

# NEMO 移动网络及其路由优化技术<sup>\*</sup>)

李俊 葛敬国

(中国科学院计算机网络信息中心 北京 100080)

**摘要** 网络移动(Network Mobility, NEMO)主要研究子网作为一个整体在全球互联网范围内移动过程中存在的网络可达性、效率和安全等方面的问题。本文介绍了 NEMO 基本支持协议以及嵌套 NEMO 网络的模型。在此基础上分析了当前几种嵌套 NEMO 网络的路由优化方案存在的问题,并给出了一个改进的路由优化方案。最后总结了当前 NEMO 网络部署中存在的问题。

**关键词** NEMO, 嵌套移动网络, 路由优化

## Network Mobility and the Technologies of Route Optimization

LI Jun GE Jing-Guo

(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Network Mobility(NEMO)is concerned with managing the mobility of an entire network to change its point of attachment to the Internet and thus its reachability, efficiency and security issues. This paper introduces the NEMO basic support protocol and the model of nested NEMO mobile network. Then some approaches to route optimization for nested mobile networks are explored and a new solution to route optimization is proposed. In the end, some issues on the deployment of NEMO are also discussed.

**Keywords** NEMO, Nested mobile network, Route optimization

## 1 引言

移动互联网融合了无线通信技术、互联网技术,是互联网技术在移动领域的扩展,包括移动 IP 和移动网络两个主要的研究领域。移动 IP<sup>[1,2]</sup>是一种在全球互联网上为移动节点提供移动功能的方案,它提供了一种特殊的 IP 路由机制,能够保证节点在移动过程中改变连接到任何链路上,在不改变现有网络 IP 地址、不中断正在进行的网络通信及不中断正在执行的网络应用的情况下实现对网络的不间断访问。移动 IP 技术主要解决针对单个移动终端的移动问题。随着 WLAN(Wireless LAN)、PAN(Personal Area Network)、CAN(Car Area Network)以及运动中的军队、飞行器、轮船、汽车和火车等运动主体上网络的逐步成熟和应用,人们希望将这些运动中的网络以一个相对稳定和可靠的形式连接到互联网,要求移动互联网不仅支持单个终端的移动,而且支持小、中规模的运动子网的移动。最初主要应用于军事领域,目前正逐渐进入商业领域,如汽车、消防、运输甚至是移动的零售网点与娱乐设施中。

支持移动的网络远比支持移动的终端复杂,移动网络内部不仅有一个或多个移动路由器(Mobile Router, MR),而且还有许多支持或不支持移动功能的主机。当前, IETF 成立了 NEMO(Network Mobility)工作组和 MANET(Mobile Ad-hoc Networks)工作组,分别研究不同类型的移动网络技术。

MANET 研究的 Ad hoc 网络是一种特殊的无线移动网络,具有无中心、自组织、网络拓扑动态变化等特点。网络的布署或展开无需依赖于任何预设的网络设施。结点通过分层

协议和分布式算法协调各自的行为,节点开机后就可以快速、自动地组成一个独立的网络。网络中所有节点的地位平等,没有严格的控制中心,是一个对等式网络。节点不仅具有普通移动终端所需的功能,而且具有报文转发能力,所有路由实现及多跳数据包转发必须由各节点自身完成。MANET 工作组关注 Ad-hoc 网络内部的路由协议标准。Ad-hoc 网络如何通过移动路由器与全球互联网的连接也是当前研究的热点之一<sup>[3~5]</sup>。

NEMO 工作组研究一个移动子网作为一个整体在全球互联网范围内变换接入位置时的移动管理和路由可达性问题。移动网络内部的网络拓扑相对固定,通过一台或多台移动路由器连接至全球的互联网。网络的移动对移动网络内部节点是完全透明的,内部节点不需要感知网络的移动,不需要支持移动功能。为区别其它的移动网络,我们称这种特征的网络为 NEMO 网络。

