

移动 IPv6 分层管理费用的分析与自适应优化

彭雪海, 张宏科, 张思东

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 为综合优化分层域内外以网络传输花费和带宽占用为代表的通信管理费用, 论文对实施分层移动 IPv6 前后的费用变化进行了理论分析, 得出了判决是否适宜使用分层移动管理的准则, 并在此基础上提出一种允许移动节点动态地根据切换频度和流量强度等参数选择适宜的移动管理机制的自适应优化方案. 仿真结果表明该方案能获得比静止使用某种移动管理机制更好的资源使用效率, 可望具有较好的实际应用价值.

关键词: 移动 IPv6; 移动管理; 分层系统; 费用优化

中图分类号: TP393.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 10-1690-04

Analysis of Hierarchical Management Cost of Mobile IPv6 and Adaptive Optimization

PENG Xuehai, ZHANG Hongke, ZHANG Sidedong

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As a micro mobility approach, Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) has been designed to improve the performance of Mobile IPv6 (MIPv6) on the number of management messages and handoff latency. Aiming at decreasing transfer cost and bandwidth consumption when enhancing the mobility management of Internet, the concept of integrated optimization is adopted in this paper. After theoretical computing and comparing the cost of HMIPv6 with MIPv6's, the judgment rules used to determine when HMIPv6 is adopted preferably are obtained, and Adaptive Mobility Management Scheme (AMMS) is proposed, which allows a mobile node residing in a HMIPv6 domain to select a suitable mobility management dynamically from MIPv6 and HMIPv6 according to its working parameters. The results of simulation show the expected performance.

Key words: mobile IPv6; mobility management; hierarchical systems; cost optimization

1 引言

为满足节点在改变网络拓扑时维护路由可达以及继续原有通信连接的需要, 移动 IP^[1,2]应运而生. 然而随着全 IP 无线网络规模的扩大, 移动 IP 终端的数量增加, 移动 IPv4^[1]日益受到地址资源、安全保障以及路由效率等问题的限制而不能得到广泛采用. 比较而言, 基于下一代 Internet 协议版本的移动 IPv6^[2] (MIPv6) 将具有更好的研究意义和应用前景. MIPv6 通过在家乡网络和有关通信节点中建立到新位置的映射关系为上层协议提供透明的移动支持. 而由此产生的位置管理消息会造成传输通信费用的增加. 本文以数据和控制消息分组在网络上的传输花费(与流量大小和传输距离有关)以及带宽占用(与流量强度有关)作为费用的主要衡量参数. 减少通信管理费用是 MIPv6 研究的一个重要课题, 尤其在资源成本较高的骨干网络、带宽受限的无线环境以及存在高频度切换的应用场合更有意义.

分层移动 IPv6^[3,4] (HMIPv6) 通过划分区域, 由区域内的功能服务器负责节点在分层域内移动时的位置映射, 可以向

层外 MIPv6 节点呈现透明的移动管理, 从而降低位置管理消息在分层域外消耗的费用^[5], 在一定程度上也减少了切换延迟. 然而, 由于 HMIPv6 改以隧道方式将流入分层域内的数据路由给移动节点, 增加了分层内的费用. 另一方面, 实际网络和移动节点属性各异, 妄图以一种固定的方式实施移动管理不利于性能优化. 因此有必要为 Internet 移动管理引入自适应机制.

通过建立模型和计算比较, 本文得出了用于判决分层移动管理是否适宜采用的准则, 并提出使用自适应移动管理方案 AMMS (Adaptive Mobility Management Scheme), 允许移动节点动态自适应地选用适宜的移动管理方式. 试验仿真结果表明, AMMS 可以获得比静止使用某种移动管理方式更好的资源使用效率.

2 HMIPv6 的基本原理

HMIPv6 增加了一个功能体, 移动锚接点 MAP (Mobile Anchor Point), 并在路由器通告消息中定义了用于发布 MAP 地址和工作模式的选项. 诸如家乡代理 HA (Home Agent)、支持

HMIPv6 的移动节点 MN(Mobile Node)、通信节点 CN(Correspondent Node)、接入路由器 AR(Access Router) 等术语和 MIPv6 中的含义相同. MN 使用区域转交地址 RCoA(Regional Care of Address)、在线转交地址 LCoA(Onlink Care of Address) 以及家乡地址 HoA(Home Address) 实现移动管理的分层.

