

# VANET 中基于移动 IPv6 的快速切换策略研究

张建明<sup>1</sup> 赵利杰<sup>1</sup> 冯 霞<sup>2</sup>

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)<sup>1</sup>

(安徽大学信息保障技术协同创新中心 合肥 230601)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对车载自组织网络在城市道路车流量大的情况,车辆在不同的路边基站之间频繁地进行上下文切换,从而导致 IPv6 的移动性支持协议切换时延过长的问題,提出了一种基于代理移动路由的快速切换方案。采用代理移动路由在 3G/WiMAX 通信域的切换触发其它 802.11p 通信域内的车辆发生切换的方法,来达到宏切换与微切换相结合的目的,从而实现批量式快速切换。分析结果表明,该方案较现有方案提高了切换效率,减小了切换时延。

**关键词** 车载自组织网络,IPv6 移动性,代理移动路由,快速切换

**中图法分类号** TP393.0 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.017

## Fast Handover Strategy Research Based on Mobile IPv6 in VANET

ZHANG Jian-ming<sup>1</sup> ZHAO Li-jie<sup>1</sup> FENG Xia<sup>2</sup>

(School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)<sup>1</sup>

(Collaborative Innovation Center of Information Security Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In vehicle ad hoc network (VANET), vehicles need to switch from one road side unit (RSU) to another one frequently in urban traffic congestion, resulting in a long handoff delay of IPv6 mobility support protocol. A fast handover scheme based on proxy mobile router was proposed as a solution to the problem. The method that proxy mobile router's switching in 3G/WiMAX communication domain triggers the handover of other vehicles in 802.11p communication domain was proposed to achieve the purpose of combining macro switch with micro switch. And then, this method can achieve the goal of mass fast switching. The analysis shows that this scheme is superior to other existing programs in switching efficiency and handoff delay.

**Keywords** VANET, IPv6 mobility, Proxy mobile router, Fast handover

## 1 引言

随着经济社会的快速发展,汽车已然成为人们必不可少的出行工具。智能交通、智慧城市等概念的提出使得车载自组织网络 (Vehicle Ad Hoc Network, VANET) 成为研究热点。VANET 是将车辆作为移动节点 (Mobile Node, MN), 通过车与车通信 (Vehicle to Vehicle, V2V) 以及车与路边基站通信 (Vehicle to Infrastructure, V2I) 而自发形成的网络, VANET 在路径导航、安全驾驶以及交通流量诱导等方面有着广泛的应用前景。不同于传统的移动自组织网络 (Mobile Ad Hoc Network, MANET), VANET 的特征在于车辆移动速度快、网络拓扑变化迅速且无中心、通信链路极不稳定等,但是其优势在于车辆总是沿道路行驶,因此节点移动具有方向性和目的性。不同于传统的 MANET, VANET 的固有特性决定了适用于 MANET 的网络协议、认证方案等不能够完全适应 VANET 环境。相关学者提出 DSDV、GPSR 等路由协议以及各种轻量级认证方案及隐私保护方案以适应 VANET

环境,上述研究均基于一个假设的前提,即车辆已配置好基本的网络参数并建立了有效的通信链路,网络层可以正常为应用层提供支持服务。但实际上,随着车辆的高速移动和拓扑的快速变化,通信链路维持时间非常短暂,对于 V2I 通信来说,这一点尤为突出。因为在传统的 MANET 环境下,节点移动缓慢并且移动范围有一定的局限性,所以节点在通信基站之间的切换不会很频繁,即使发生切换,数据传输量也是有限的。然而在 VANET 环境下,由于路边基站的信号覆盖范围有限并且节点的移动一般不会局限于同一路边基站信号覆盖范围内,这就会导致节点在不同的路边基站之间频繁切换,当前车载应用不再局限于少量的数据传输,娱乐性以及实时性的应用业务占有相当大的比例,用户的多元化需求对 VANET 的服务质量提出更高的要求,用户希望在 VANET 环境中能够享受到同在固定部署网络中同样稳定的网络服务。同时,鉴于当前城市交通状况堪忧,大量汽车可能突发地向同一路边单元 (Road Side Unit, RSU) 发出移动切换请求,这对路边基站的处理性能也提出了更高的要求,因此能否提高移

到稿日期:2015-08-20 返修日期:2015-11-26 本文受国家自然科学基金(61472001)、镇江市工业支撑计划项目(GY2013030)资助。

张建明 男,教授,主要研究方向为物联网与安全协议,E-mail:15751011537@163.com;赵利杰 男,硕士生,主要研究方向为车联网移动 IP 技术,E-mail:739741573@qq.com;冯霞 女,博士生,主要研究方向为车联网网络协议,E-mail:fengx.ahu@foxmail.com.