本文主要讨论 NEMO 网络的基于双向隧道的基本支持协议,同时研究了多重嵌套隧道的路由优化问题。

## 2 NEMO 网络模型

### 2.1 NEMO 网络基本支持协议

由于主机移动支持和网络移动支持具有不同的特征和需求,移动 IP 协议不能解决 NEMO 网络的移动支持问题。RFC 3963<sup>[6]</sup>扩展了移动 IP 协议,定义了一个新的协议以支持 NEMO 网络在移动过程中保证与互联网的连接和内部节点的通信不中断。通过在移动路由器(MR)和家乡代理(Home Agent, HA)之间运行 NEMO 基本支持协议,实现

<sup>\*</sup>)本文受中国科学院知识创新重大方向性项目(KGCX2-SW-102)资助。李俊 研究员、硕士生导师,主要研究方向为计算机网络体系结构、网络管理。

NEMO 网络与互联网的连接性与可达性,保证 NEMO 网络的移动对内部节点的透明性。

NEMO 网络由一个或多个移动路由器、本地固定节点 (Local Fixed Node, LFN) 和本地固定路由器 (Local Fixed Router, LFR) 组成。LFR 可以接入其它的移动节点 (Mobile Node, MN) 或 MR, 构成潜在的嵌套移动网络。NEMO 网络一般作为一个叶子网络, 可以移动到互联网的任意位置, 由 MR 管理并负责与外部互联网的连接。与移动 IP 机制类似, NEMO 网络在家乡链路上有一个路由器作为家乡代理 (HA)。NEMO 网络从家乡网络得到永久的 IP 地址前缀, 并通过 HA 对外宣告路由, MR 在家乡网络分配有家乡地址 HoAddr\_MR。图 1 说明 NEMO 基本支持协议的应用模型。

NEMO 基本支持协议实现 NEMO 网络的移动, NEMO 网络内部节点与其它节点通信过程如下:

1) 当 NEMO 网络离开家乡, 其 MR 接入访问链路。在访问链路上配置一个转交地址 (CoA\_MR), 然后 MR 向 HA 发送一个绑定更新消息。绑定更新消息设置标志 R, 并且可以包含 NEMO 网络前缀信息的可选报头。

2) 当 HA 收到绑定更新消息, 在缓存中建立 MR 的家乡地址 HoAddr\_MR 和转交地址 CoA\_MR 的绑定记录, 为 NEMO 网络的前缀建立转发表。

3) HA 向 MR 发送对绑定更新的应答消息。一旦上述绑定过程完成, 就已经在 HA 和 MR 之间建立了一条双向隧道。隧道的端点是 HA 和 CoA\_MR。

4) 如果从 NEMO 移动网络收到源地址属于 NEMO 网络前缀范围的数据包, MR 将数据包进行 IP-In-IP 封装后从这个隧道的相反方向转发给 HA。HA 解封收到的数据包并向目标通信节点 (Correspondent Node, CN) 转发。

5) 当 CN 向 NEMO 网络内节点发送数据包, 数据包首先会向 HA 转发。HA 收到数据包后, 通过双向隧道发送到 NEMO 网络的 MR, 再由 MR 解封后转发到相应的目标节点。

在 MR 和 HA 之间通过双向隧道运行一种路由协议, 实现路由信息的交互。在隧道接口上执行相关的路由协议, 但要防止 NEMO 网络的路由信息通过出口接口发布出去。通过运行路由协议, 在绑定更新消息中就不需要包含 NEMO 网络前缀的信息, HA 可以根据路由协议获取的信息直接建立 NEMO 网络的转发表。