HMIPv6 的位置注册过程如图 1 所示: 首先 MN 通过无状态自动配置^[9]生成 LCoA, 依据 MAP 选项中的 MAP 地址判断分层域的变化, 并使用该地址的前 64 比特作为前缀结合接口硬件地址生成 RCoA(在以前的草案中允许使用 MAP 地址作为 RCoA, 称作扩展模式); 之后在 MAP 中设置 RCoA 同 LCoA 的绑定条目(扩展模式中为 HoA 与 LCoA 的绑定); 最后在 HA 和 CN 中设置 RCoA 同 HoA 的绑定条目. 当 MN 在分层域内切换时改变了 LCoA, 而 RCoA 一般保持不变, 仅需要更新 MAP 中的缓存条目, 而对分层域外呈现透明的移动管理.

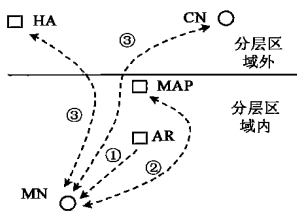


图 1 位置注册过程

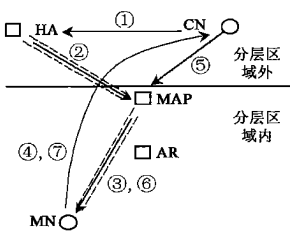


图 2 发自 CN 的分组的路由过程

对于发自 CN 的分组, HMIPv6 的路由处理过程如图 2 所示:

- 1 分组首先被路由到 MN 的家乡链路;
 - 2 使用 MIPv6 措施, HA 拦截得到该分组并将其封装进以 RCoA 为目的地址的隧道;
 - 3 MAP 处理分组并封装进以 LCoA 为出口的隧道;
 - 4 MN 拆解隧道分组, 并向 CN 进行位置注册以优化路由(由于拆解后的分组中没有类型为 2 的路由报头);
 - 5 CN 建立 RCoA 与 HoA 的绑定, 并借助路由报头发送后续分组;
 - 6 类似于 3 的处理, MAP 使用隧道将分组发送给 MN;
 - 7 MN 使用路由优化时, 以 RCoA 为源地址、CN 为目的地址, 借助目的扩展报头的家乡地址选项向 CN 发送后续分组.
- MN 发送分组的具体方式由于功能设置可能存在差异, 但是 HMIPv6 中流入层内 MN 的分组均需要 MAP 借助隧道方式传送给 MN.

3 分层前后费用变化的理论分析

依据 HMIPv6 协议流程建立了如下网络传输花费模型以及带宽占用模型. 我们约定在这两个模型中所讨论的切换均发生在分层域内, MN 发到分层域外的分组假定不使用反向隧道, CN 均为位于 MAP 域外的节点, HMIPv6 对于 CN 到 MN 的路由路径不产生显著改变(MAP 一般位于分层域网络拓扑的顶端, 是连接分层区域内外通信的主要路由节点, 所以这种假设是可行的), 并且不考虑周期更新所产生的位置管理消息的影响.

3.1 网络传输花费模型

如图 3 所示, B 为 MAP 范围内的一个移动节点. 其位置切换事件遵从平均速率为 L 的泊松过程. 随机变量 X、Y_i、Z 分别为 B 的家乡代理 A 到 MAP、第 i 个通信节点 CN_i 到 MAP、MAP 到 B 传送单位字节的网络

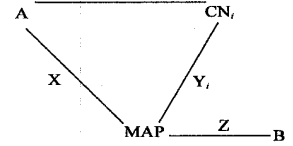


图 3 网络传输花费模型

传输花费. 影响网络传输花费的因素较多, 这里假定单位字节的网络传输花费与传输距离成正比. 随机变量 D_{HA}、D_{CN}、D_{MAP} 分别表示在移动 IPv6 模式下 B 同 HA、CN, 以及在 HMIPv6 模式下与 MAP 完成一次位置注册交互所产生的消息字节数; 随机变量 D_{TUN} 表示 MAP 为流入的分组进行隧道封装所增加的字节数. m 表示 B 具有的 CN 个数. A 和 CN_i 分别以平均分组速率为 K₀、K_i 的独立泊松过程向 B 发送数据.

