

## 嵌套移动网络中基于代价函数的自适应路由优化机制

葛国栋\* 汤红波 王晓雷

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

**摘要:** 该文针对嵌套移动网络中的路由优化问题, 依据子网的实时通信和运动模式, 提出了一种自适应路由优化机制。该机制将嵌套子网划分绑定更新、均衡通信和数据路由 3 种通信模式, 在不同模式下采取相对应的路由优化策略, 合理均衡绑定更新和数据隧道封装传输之间的代价开销。仿真结果表明, 该机制减少了数据传输的封装次数和隧道长度, 具有较小的传输时延, 实现了移动过程中数据传输代价最小化, 对子网的动态变化具有良好的适应性。

**关键词:** 嵌套移动网络; 路由优化; 乒乓路由; 自适应

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-2018-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01306

## An Adaptive Routing Optimization Scheme for Nested Mobile Networks Based on Cost Function

Ge Guo-dong Tang Hong-bo Wang Xiao-lei

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Considering the routing optimization issue in nested Network Mobility (NEMO), an adaptive routing optimization scheme based on cost function is proposed. In the scheme, depending on the communication and mobility pattern, the communication of nested NEMO is divided into three communication models, including binding update model, data routing model and balanced communication model; Different routing optimization strategy is chosen to balance the binding update signaling and the data tunneling cost to minimize the total cost in the models. The simulation results show that the scheme can shorten tunnel length and transmission delay, achieve the minimum cost of the communication in nested NEMO and have good adaptability for network topology dynamic changes.

**Key words:** Nested Network Mobility (NEMO); Route optimization; Pinball routing; Adaptive

### 1 引言

随着移动 IP 技术逐渐成熟并推向应用, 人们对采用移动网络(Network Mobility, NEMO)方式接入因特网的需求日渐强烈。但 NEMO 的基本支持协议(NEMO Basic Support Protocol, NBSP)<sup>[1]</sup>本质上是 MIPv6 协议的简单自然扩展, 将移动性管理功能集中在移动路由器(Mobile Router, MR)上, 是建立在家乡代理(Home Agent, HA)和隧道技术上的实现方案。当多个移动网络依次附着, 形成树形的嵌套移动网络(Nested NEMO)时, 数据包的转发要经过多层隧道封装经多个 HA 的转发才能到达通信对端节点 CN<sup>[2]</sup>。导致数据报文的传输时延、丢包率和报文封装开销大幅增加, 而且随着移动网络嵌套层次的增加会变得愈加严重<sup>[3]</sup>。文献[4-7]给出了优化

解决方案。这些方案在一定程度上解决了路由优化问题, 但也存在着诸多不足: (1)为了优化传输路径, 带来大量的绑定更新(Binding Update, BU)信令开销, 当子网频繁切换时, 易造成信令风暴<sup>[8]</sup>; (2)现有的路由优化机制是静态孤立的, 未能与网络实时通信和运动模式相结合<sup>[9]</sup>; (3)单一追求最优路径传输或最小信令开销, 不能在两者之间进行合理的均衡; (4)数据传输路径的非最优化带来额外的封装开销。

为此, 本文提出了一种基于代价函数的自适应路由优化机制(Adaptive Routing Optimization scheme for nested mobile networks based on Cost Function, AROCF), 根据会话移动率<sup>[10]</sup>(Session-to-Mobility Ratio, SMR)的大小, 将嵌套移动网络划分为 3 种不同的通信模式, 以最小化各模式下的通信总代价为目标, 采取相对应的地址配置和绑定更新策略。该机制解决了嵌套移动网络中乒乓路由和数据包多层隧道封装问题, 在不同的子网结构下,

2010-11-25 收到, 2011-01-26 改回

国家科技重大专项(2009ZX03004-002)和国家 973 计划项目(2007CB307102)资助课题

\*通信作者: 葛国栋 geguodong66@126.com

均能实现通信总代价的最小化，对于子网结构的变化具有良好的适应性。

## 2 基于代价函数的自适应路由优化机制

### 2.1 代价函数的定义与通信模式的划分

对于嵌套移动子网，从两方面考虑数据的传输代价：(1)在切换过程中向 RMR、HA 或 CN 发送额外的 BU 与绑定确认所产生的信令开销代价；(2)数据包由于隧道封装传输产生的额外开销代价。定义：单位时间内通信总代价  $C$

