

基于网络预测的改进型 PMIPv6 快速切换方法

唐 军* 裴昌幸 苏 博 张曼君

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 针对 PMIPv6 协议切换效率较低的问题, 该文提出了一种基于网络预测的改进型 PMIPv6 快速切换方法。该方法在不变更切换决策主体的前提下, 通过学习先验切换经验, 利用 k -距离加权最近邻算法来预测移动节点的切换目的地; 同时采用软转发机制来保护在切换过程中到达移动节点的数据分组。仿真结果表明, 改进方法产生的切换延迟和分组丢失数量明显少于 PMIPv6。

关键词: 网络预测机制; 快速切换; 软转发; 机器学习

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-3022-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01272

An Improved Fast Handover Scheme Based on Network-performed Prediction for PMIPv6

Tang Jun Pei Chang-xing Su Bo Zhang Man-jun

(State Key Lab of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Since the PMIPv6 can not be efficiently operated, an improved fast handover scheme based on network-performed prediction is proposed. Without changing the decision-maker, the handover experience is generated to train the learning system. The k -distance weighted nearest neighbor algorithm is employed to predict the next mobile access gateway and the soft forwarding mechanism is employed to protect the receiving packets during the handover. Simulation results indicate that the proposed scheme can achieve better performance in terms of handover latency and packet loss compared with PMIPv6.

Key words: Network predicting mechanism; Fast handover; Soft forwarding; Machine learning

1 引言

随着人们对互联网移动性需求的日益增长, 国内外大量研究人员开始关注如何在下一代互联网普及之前使其更好地支持移动性。移动 IPv6 协议 (Mobile IPv6, MIPv6)^[1]正是在这样的背景下应运而生并在试验网中大量部署。然而随着时间的推移, 人们发现 MIPv6 低效的切换效率无法满足诸如 VoIP 等实时业务的 QoS 需求, 因此大量改进方案被设计出来以取代 MIPv6^[2-11]。其中一类被称为基于节点的移动性管理方案 (Node-based mobility management), 主要以 Koodli 等人^[2]提出的移动 IPv6 快速切换机制 (Mobile IPv6 Fast handovers, FMIPv6) 和 Soliman 等人^[3]提出的层次性移动 IPv6 (Hierarchical Mobile IPv6, HMIPv6) 为代表。此类方案一般要求移动节点 (Mobile Node, MN) 对切换

时机及目标进行决策, 增加了 MN 协议栈设计的复杂性。因此 IETF (Internet Engineering Task Force) 又着手制定基于网络的移动性管理协议 (Network-based Localized Mobility Management, NETLMM), 试图将 MN 从繁琐的移动相关的信令传输中解放出来, 从而达到支持各种类型的 IPv6 节点的目的。Gundavelli 等人^[4]提出的代理移动 IPv6 协议 (Proxy Mobile IPv6, PMIPv6) 就是此类中的典型代表。由于 PMIPv6 将切换的控制权由 MN 转移至网络实体 (mobility entities), 且 MN 在同一域内漫游时无需更换 IPv6 地址, 这与当前广泛部署的移动通信系统相一致, 因此在我国“三网融合”的大背景下, PMIPv6 的发展前景更加被看好。

针对文献[12]所描述的 PMIPv6 切换性能偏低的问题, 本文提出了一种基于网络预测的改进方法。该方法根据先验切换知识以及 k -距离加权最近邻算法对 MN 切换的目的地进行预测, 在切换过程中采用软转发 (soft forwarding) 机制保护到达 MN 的数据分组, 以减小切换延迟及丢包率。同时将切换结果用于更新知识库以提高预测的准确率。

2010-11-19 日收到, 2011-10-11 改回

国家自然科学基金 (61072067), 国家重点实验室专项资金 (ISN 1001004), 高等学校学科创新引智计划 (B08038) 和陕西省工业攻关计划基金 (2009K01-46) 资助课题