随机过程 C₁、C₂、C₃ 分别表示节点 B 采用 HMIPv6 后层外因位置管理消息的减少而节省的平均网络传输花费、流入 B 的分组因 MAP 的隧道封装而增加的层内平均网络传输花费、分层域内因位置管理消息交换流程的改变所增加的层内平均网络传输花费. 分别计算其平均强度为:

$$E(C_1) = IE(D_{HA})E(X) + \sum_{i=1}^m IE(D_{CN_i})E(Y_i) \quad (1)$$

$$E(C_2) = \sum_{i=0}^m KE(D_{TUN})E(Z) \quad (2)$$

$$E(C_3) = L[E(D_{MAP}) - E(D_{HA}) - mE(D_{CN})]E(Z) \quad (3)$$

3.2 带宽占用模型

随机过程 B₁、B₂、B₃ 分别表示节点 B 采用 HMIPv6 后层外减少的位置管理消息的字节数、流入 B 的分组由于 MAP 的隧道封装而增加的层内流量的字节数、分层域内因位置管理消息交换流程的变化所增加的层内流量的字节数. 计算其平均强度, 则得到实施 HMIPv6 而节省的层外平均带宽占用、隧道封装增加的层内平均带宽占用、移动管理方式改变所增加的层内平均带宽占用分别为:

$$E(B_1) = IE(D_{HA}) + mIE(D_{CN}) \quad (4)$$

$$E(B_2) = \sum_{i=0}^m KE(D_{TUN}) \quad (5)$$

$$E(B_3) = IE(D_{MAP}) - IE(D_{HA}) - mIE(D_{CN}) \quad (6)$$

4 自适应移动管理方案

由于减少分层域外分发管理消息的费用, 即增加 E(C₁)、E(B₁); 同时却在分层域内产生了大小分别为 E(C₂) + E(C₃)、E(B₂) + E(B₃) 的网络传输花费和带宽占用. 因此 HMIPv6 降低骨干网络上的移动管理费用是以增加分层域内网络传输花费和带宽占用为代价的. 从整个网络资源使用效率的角度考虑, MN 在进入支持 HMIPv6 的区域后应根据环境参数动态自适应地决定使用 HMIPv6 和普通 MIPv6 中的哪种移动管理方式. 我们将这种工作机制称作自适应移动管理方案(AMMS).

4.1 AMMS 的判决准则

考虑到分层域内外网络传输花费和带宽的平均成本是不

等的, 分别用 k_1 、 k_2 表示层外与层内的网络传输花费折算率和平均单位带宽折算率。

为了降低分层内外分发位置管理消息以及数据分组所产生的总费用, 在单独考虑网络传输花费时, 判决 HMIPv6 适宜采用的条件为: $E(C_1) > [E(C_2) + E(C_3)] / k_1$; 单独考虑带宽占用时, 判决 HMIPv6 适宜采用的条件为: $E(B_1) > [E(B_2) + E(B_3)] / k_2$ 。

代入式(1)~(6), 则得到从网络传输花费角度判断 HMIPv6 是否适用采用的等价准则为:

$$L/K > D_1 \quad (7)$$

式中, $K = \sum_{i=0}^m K_i$,

$$D_1 = \frac{E(D_{TIN})E(Z)}{\{E(D_{HA})[k_1 E(X) + E(Z)] + E(D_{CN})[nE(Z) + k_1 \sum_{i=1}^m E(Y_i)] - E(D_{MAP})E(Z)\}}$$

从带宽占用角度判断 HMIPv6 是否适用采用的等价准则为:

$$L/K > D_2 \quad (8)$$

$$\text{式中 } D_2 = \frac{E(D_{TIN})}{[(k_2 + 1)E(D_{HA}) + (k_2 + 1)mE(D_{CN}) - E(D_{MAP})]}$$

设 $D_{\max} = \max(D_1, D_2)$, $D_{\min} = \min(D_1, D_2)$, 则得到兼顾网络传输花费和带宽占用时, 判断 HMIPv6 适宜使用的综合准则为:

$$L/K > D_{\max} \quad (9)$$

不适宜采用 HMIPv6 的综合准则为:

$$L/K < D_{\min} \quad (10)$$

可以看出: L/K 越大, HMIPv6 总费用的改善效果越明显。如果进一步考虑层内为发布 MAP 信息而产生的消息流量, 即增加了 $E(C_3)$, 则 $D_{\max}$ 要取一个更大的值。另一方面, 对于具有较小路径最大传输单元 PMTU (Path Maximum Transmission Unit) 的分层区域, 在同等比特流强度下, K 将会增加 (D_1 和 D_2 并没有因 PMTU 的减少而改变)。此时如果仍采用 HMIPv6, MAP 隧道封装产生的字节相对于流入分组大小的比例就会增加。在这种情况下为达到费用综合优化的目的, 采用 HMIPv6 的 MN 必然具有更大的 L 。因此 HMIPv6 适宜的是切换频度高并且通信分组流量相对低的应用环境, 在具有多级 MAP 分层结构的环境中, 可以让 L/K 较大的节点选择处于更高拓扑位置的 MAP。

