

# 基于实验方法的移动 IPv6 切换性能研究

罗立军<sup>1</sup>, 蒋新华<sup>1</sup>, 邹复民<sup>2</sup>, 王桐森<sup>2</sup>, 林漳希<sup>3</sup>, 张永晖<sup>1</sup>

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 福建工程学院下一代互联网应用与研究中心, 福州 350014;

3. 德克萨斯理工大学商学院, 美国 79409-2101)

**摘要:** 移动 IPv6 标准比移动 IPv4 在移动性、安全性、扩展性和路由效率等很多方面有了明显改进, 成为解决移动 IP 潜在的最优方案之一。而切换是移动 IPv6 的关键技术之一, 透明、平滑、快速的网络切换是保证移动节点在移动过程中保持不间断网络连接的基础。该文基于 Linux 系统建立了移动 IPv6 实验床, 对其 MAC 层、IP 层切换做了一系列实验研究。根据对比实验研究, 得出无线网络 ESSID 和频道等因素对切换性能的影响。通过对实验数据的统计分析, 得到各主要切换步骤的时延分布, 提出了改进切换性能的几种方法。

**关键词:** 移动 IPv6; 切换; Linux; 实验床

## Experimental Study of Mobile IPv6 Handoff Performance

LUO Li-jun<sup>1</sup>, JIANG Xin-hua<sup>1</sup>, ZOU Fu-min<sup>2</sup>, WANG Tong-sen<sup>2</sup>, LIN Zhang-xi<sup>3</sup>, ZHANG Yong-hui<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2. Research Centre for Next-generation Internet Technology & Applications, Fujian University of Technology, Fuzhou 350014;

3. College of Business Administration, Texas Tech University, TX, USA 79409-2101)

**【Abstract】** A mobile IPv6 testbed based on Linux is set up and a series of experimental studies on the MAC and IP layer handoff are performed. According to the experimental result with statistic analysis, the distribution of mobile IPv6 latency is presented. Factors which affect the handoff efficiency are investigated such as the ESSID and channel of wireless network. Approaches to improving the handoff efficiency are proposed.

**【Key words】** mobile IPv6; handoff; Linux; test bed

### 1 概述

IETF 于 2004 年 6 月正式推出了 RFC 3775 和 RFC 3776, 分别定义了移动 IPv6(MIPv6)及其安全性标准, 为 MIPv6 的实用化迈出了关键的一步。切换是 MIPv6 的关键技术之一, 不仅决定了移动节点(MN)在移动过程中能否保持不间断的网络连接, 并且对 MIPv6 能否实用化起着决定性的作用, 尤其对于 VoIP 等实时性应用和服务。切换包括两个方面, 即快速切换和平滑切换。快速切换是指尽量减少切换过程中的时延, 平滑切换是指尽量减少切换过程中的丢包率。很大程度上, 时延反映了 MIPv6 的切换性能, 时延增加意味着丢包率也将同步增长, 因此本文将主要基于对切换时延的评价和分析, 研究如何提高 MIPv6 的切换性能。

目前, 不少学者借助网络仿真 NS2 等研究 MIPv6 的切换性能。文献[1]提出了基于主动网络技术的 MIPv6 切换方案; 文献[2]提出将 IP 层的切换决策权交给网络而不是 MN 本身; 文献[3]定性地研究了接入路由器(AR)的广播周期对切换性能的影响, 推导出 AR 的最佳理论广播周期; 文献[4]提出一种基于非均匀检测模型来减小移动检测的低时延切换方法; 文献[5]提出了一种应用于 GSM-R 网络的小区切换的 MIPv6 技术。这些仿真研究的结果对进一步的实验研究具有非常重要的指导意义, 但并不能完全代替实验研究。对于 MIPv6 的实用化评估与改进, 基于实验床的研究显得尤为重要。

为此, 基于实验方法的 MIPv6 研究工作得到了越来越多的重视, 特别是在国外针对不同问题和应用, 搭建了一系列的 MIPv6 实验床展开实验研究。PREGINET 正在进行网络应用

