,该算法具有分布式特性,可以为每个车载用户进行 VHO 操作决策。

## 5.2 基于人工智能的切换判决算法

第二类垂直切换判决算法是基于人工智能的切换算法,这类算法使用动态规划(dynamic programming)的方法或人工智能(artificial intelligence)的方法进行切换判决,比如 Maturino-Lozoya 等<sup>[18]</sup>和 Pollini 等<sup>[19]</sup>采用了模式识别(pattern recognition)的方法, Pahlavan 和 Makela 等<sup>[20]</sup>中采用了神经网络(neural network)的方法, Guo<sup>[21]</sup>和 Hou 等<sup>[22]</sup>则采用了模糊逻辑(fuzzy logic)的方法。

Pahlavan 等<sup>[4]</sup>提出了一个使用神经网络在 GPRS 网络和基于 IEEE 802.11 的 WLAN 所组成的混合网络中进行切换判决的例子。文中使用一个 3 层的反向传播神经网络,系统的输入为 AP 的 RSS 样本值,输出为一位二进制数,0 代表不切换,仍跟 AP 进行通信;1 代表切换,转而跟 BS 进行通信。用这些 RSS 样本值和对应的输出来训练该神经网络。文中进一步将这个基于神经网络的切换算法与传统的基于 RSS 和迟滞电平的算法进行了对比,证明该算法具有更短的切换延迟,并可避免不必要的切换。

Tripathi 等<sup>[23]</sup>提出了一种基于模糊逻辑的自适应垂直切换判决算法,利用一个模糊推理系统(FIS, fuzzy logic system)来实现目标网络选择,选出候选的宏蜂窝“x”(对应 WWAN)和微蜂窝“y”(对应 WLAN)。算法采用的是 Mamdani 模糊系统,此系统的输入是  $RSS_{micro}$ (微蜂窝的信号强度)、 $Trd$ (微蜂窝和宏蜂窝中的业务流量差或者呼叫个数差)以及 MS velocity (MS 的速度)。输出是网络选择系数(cell selection index),其代表的是一个确定的用户属于微蜂窝或者宏蜂窝的程度。这个值越高,意味着 MS 应该连接到一个微蜂窝,值低则意味着 MS 应该连接到一个宏蜂窝。文中所提出的基于模糊逻辑的自适应垂直切换判决算法不仅要求知道 MS 的移动速度,还需要实时知道 MS 相对于新旧 BS 的移动方向,这在实际的网络环境中很难获得,并且没有考虑微蜂窝网络的流量状况。

Guo 等<sup>[21]</sup>结合模糊推理系统(FIS)和改良的

Elman 神经网络(MENN),提出了一种自适应的多指标垂直切换判决算法 AMVHO。其中 FIS 采用了垂直切换的关键指标作为输入变量,并基于定义的基本规则作出切换判决。输入变量包括业务流带宽、移动台的速度、切换后网络的用户数量。其中切换后网络的用户数量由 MENN 负责预测,并将预测的输出作为自适应多指标判决的一个输入。

Mallick 等<sup>[24]</sup>针对 4G 网络提出了一种基于基因选择算法的自适应多属性垂直切换判决算法。该算法首先利用一个模糊逻辑推理系统来对切换判决指标参数进行处理,执行切换初始化过程。该算法中的参数包括信号强度、网络覆盖范围、数据发送速率、服务成本、可靠性、安全性、终端设备电量、终端移动速度等多个指标要素;进而将处理后的结果输入到多属性决策算法中进行最佳网络接口选择,并利用基因选择算法最终给出最优解。

Xu 等<sup>[25]</sup>针对车载异构无线网络中快速移动车载单元 OBU (on board unit) 与路边单元 RSU (road side unit) WLAN 以及蜂窝网连接的特点,提出了一种基于模糊 Q-learning 的垂直切换 FQVH (fuzzy Q-learning based vertical handoff) 策略,如图 2 所示。FQVH 作为模块被整合到 RSU 上,它的架构采用了神经网络模糊推理系统(NFIS)以及 Q-learning 理论来进行网络参数计算,对靠近 OBU 和远离 RSU 时的 WLAN 和宏蜂窝网络状况进行分析,进而实现垂直切换过程。