*通信作者: 唐军 canarmy@qq.com

2 基于网络预测的改进型PMIPv6快速切换方法

2.1 基本思想

本文方法的主要思想是：当前移动接入网关(Previous Mobile Access Gateway, PMAG)根据切换点附近若干个已知切换点的切换结果，对MN即将接入的MAG(Next MAG, NMAG)进行预测，在MN进行切换的同时将数据分组转发至NMAG，从而减少切换延迟；在MN切换过程中采用转发与缓存并行的策略来解决因预测错误而带来的分组丢失问题。具体过程如图1所示。当PMAG检测到MN的信号强度低于某个判决门限时对MN进行定位，然后结合切换知识库预测NMAG，与其协商建立单向隧道并转发数据分组，切换结束后本地移动锚点(Local Mobility Anchor, LMA)将切换结果反馈给PMAG。

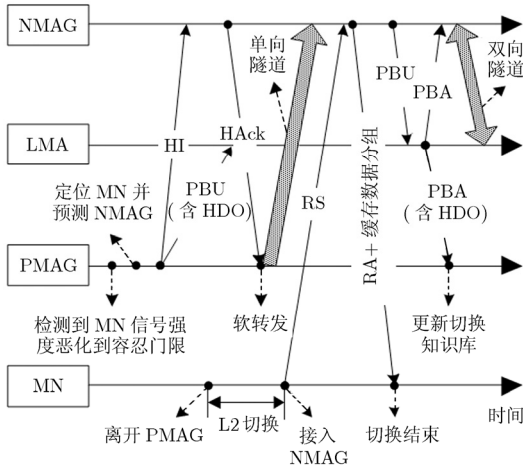


图1 本文方法的切换时序图

2.2 移动节点的定位

目前常见的节点定位方法包括到达角度(AOA)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)等。文献[13]的研究表明：角度定位方法的性能优于基于信号强度的距离定位方法，因此本文采用MUSIC算法^[14]来估计AOA，其参考模型为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix} = [\boldsymbol{\xi}(\theta_1), \dots, \boldsymbol{\xi}(\theta_D)] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{W}_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 \mathbf{Y}_i 为第 i 个天线观测到的数据矢量， \mathbf{I}_i 为第 i 个入射信号的数据矢量， \mathbf{W}_i 为第 i 个加性噪声矢量， $\boldsymbol{\xi}(\theta_i)$ 为第 i 个信号的导向矢量。 \mathbf{Y} 的协方差矩阵应为

$$\mathbf{S} = \overline{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^*} = \overline{\boldsymbol{\xi}\mathbf{I}\boldsymbol{\xi}^*} + \overline{\mathbf{W}\mathbf{W}^*} \quad (2)$$

对 \mathbf{S} 进行特征值分解可得到信号子空间和噪声子空间，然后构造空间谱函数。

$$\mathbf{Z}(\theta) = P_{\text{MU}}^{-1}(\theta) = \left(\left(\frac{\boldsymbol{\xi}(\theta)}{\|\boldsymbol{\xi}(\theta)\|} \right)^H (\mathbf{I}_M - \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H) \left(\frac{\boldsymbol{\xi}(\theta)}{\|\boldsymbol{\xi}(\theta)\|} \right) \right)^{-1} \quad (3)$$

其中 \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 的单位矩阵， $\mathbf{E}_s = \text{span}\{e_1, \dots, e_D\}$ 为信号子空间。对整个角度空间进行搜索可得到 $\mathbf{Z}(\theta)$ 的谱峰，其对应的角度就是所求的AOA。

2.3 NMAG的预测

PMIPv6 域中的网络实体的位置通常不会发生变化，因此MN每一次成功的切换经验都可以作为其它MN今后在附近进行切换的参考。这样每个MAG都可以看作是一个基于实例的机器学习系统。针对该系统的特点，本文提出了一种基于 k -距离加权最近邻的学习方法。该方法并不在整个实例空间上一次性地估计目标函数，而是针对每个待分类的新实例做出局部的和相异的估计。