动性管理的效率、降低数据传输过程中的丢包率、缩短切换时延,决定着 VANET 是否能够承载大量的实时性应用业务以及更好的服务能力。

## 2 相关研究

互联网工程任务组(IETF)于2005年提出 Network Mobility(NEMO)basic support protocol<sup>[1]</sup>, NEMO 协议定义了车辆内部无线网环境中的一组节点(MNNs)通过随车携带的移动路由(MR)访问 RSU,通过 MR 与 RSU 之间的切换信令交互,为 MNNs 提供透明的互联网接入方案。根据 NEMO 协议的定义,承载车辆在不同的 RSU 之间切换的网络实体是 MR,即移动性支持协议的承载实体是 MR 和 RSU。为支持网络的移动性,较早提出的移动性支持协议是 MIPv4,该协议是在原有 IPv4 协议上的补充性协议,切换性能较差,并且 IPv4 全球地址已枯竭,因此该协议已不再适用于新型的 VANET,取而代之的是 MIPv6<sup>[2]</sup>。该协议在设计之初已考虑到节点的移动性,在地址自动配置、安全机制以及透明性的实现等方面具有明显优势,但是切换性能仍然不能达到 VANET 中高速行驶车辆的性能要求。切换性能主要包括平滑切换和快速切换,平滑切换旨在降低切换过程中的丢包率,尽量使车辆在不同 RSU 之间切换时感知不到链路的断开与重建;快速切换着重于降低切换过程所耗费的时间,即切换时延。切换过程包括二层切换(L2)和三层切换(L3),二层切换指的是 MR 对于信噪比的检测及无线信道的切换等;三层切换是网络层的切换,包括移动检测(MD)、重复地址检测(DAD)和位置绑定更新(REG)。移动性支持协议所提出的优化切换方案均属于三层切换。

在移动节点和其 HA 之间更新位置信息的信令交互会影响正常的通信,造成数据包丢失, HMIPv6<sup>[3]</sup> 引入移动锚点(MAP), MAP 能够绑定移动节点的当前位置(LCoA), 发送至移动节点的数据包由 MAP 代理接收并转发至目的地, MAP 能够有效减少移动节点在外地链路和 HA 位置更新信令交互的次数,从而提高切换性能。但对于 VANET 拓扑来说,由于节点的移动速度快,虽然不同 MAP 之间的切换仅需绑定 LCoA,但不同的接入路由(AR)之间的切换仍需要 HA 的参与。

上述移动性支持协议均是基于移动节点的,即移动性管理相关信令需要移动节点的参与,移动节点需要安装相应的移动协议栈。不同于上述协议, PMIPv6<sup>[4]</sup> 是一款基于网络的移动性支持协议,该协议定义移动接入网关(MAG)和本地移动锚点(LMA), MAG 向移动节点发送包含有归属地网络前缀的路由通告,能够仿效移动节点的归属地链路。从 PMIPv6 网络域内被授权移动节点的角度来看,接入点的切换对移动节点来说是透明的, PMIPv6 虽然保证了移动节点不参与移动信令的发送与处理,但是将移动性管理的压力转嫁到 MAG 和 LMA 之间的网络,在 VANET 环境车辆较多的情况下, MAG 与 LMA 之间需要大量交互代理绑定更新(PBU)和代理绑定更新确认(PBA),车辆的快速移动导致的频繁切换也会使得 MAG 和 LMA 之间的隧道不断地建立和撤销,造成网络性能下降。