$$C = \gamma C^{BU} + \lambda C^{PT} \quad (1)$$

其中  $C^{BU}$  为一次切换中绑定更新和绑定确认信令消息产生的代价， $C^{PT}$  为一次会话数据隧道传输产生的代价， $\gamma$  为单位时间内的切换次数， $\lambda$  为会话到达率。由会话移动率 SMR 与  $\gamma$ ， $\lambda$  的关系，式(1)可以写成

$$C = \gamma(C^{BU} + SMR \times C^{PT}) \quad (2)$$

根据嵌套子网 SMR 的大小，划分为绑定更新模式(Binding Update Model, BUM)，数据路由模式(Data Routing Model, DRM)和均衡通信模式(Balanced Communication Model, BCM)。设计各个模式下的优化策略，使  $C_{BUM}^{BU} < C_{BCM}^{BU} < C_{DCM}^{BU}$ ， $C_{BUM}^{PT} > C_{BCM}^{PT} > C_{DCM}^{PT}$ 。

(1)绑定更新模式：该模式下， $SMR \leq \delta_{SMR}^{BB}$ ，会话到达率较低，根移动路由器(Root-MR, RMR)切换频繁，不断重新配置转交地址(Care of Address, CoA)，发送大量的 BU，信令开销和位置更新在整个通信中占据主导地位，应采用最小化信令开销的路由优化策略。

(2)均衡通信模式：该模式处于绑定更新模式和数据路由模式之间， $\delta_{SMR}^{BB} < SMR < \delta_{SMR}^{BD}$ ，会话的到达率和切换频率处于相对均衡的状态。此时采用折衷信令补偿的路由优化策略。

(3)数据路由模式：该模式下， $SMR \geq \delta_{SMR}^{BD}$ ，会话到达率较高，RMR 切换率低，信令开销较小，数据的隧道传输代价占据主导地位。此时采用最小化数据隧道传输的路由优化策略。其中  $\delta_{SMR}^{BB}$ ， $\delta_{SMR}^{BD}$  为 3 种通信模式的界定阈值，具体数值的确定在 2.3 节中进行说明。

### 2.2 优化机制

图 1 给出了 ARO-CF 优化机制的基本工作流程，子网依据 SMR 和  $\delta_{SMR}^{BB}$ ， $\delta_{SMR}^{BD}$  的大小关系，判断所处的通信模式，采取相应的优化措施。对于各优化策略，具体包括地址配置、绑定更新和通信路径 3 个方面。

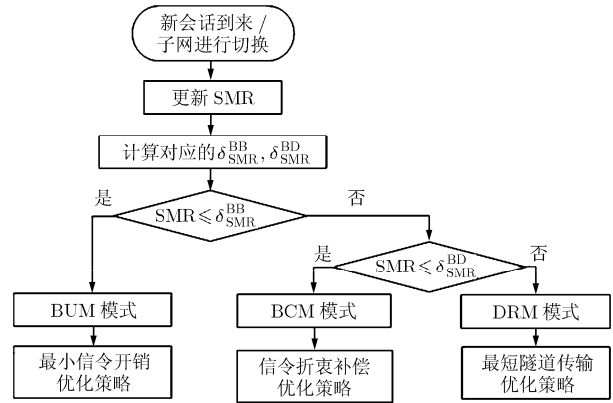


图1 ARO-CF的基本工作流程

**2.2.1 地址配置策略** 将 MR 和访问移动节点(Visiting Mobile Node, VMN)统一称为可以进行 BU 的节点(BU Capable Nodes, BCN)，在 ARO-CF 的地址配置策略中，BCN 配置两种转交地址：(1)拓扑正确 CoA，由外地 AR 的地址前缀配置的 CoA，具有正确的拓扑位置信息，数据路由模式下配置这种 CoA；(2)拓扑不正确 CoA，BCN 根据父移动路由器地址前缀配置的 CoA，不能标识当前 BCN 正确的拓扑位置，绑定更新和均衡通信模式下配置这种 CoA。为了消除多级隧道嵌套的影响，对 RMR 的路由器通告消息(Router Advertisement, RA)进行简单的修改，增加路由信息选项和根移动路由器家乡地址选项。具体的 CoA 配置策略如下：

(1)RMR 根据外地网络前缀配置 CoA，在 RA 中的根移动路由器家乡地址选项加入自己的 HoA，在路由信息选项的 CoA 列表中加入自己的 CoA，如果当前子网处于数据路由模式，则向子网区域发送带有路由信息选项的 RA 消息，否则，向子网区域发送带有路由信息选项和根移动路由器家乡地址选项的 RA 消息。