以PMAG所在位置为极点，在水平面上建立极坐标系。定义实例集合 X ，它表示所有可能的切换位置。将任意的实例 $x \in X$ 表示为特征向量 $\langle \rho(x), \varphi(x) \rangle$ ，其中 $\rho(x)$ 与 $\varphi(x)$ 分别为切换点的极径与极角。由于在本文算法中只有角度值会对判决产生决定性影响，因此可将任意两个实例 x_i 与 x_j 的距离定义为 $d(x_i, x_j)$ 。

$$d(x_i, x_j) = |\varphi(x_i) - \varphi(x_j)| \quad (4)$$

考虑学习以下形式的离散目标函数 $f: X \rightarrow M$ ，其中 M 是有限集合 $\{M_1, \dots, M_s\}$ ，表示所有与PMAG相邻的MAG。函数 f 的作用是将 X 中的某个实例映射为 M 中的某个MAG。换句话说，任意给定切换点的位置坐标，通过函数 f 的计算就可以找到最有可能的NMAG。定义函数 f^* 为函数 f 的近似函数，二元组 $\langle x, f(x) \rangle$ 为学习系统的训练样例。在PMAG上建立切换知识库 L_H ，该库以列表形式存在，每个表项存储一个训练样例，其中包含极角与切换目的地字段，所有表项依 $\varphi(x)$ 的大小顺序排列。

k -距离加权最近邻算法包含下面两个部分：

(1) 训练算法：对于每个训练样例 $\langle x, f(x) \rangle$ ，将其加入 L_H 。

(2) 分类算法：给定一个要分类的查询实例 x_q ，在 L_H 中选出最靠近 x_q 的 k 个实例，并用 x_1, \dots, x_k 表示。按照式(5)对NMAG进行预测：

$$f^*(x_q) \leftarrow \arg \max_{v \in V} \sum_{i=1}^k K(d(x_q, x_i)) \delta(v, f(x_i)) \quad (5)$$

其中

$$\delta(a,b) = \begin{cases} 1, & a = b \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

$K(d(x_q, x_i))$ 为距离惩罚因子,表示 k 个近邻对判决的影响程度。为了将较大的权值赋给较近的近邻,本文采用高斯核函数来决定每个训练样例的权值,即

$$K(d(x_q, x_i)) = e^{-\frac{1}{2\sigma^2}d^2(x_q, x_i)} \quad (7)$$

在实际场景中,由于某些特殊原因(如增加或删除MAG)会造成先验切换经验失效,从而在切换知识库中产生孤立点,这些孤立点会对预测产生影响。因此本文方法要求选择 k 个邻居一同进行判决,且利用距离的函数进行加权,这样少数孤立点对判决的影响会被占多数的正常数据所稀释。只要 k 足够大,函数 f^* 就能够以任意小的误差逼近函数 f ,从而保证预测的正确率。

2.4 软转发机制

当PMAG完成对NMAG的预测后,立即通过切换发起报文(Handover Initiate, HI)和切换应答报文(Handover Acknowledge, HAck)与NMAG协商建立单向隧道,并将发往MN的数据分组通过该隧道转发至NMAG,这样MN在接入NMAG后就能立刻获得数据分组,从而降低了切换延迟。然而在某些情况下,如在协议启动初期,由于切换知识库内容的匮乏导致预测结果往往不够准确,此时如果贸然将数据分组转发至NMAG,就有可能带来大量的分组丢失。为了保护这些数据分组,本文设计了一种称为软转发的技术,具体过程为:预测结束后PMAG为该MN建立一个切换缓冲区,然后为每一个发往MN的数据分组建立一个副本并存入该缓冲区。单向隧道建立成功后,PMAG将发往MN的原始数据分组通过该隧道转发至NMAG,后者也建立一个切换缓冲区用于保存这些分组,直到MN接入后将缓存分组发往MN。若切换结果与预测相符,则直接释放PMAG上的切换缓冲区,否则将其中的全部分组转发至实际的NMAG。而NMAG上的切换缓冲区可在单向隧道关闭时释放。