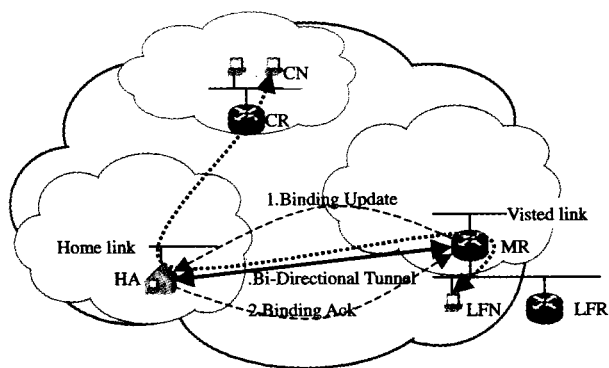


图 1 NEMO 基本支持协议模型

## 2.2 嵌套 NEMO 网络模型

由于 NEMO 网络的移动特性, 多个移动网络依次附着, 可以形成树型的嵌套 NEMO 网络。不支持移动功能的固定

路由器 LFR 永久地附着于 NEMO 网络, 主要负责本地的网络汇聚和分布。同时, 一些 NEMO 移动网络的 MR 也可以附着在上层的移动网络上, 并且本身也可以为其它移动网络提供附着点。这样, 移动网络层层嵌套, 如果将每个移动网络作为一个节点, 用其 MR 作为代表, 而且避免出现环状嵌套, 整个嵌套的移动网络就构成一种树型拓扑结构。

图 2 是一个 NEMO 网络嵌套的例子。MR1、MR2、MR3 分别代表一个 NEMO 移动网络, 其对应的家乡代理分别是 HA1、HA2、HA3。MR3 附着在 MR2 上, MR2 附着在 MR1 上, 而 MR1 移动到外地访问链路上, 形成了一个嵌套的 NEMO 网络。

MR3 网络内节点 LFN 和互联网上节点 CN 通信时, 若 MR 和 HA 之间采用 NEMO 基本支持协议, 则通信过程中需要采用嵌套的隧道技术。假设数据包的源地址和目标地址分别为 LFN 和 CN, 到达 MR3 后, 使用 MR3 的转交地址 CoA\_MR3 和其家乡代理地址 Addr\_HA3 作为隧道的端点源地址进行隧道封装。封装后的数据包依次到达 MR2、MR1 后, 同样执行上述封装过程, 隧道端点地址对分别是 (CoA\_MR2, Addr\_HA2)、(CoA\_MR1, Addr\_HA1)。数据包穿过 MR1-HA1 隧道到达 HA1 后, HA1 脱去数据包的外层封装。数据包继续沿中间层 MR2-HA2 隧道到达 HA2, HA2 再次脱去数据包的中层封装。然后数据包继续沿最内层 MR3-HA3 隧道到达 HA3, HA3 最后脱去数据包的内层封装。根据数据包的最初的目的地址, 数据包被转发到其目的节点 CN。CN 向 LFN 发送数据包的路由过程正好相反, 经过 HA3、HA2、HA1 进行嵌套层层封装, 在 MR1、MR2、MR3 层层解封, 最终到达随 NEMO 网络移动到外地的目标节点 LFN。上述数据转发的路径由多段路径组成, 经过多个 HA 多次改变路径, 如同钉球游戏中弹球的运动轨迹, 因此将此种转发过程称为“钉球路由 (Pinball Routing)”。

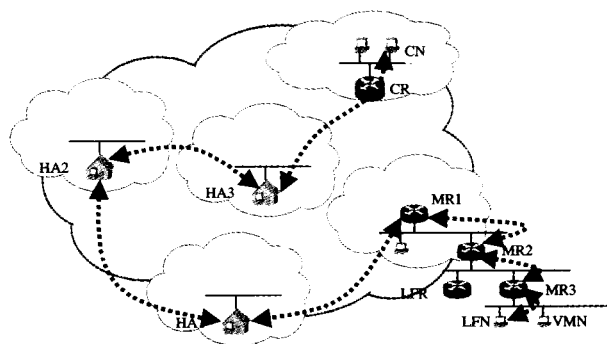


图 2 NEMO 网络嵌套举例

若一个移动 IP 主机附着在 NEMO 移动网络上, 作为访问移动节点 (VMN), 其本身将运行移动 IP 协议, 在移动网络内得到一个转交地址, 其注册过程和路由优化过程不需要特别处理, 与其移动到固定网络的外地链路上的协议流程一致, 只是数据的转发过程更加复杂。