4.1.2 AMMS 的可行性分析

AMMS 具有良好的可操作性与协议兼容性。在判决准则所需要的参数中, 比较难以统计的是 K 和 L 。我们定义 $R_{ph} = K/L$, 表示 MN 在接入子网切换间隙中收到的流入分组的平均数。 R_{ph} 的统计是方便可行的, 从而提高了 AMMS 的可操作性。

另一方面 AMMS 仅是在 MN 处增加了能动态自适应地切换移动管理方式的机制。这种切换在实现上并不困难。比如, 在支持 HMIPv6 的网络环境中, 若判决准则给出不适宜采用分层管理的结果, 则可以由 MN 的自适应实现模块向移动协议实现模块发送网络不支持分层移动的欺骗信息, 强制 MN 使用 MIPv6。因此, AMMS 不需要修改其它节点的协议栈, 完全能在现有 HMIPv6 和 MIPv6 的基础上工作。

需要说明的是, 当 L/K 处于区间 $(D_{\min}, D_{\max})$ 内时, 对网络传输花费和带宽占用的不同关注可能会得到不同的判决结果。此时, AMMS 可以根据实际环境选择使用(7)或(8)中的一种判决准则。

5 仿真与性能评价

试验仿真所用的网络拓扑每一次都是基于 10@10 网络随机构造的, 交叉点为路由器(共 100 个), 连线为子网链路, 固定第 5 行第 5 列的交叉点为 MAP, 其余为 HA 或直接连接 CN 的网关路由器。单位网络传输花费以最短路径上的子网链路数目表示。为简单起见, 我们合理地设定 HA 和各个 CN 以相同的速率向 MN 发送分组, 不考虑周期刷新所产生的位置管理消息, MN 到 MAP 的单位网络传输花费 $E(Z)$ 设置为 1, 并将 MAP 内的单位网络传输花费和带宽占用作为折算基准。

仿真方法是: 在基本拓扑上从 MAP 以外的路由器中等概率地选择 1 个作为 HA, m 个作为 CN 的网关路由器, 分别统计使用 MIPv6、HMIPv6 和 AMMS 时分发位置管理消息以及数据分组, MAP 内外用 k_1 、 k_2 加权折算后的网络传输总花费 C_t 和字节带宽总占用 B_t , 再进行比较(统计时长为 T)。我们构造了 HA 和 CN 的 100 个随机分布拓扑, 在每个分布拓扑上针对 MN 的切换速率和分组强度的组合做 10 次仿真。从而为每种 (L, K) 组合获得 1000 个数据, 最终结果为这些数据的平均值。在测算 AMMS 的数据时, C_t 和 B_t 分别采用式(7)和(8)的判决准则。

仿真中的实验参数设置如下: 路径最大传输单元 $P_1 = 1500$ 字节、来自 CN 或 HA 的分组的大小 $P_2 = 200$ 字节、 $E(D_{HA}) = E(D_{CN}) = E(D_{MAP}) = 150$ 字节、 $E(D_{TIN}) = 40$ 字节、 $T = 200$ 秒、 $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 10$ 、 $m = 9$ 。由于受工作模式和安全机制的影响, $E(D_{HA})$ 、 $E(D_{CN})$ 和 $E(D_{MAP})$ 的取值同实际情况存在一些差异, 这里给出的是为完成仿真测试在不考虑安全负载和一些辅助选项后, 位置管理消息的可能近似值。

5.1.1 网络传输花费的优化性能

图 4 中(a)和(b)分别给出了 K 为每秒 100 和 200 个包时, MAP 内外网络传输总花费同 L 的变化关系。命名 MIPv6 和 HMIPv6 的 C_t 曲线相交点为临界点, 此位置的切换频率为临界切换频率, 则图 4 中(a)和(b)的临界切换频率分别为 0.137 和 0.176。