切换缓冲区采用先进先出的排队策略,其大小可参考数据分组当前到达速率以及历史平均切换延迟等因素来配置。若发生溢出可采用常规的包丢弃机制(如:尾部丢弃、早期包丢弃等)。为防止系统资源因为攻击而消耗殆尽,缓冲区的寿命和数量分别由历史平均切换延迟和系统性能约束。

2.5 切换结果的反馈

为了将切换结果及时地反馈给PMAG以便更新切换知识库,本文方法设计了一种新的移动选项

——切换目的地选项(Handover Destination Option, HDO)。选项格式如图2所示。该选项符合通用的TLV格式,对齐要求为 $8n+6$ 。选项的类型值固定为28,长度值固定为16。当PMAG检测到MN离开时向LMA发送代理绑定更新报文(Proxy Binding Update, PBU),其中包含选项值为全0的HDO,表示PMAG申请解除注册并请求NMAG的地址。当LMA收到来自NMAG的注册PBU报文时,它会将后者的IPv6地址填入HDO并通过代理绑定应答报文(Proxy Binding Acknowledgement, PBA)报文回复给PMAG。这样PMAG就可以判断预测结果是否正确并更新切换知识库。

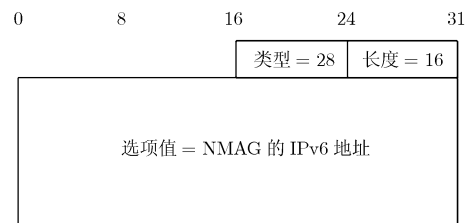


图2 切换目的地选项格式

3 性能分析

下面对PMIPv6和改进方法的切换性能进行对比分析,主要考察切换延迟和分组丢失数量。假定除MN与MAG通过无线方式连接外,其余网络实体间的连接均为有线方式。设 $D_{A \rightarrow B}$ 与 $H_{A \rightarrow B}$ 分别为信令分组在网络实体A与网络实体B之间的单向传输延迟和跳数, D_{HOP} 为有线链路的单跳延迟, D_{L2} 为MN的第2层(Layer 2, L2)切换延迟, $D_{\text{HI-PBA}}$ 为PMAG自发出HI报文至收到PBA报文所经历的时间, $D_{\text{HAck-RS}}$ 为NMAG自发出HAck报文至收到RS报文所经历的时间。假设所有通信节点(Correspondent Node, CN)发往MN的数据分组以恒定速率 v 到达LMA,分组平均长度为 L ,PMAG与NMAG上的切换缓冲区大小分别为 C_{PMAG} 和 C_{NMAG} 。分析中不考虑信令的处理时延、排队时延、节点内部信令开销及信令丢失。

按照PMIPv6协议对于切换过程的规定,MN离开PMAG后便无法收发数据分组,接入NMAG后,它需要发送路由器请求报文(Router Solicitation, RS)来获取前缀信息。而NMAG在收到RS后,需要向LMA发送PBU来注册MN当前的位置,后者将安装相应的绑定缓存条目(Binding Cache Entry, BCE),将分配给MN的归属网络前缀(Home Network Prefix, HNP)通过PBA回复给NMAG,并与其建立双向隧道来传输MN的数据分组。

NMAG 将 HNP 通过路由器广播报文 (Router Advertisement, RA) 告知 MN 后, MN 才恢复收发数据分组。在切换过程中发往 MN 的数据分组将全部丢失, 因此 PMIPv6 的切换延迟与分组丢失数量应分别为

$$\begin{aligned} D_{\text{PMIPv6}} &= D_{L2} + 2D_{\text{MN} \leftrightarrow \text{NMAG}} + 2D_{\text{LMA} \leftrightarrow \text{NMAG}} \\ &= D_{L2} + 2(D_{\text{MN} \leftrightarrow \text{NMAG}} + H_{\text{LMA} \leftrightarrow \text{NMAG}} D_{\text{HOP}}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L_{\text{PMIPv6}} &= D_{\text{PMIPv6}} v = [D_{L2} + 2(D_{\text{MN} \leftrightarrow \text{NMAG}} \\ &\quad + H_{\text{LMA} \leftrightarrow \text{NMAG}} D_{\text{HOP}})] v \end{aligned} \quad (9)$$