软件测试, 监视数据包的利用情况; FhG Fokus 侧重于 MIP 的功能和 MIPv6 环境中的视频会议的测试; CAIA 主要用于验证主机能否在网络之间进行移动; 维也纳工业大学研究了 MN 在子网之间切换时吞吐量的变化情况; 南洋理工大学和 Paolo Cavone 研究路由器广播周期对切换性能的影响; 中国科学技术大学也搭建了 HMIPv6 实验床, 研究切换性能以及 QoS 的改进。

随着 WiFi/WiMAX 等无线宽带网络技术的快速发展, 国内外已经开始研究在交通干线为快速移动的车辆(如旅客列车)提供无线宽带接入<sup>[6]</sup>。交通干线无线宽带接入对 MIPv6 提出了新的要求, 为研究 MIPv6 在这种应用中的切换时延、对高速移动性的支持、高速状态下的网络吞吐量及组网优化等系列问题, 本文将搭建 MIPv6 实验床, 对 MIPv6 的切换性能的改进展开系列研究工作。

### 2 MIPv6 工作原理

MIPv6 使得 MN 在移动过程中能够从不同的位置透明、不间断地访问 Internet, 其工作原理如下:

(1) 每个 MN 都有一个永久的家乡地址(HoA), 通过这个 HoA, MN 总是可以被访问的。

(2) 当 MN 在家乡网络时, 发往 MN 的数据包通过常规的路由机制转发给 MN。

**作者简介:** 罗立军(1982-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 移动 IPv6; 蒋新华, 教授、博士生导师; 邹复民, 博士研究生; 王桐森, 副教授; 林漳希, 教授; 张永晖, 博士研究生

**收稿日期:** 2006-08-30 **E-mail:** luolijun\_1982@163.com

(3)当 MN 移动到外地网络时,通信节点(CN)向 MN 发送数据有两种情况。当 CN 不知道 MN 的转交地址(CoA)时,CN 发往 MN 的数据包被家乡代理(HA)截获,然后以隧道的方式交付给 MN;当 CN 知道 MN 的 CoA 时,CN 直接把数据包发给 MN,从而有效地解决了 MIPv4 中存在的“三角路由”问题。

根据 MIPv6 标准,IP 层切换在 MAC 层切换的基础上,还需要完成以下几个阶段的操作:

(1)移动检测(MD):用于判断 MN 是否从一个网络移动到了另一个网络。MN 已经发生移动,当 MN 同时满足:当前 AR 不再可达;有新的 AR 可提供接入服务。

(2)路由器发现(RD):一旦发生移动后,MN 就通过执行 RD 来获得新的 AR 的网络前缀。MN 有两种获得网络前缀的方式,一种是接收作为响应路由器请求(RS)的路由器公告(RA),另一种是收到周期性的 RA。

(3)地址配置(AC):通常有两种方法获得新的地址,即有状态的和无状态的地址自动配置。

(4)重复地址检测(DAD):用于判断已配置的地址在网络中是否已正在使用,如果该地址正在使用通常要引入有状态的地址自动配置机制来重新配置。

(5)注册 CoA(RC):向 HA 和 CN 告知 MN 当前的位置,通过绑定更新(BU)和绑定应答(BA)来实现。

为研究 MIPv6 切换性能的改进方法,本文将构建 MIPv6 实验床,分析上述各阶段操作引入的延时分布。由于 MAC 层切换是 IP 层切换的前提,因此首先将研究 MAC 层切换。

### 3 实验过程及结果分析

基于赫尔辛基理工大学开发的开放源代码 MIPv6 系统 MIPL,本文建立了如图 1 所示的 MIPv6 实验床。

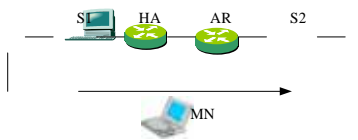


图 1 MIPv6 实验床拓扑结构示意图

图 1 中 HA 和 AR 均采用 Linux 服务器(Fedora Core 1, 2.4.22)、配置 MIPL1.0 系统构建,形成两个网络。HA 作为家乡代理,通过交换机 S1 连接 CN1 和一个 802.11 b/g 的接入点(AP1),组成家乡网络;AR 作为接入路由器,通过交换机 S2 连接 CN2 和另一个接入点(AP2),组成外地网络。MN 通过无线网卡接入 AP1 或 AP2 在家乡/外地网络之间移动,实现 MIPv6 切换。其中主要的硬件配置,AP 为 NETGEAR WG602 v3、无线网卡为 D-Link DWL-650。