针对切换过程中地址配置和 DAD 耗时过长的问题, Arnold 等人提出地址传递方案<sup>[5]</sup>, 该方案将即将离开当前 RSU 的车辆所使用的地址信息直接交付给下一个即将进入该 RSU 的车辆使用,降低了地址回收与再分配的时间和 DAD 时延,但是该方案要求每一车载单元(OBU)在离开 RSU 时要执行复杂的地址传递进程,导致 OBU 处理其它应用层数据效率低下。Maria 等人提出基于 Leader 的地址分配方案<sup>[6]</sup>,利用车辆沿道路行驶的特性,组成 Leader 链,属于 Leader 管理范围内的车辆不需要频繁更换通信地址,仅在 Leader 改变时更换通信地址。基于 Leader 的方案虽然不必要求每辆车均执行复杂的进程,但是 Leader 链的维护较为困难,造成被选为 Leader 的车辆开销负载过重。

文献[2-6]引入的切换方案均是从 MD、DAD 以及 REG 等方面寻求改进以提高切换性能,与上述方案不同, Koodli 提出一种 FMIPv6<sup>[7]</sup>快速切换方案,该方案的基本思想是将三层切换提前至二层切换之前完成,即车辆在即将进入下一 AR(NAR)甚至还停留在当前 AR(PAR)通信范围内之前就已经配置好 NAR 链路上的相关网络参数。在降低数据包丢失率方面, FMIPv6 通过快速绑定更新(FBU)重定向发往 MR 的数据流,二层链路断开产生的不可达数据流,利用隧道技术转发至 NAR 缓存。相关研究者还提出 FHMIPv6<sup>[8]</sup>, FPMIPv6<sup>[9]</sup>以及 FP-NEMO<sup>[10]</sup>等更加高效的快速切换方案,这些方案的基本思想是将 FMIPv6 的提前切换机制引入到 HMIPv6 和 PMIPv6 等协议中。FMIPv6 虽然在一定程度上减少了切换时延和丢包率,但是鉴于当前城市交通压力日益繁重以及车载应用多元化的情况, FMIPv6 所定义的 PAR 与 NAR 之间的双向数据隧道拥塞问题成为提升切换性能的瓶颈。Seonggeun 等研究者提出增强型的快速切换技术 EfNEMO<sup>[11]</sup>, 该技术通过在 FBU 消息和切换初始化消息(HI)中嵌入尝试性绑定更新消息(TBU),与 FMIPv6 相比在时序上更快地向 HA 绑定位置信息,因此发往 MR 的数据不需要隧道技术重定向,由 HA 直接发送至 NAR 缓存即可。EfNEMO 虽然降低了通信隧道的启用频率,但是鉴于当前的城市交通流量较大的状况,在 VANET 环境下必须考虑较多的车辆在某一小段时间内向 AR 发送较多的切换请求,在 AR 处理能力有限的情况下势必造成响应不及时,网络内产生大量的超时消息及重传信息,从而使切换性能不佳,最终导致网络的整体性能下降。

## 3 代理 MR 在 VANET 中的实现方案

为了减少 MR 的切换请求,从而提高 AR 的切换响应速度,进而减少触发反应式切换的可能性,进一步降低切换过程中的数据包丢失率和切换时延,本文提出一种通过代理 MR 连接到 AR 的方法,即大多数车辆不需要配置 MR,通过部分车辆的公用 MR 即可访问到 AR,显著减少了 MR 的数量,从而提高切换效率。

### 3.1 基本网络架构

本方案的基本网络架构如图 1 所示,仅在一部分节点上配置有公用 MR,其它移动车辆(Mobile Vehicle, MV)配置车载单元(On board Unit, OBU),该 OBU 支持 802.11p 通信

协议,MR集成多种通信模块以支持多种模式的通信,包括3G通信模块、Wi-Fi模块以及802.11p通信模块。MR利用Wi-Fi模块提供网络内部移动节点(Mobile Nodes, MNs)的互联网接入点;通过802.11p模块向MV提供移动状态下的互联网接入点,MV通过车载自组网的路由协议经多跳连接至MR,MV不需要携带MR,通过选择合适的MR作为其代理MR从而访问互联网。整个网络划分为两个通信域,即3G\WiMAX通信域(MR与AR之间的通信)和802.11p通信域(车辆之间短距离通信)。VANET通过代理MR访问互联网的方案不仅有效减少了MR的数量,而且大量MV的切换不需要AR的干预,从而提高了AR的切换响应速度;同时MV在AR之间的切换是随MR而进行的,MV省略了MD过程和繁琐的快速切换信令的交互过程。