可以看出 AMMS 具有最小的网络传输

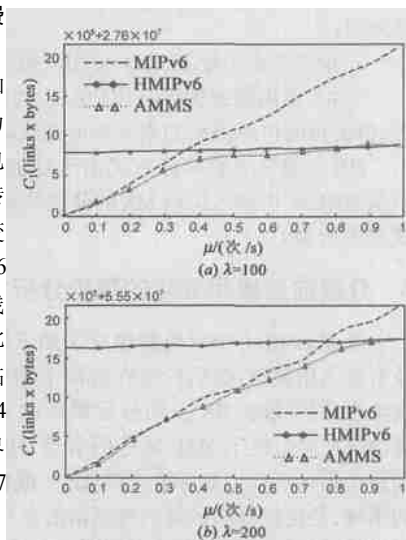


图 4 网络传输总花费的优化性能仿真

总花费, 并且以临界频率为界, 在 L 增大的方向上趋向于 HMIPv6 的性能, 在 L 减小的方向上趋向于 MIPv6 的性能. AMMS 之所以没有在临界频率附近分别和 MIPv6 和 HMIPv6 的 C_t 曲线完全重合是因为: 在使用 AMMS 时受传输距离的影响, 为某个 (L, K) 随机选取的 100 个分布拓扑测试例的判决结果不完全一致 (在小于临界切换频率时更多的采用 MIPv6).

MIPv6 和 HMIPv6 的网络传输总费用基本上是 L 的线性函数, 但是 MIPv6 显然具有更陡峭的 C_t 曲线. 这是因为斜率的主要贡献因素是位置管理消息所产生的网络传输花费, 并且在每次位置切换时 MIPv6 需要向 HA 和 m 个 CN 分别进行位置注册, 而 HMIPv6 不需要这样做. 在 $L=0$ 处 HMIPv6 和 MIPv6 的网络传输总花费具有初值, 并相差 $\$C_i$. 初值是传送数据分组的所产生的网络传输花费, 而 $\$C_i$ 是由于使用 HMIPv6 时, MAP 隧道封装所增加的流量在分层内所产生的网络传输花费. 由于 MIPv6 具有比 HMIPv6 大的 C_t 曲线斜率, 两者的 C_t 曲线必定要相交于某一点, 即临界点. 在临界点以内 MIPv6 具有比 HMIPv6 小的 C_t , 而在临界点外 HMIPv6 的性能更好些. 在不改变其它实验参数的情况下, 随着 K 的增加 (由 100 到 200), 临界点的位置向 L 增加的方向移动 (0.137 到 0.176), 即随着流入分组强度的增加, HMIPv6 将倾向适用于具有更大切换频率的环境.

计算基本网络网络各交叉点到 MAP 的平均子网链路数目为 51.5, 从而得到 $E(X)$ 和 $E(Y_i)$ 的分别为 51.5 和 61.5. 根据判决准则 (7), 代入表 1 中的参数后得到 $D_1 = 0.00389$. 因此在 K 为 100 和 200 时, 临界切换频率的理论值分别为 0.1389 和 0.1778, 近似于仿真获得的结果.

5.1.2 带宽总占用的优化性能

图 5 中 (a) 和 (b) 分别给出了 K 为每秒 100 和 200 个包时, MAP 内外字节带宽总占用同 MN 切换频率 L 的变化关系. 相似地定义临界点.

可以看出 AMMS 具有最小的字节带宽总占用. 区别于 C_t 曲线, AMMS 的 B_t 曲线之所以在临界频率内外分别和 MIPv6 和 HMIPv6 的 B_t 曲线基本重合是因为 CN 和 HA 的随机分布拓扑并不影响 AMMS 判决准则的输出结果.