对于本文提出的改进方法, 由于先验切换经验有可能失效, 从而导致预测失败, 因此按预测正确与否分为 2 个场景。在预测正确场景中, MN 进行 L2 切换的同时, PMAG 已将到达 MN 的数据分组经由隧道转发至 NMAG, 这样当 MN 接入 NMAG 并发出 RS 时, 后者可直接将 RA 连同下行数据分组发给 MN。在利用 RA 中的 HNP 配置了移动节点归属地址 (Mobile Node's Home Address, MN-HoA) 后, 上行数据传输也立即恢复。此时分组是否丢失取决于 NMAG 上的切换缓冲区是否溢出。在预测错误场景中, 当 MN 到达实际的 NMAG 时, 由于后者并未收到来自 PMAG 的 HI 报文, 因此它将按照标准 PMIPv6 协议的规则进行处理, 也就是说即便先验切换经验失效也不会导致算法失效。而又由于 PMAG 采用了软转发机制, 当其收到 PBA 时会将切换缓冲区中的数据分组全部发往实际的 NMAG, 此时分组是否丢失取决于 PMAG 上的切换缓冲区是否溢出。因此本文方法的切换延迟与分组丢失数量应分别为

$$\begin{aligned} D_{\text{proposed}} &= \\ &\begin{cases} D_{L2} + 2D_{\text{MN} \leftrightarrow \text{NMAG}}, & \text{预测正确} \\ D_{L2} + 2(D_{\text{MN} \leftrightarrow \text{NMAG}} + H_{\text{LMA} \leftrightarrow \text{NMAG}} D_{\text{HOP}}), & \text{预测错误} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} L_{\text{proposed}} &= \\ &\begin{cases} \left\{ \begin{aligned} &0, (D_{\text{HACK-RS}} - 2D_{\text{PMAG} \leftrightarrow \text{NMAG}}) v L < C_{\text{NMAG}} \\ &(D_{\text{HACK-RS}} - 2D_{\text{PMAG} \leftrightarrow \text{NMAG}}) v - \lfloor C_{\text{NMAG}} / L \rfloor, \text{其它} \end{aligned} \right\}, & \text{预测正确} \\ \left\{ \begin{aligned} &0, D_{\text{HI-PBA}} v L < C_{\text{PMAG}} \\ &D_{\text{HI-PBA}} v - \lfloor C_{\text{PMAG}} / L \rfloor, \text{其它} \end{aligned} \right\}, & \text{预测错误} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

对比式(8)与式(10)可知, 在预测正确时, 本文方法的切换延迟明显小于 PMIPv6, 即便预测出现错误, 两种方法的切换延迟也大致相当。对比式(9)与式(11)可知, 只要切换缓冲区的大小设置合理,

本文方法几乎不会丢失分组, 但 PMIPv6 却会丢失切换过程中的绝大部分数据分组。需要说明的是: 由于切换是一个随机事件, 任意两次切换事件都是不相关的, 因此每次切换所产生的切换延迟和丢包数量也都是随机变化的。在理论分析中也只能在简化的场景中对它们进行定性讨论。