FQVH 策略能够自适应地针对车载终端速度和会话的到达速率来调整切换过程。同时,文中运用模糊推理系统(NFIS, neural fuzzy inference system)中的实时学习的功能将相关信道参数计算结果保存下来用于信道建模,为用户提供更高的 QoS。

Kassar 等<sup>[26]</sup>基于模糊逻辑和上下文感知,提出了一个垂直切换判决算法,其架构如图 3 所示。其中切换信息搜集模块(handover information gathering)通过监控和测量,实时搜集移动节点一侧和可用网络侧的上下文信息。切换决策模块(handover decision)是算法的核心,又分为切换启动模块(handover initiation)和网络选择模块(network selection)。切换启动模块的任务是根据信息搜集阶段搜集到的上下文信息,采用模糊逻辑方法决定何时触发切换。网络选择模块的任务是根据用户的需求,采用 AHP (analytic hierarchy process) 方法,从所有候选网络中选择出一个最佳的并且最能满

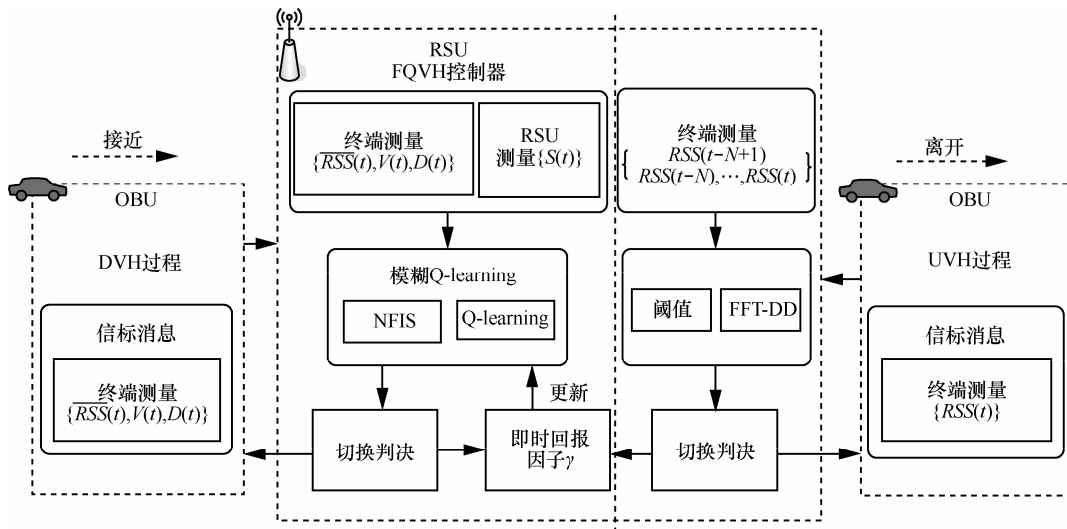


图2 FQVH 策略算法处理流程

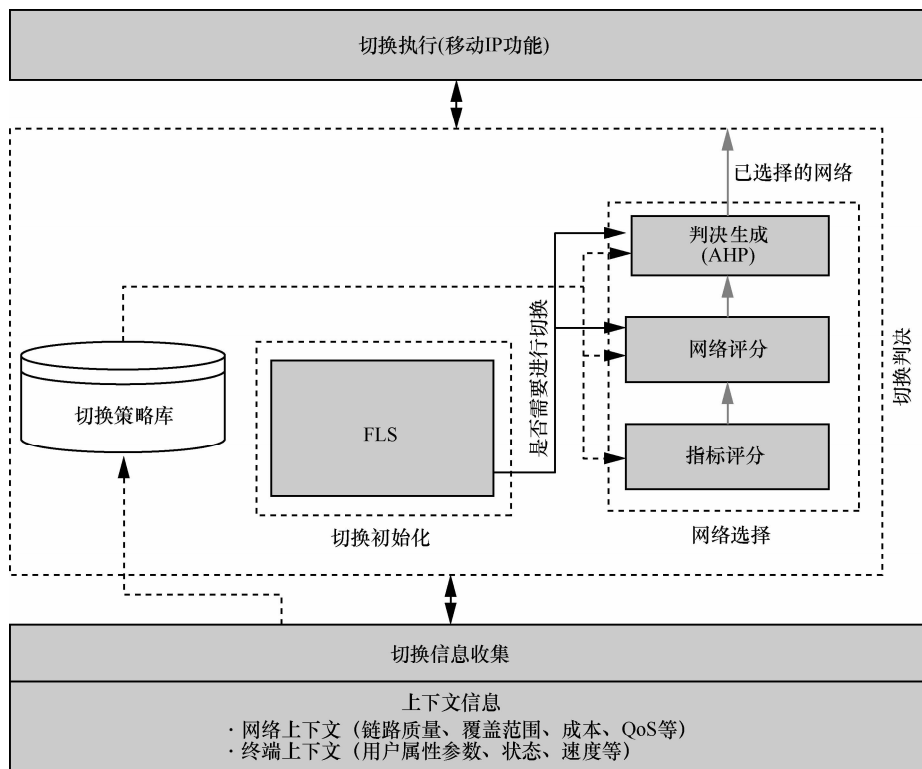


图3 基于模糊逻辑和上下文感知的垂直切换判决算法

足用户需求的目标网络进行切换。从而指导移动节点选择总分最高的作为目标网络进行切换。

### 5.3 基于成本函数的切换判决算法

基于成本函数的切换判决算法为待选网络的接入成本、电量消耗、带宽等参数设定不同的权重，通过判决函数的计算结果来进行切换触发。

Chen 等<sup>[7]</sup>的研究工作<sup>[7]</sup>中定义了稳定期的概念：从发现更好的无线网络，到开始执行切换操作