(2)如果当前子网处于数据路由模式，BCN 根据根移动路由器 RA 消息的 CoA 前缀来配置自己的 CoA，否则，BCN 根据父移动路由器的地址前缀配置相应的 CoA。

(3)MR 查看路由信息选项，将去往 RMR 的下一跳地址设为 CoA 的列表最后一项所存储的地址，并将自己的 CoA 加入到路由信息选项 CoA 的列表中，存储 RMR-HoA，然后将修改后的 RA 继续向下转发。

**2.2.2 绑定更新策略** BCN 依据配置 CoA 后，发送两种绑定更新：(1)向 RMR 发送局部 BU 更新路径信息；(2)向 HA 或 CN 发送全局 BU 更新位置信息。在局部 BU 消息中增加模式标志 M，如图 2 所示。具体的更新策略如下：

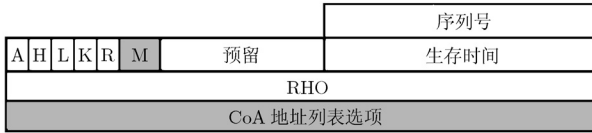


图2 局部BU消息格式

(1)绑定更新模式: M 标志位置为 01。借鉴 ROTIO(Routing Optimization using Tree Information Option)思想<sup>[4]</sup>, 局部 BU 发送给 RMR, 其中路由信息选项包括了上层父移动路由器的 CoA 列表, 从中 RMR 可以获知嵌套子网内的拓扑结构; 实现子网内的源路由。全局 BU 发送给相应的 HA, 注册 CoA; 根移动路由器家乡地址选项插入的是 RMR 的 HoA, 使 HA 获知 MR 处于 RMR 的下级。这样 MR 在子网内移动时, 只需发送局部 BU, 更新 CoA, 而不用向 HA 注册。当子网整体进行切换时, RMR 只需向其 HA 更新 CoA 即可, 子网内的 BCN 不需重新配置 CoA 和更新路径信息, 大大减少了信令开销。

(2)均衡通信模式: 将 M 标志位置为 10, BCN 向 RMR 发送包含路由信息选项和根移动路由器家乡地址选项的局部 BU, 其中根移动路由器家乡地址选项插入的是各 MR 所管理的移动子网 HoA 前缀或 VMN 对应的 HoA; BCN 向 CN 发送全局 BU 注册 CoA, 根移动路由器家乡地址选项插入的是 RMR 的 HoA, 使 CN 获知 MR 处于 RMR 的下级。用  $C_{extra}$  表示 BCN 向 CN 发送全局 BU 产生的额外信令开销,  $C_s^{PT}$  表示  $C_{extra}$  对应节省的数据包隧道传输代价。该方案借助小量的额外信令开销  $C_{extra}$ , 换取更优的  $C_s^{PT}$ 。

(3)数据路由模式: 将 M 标志位置为 11, 表明子网内的会话到达率较高, 切换率低, 数据隧道传输占据主导地位。对于  $C_{DRM}$ , 以最小化  $C_{DRM}^{PT}$  为主要目标, 减小通信总代价。局部 BU 发送给 RMR, 其中路由信息选项包括了上层父移动路由器的 CoA 列表, 从中 RMR 可以获知嵌套子网内的拓扑结构。在数据路由模式下, RMR 使用 CoA 列表实现子网内的源路由。全局 BU 发送给相应的 HA 和 CN, 注册为 CoA。

**2.2.3 数据通信路径** (1)绑定更新模式: BCN配置的是拓扑不正确CoA, 减小BU信令开销, 但数据包必须经过两层隧道的转发。如图3所示, 当CN要和MR3下的节点MNN通信时, 数据包的转发路径是: CN → HA3 → HA1 → AR1 → RMR → MR2 → MR3 → MNN。其中  $\downarrow$  和  $\uparrow$  表示数据包经过一层和两层隧道封装。