4 仿真结果

本节利用 NS2 对 PMIPv6 及改进方法进行仿真并对二者的切换效率进行比较。仿真环境如图 3 所示。MAG1 至 MAG10 为 PMAG 的 10 个邻居 MAG, MN 与 MAG 通过无线点到点链路连接并采用 IEEE 802.11b 协议, 其传输延迟为 20 ms。其余网络实体均由 G bit 线缆连接, 单跳延迟为 2 ms。PMAG 与所有邻居 MAG 的距离均为 1 跳, 所有 MAG 与 LMA 的距离均为 10 跳。MN 的移动速率为 15 m/s, 移动方向随机, MAG 的覆盖半径为 250 m, 切换缓冲区的大小为 15 kb, 仿真过程中 CN 持续以 300 packets/s 的恒定速率向 MN 发送长度为 500 byte 的 UDP 分组。

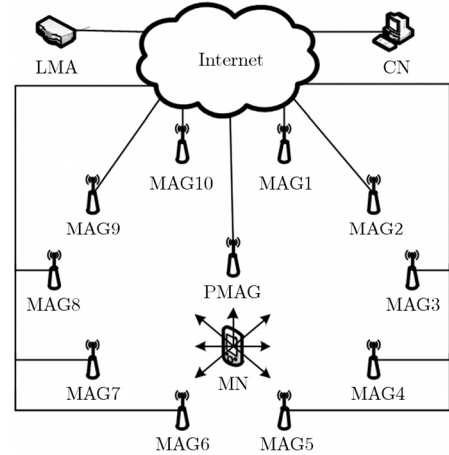
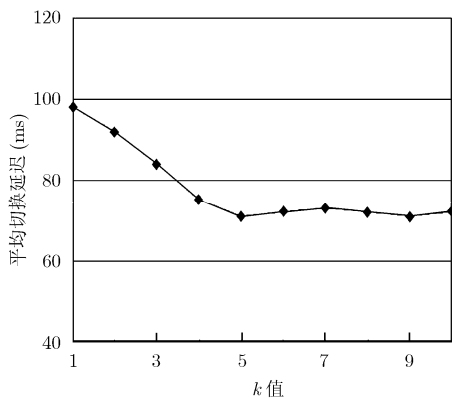


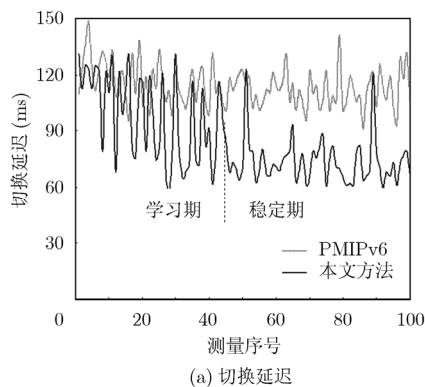
图3 仿真环境

图 4 给出了不同 k 值下利用本文方法进行 100 次切换所得的平均切换延迟。可以看出在 $k=5$ 时的平均切换延迟比 $k=1$ 时的低约 27.6%, 此后随着 k 值的增加, 切换延迟没有明显变化。这说明取 5 个样本进行预测时, 本文方法能够以最小的开销获得最小的切换延迟。由于平均切换延迟越大意味着预测失败的次数越多, 而预测失败绝大部分是由切换知识库中的孤立点造成的, 因此合理的选择 k 值能够很好地减轻孤立点对预测的影响, 这也与第 3 节的分析相吻合。

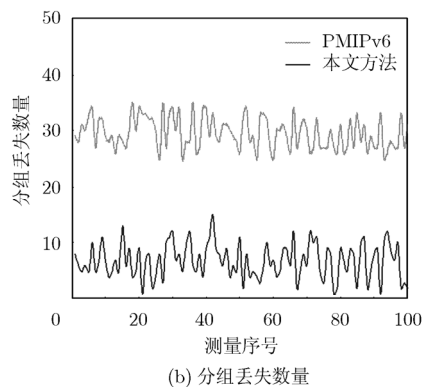
图 5 给出了两种方法在协议启动后前 100 次切换所产生的切换延迟和单次切换过程中的分组丢失