之间的时间长度，其实相当于驻留定时器。文中提出的切换算法根据网络资源状况和移动节点上正在运行的应用的需求来动态调整稳定期。所设定的判决函数主要体现为从移动终端上正在运行的应用的角度来看，待选的无线网络所能提供的 QoS。实际上就是一种自适应地调整驻留定时器的切换算法。该算法通过已知参数来计算切换前后网络的利用率，作为切换触发条件。

Ormond 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于效用函数的垂直切换判决算法。该算法面向非实时的文件传输应用,考虑用户的时间要求,估计每个接入网络的文件传输时间,并基于消费盈余 (consumer surplus) 这一经济学的概念来选择最佳的网络接入。

Stevens-Navarro 等<sup>[28]</sup>将垂直切换判决形式化为一个以最大化每个连接的总预期收益为目标的马尔可夫决策过程。连接所使用的网络资源表示为一个链路收益函数,而执行垂直切换所产生的路由操作和信令处理则表示为信令开销函数。在此基础上,用数值迭代算法来计算静态确定策略。该算法所需要的参数基于 IEEE 802.21 标准草案获得。其收益函数中包括待选网络的可用带宽信息、延迟信息,并可扩展支持抖动信息、接入成本、能量消耗、安全性等。

Sun 等<sup>[29]</sup>将垂直切换判决形式化为一个约束马尔可夫决策过程,其目标是在预期的总访问开销的约束条件下最大化每个连接的总预期收益。在切换判决中,考虑了不同网络的资源情况、用户的移动速度和位置信息。一个效益函数用来表征连接的带宽和延迟,一个罚函数用来表征信令开销和呼叫掉线率 (call dropping probability), 而一个成本函数用来表征一个特定网络的接入成本。

Lee 等<sup>[30]</sup>利用一个目标函数来选择最佳的目标网络 (包括水平切换和垂直切换)。目标函数考虑了移动节点的电量和不同接入点间的负载均衡。所提出的垂直切换判决算法需要实现于多个垂直切换判决控制器 (VHDC, vertical handoff decision controller)。VHDC 位于接入网,可以为同时有多个 AP 和/或 BS 覆盖的区域提供切换判决服务。