考虑嵌套 NEMO 网络内部不同移动子网之间的通信问题, 可以发现虽然通信节点之间的物理网络位置可能比较近, 但是路由过程与前面的路由过程一样复杂, 需要经过多次隧道封装/解封, 而且存在重复路径问题, 绕道经过外面的各级家乡代理 HA 后再返回进入移动网络。

## 3 NEMO 移动网络几种路由优化模型

NEMO 网络内部一般包含多个与外部互联网通信的节

点。与单个移动主机相比,通过 HA-MR 隧道转发数据需要更多的链路带宽和设备转发能力。HA-MR 隧道降低了网络的效率,家乡网络参与移动网络数据的中转也容易成为网络的瓶颈。当存在嵌套的移动网络时,上述问题更加严重,多重隧道和钉球路由严重地降低了 NEMO 网络的性能。因此,优化 NEMO 网络的数据转发路径和提高网络的效率是 NEMO 网络的一个重要的研究内容。文[7、8]分析了 NEMO 网络特有的路由优化问题并提出了一些可能的解决方案。NEMO 网络路由优化包括两个部分内容:一部分是基于互联网路由结构的路由优化;一部分是嵌套 NEMO 网络的路由优化问题<sup>[9]</sup>。

基于路由结构的优化方案通常由与通信双方位置最近的经过扩展的特殊路由器完成。一种是基于 CR(Correspondent Router)的路由优化方案,CR 指与通信节点 CN 最近的路由器,在 NEMO 移动网络一侧一般由 MR 承担。通过 MR 与 CR 的信令消息的交互,一方面解决需要 HA 转发的“三角路由”问题,在 MR 和 CR 之间建立直接的隧道,另一方面也为通信双方节点提供透明的移动性支持。路由优化可以在转发路径的两个方向上独立进行;MR 确定通信相关的 CR 后,与 CR 建立一条隧道,设置一个通过隧道到达 CN 的路由,与 CN 通信的流量不再经过 HA 转发;CR 处于从 CN 到 HA 的路径上,它必须能够感知到 MR 和 MR 所在的 NEMO 网络的存在,建立合适的隧道和路由。如何确定与通信节点 CN 接近的 CR 是一个困难,尤其当 CN 存在多宿连接,通过多个路由器与外部互联的情况下,CR 的选择比较复杂。

另一种基于路由结构的优化方案是分布式锚点路由器方案(Distributed Anchor Routers),它进一步扩展了基于层次化移动 IPv6(Hierarchical Mobile IPv6, HMIPv6)<sup>[10]</sup>的路由优化方案。在互联网上分布着一些特殊的支持移动锚点(Mobility Anchor Point, MAP)功能实体的路由器,它们作为本区域移动网络的区域家乡代理。MR 从其最近的移动锚点路由器获取一个区域转交地址 RCoA(Regional Care-of Address)。来自移动 NEMO 网络的数据包首先经过隧道发送给一个最近的移动侧锚点路由器 M-AR。M-AR 解开隧道封装后,根据数据包的目标地址将数据包通过隧道发给距离通信节点 CN 最近的锚点路由器 C-AR。C-AR 将数据包解封后发给相应的 CN。通过引入锚点路由器,可以将移动 NEMO 网络的移动区分为宏观移动和微观移动。微观移动指移动 NEMO 网络在某个移动锚点路由器管理的区域内移