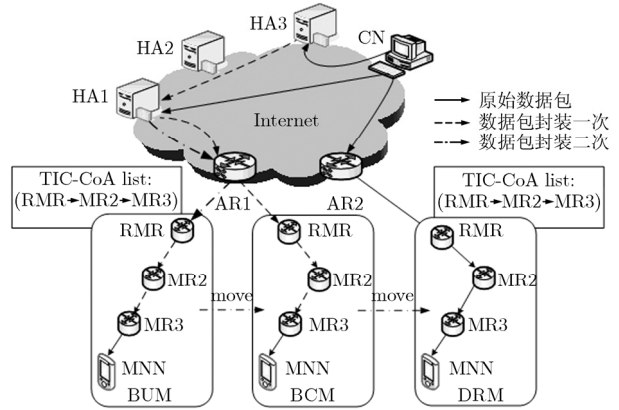


图3 数据通信路径

(2)均衡通信模式: 通过信令折衷补偿的优化方案。在绑定更新模式的基础上, BCN 向 CN 发送全局 BU 注册 CoA, 其中包括根移动路由器家乡地址选项, 使 CN 获知 MR 处于 RMR 的下级, 这样数据的传输只需经过 RMR 的 HA 一层隧道转发, 如图 3 所示, 转发路径是: CN → HA1 → AR1 → RMR → MR2 → MR3 → MNN。

(3)数据路由模式: BCN 配置的是拓扑正确 CoA, 标识了正确的拓扑位置。如图 3 所示, MR3 向 CN 发送全局 BU 后, CN 可以向 RMR 直接发送数据包, 数据包的转发路径是: CN → AR2 → RMR → MR2 → MR3 → MNN, 不需任何 HA 中转和隧道封装。

**2.3 最优  $\delta_{SMR}^{BB}$  和  $\delta_{SMR}^{BD}$  的确定**

(1)初始化  $\delta_{SMR}^{min}$ ,  $\delta_{SMR}^{max}$ , SMR 以及门限值  $\epsilon$ ,  $\epsilon$  的值一般取代价计算精度的 3-5 倍;

(2)令  $\delta_{SMR} = (\delta_{SMR}^{min} + \delta_{SMR}^{max})/2$ , 计算均衡通信模式额外信令开销  $C_{extra}$  和相应的  $C_s^{PT}$ , 判断  $|C_{extra}(\delta_{SMR}) - C_s^{PT}(\delta_{SMR})|$  是否小于门限值  $\epsilon$ , 如果小于, 执行(3), 否则执行(4);

(3)令  $\delta_{SMR}^{BB} = \delta_{SMR}$ , 输出  $\delta_{SMR}^{BB}$ , 算法结束;

(4)判断  $C_{extra}(\delta_{SMR})$  是否大于  $C_s^{PT}(\delta_{SMR})$ , 如果大于, 令  $\delta_{SMR}^{min} = \delta_{SMR}$ , 否则, 令  $\delta_{SMR}^{max} = \delta_{SMR}$ , 执行(2)。

确定出  $\delta_{SMR}^{BB}$  的取值后, 对于  $\delta_{SMR}^{BD}$ , 采取上述同样的方法在  $SMR > \delta_{SMR}^{BB}$  的范围内搜索确定。

**3 仿真及性能分析**

**3.1 实验参数**

使用 Mobiwlan: NS-2 extensions to study mobility in Wide-Area IPv6 networks 进行实验仿真。参数设置如下: 嵌套层次  $L=7$  的 Nested NEMO, 子网内 MR 的总数  $N_{MR}=7$ , 每层含有一个 MR,  $N_{MR}(i) = 1, i = 1, 2, \dots, 7$ 。嵌套深度为  $i$  层的

节点发送和接受的数据包所占的比率设为  $P_i$ ，均为  $P_i = 1/7$ 。每个 MR 下配置 3 个 VMN， $N_{VMN}(i)=3$ ，子网内 VMN 接收和发送数据的概率  $P(VMN) = 0.1$ ，本地节点接收和发送数据的概率  $P(LN) = 1 - P(VMN) = 0.9$ ；平均跳数设为  $d_{HA-HA} = 8$ ， $d_{CN-HA} = 5$ ， $d_{HA-AR} = 10$  [10]。子网在 AR 内的驻留时间  $t_{resid}^{AR}$  服从 Gamma 分布，在一次会话期间，通信两端发送和接受的平均分组数  $C_{session}$  服从正态分布，数据包长度设为 1000 byte， $E[C_{session}] = 10$ ， $\sigma^2 = 625$  [11]。

### 3.2 性能分析

对本文提出的 AROCF 优化机制和 NBSP，ROTIO，文献[5] LRO 方案进行对比分析。

图 4 给出了当  $E[C_{session}] = 10$ ， $L = 7$ ， $P_{VMN} = 0.1$  时 4 种优化方案的通信总代价，其中  $\delta_{SMR}^{BB} = 4.410$ ， $\delta_{SMR}^{BD} = 15.5866$ ，虚线表示的是用数学计算得出的代价曲线，实验仿真得出的结果和数学计算得出的数据基本一致，少许的差异是由于  $C_{session}$  的高方差  $\sigma^2$  的影响，其中 AROCF 各模式的通信代价是 4 种优化方案中最小的。