He 等<sup>[31]</sup>提出了一种简单有效的垂直切换算法,文中创新性地将参与垂直切换过程的移动终端进行分类考虑:一种是资源有限终端,一种是资源富足终端。对于不同类型的终端采取不同的阶段切换判决策略,分为下面 2 个阶段。

第一个阶段为切换预判阶段,也是一个快速评估阶段。该阶段主要为了判定接入网络是否能够满足用户的最低需求,即关键性能参数必须大于预设阈值,用下列表达式表示。

$$M_i = F(b_i - b_{th})F(RSS_i - RSS_{th})F(V_i - V_{th}) \cdot F(T_i - T_{th})F(P_i - P_{th})F(C_i - C_{th}) \quad (1)$$

其中,  $RSS_i, V_i, T_i, P_i, C_i$  分别表示当前接入网络的可用

带宽、接收信号强度、速度、持续时间、电池电量和业务成本值,  $b_{th}, RSS_{th}, V_{th}, T_{th}, P_{th}, C_{th}$  为预设阈值,  $F(\cdot)$  为单位阶跃函数。上述指标只要有一个小于阈值,则该上述表达式  $M_i$  值为 0, 即该网络  $i$  不能作为备选目标网络;反之,表达式值为 1, 该网络即被加入目标备选网络列表中。

第二个阶段是切换判决执行阶段。在该阶段中,文中引入了动态呼叫阻塞概率 (DNCBP, dynamic new call blocking probability) 作为进行切换网络判决的依据动态呼叫阻塞概率通常用来表征由于拥塞无法在请求时间完成的呼叫情况,是衡量终端移动切换相关服务质量重要的性能参数之一,如式(2)所示。

$$H_i = \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^{b_i}}{b_i!} \left( \sum_{n=0}^{b_i} \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^n}{n!} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中,  $H_i$  为待接入第  $i$  种网络的动态呼叫阻塞概率,  $b_i$  为当前第  $i$  种接入网络的可用带宽,  $\mu_i$  表示每单位时间内到达的平均呼叫次数,假设呼叫保持时间遵循以  $\frac{1}{\mu_i}$  为均值的指数分布;  $\lambda_i$  表示每单位时间内平均服务呼叫个数,即当前到达呼叫请求数遵循以  $\lambda_i$  为参量的标准泊松分布;动态呼叫阻塞概率 DNCBP 既和当前接入网络可用带宽有关,又和网络负荷相关。计算出 DNCBP 值以后,再进行最终的切换判决。

## 6 现有垂直切换执行机制分析

在切换执行阶段,需要特有的移动管理协议和机制来实现数据分组的重路由。现有的垂直切换执行机制按网络层次划分,主要可分为 3 个层次:基于网络层的机制、基于传输层的机制、基于应用层的机制。

### 6.1 网络层机制

网络层的切换执行机制可分为基于主机的切换管理机制和基于网络的切换管理机制。在基于主机的解决方案中,移动节点在移动过程中主动发起移动信令,这类协议以移动 IPv4 (RFC 3344)<sup>[32]</sup> 和移动 IPv6 (RFC 3775)<sup>[33]</sup> 及其改进协议为代表;在基于网络的解决方案中,移动节点在移动过程中无需参与移动信令管理,网络端负责对移动节点进

行位置管理及数据转发,这类协议以代理移动 IPv6 (RFC 5213)<sup>[34]</sup>协议为代表。

### 6.1.1 基于主机的切换管理机制

移动 IP 的设计目的是建立一种规范化的机制,使移动节点在不改变 IP 地址的情况下能够改变其互联网接入点,同时在移动过程中不断开连接,从而真正实现 IP 移动性。移动 IP 现在有 2 个版本,分别为移动 IPv4 (RFC 3344)<sup>[32]</sup>和移动 IPv6 (RFC 3775)<sup>[33,34]</sup>。

层次化移动 IPv4<sup>[35]</sup>、层次化移动 IPv6<sup>[36]</sup>以及 Cellular IP<sup>[37]</sup>、IDMP<sup>[38]</sup>、HAWAII<sup>[39]</sup>等其他一些微移动协议是缩短切换时延的主要解决方案。其主要思想是通过在标准的移动 IP 协议中引入层次化的概念,将移动节点切换过程的影响控制在子网范围内,从而减小地址绑定更新过程的延时和信令消耗。快速移动 IPv6<sup>[40]</sup>则是通过转交地址的预配置、切换的二层触发和切换预测来减小切换过程中移动检测和地址配置的时间。