动,由该移动锚点路由器充当本地的家乡代理。绑定更新过程只需要在 MR 和本地移动锚点路由器之间进行,将切换过程的影响控制在区域范围内,既减小了地址绑定更新过程的延时,又减小了信令消耗,并且绑定更新过程完全对 HA 和 CN 透明。宏观移动指 NEMO 网络移动到其它区域时,绑定更新过程与 NEMO 网络基本支持协议一样,需要 HA 的参与。基于移动锚点路由器的方案实现起来比较复杂,一方面需要移动锚点路由器管理本区域内部的网络移动,另一方面需要和互联网上其它的移动锚点路由器交互获取各自管辖范围的信息。

由于 NEMO 网络的移动性导致了嵌套的 NEMO 网络,从而出现 NEMO 网络特有的嵌套隧道的路由优化问题。当存在嵌套 NEMO 网络时,通信双方的数据包需要经过多重的封装和解封装,数据转发路径也呈现曲折的“钉球路由”,不仅增加了通信的延迟,也大大耗费了网络资源。文[11]提出了一个基于源路由的可伸缩隧道方案,避免嵌套的多重隧道封装。该方案引入 RRH(Reverse Routing Header)路由,报头记录嵌套网络内部的路由,返回移动 NEMO 网络的数据包依据 RRH 记录的路由采用源路由机制在嵌套的 NEMO 网络内部进行路由转发。

考虑图 2 嵌套网络中节点 LFN 和 Internet 中 CN 通信过程,基于源路由的可伸缩隧道方案中路由优化过程如下:与 LFN 最近的 MR3 收到从 LFN 发出的数据包后,一方面依据 NEMO 网络基本支持协议的规定在 MR3 和它的家乡代理 HA3 之间建立一个双向隧道,以 MR3-CoA 和 Addr-HA3 作为隧道的端点源地址进行隧道封装,同时附加一个扩展的 RRH 路由报头。RRH 报头预留了多个槽位,用于记录嵌套网络的反向路径,最底层槽位记录的是 MR3 的家乡地址 MR3-HoA。封装后包被转发到反向路径的下一跳 MR2,MR2 注意到该包已经包含一个 RRH 的扩展报头,因此 MR2 不再执行 NEMO 基本支持协议建立双向隧道,而是修改封装包的内容,将封装报头的源地址 MR3-CoA 填入 RRH 路由报头的空闲槽位,以自己的地址 MR2-CoA 覆盖封装报头的源地址。一直到反向路径的顶层移动路由器 MR1 做同样的类似处理,封装包离开 MR1 后包格式如图 3。最初的 MR3 到 HA3 的反向隧道的端点从 MR3-CoA 伸缩到 MR2-CoA、MR1-CoA。HA3 注意到 RRH 路由报头,在 CACHE 内增加一条与 MR3 相关的绑定记录,内容是封装包的源地址 MR1-CoA 和 RRH 中记录的地址序列。

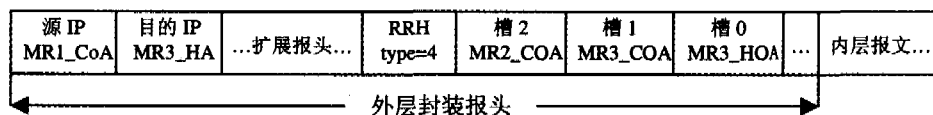


图 3 携带 RRH 的数据报格式

从 CN 发往 LFN 的数据包首先被发送到 HA3,HA3 首先查找绑定记录表,以 HA3 和 MR1-CoA 分别作为隧道的两端封装数据包,同时增加路由报头 RH,其中内容根据相应