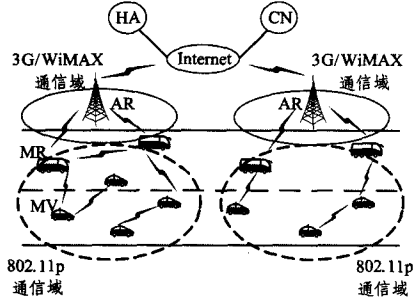


图1 网络架构图

### 3.2 数据包传输流程

基于图1所示的基本网络架构,下面阐述由CN发出或目的地是CN的数据包传输过程。以CN向802.11p通信域内某一漫游到外地链路的MV发送数据包为例:1)CN将数据包发送至MV的归属地代理HA;2)HA维持的BCE记录了该MV漫游到外地链路上的CoA,将数据包转发至MV所在的外地链路的AR;3)AR广播ARP请求以期获得相应MV的MAC地址;4)广播域内的所有代理MR通过代理ARP协议处理该ARP请求,为该MV提供互联网接入点的代理MR则回复该ARP请求;5)AR将数据包转发至相应的代理MR;6)代理MR将数据交付至目的地MV,数据传输结束。

## 4 节点移动漫游的快速切换

考虑到车辆相对速度的差异性,导致MV在移动过程中可能会选择不同的MR作为其代理MR,由于MV可以通过多跳连接至代理MR,因此MV一旦选定代理MR,则可能维持较长的时间不发生切换,代理MR在不同AR之间的切换也会触发其代理的MV节点向各自的HA发送绑定更新。本文定义了微切换和宏切换两种切换机制,为避免协议解读的二义性,本文采用协议形式化描述技术(FDT)对该协议的性质作进一步详述。

### 4.1 时序逻辑系统

FDT贯穿于协议开发的各个阶段,在协议工程中是获得协议规范的唯一方法,能够提供对协议无二义性的描述。本文的FDT采用Manna等提出的时序逻辑系统MPTL<sup>[12]</sup>,MPTL只使用“现在状态”和“将来状态”,不考虑“过去状态”。使用的时序逻辑所使用的符号、谓词及个体变量等含义如表1所列。

表1 TL所使用的符号对照表

符号	含义
◇	系统的某时
▽	直到
□	总是为真
?	数据接收
!	数据发送
→	蕴含
↔	等同于
∧	逻辑并列
M <sub>x</sub>	X类型消息
D <sub>y</sub>	由Y发送的应用数据
tunnel	置0或1表示隧道建立与撤销
success()	切换成功
after	在某个事件发生之后
at	在某个事件开始时

### 4.2 MV在代理MR之间的微切换机制

网络协议的微切换机制协议实体集合定义为 Entity = {MV, pMR, nMR, AR, HA},微切换机制的协议实体性质描述如下:

$$(1) \text{性质 } A_1: \diamond \text{after}(MV ? M_{Hello}) \rightarrow \square \diamond \text{at}(MV ! M_{NR}) \vee \text{after}(pMR ! M_{NRack})$$

该性质表示微切换系统某时刻MV一旦接收到周围车辆发送的Hello数据包后,开始向pMR发送邻居注册消息(Neighbor Register, NR)。微切换初始阶段MV会接收周围车辆定期广播发送的Hello数据包,以获取nMR的相关信息。不同于移动节点在固定部署的AR之间的切换,相邻的AR之间的信息是预先注册好的,而MR的移动是随机的,因此MV解析收到Hello数据包后,封装NR消息发送给pMR, NR消息包括发送方的MAC地址和nMR的CoA等。

$$(2) \text{性质 } A_2: \diamond \text{after}(MV ? M_{NRack}) \wedge (\text{tunnel} = 1) \rightarrow \square \diamond \text{at}(nMR ? D_{AR}) \vee \text{after}(nMR ? M_{MBU})$$