针对三角路由问题,移动 IPv4 协议中引入了路由优化 (route optimization)<sup>[41]</sup>机制以缩短移动节点和对端通信节点之间的端到端时延,移动 IPv6 协议更是把路由优化作为其基本的组成部分。路由优化要求 MN 在 CN 上注册当前的转交地址,来自 CN 的数据分组直接路由到 MN 的转交地址。然而,路由优化需要对端通信节点 CN 也支持移动 IP,从而大大增加了部署的难度。同时,每个通信主机必须将固定的通信对端和移动的通信对端区分对待。另外,路由优化可能带来严重的安全问题。因此,目前路由优化模式实际应用的还非常少。

### 6.1.2 基于网络的切换管理机制

代理移动 IPv6 协议 (PMIPv6) RFC5213 于 2008 年 8 月成为 RFC 标准,是一种基于网络的移动性管理解决方案。PMIPv6 可以为移动节点提供基于网络的移动性管理,不需要移动节点参与移动信令的交互,因而移动节点无需对其协议栈进行修改。通过使用代理移动 IPv6,移动设备可以在网络中自由移动,不用手工配置任何网络信息就能够继续通信,并且能保持正在进行的网络连接不被中断。Iapichino 等<sup>[42]</sup>将 PMIPv6 和 HIP 协议相结合,为多宿终端提供安全的全局及局部的移动管理。Li<sup>[43]</sup>将 PMIPv6 和 Shim 协议相结合,实现当前 PMIPv6 协议对多宿主的支持。而 Li 等<sup>[44]</sup>则进一步在 PMIPv6 中引入了基于组的切换机制,以减少切换延迟和信

令开销。

## 6.2 传输层机制

传输层的切换机制需要动态地重新绑定一个连接的 IP 地址。由于传输层切换技术通常需要网络层和数据链路层的配合来实现网络检测和 IP 地址管理。目前较成熟的实现方法包括 TCP-Migrate、DCCP 和 SCTP。

### 6.2.1 TCP-Migrate

Snoeren 等<sup>[45]</sup>提出的 TCP-Migrate 是一种传输层的移动管理机制,主要通过动态更新 DNS 来定位移动主机。在这种机制中,现存的 TCP 连接可以通过安全有效的连接迁移技术来保持,使现有的连接双方可以在没有第三方参与的情况下协商终端地址的变化。其优点是不需要像移动 IP 一样引入家乡代理等网络设施的支持。但由于移动用户是直接通知对端节点自己的 IP 变化的,所以无法做到对应用程序透明。另外, TCP-Migrate 机制需要修改所有用户的现有 TCP 实现。

### 6.2.2 DCCP

数据报拥塞控制协议 (DCCP, datagram congestion control protocol)<sup>[46]</sup>是 IETF 提出的取代 UDP 的新传输协议,用来传输实时业务。它是一个可以进行拥塞控制的非可靠传输协议,并同时提供多种拥塞控制机制, DCCP 可提供多重连接。在连接过程中可以通知对方地址或者端口的改变。当移动终端得到新的 IP 地址后,它可以从新地址发送 DCCP-Move 分组给对端通信节点,然后对端通信节点使用新的地址来改变连接状态。

### 6.2.3 mSCTP

流控制传输协议 (SCTP, stream control transmission protocol)<sup>[47]</sup>作为 IP 层之上的通用端到端协议,可在 UDP 或 IP 层等不可靠数据分组的服务上提供可靠的服务。移动 SCTP (mSCTP, mobile SCTP)<sup>[48]</sup>因其具备“动态地址重构”,使端节点可以在活动着的 SCTP 关联中使用 ASCONF (地址配置消息) 增加、删除或改变 IP 地址,从而支持移动应用场景。