本文首先研究 ESSID 和频道对 MAC 层切换性能的影响。

#### 3.1 MAC 层切换

将两个 AP 分别设为相同或不同的 ESSID 及相同频道或正交频道进行实验。借助于 ping6 和 Ethereal 各得到 7 组实验数据,通过分析和处理得到实验结果如图 2 所示。

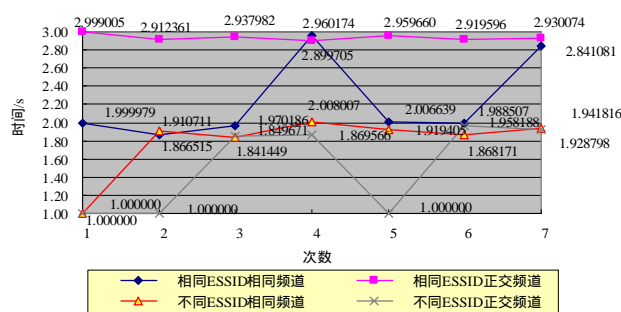


图 2 MAC 层切换时延

图中横坐标表示实验次数,纵坐标表示对应的切换时延。从图 2 可以看出,MAC 层切换的时延从 1s 到 2.999 005s 之间变化;当 ESSID 和频道都相同时,第 1 次~第 7 次实验的切换时延依次为 1.999 979s、1.866 515s、1.970 186s、2.960 174s、2.006 639s、1.988 507s 和 2.841 081s;当 ESSID 与频道分别相同/不同、相同/正交时,其平均切换时延依次为 2.233 297s、2.936 912s、1.784 223s 和 1.515 175s。另外,从图 2 可以看出,当两个 AP 具有相同 ESSID 时,相同频道的 MAC 层切换时延要比正交频道的 MAC 层切换时延要小;然而,当两个 AP 设为不同 ESSID 时,结论恰好相反。这是因为当两个 AP 设为相同 ESSID 时,它们构成 802.11 所定义的扩展服务集,当 AP 设为相同频道时,802.11 支持 MN 在一个服务集内自动漫游。当 AP 设为不同 ESSID 时,这意味着每个 AP 构成一个基础网络,基础网络之间最好分配正交频道以避免相互干扰。

下面将 AP 设置为不同的 ESSID,因为它比 ESS 配置具有更高的吞吐量,从而更适合交通干线无线宽带应用。并分别将 AP 设为相同或正交频道,以此来研究 IP 层切换。

#### 3.2 IP 层切换

基于 MAC 层的研究结果,下面将研究 IP 层切换。实验时,采用 ping6 每隔一秒发送一个 ICMP6 包,同时在 HA、AR、MN 和 CN2 上采用 Ethereal 捕获数据包。实验中,先让 MN 从家乡网络移动到外地网络,然后再移回家乡网络,且移动过程的模拟采用 Wireless Tools 的 iwconfig 切换其接入的 AP 来实现。分别通过 6 次可重复的实验,其切换时延的结果如图 3 所示。