该性质表示微切换系统的MV在某一时刻接收到邻居注册确认消息(NRack)并且pMR与nMR建立了通信隧道后,nMR开始接收并缓存由AR发送给pMR进而通过隧道转发的实时应用数据流,直到接收到MAC地址绑定更新消息(MAC Binding Update, MBU)为止。pMR获取到nMR的CoA后,即可与nMR之间建立通信隧道,并在微切换MAC地址表(Micro-Handover MAC Table, MHMT)中记录发生微切换MV的MAC地址。当发送给正在执行微切换进程的MV的数据包到达pMR时,pMR查看MHMT的记录信息,将数据包由pMR通过隧道转发至nMR暂时存储,MV向nMR发送MAC地址绑定更新消息(MAC Binding Update, MBU),其作用是向nMR的代理ARP进行MAC地址的注册。

$$(3) \text{性质 } A_3: \text{after}(nMR ? M_{MBU}) \wedge \text{after}(MV ? D_{nMR}) \wedge \text{after}(pMR ? M_{MBA}) \leftrightarrow \text{success()} \wedge (\text{tunnel} = 0)$$

该性质表示一旦nMR接收到MBU消息,MV接收缓存在nMR中的数据并且pMR接收到MAC地址绑定更新确认(MBA)之后,撤销隧道,微切换结束。

### 4.3 代理MR在AR之间的宏切换机制

代理MR在AR之间的宏切换过程可以分为两个部分,第一部分是代理MR在AR之间的切换,这一部分的切换沿用FMIPv6或者EfNEMO的切换方案,这里不再赘述;第二部分是随代理MR的切换而切换的MV。宏切换机制充分利用了IPv6的地址自动配置机制,MV的端口只需要获得附着链路的网络前缀即可自动配置该端口的IPv6地址,而繁琐的

快速切换工作交由代理 MR 完成。宏切换机制的网络实体集合定义为  $\text{Entity} = \{MV\text{-}HA, MV, \text{proxyMR}, \text{pAR}, \text{nAR}, \text{MR}\text{-}HA\}$ 。本文对该机制的协议实体性质描述集中在代理 MR 和其所代理的移动节点之间,至于代理 MR 与 AR 之间的快速切换,参考文献[8,12]的详尽解释。

(4)性质  $B_1: \diamond \text{after}(\text{proxyMR} ? M_{RA}) \rightarrow \square \diamond \text{at}(\text{proxyMR} ! M_{MNP}) \nabla \text{after}(\text{proxyMR} ? M_{MNPack})$

该性质表示在系统某一时刻一旦代理 MR 接收到 RA 消息,就向其代理的 MV 发送网络前缀 MNP 消息,直到接收到确认消息 MNPack 为止。通过代理 MR 接收到网络前缀的车辆提前配置 nCoA,确认信息包括 nCoA 和 pCoA 的绑定信息。

(5)性质  $B_2: \diamond \text{after}(MV ! M_{MNPack}) \rightarrow \square \diamond \text{at}(MV ! M_{BU}) \nabla \text{after}(MV ? M_{BA})$

该性质表示一旦 MV 接收到其代理 MR 发送的 MNP 消息,意味着 MV 提前配置相关网络参数,与其归属地代理交互绑定更新和确认。当代理 MR 与 nAR 建立连接后,暂时缓存在 nAR 中的消息转发至代理 MR,代理 MR 通过各个 MV 发送的 nCoA 与 pCoA 的绑定信息将数据包转发至 MV。

## 5 性能分析

本节主要针对 EfNEMO 协议和本文所提出的基于代理 MR 的协议(proxyMR)在移动切换过程中的切换时延进行对比分析,EfNEMO 和 proxyMR 均使用 FMIPv6 协议用以支持移动性切换。切换时延定义为:代理 MR 发送 RS 消息开始到 CN 发送的第一个数据包到达 MV 结束。因此,基于 proxyMR 的 NEMO 网络切换时延可以表示为:

$$T_{\text{proxyMR\_NEMO}} = T_{L_2} + T_{\text{proxyMR\_MD}} + T_{\text{DAD}} + T_{\text{REG}} \quad (1)$$

由于将代理 MR 所代理的 MV 车辆视为一个整体切换,因此仅有少量的代理 MR 执行 MD 过程,大量 MV 不需要执行 MD 过程。

定义某一时刻,在相邻的 AR 之间需要进行切换的节点总数为  $n$ ,若不使用代理 MR 进行切换,那么  $n$  个节点均带有各自的 MR,切换过程退化为 EfNEMO 协议切换,若使用代理 MR 的方式进行移动切换,那么  $n = n_{MV} + n_{MR}$ ,  $n_{MV}$  表示 MV 的节点数,  $n_{MR}$  表示 MR 的节点数,  $n_{MR}$  远小于  $n_{MV}$ , 平均每个代理 MR 为  $k$  个 MV 节点提供代理服务。