## 6.3 应用层机制

SIP (session initiation protocol)<sup>[49]</sup>是一个简单、可扩展的、基于文本的会话控制协议。作为应用层机制, SIP 对底层透明,可以保持真正的端到端连接。SIP 可以支持终端移动性、会话移动性、个人移动性和服务移动性。

终端移动要求 SIP 在新会话建立的过程中 (移

动节点 MN 已经移动到一个新的位置), 或者在会话的中间过程中建立一条连接<sup>[50]</sup>。前者称为呼叫前移动 (pre-call mobility), 后者称为呼叫中移动 (mid-call or in-session Mobility)。对于前者, MN 通过发送一个 REGISTER 消息向其家乡 (家乡网络的代理服务器或重定向服务器) 注册新的 IP; 对于后者, 用户需要通过一个 INVITE 信息通知对端通信节点 CN 自己的新 IP, 并更新会话参数, 这类似于移动 IP 的路由优化。CN 收到这个新的 INVITE 信息后立即向 MN 的新地址发送数据。

## 7 未来研究方向

垂直切换作为一个新兴的研究领域, 未来的研究将会更长期深入。纵观已有研究成果和实际的应用需求, 未来可以在以下方面做进一步研究。

1) 如何获得更低的切换时延。用户的应用程序在移动过程中不能有时间上的限制, 也就是说, 切换不应带给用户时间上的拖延。随着用户对移动的需求越来越高, 必须要保证切换过程中的用户体验。

2) 如何实现更好的服务质量保证。移动终端从高带宽网络切向低带宽网络, 则某些上层应用所需要的网络带宽资源将难以得到满足, 此时其服务质量便会大幅下降; 因此需要对垂直切换前后所涉及的资源进行合理调配和管理, 为上层业务提供服务质量保证。

3) 如何实现更安全的切换。无线移动环境具有开放性特点, 必须考虑移动环境的安全防护, 而安全防护过程往往会增加切换时延, 降低切换性能。为切换性能的优化提供更多的改进空间。

4) 如何提升切换的可管理性。虽然出于简化用户操作的目的, 认证与配置等许多复杂操作可对用户透明, 但是应该支持切换策略上用户的自配置及资费考虑, 以实现更为灵活有效的切换判决。

## 8 结束语

本文系统介绍了异构无线网络中的垂直切换技术的基本概念、分类、处理流程, 并重点介绍了垂直切换中的切换判决和切换执行 2 个环节。针对垂直切换中的切换判决环节, 将已有的垂直切换判决算法分为 2 类, 对各类算法的基本思想、复杂性进行了定性分析和比较。根据已有研究成果和实际的应用需求, 对未来垂直切换技术的研究方向进行

了展望。本文对了解异构无线网络中的垂直切换技术的研究背景、研究方法和进一步研究的问题, 具有较大帮助。今后将针对具体的垂直切换技术进行深入研究, 提出高效、智能、自适应的垂直切换判决算法和执行机制。

## 参考文献:

- [1] STEVENS N E, WONG V W S. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks[A]. Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Melbourne, Australia, 2006.947-951.
- [2] MCNAIR J, ZHU F. Vertical handoffs in fourth-generation multinet-work environments[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(3): 8-15.
- [3] SIDDIQUI F, ZEADALLY S. Mobility management across hybrid wireless networks: trends and challenges[J]. Computer Communications, 2006, 29(9): 1363-1385.
- [4] PAHLAVAN K, KRISHNAMURTHY P, HATAMI A. Handoff in hybrid mobile data networks[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2): 34-47.
- [5] LEE C W, CHEN L M, CHEN M C, *et al.* A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(11): 2118-2128.
- [6] SUCIU L, BENZAID M, BONJOUR S, *et al.* Assessing the handover approaches for heterogeneous wireless networks[A]. Proceedings of the 18th International Conference on Computer Communications and Networks[C]. San Francisco, CA USA, 2009.1-6.
- [7] CHEN W T, LIU J C, HUANG H K. An adaptive scheme for vertical handoff in wireless overlay networks[A]. Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems[C]. California, USA, 2004.541-548.
- [8] WANG Q, ATKINSON R, CROMAR C, *et al.* Hybrid user- and network-initiated flow handoff support for multihomed mobile hosts[A]. Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Dublin, Ireland, 2007.748-752.
- [9] LIU M, LI Z C, GUO X B. An efficient handoff decision algorithm for vertical handoff between WWAN and WLAN[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007, 22(1): 114-120.
- [10] BING H, HE C, JIANG L. Performance analysis of vertical handover in a UMTS-WLAN integrated network[A]. Proceedings of the 14th IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Beijing, China, 2003.187-191.
- [11] HATAMI A, KRISHNAMURTHY P, PAHLAVAN K, *et al.* Analytical framework for handoff in non-homogeneous mobile data networks[A]. Proceedings of 10th IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Osaka, Japan, 1999.760-764.
- [12] MOHANTY S, AKYILDIZ I F. A cross-layer (layer 2 + 3) handoff management protocol for next-generation wireless systems[J]. IEEE

- Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(10): 1347-1360.
- [13] 刘敏, 李忠诚, 过晓冰, 等. 基于运动趋势的自适应垂直切换算法及其性能评价[J]. 计算机学报, 2008, 31(1): 112-119.
- LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* A movement trend based self-adaptive vertical handoff algorithm and its performance evaluation[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(1): 112-119.
- [14] CHANG B J, CHEN J F. Cross-layer-based adaptive vertical handoff with predictive RSS in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3679-3692.
- [15] 刘敏, 李忠诚, 过晓冰. 一种基于速度感知的垂直切换算法[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1198-1201.
- LIU M, LI Z C, GUO X B. A speed sensitive vertical handoff algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1198-1201.
- [16] LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(7): 846-857
- [17] SHAFIIE K, ATTAR A, LEUNG V C M. Optimal distributed vertical handoff strategies in vehicular heterogeneous networks[J]. Selected Areas in Communications, 2011, 29(3): 534-544.
- [18] MATURINO-LOZOYA H, MUNOZ-RODRIGUEZ D, TAWFIK H. Pattern recognition techniques in handoff and service area determination[A]. Proceedings of the IEEE 44th Vehicular Technology Conference[C]. Stockholm, Sweden, 1994.96-100.
- [19] POLLINI G P. Trends in handover design[J]. IEEE Communication Magazine, 1996, 34(3): 82-90.
- [20] MAKELA J, YLIANTTILA M, PAHLAVAN K. Handoff decision in multiservice networks[A]. Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. London, UK, 2000.655-659.
- [21] GUO Q, ZHU J, XU X. An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous networks[A]. Proceedings of the 40th annual IEEE International Conference on Communications[C]. Seoul, Korea, 2005.2769-2773.
- [22] HOU J, O'BRIEN D C. Vertical handover decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated radio-and-ow system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(1): 176-185.
- [23] TRIPATHI N D, REED I H, VANLANDINGHUM H F. Adaptive handoff algorithm for cellular overlay systems using fuzzy logic[A]. Proceedings of the IEEE 49th Vehicular Technology Conference[C]. Houston, USA, 1999. 1413-1418.
- [24] MALLICK C, MAHAPATRA S, DAS R K, *et al.* A seamless vertical handoff algorithm in 4G networks[A]. Advanced Computer Science Applications and Technologies (ACSAT) 2012 International Conference on[C]. IEEE, 2012.92-99.
- [25] XU Y, LI L, SOONG B H, *et al.* Fuzzy Q-learning based vertical handoff control for vehicular heterogeneous wireless network[A]. Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference[C]. IEEE, 2014.5653-5658.
- [26] KASSAR M, KERVELLA B, PUJOLLE G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2607-2620.
- [27] ORMOND O, MURPHY J, MUNTEAN G. Utility-based intelligent network selection in beyond 3G systems[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications[C]. Istanbul, Turkey, 2006.1831-1836.
- [28] STEVENS N E, LIN Y, WONG V W S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1243-1254.
- [29] SUN C, STEVENS N E, WONG V W S. A constrained MDP-based vertical handoff decision algorithm for 4G wireless networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2008. 2169-2174.
- [30] LEE S K, SRIRAM K, KIM K, *et al.* Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 865-881.
- [31] HE D, CHI C, CHAN S, *et al.* A simple and robust vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless mobile networks[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 59(2): 361-373.
- [32] PERKINS C. IP mobility support for IPv4[S]. IETF RFC 3220, 2002.
- [33] JOHNSON D, PERKINS C, ARKKO J. Mobility support in IPv6[S]. IETF RFC 3775, 2004.
- [34] LEUNG K, DEVARAPALLI V, CHOWDHURY K. Proxy mobile IPv6[S]. IETF RFC 5213, 2008.
- [35] FOGELSTROEM E, JONSSON A, PERKINS C. Mobile IPv4 regional registration[S]. IETF RFC 4857, 2007.
- [36] SOLIMAN H, CASTELLUCCIA C, ELMALKI K, *et al.* Hierarchical mobile IPv6 (HMIPv6) mobility management[S]. IETF RFC 5380, 2008.
- [37] VALKO A. Cellular IP: a new approach to Internet host mobility[J]. ACM Computer Communication Review, 1999, 29(1): 50-65.
- [38] MISRA A, DAS S, DUTTA A, *et al.* IDMP-based fast handoffs and paging in IP-based 4G mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(3): 138-145.
- [39] RAMJEE R, VARADHAN K, SALGARELLI L, *et al.* HAWAII: a domain-based approach for supporting mobility in wide-area wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 396-410.
- [40] KOODLI R. Fast handovers for mobile IPv6[S]. IETF RFC 4068, 2005.
- [41] PERKINS C E, JOHNSON D B. Route optimization in mobile IP[S]. IETF, draft-ietf-mobileipoptim-11.txt, 2001.
- [42] IAPICHINO G, BONNET C. Host identity protocol and proxy mobile IPv6: a secure global and localized mobility management scheme for multihomed mobile nodes[A]. Proceedings of the 52nd IEEE Global Telecommunications Conference[C]. Honolulu, USA, 2009.1-5.
- [43] LI Y, KUM D W, SEO W K, *et al.* A multihoming support scheme with