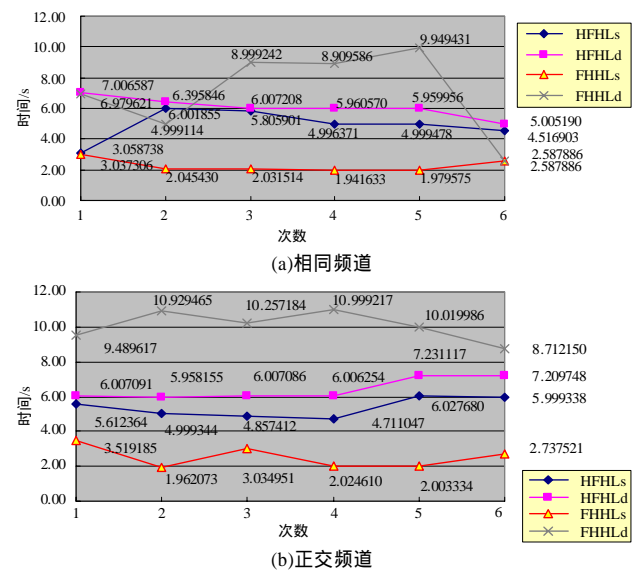


图 3 IP 层切换时延

图 3 中,HFHLS 表示 MN 从家乡网络切换到外地网络时,MN 向 CN2 单向通信恢复正常的切换时延,HFHLd 表示其恢复正常双向通信的切换时延;FHHLs 和 FHHLd 分别表示 MN 从外地网络返回家乡网络时的单向通信和正常双向通信的切换时延。HFHLS 是指 CN2 能收到 MN 发送的 Echo request 数据包,并且 MN 也能收到相应的 Echo reply 数据包,但是 MN 不能收到 CN2 发来的 Echo request 数据包。这是因为:当 MN 切换到外地网络时,只要 MN 向 HA 发送了 BU,MN 很快就可以用 CoA 作为源地址发送 Echo request 数据包,CN2 也能够通过正常的路由向 MN 返回 Echo reply;但在 HA 返回 BA 之前,在 HA 的

绑定缓存中没有更新HoA和CoA的绑定，因而CN2 发往MN的Echo request数据包被路由到MN的家乡网络后HA不知道将其转发到MN当前接入的网络，从而MN不能收到CN2 发过来的Echo request数据包。而FHHL<sub>s</sub>是指仅CN2 能收到MN发送的Echo request数据包，但MN收不到CN2 返回的Echo reply数据包，并且MN也不能收到CN2 发过来的Echo request数据包。这是因为：当MN返回家乡网络而尚未完成注册与绑定更新，MN可以用HoA作为源地址向CN2 发送Echo request数据包，但CN2 响应的Echo reply数据包仍被HA截获并转发给CoA，从而导致MN不能收到相应的Echo reply数据包。类似的，CN2 发送给MN的Echo request数据包也被HA截获并转发至外地网络。从图 3(a)可以得到，当发生相同频道的IP层切换时，HFHL<sub>s</sub>、HFHL<sub>d</sub>、FHHL<sub>s</sub>和FHHL<sub>d</sub>的平均值依次为 4.896 541s、6.055 893s、2.270 557s与 7.070 813s。从图 3(b)可以得到，当发生正交频道的IP层切换时，HFHL<sub>s</sub>、HFHL<sub>d</sub>、FHHL<sub>s</sub>和FHHL<sub>d</sub>的平均值依次为 5.367 864s、6.403 242s、2.546 946s、10.067 94s。对照图 3(a)和图 3(b)可以得到，相同频道的IP层切换时延大多要比正交频道小。

#### 4 改进切换性能的思考

由于 MN 从家乡网络移动到外地网络与它返回家乡网络时信令不完全相同，因此需对其作区分讨论。其切换过程分别如图 4(a)和图 4 (b)所示。图中带虚线的箭头表示该操作可能存在，也可能不存在。

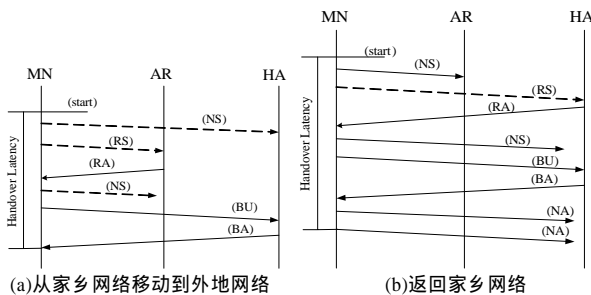


图 4 IP 层切换步骤

图中，start 表示从切换前的网络收到的最后一个数据包，NS 表示邻居请求，NA 表示邻居广播。需要说明的是，图 4(a)和图 4 (b)中的 用于执行重复地址检测，而图 4 (b)中的 用于检测当前路由器是否可达。

根据分析和计算，可以得到 MIPv6 切换过程中各阶段的时延，本文仅给出同频场景下 MN 从家乡网络移动到外地网络时各阶段的时延分布，如表 1 所示(时间单位：s)。

表 1 相同频道时从家乡网络切换到外地网络

	MD	RD	AC	RC	总时延
第 1 次	1.259 619	-	1.091 053	3.998 314	6.348 986
第 2 次	4.039 962	0.240 311	0.000 115	1.739 824	6.020 212
第 3 次	4.609 522	0.240 979	0.000 123	1.058 872	5.909 496
第 4 次	4.259 248	0.250 338	0.000 109	1.530 751	6.040 446
第 5 次	3.879 464	0.261 431	0.000 112	0.998 803	5.139 810
第 6 次	3.779 637	0.160 340	0.020 011	0.999 908	4.940 008