图4 不同 k 值下本文方法的平均切换延迟

数量。可以看出 PMIPv6 的切换延迟大致在 110 ms 上下波动, 而本文方法的切换历程可分为学习期和稳定期, 协议启动后本文方法进入学习期, 由于这一时期切换知识库尚未完善, 因此预测错误的概率非常大, 从而导致切换延迟较高。随着切换知识库内容的不断充实, 本文方法逐步进入稳定期, 这一



(a) 切换延迟



(b) 分组丢失数量

图5 仿真结果

参考文献

- [1] Johnson D, Perkins C, and Arkko J. RFC 3775 mobility support in IPv6[S]. Reston, VA, USA, Internet Society, 2004.
- [2] Koodli R. RFC 5568 Mobile IPv6 fast handovers [S]. Reston, VA, USA, Internet Society, 2009.
- [3] Soliman H, Castelluccia C, and Elmalki K. RFC 5380 hierarchical mobile IPv6 (HMIPv6) mobility management [S]. Reston, VA, USA, Internet Society, 2008.
- [4] Gundavelli S, Leung K, and Devarapalli V. RFC 5213 proxy mobile IPv6[S]. Reston, VA, USA, Internet Society, 2008.
- [5] Yokota H, Chowdhury K, Koodli R, et al. RFC 5949 fast handovers for proxy mobile IPv6[S]. Reston, VA, USA, Internet Society, 2010.
- [6] 周华春, 张宏科, 秦雅娟. 一种基于代理移动 IPv6 的全局移动性管理结构和协议[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2999-3004.
- [7] 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.
- [8] 沈波, 刘云. IP 微移动的切换管理[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2767-2770.

时期的预测正确的概率远高于学习期, 随着时间的推移, 除个别样本外, 其余样本的切换延迟基本稳定在 72 ms 左右, 较 PMIPv6 方法低约 36.4%。本文方法的平均分组丢失数量为 6.8, 远少于 PMIPv6 的 29.6, 这是由于本文方法采用了软转发机制来保护数据分组, 即使在预测错误的情况下, 数据分组也能从切换缓冲区中恢复出来, 仿真中的分组丢失主要是由切换缓冲区溢出及传输超时引起。

5 结束语

本文深入研究了 PMIPv6 协议的切换机制, 提出了一种基于网络预测的改进型方法。该方法通过学习先验切换经验, 提前预测移动节点的切换目的地, 从而使移动节点在接入新网络时能够立刻获取数据分组。仿真数据表明: 虽然该方法增加了部分存储开销, 但是能够取得比 PMIPv6 更小的切换延迟及更少的分组丢失数量。在今后的工作中将考虑学习系统的优化及拓扑不稳定的场景。

- [9] Oh S and Choo H. Low latency handover scheme based on optical buffering at LMA in proxy MIPv6 networks[C]. Computational Science and Its Applications-ICCSA 2009, Seoul, 2009: 479-490.
- [10] Lee Jong-hyouk, Kim Yeong-heok, and Lee Dong-woo. Enhanced handover process for proxy mobile IPv6[C]. 2010 4th International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering, Cebu, 2010: 105-108.
- [11] Yan Zhi-wei, Zhang Si-dong, Zhou Hua-chun, *et al.*. Network mobility support in PMIPv6 network[C]. Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Caen, 2010: 890-894.
- [12] Ali D and Andreas M T. Comparative analysis of proxy MIPv6 and fast MIPv6[C]. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, Tenerife, 2009: 26-33.
- [13] Roy S, Chatterjee S, and Bandyopadhyay S. Neighborhood tracking and location estimation of nodes in Ad hoc networks using directional antenna: a testbed implementation[C]. WirelessCom, Hawaii, 2005: 281-287.
- [14] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1986, 34(3): 276-280.
- 唐 军： 男，1981年生，博士生，研究方向为移动IPv6关键技术。
- 裴昌幸： 男，1946年生，教授，博士生导师，研究方向为网络测量、无线通信及抗干扰。
- 苏 博： 男，1982年生，博士生，研究方向为无线传感器网络。
- 张曼君： 女，1981年生，博士生，研究方向为移动网络安全。