localized shim protocol in proxy mobile IPv6[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications[C]. Dresden, Germany, 2009.1-5.

- [44] LI Y, JIANG Y R, SU H B, *et al.* A group-based handoff scheme for correlated mobile nodes in proxy mobile IPv6[A]. Proceedings of the 52nd IEEE Global Telecommunications Conference[C]. Honolulu, USA, 2009.1-6.
- [45] SNOEREN A C, BALAKRISHNAN H. An end-to-end approach to host mobility[A]. Proceedings of the Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Boston, USA, 2000. 155-166.
- [46] KOHLER E, HANDLEY M, FLOYD S. Datagram congestion control protocol (DCCP)[S]. IETF RFC 4340, 2006.
- [47] ONG L, YOAKUM J. An introduction to stream control transmission protocol[S]. IETF RFC 3286, 2002.
- [48] CHANG M, LEE M, KOH S. Transport layer mobility support utilizing link signal strength information[J]. IEICE Transaction on Communications, 2004, E87-B (9):2548-2556.
- [49] ROSENBERG J, SCHULZRINNE H, CAMARILLO G, *et al.* SIP: session initiation protocol[S]. IETF RFC 3261, 2002.
- [50] BANERJEE N, WU W, BASU K, *et al.* Analysis of SIP-based mobility management in 4G wireless networks[J]. Computer Communications, 2004, 27(8): 697-707.

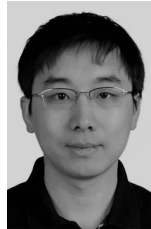
#### 作者简介:



王煜炜(1980-),男,河北唐山人,中国科学院计算技术研究所博士生、助理研究员,主要研究方向为异构网络融合、移动互联网和云计算。



刘敏(1976-),女,河南郑州人,博士,中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为移动管理、网络测量和移动计算。



房秉毅(1980-),男,山东泰安人,博士,中国联合网络通信集团有限公司研究院高级工程师,主要研究方向为下一代网络、移动核心网和云计算。