的 RRH 构造。图 4 是携带源路由报头的数据包格式示意图。

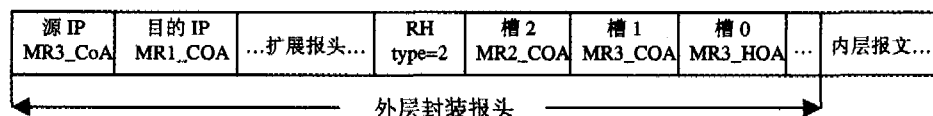


图 4 携带 RH 的数据报格式

数据包发送到 MR1-CoA 后,其中的 RH 内容包含了数据包在嵌套 NEMO 网络中的路由,此时数据包按照源路由机制转发。MR1 取出 RH 头部的首地址 MR2-CoA 更新目标地址,同时修改 RH 头部,删去最外层的地址。MR2 执行同样的操作,直到数据包到达隧道的最终端点 MR3。MR3 脱去数据包的隧道封装,将数据包转发到目的端点 LFN。这个方案可以优化嵌套 NEMO 网络的“弹球路由”,但是保留了叶子 MR 与其 HA 之间的双向隧道。

文[9]的方案与上述方案类似,引入一个 Hop-by-Hop 扩展报头 PCH(Path Control Header),记录嵌套网络内部的路由,附加在 HA 向 CN 转发的数据包中。由于采用 Hop-by-Hop 机制,HA 到 CN 中的每个路由器都处理这个数据包,并且建立该路由器与嵌套 NEMO 树顶层 MR 的优化隧道,CN 和 LFN 之间的通信不再需要经过任何 HA 的转发。这种优化方案存在严重的可扩展性和状态一致性维护问题。大量路由器需要存储维护这些移动优化路由,产生大量的绑定更新消息,同时当 NEMO 网络移动到新的位置后,一些优化隧道可能无法更新而出现错误的转发。

#### 4 一种改进的路由优化方案

为彻底解决 NEMO 移动网络需要 HA 中转的“三角路由”和嵌套 NEMO 网络路由优化问题,我们在借鉴 MIPv6 的路由优化和基于源路由的可伸缩隧道机制的基础上,提出一种改进的路由优化方案。该方案要求 CN 支持 NEMO 优化,需要建立一个 Cache 包含 NEMO 网络前缀和嵌套 NEMO 网络内部路由的绑定记录。LFN 与 CN 通信最初执行基于源路由的可伸缩隧道机制,用 RRH 沿途记录嵌套 NEMO 网络内部的路径,此时由 HA 完成 LFN 与 CN 之间的流量中转,在嵌套 NEMO 网络内部采用源路由技术。HA 维护 NEMO 内部网络前缀和 RRH 地址序列的绑定记录,同时向 MR 宣告这条绑定记录。MR 感知到 LFN 与 CN 之间的会话,向 CN 发出绑定更新消息,包含 MR-CoA、当前 NEMO 内部网络前缀和嵌套 NEMO 网络内部路由的绑定记录。CN 收到绑定更新消息后,增加一条绑定记录,并向 MR 发送绑定应答。MR 收到绑定应答后,为 CN 建立一个绑定记录。此时 LFN 向 CN 发送的数据包到达 MR 后,首先查找绑定记录 Cache,若查找成功,则源地址修改为 MR-CoA,目的地址为 CN,插入家乡地址选项和源路由地址选项,源路由的内容是嵌套 NEMO 网络内部的路由。依照源路由机制数据包穿过嵌套的 NEMO 网络到达顶层 MR 并按照正常路由到达 CN。CN 收到数据包后用家乡地址选项报头内的地址替换源地址,交到上层协议栈。从 CN 向 LFN 发送数据,首先查找绑定记录 Cache,若 LFN 地址前缀与 NEMO 网络前缀匹配,则插入源路由报头,将绑定记录中的嵌套路由放在源路由中。

改进的路由优化方案在嵌套 NEMO 树的叶子节点 MR 和 CN 之间建立直接的路由优化隧道,不再存在多层的嵌套隧道和通过 HA 中转的“三角路由”问题,路由效率最高。另外,不需要 CR 参加,减少了因选择 CR 的复杂性。但当嵌套 NEMO 网络内部拓扑改变,必须维护嵌套网络内部路径与源路由指示的路径的一致性,否则会造成 NEMO 网络不可达。一种解决办法是当嵌套树上的某个 MR 变换位置时,需要通知以其为根的各子树上的 MR 路由器,更新这些 MR 到顶层的 TLMR 的路径,并重新维护优化隧道的内容。