从表中可以明显看出，MIPv6 的切换时延主要是由 MD 贡献，其值从 1.259 619s 到 4.609 522s 不等，从第 1 次~第 6 次占总切换时间的比例依次为 19.84%、67.11%、78.00%、70.51%、75.48%和 76.51%。由此可见，大多数情况下 MD 操作造成了主要的切换时延。根据标准差公式：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (1)$$

其中，s 为标准差； $X_i$  为个体数据； $\bar{X}$  为均值；N 为样本容量。计算出 MD 和总切换时延的标准差分别为 1.097 455s 和 0.511 259s，可以看出 MD 的波动较大。其次，注册对切换时延的影响也较大，其值从 0.998 803s 到 3.998 314s 不等。因此，要想获得较小的切换时延，就要大幅度地减少这两项所用的时间。并且多次实验后得到，无论是从家乡网络移出还是返回，相同频道总比正交频道时的切换性能要好。

对于表中的 MD，其值都不大于 5.2s，这是因为 MN 离最近收到 HA 的广播 5.2s 后才能确定其发生了移动。因此，要想减少切换时延，其方法之一就是减少 MD 的值，从以上分析得出可以采用两种方法：

(1)减少广播的周期。但是广播帧也将占用网络带宽，单位时间内广播的次数越多，网络中的有效带宽就越少；

(2)预测切换的发生。基于预测信息如 MAC 层触发 IP 层切换的事件，通过发送 RS 来提前结束 MD，从而达到减少由 MD 引发的切换时延。此外，广播周期的最大/最小值设置相差不能太大，否则会导致 MD 的大幅波动及切换时延的不确定性。

相对来说，RD 和 AC 的值较小。表中第 1 次实验的 RD 不存在是由于 MN 收到了周期性的广播而不需要发送 RS。而第 1 次实验中 AC 的值较大是由于在配置地址时执行了 DAD。通常情况下，RC 操作只要用大约 1s 的时间。但是，如果在注册过程中有数据包丢失，RC 的值就会偏高。例如，表中的第 2 次和第 4 次有较大的偏差，这是由于 BA 丢失后重发的缘故；而表中第 1 次实验中 RC 操作用了将近 4s 的时间，这是因为 BU 丢失后 MN 过了大约 3s 才重发 BU。为此，考虑到无线网络丢包率高的缺陷，在研究改善切换性能时，必须慎重考虑切换过程中重要信息，如 BU、BA 等丢失后的重发策略。

#### 5 结语

MIPv6 实验床为研究移动切换提供了一个真实、可靠的网络环境，基于该环境对 MAC 层和 IP 层切换开展了一系列研究工作。通过对实验数据的统计分析和比较研究，获得了 MAC 层和 IP 层切换的切换时延、IP 层切换各主要步骤的时延分布、ESSID 和频道对切换性能的影响等，据此提出了改进切换性能的几种方法。进一步的工作正基于 MIPL2.0 系统，研究基于预测信息的 MIPv6 快速切换算法。

#### 参考文献

- 廖小飞, 李津生, 洪佩琳, 等. 基于主动网络技术的移动 IPv6 切换方案[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(3): 440-445.
- 杨文川, 王济世, 杨 巍, 等. MIPv6 在 WLAN 内快速切换的性能研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2005, 41(5): 527-531.
- 杨天武, 蒋铃鸽. MIPv6 网络中基于平衡机制的最佳路由器广播周期[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(4): 602-605.
- 沈 波, 刘 云, 张宏科. 一种新的 WLAN 环境下移动 IPv6 的低时延切换方法[J]. 电子学报, 2005, 33(4): 590-595.
- 孙 伟, 刘 云. 移动 IPv6 网中的列车软切换性能分析与仿真[J]. 北京电子科技学院学报, 2005, 13(2): 66-69.
- T Van Leeuwen, Moerman I, Rogier H, et al. Broadband Wireless Communication in Vehicles[J]. Journal of the Communications Network, 2003, 24(2): 77-82.