图 5 给出了  $E[C_{session}] = 50$  时，4 种路由优化方案的通信代价。 $\delta_{SMR}^{BB} = 0.9132$ ， $\delta_{SMR}^{BD} = 3.20$ ，随着  $E[C_{session}]$  的增大， $C_{BUM}^{PT}$ ， $C_{BCM}^{PT}$  会大幅增加，数据

的隧道传输代价成比例增大， $\delta_{SMR}^{BB}$ ， $\delta_{SMR}^{BD}$  会相应减小，绑定更新和均衡通信模式范围减小，数据路由由模式范围不断增大。

图 6 给出了 4 种路由优化方案的平均传输时延。在绑定更新模式下需要 2 层隧道封装，传输时延与 ROTIO 相当；进入均衡通信模式时，只需 RMR 和其 HA 之间的一层隧道封装，时延大幅减小；数据路由模式下，数据无需 HA 转发和隧道封装，传输时延最小。相比其他机制，有效的减小了数据的封装次数和隧道传输长度，具有较小的时延。

### 3.3 ARO-CF机制适应性讨论

将移动网络的嵌套层次从  $L = 7$  变为  $L = 4$ ， $E[C_{session}] = 10$ ，其他条件不变。此时  $\delta_{SMR}^{BB} = 3.2797$ ， $\delta_{SMR}^{BD} = 5.3487$ 。图 7 给出在  $E[C_{session}] = 50$  和  $E[C_{session}] = 10$  下， $N_{VMN}(i) = 3, 5, 7$  时，AROCF 的代价曲线。随着 MR 下的 VMN 数量的增多， $C_{BCM}^{BU}$ ， $C_{DRM}^{BU}$  会不断增加，对应的  $C_{BUM}^{BU}$ ， $C_{BCM}^{PT}$ ， $C_{BUM}^{PT}$  保持不变，所以  $\delta_{SMR}^{BB}$  和  $\delta_{SMR}^{BD}$  会不断增大，绑定更新模式在整个通信中的范围增大，均衡通信模式和数据路由模式的范围不断减小。

图 8 给出在  $E[C_{session}] = 50$  和  $E[C_{session}] = 100$  下， $P(VMN) = 0.01, 0.1$  和  $0.5$  时，AROCF 的代价曲线。随着  $P(VMN)$  的增大，MR 下 VMN 接收和发

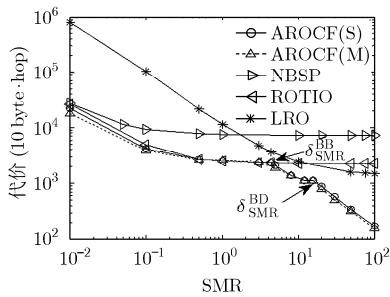


图 4 优化方案通信代价对比 ( $E[C_{session}] = 10$ )

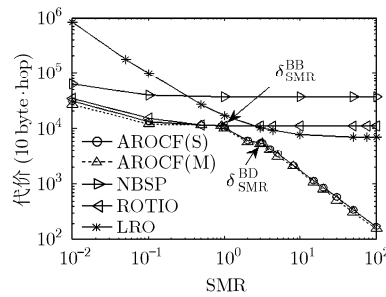


图 5 优化方案通信代价对比 ( $E[C_{session}] = 50$ )