**总结** NEMO 基本支持协议采用双向隧道,可以为移动

网络中节点提供移动透明性支持,但是双向隧道技术存在明显的效率问题。封装操作和三角路径消耗更多的网络资源,增加了数据包的延迟和丢报的概率,尤其在多重嵌套 NEMO 网络中更加明显。路由优化是提高 NEMO 网络通信效率的关键,当前已经提出了多种路由优化方案。本文在 MIPv6 的路由优化机制和基于源路由的可伸缩隧道机制的基础上,提出一种改进的路由优化方案,可以彻底解决三角路由和嵌套网络的钉球路由问题。

除了路由优化问题之外,NEMO 网络的部署与实施中还有一些其他问题需要解决。这些问题主要涉及可扩展性、安全和多宿主等方面。NEMO 网络可扩展问题主要讨论在不需修改互联网上通信节点条件下,保证 NEMO 网络在快速变化附着位置时网络的可达性和会话的持续性,要求考虑支持 NEMO 的机制对 HA 和 MR 的可扩展性以及互联网路由会聚特性的可扩展性问题。

NEMO 网络可以参考移动 IP 的安全机制<sup>[12]</sup>,主要考虑 HA 与 MR 之间的信令消息以及一些路由优化消息的安全问题,一般采用 IP Sec 机制以及源地址过滤等技术,防止受到 IP 欺骗攻击和 DOS 攻击。

移动网络与互联网的典型连接方式是通过无线链路连接,而无线链路不稳定和带宽有限的特点要求 NEMO 网络支持多宿连接<sup>[13]</sup>。但引入多宿主连接,在带来可靠性、可用性的同时,也将带来 NEMO 网络协议的复杂性,需要进一步研究。

#### 参考文献

- Perkins C E. IP Mobility Support for IPv4. RFC 3344, IETF, August, 2002
- Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility Support in IPv6. RFC 3775, IETF, June, 2004
- Corson M S, Macker Gregory J P, Cirincione H. Internet-Based Mobile Ad Hoc Networking. IEEE Internet Computing, 1999, 3 (4): 63~70
- Wakikawa R, Malinen J T, Perkins C E, et al. Global Connectivity for IPv6 mobile ad hoc networks. IETF, July 2002
- Xie Bin, Kumar A. Integrated Connectivity Framework for Internet and Ad hoc Networks. The 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, Fort Lauderdale, Florida, USA, 2004
- Devarapalli V, Wakikawa R, Petrescu A, et al. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol. RFC 3963, IETF, January 2005
- Ng C, Thubert P, Watari M, et al. Network Mobility Route Optimization Problem Statement. draft-ietf-nemo-ro-problem-statement-00, Internet-draft, IETF, 2005
- Thubert P, Molteni M. Taxonomy of Route Optimization Models in the NEMO Context. IETF draft-thubert-nemo-ro-taxonomy-02 (work in progress), 2004
- Na Jongkeun, Choi Jaehyuk, Cho Seongho, et al. A Unified Route Optimization Scheme for Network Mobility. In: Proc. 9th Intl Conference on Personal Wireless Communications (PWC) 2004, Delft, The Netherlands, 2004
- Castelluccia C. HMIPv6: A Hierarchical Mobile IPv6 Proposal. ACM Mobile Computing and Communication Review (MC2R), 2000
- Thubert P, Molteni M. IPv6 Reverse Routing Header and its application to Mobile Networks. draft-thubert-nemo-reverse-routing-header-05, Internet-Draft, IETF, 2004
- Arkko J, Devarapalli V, Dupont F. Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling between Mobile Nodes and Home Agents. RFC 3776, 2004
- Ernst T. Analysis of Multihoming in Network Mobility Support. draft-ietf-nemo-multihoming-issues-02, Internet-Draft, IETF, 2005