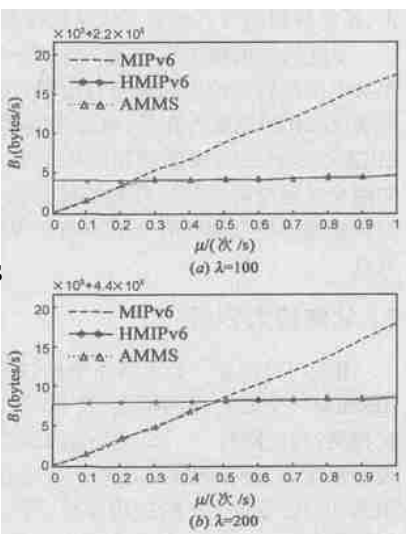


图 5 字节带宽总占用的优化性能仿真

相比于 C_t 仿真, MIPv6 和 HMIPv6 的 B_t 曲线具有同 L 更好的线性变化 (MIPv6 的 B_t 曲线比 HMIPv6 的更陡峭些). 这是因为 MAP 向层外节点屏蔽了 MN 的切换, 且传输距离不影响 B_t 的测量. 在 $L=0$ 处 HMIPv6 和 MIPv6 的字节带宽总占用具有初值, 并相差 $\$B_i$. 初值是传送数据分组所占用的字节带宽, 而 $\$B_i$ 是使用 HMIPv6 时 MAP 隧道封装所增加的流量占用的层内字节带宽. 同样 MIPv6 和 HMIPv6 的 B_t 曲线也必然存在临界点, 并在临界点内外表现出不同的性能. 在不改变其它实验参数的情况下, 随着 K 的增加 (由 100 到 200), B_t 曲线临界点的位置也向着 L 增加的方向移动 (0.123 到 0.147).

同样可以根据判决准则 (8) 计算出 D_2 等于 0.00244. 因此从字节带宽总占用角度考虑, 在 K 为 100 和 200 时, 临界切换频率的理论值分别为 0.1244 和 0.1488, 近似于仿真获得的结果.

综上所述, 分层前后费用变化的理论分析是正确的, 自适应方案的判决准则是合理的, 使用 AMMS 能比固定 MN 使用某种移动管理方式获得更低的网络传输总花费和带宽总占用.

6 结束语

分层移动性管理是减少切换延迟和降低骨干网络上移动路由协议消息量的有效方法, 是近年来一个比较活跃的研究方向. HMIPv6 对费用的优化是有条件的, 需要做自适应处理. 考虑到无线网络的异构性以及业务多样性等特点, 构造多级移动管理体系结构将是必然趋势. 本文为 HMIPv6 引入了自适应机制, 允许 MN 根据工作参数动态选择适宜的移动方式, 综合优化了资源使用效率. 基于这种自适应思想的多 MAP 分布树构造方法以及自适应分层跃迁算法是我们正在进行的重要工作.

作者简介:



彭雪海 男, 1975 年生于安徽萧县, 1997 年毕业于北方交通大学, 获得学士学位, 现于北京交通大学电子信息工程学院攻读博士学位, 研究方向为移动 IP、移动组播路由、高性能传输协议和 QoS 控制.



张宏科 男, 1957 年生于山西大同, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网路由、安全、服务质量.

(下转第 1701 页)

参考文献:

- [1] IEEE Standards Board. 802 part 11: Wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications[S]. IEEE Standard 802. 11, 1999 Edition.
- [2] Jesse Walker. TGe security baseline draft text [DB/OL]. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/March.2001>.
- [3] S Fluhrer, I Martin, A Shamir. Weaknesses in the key scheduling algorithm of RC4[A]. Eighth annual workshop on selected areas in Cryptography[C]. August 2001.
- [4] Tim Moore. Suggested changes to robust security network (RSN) for IEEE 802. 11 [DB/ OL]. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Sep.2.2002>.

作者简介:



曹秀英 女, 1947 年生于上海, 东南大学教授, 研究方向为保密通信. Email: cao_xy@seu.edu.cn

毕光国 男, 1939 年生于上海, 东南大学教授, 博士生导师, 研究方向为超宽带无线通信、信息安全等.

耿 嘉 男, 1978 年生于江苏南京, 2002 年毕业于东南大学获通信与信息系统硕士学位, 现在东南大学移动通信国家重点实验室攻读博士学位. 研究方向为: 信息安全、移动通信技术. Email: gengjia.cn@hotmail.com

(上接第 1693 页)

参考文献:

- [1] C Perkins. RFC3344. IP Mobility Support for IPv4 [S].
- [2] D Johnson, C Perkins. Mobility support in IPv6 [S]. IETF Internet Draft, [draft2iet2mobileip2ip624.txt](#).
- [3] Castelluccia C. A hierarchical mobility management scheme for IPv6 [A]. Proceedings of the third IEEE Symposium on Computers and Communications[C]. Athens, Greece: IEEE, 1998:305- 309.
- [4] Hesham Soliman, Claude Castelluccia, Karim El Malki, Ludovic Bellier. Hierarchical mobile IPv6 mobility management (HMIPv6) [S]. IETF Internet Draft, [draft2iet2mobileip2hmip6208.txt](#).
- [5] Montavont N, Noël T. Handover management for mobile nodes in IPv6 networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 38- 43.
- [6] S Thomson, T Narten. IPv6 stateless address autoconfiguration [S]. RFC2462.
- [7] J McCann, S Deering, J Mogul. Path MTU discovery for IP version 6 [S]. RFC1981.