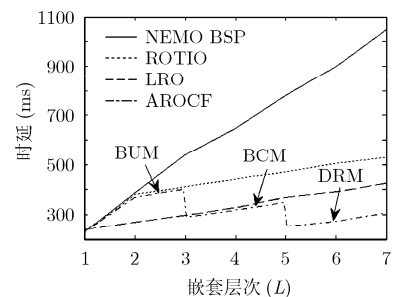


图 6 优化方案传输时延对比

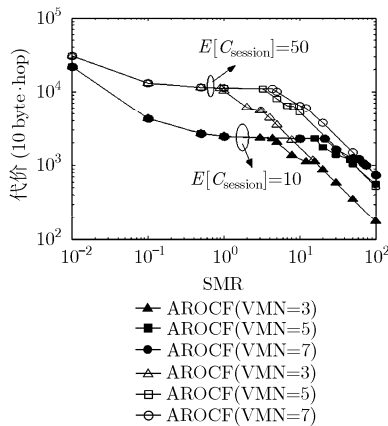


图 7 通信代价随  $N_{VMN}(i)$  的变化趋势

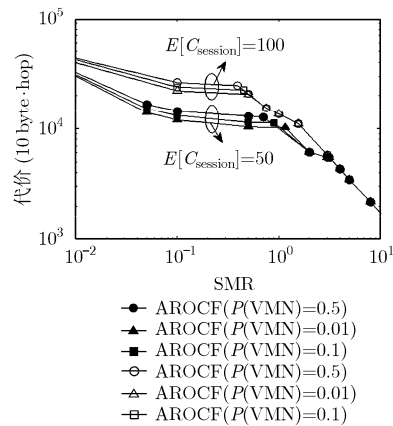


图 8 通信代价随  $P_{VMN}$  的变化趋势

送的数据比例增大, 导致  $C_{BUM}^{PT}$  增大,  $C_{BCM}^{PT}$  的大小不受  $P(VMN)$  的影响, 保持不变,  $\delta_{SMR}^{BB}$  会相应减小;  $C_{DRM}^{PT}$  为 0, 所以  $\delta_{SMR}^{BD}$  保持不变, 绑定更新的范围不断减小, 均衡通信模式的范围不断增大。

#### 4 结束语

本文设计了一种基于代价函数的自适应路由优化机制。该机制依据嵌套子网的会话移动率, 将移动网络划分为 3 种通信模式; 在各模式下, 对绑定更新和数据隧道封装传输两方面的代价进行合理均衡, 采取相对应的路由优化策略。仿真结果表明, 该机制解决了嵌套移动网络中路由优化问题, 减小了数据包的封装次数和隧道传输长度, 具有较小的传输时延; 在不同的子网结构下, 具有很好的适应性。快速准确的确定 SMR 和提高优化机制的安全性是下一步的重点研究工作。

#### 参考文献

- [1] Devarapalli V, Wakikawa R, Petrescu A, *et al.* Network Mobility (NEMO) basic support protocol[S]. IETF RFC 3963, 2005.
- [2] 苏伟, 张宏科. 一种移动网络中的路由优化模型[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1217-1222.  
Su Wei and Zhang Hong-ke. A route optimization model in mobile network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(7): 1217-1222.
- [3] Lim Hyung-Jin, Kim Moon-seong, Lee Jong-hyouk, *et al.* Route optimization in nested NEMO: classification, evaluation, and analysis from NEMO fring stub prespective[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(11): 1554-1572.
- [4] Cho Hosik, Kwon Taekyoung, and Choi Yanghee. Route optimization using tree information option for nested mobile networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(9): 1717-1724.
- [5] Lu Li-hua, Ma Xiao-lei, and Liu Yuan-an. Route optimization solution for nested mobile network in local mobility domain with multiple local mobility anchors[C]. In International Symposium on Communications and Information Technologies, Sydney, 2007: 638-642.
- [6] Chuang Ming-chin and Lee Jeng-farn. DRO: domain-based route optimization scheme for nested mobile networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Budapest, 2009: 1-6.
- [7] Yi Myung-kyu, Myoung Dae-hee, and Yang Young-kyu. Paging extension for network mobility in nested mobile networks[C]. IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, 2008: 360-364.
- [8] Tsain Chun-shian. A high speed-based vehicular application for wireless network mobility (NEMO) enviroment[C]. Second International Conference on Computer and Network Technology, Wuhan, 2010: 162-167.
- [9] Shahriar A Z M, Mohammed Atiquzzaman, Inavcie W, *et al.* Route optimization in network mobility: solution, classification, comparison, and future research dicections[J]. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 2010, 12(1): 24-38.
- [10] Sangheon Pack, Taekyoung Kwon, Yanghee Choi, *et al.* An adaptive network mobility support protocol in hierarchical mobile IPv6 networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(7): 3627-3639.
- [11] Pack Sang-heon, Shen Xue-min, Mark J W, *et al.* Adaptive route optimization in hierarchical mobile IPv6 networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(8): 903-913.

葛国栋: 男, 1985 年生, 硕士生, 研究方向为可移动网络、移动通信.

汤红波: 男, 1968 年生, 教授, 研究方向为可移动网络、移动通信.

王晓雷: 男, 1982 年生, 讲师, 研究方向为可移动网络、移动通信.