$$k = \lceil n_{MV} / n_{MR} \rceil \quad (2)$$

长度为  $L$  的消息  $X$  在有线链路的传输时延  $t_w(L_X)$  和无线链路的传输时延  $t_{wl}(L_X)$  表示如下:

$$t_w(L_X) = L_X / B_w + T_w + T_{\text{process}} + T_{\text{wait}} \quad (3)$$

$$t_{wl}(L_X) = (1 + p_{wlf} / (1 - p_{wlf})) \cdot (L_X / B_{wl} + T_{wl} + T_{\text{process}} + T_{\text{wait}}) \quad (4)$$

其中,  $B_w$  和  $B_{wl}$  分别表示有线带宽和无线带宽,  $T_{\text{process}}$  表示数据的处理时间,表示数据排队等待处理的时间,可以表示为:

$$T_{\text{wait}} = \eta \cdot (L_X / B_{wl} + T_{wl} + T_{\text{process}}) \quad (5)$$

$p_{wlf}$  表示无线传输失败的概率,  $T_w$  和  $T_{wl}$  分别表示数据在有线链路和无线链路上的传输时延。

基于 proxyMR 的 NEMO 网络的切换时延表示为:

$$T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{EF} = p_{mf} \cdot T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{EF} + (1 - p_{mf}) \cdot T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{EF} \quad (6)$$

$$T_{\text{proxyMR\_NEMO}} = T_{L_2} + T_{\text{proxyMR\_MD}} + T_{\text{DAD}} + T_{\text{REG}} \quad (7)$$

其中,  $p_{mf}$  表示 EfNEMO 预测式切换失败的概率,分析模型

采用城市部分模型<sup>[13]</sup> (City Section Mode, CSM), 则  $p_{mf} = 1 - e^{-\lambda \cdot T_{L_3}}$ , 其中  $\lambda = \frac{1}{T_r \cdot R_0 \times 1000}$ ,  $T_r^{[13]}$  表示平均每个节点在 AR 的无线覆盖范围内的驻留时间,  $R_0$  表示两个相邻 AR 无线覆盖重叠区域大小,  $R_0, T_r$  参考文献[11]的建议性取值。

$T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{DEF}$  和  $T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{REF}$  分别表示预测式切换时延和反应式切换时延,结合第 4 节中对切换时序的描述,预测式切换和反应式切换时延分别表示如下:

$$T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{DEF} = T_{L_3} + T_{L_2} + T_{\text{NEW}} + T_{\text{REG}} \quad (8)$$

$$T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{REF} = T_{L_{3f}} + T_{L_2} + T_{L_{3s}} + T_{\text{REG}} \quad (9)$$

其中,  $T_{L_3}$  表示提前进行的三层切换的切换时延,  $T_{L_2}$  表示二层切换时延,  $T_{\text{NEW}}$  表示代理 MR 通知 nAR 以预测式切换模式接入到 nAR 的时延,  $T_{\text{REG}}$  表示绑定更新时延,  $T_{L_{3f}}$  表示三层切换未全部完成时链路即断开的时延,  $T_{L_{3s}}$  表示二层切换完成后继续进行反应式切换的时延。各个阶段计算公式如下:

$$T_{L_3} = t_{wl}(L_{RS} + L_{RA}) + t_{wl}(L_{FBU}) + k \cdot d_{MR-MV} \cdot (t_{wl}(L_{MNP} + L_{MNPack})) + d_{AR-AR} \cdot (t_w(L_{HI} + L_{HACK}) + \max(t_w(L_{FBack}), t_{wl}(L_{FBack}))) \quad (10)$$

$$T_{L_{3s}} = t_{wl}(L_{UNA} + L_{FBU} + L_{TBU}) + t_{wl}(L_{DATA}) + d_{AR-AR} \cdot t_w(L_{FBU} + L_{HI} + L_{HACK} + L_{FBack}) \quad (11)$$

$$T_{L_{3f}} = t_{wl}(L_{RS} + L_{RA}) + k \cdot d_{MR-MV} \cdot t_{wl}(L_{MNP} + L_{MNPack}) \quad (12)$$

$$T_{\text{NEW}} = t_{wl}(L_{UNA} + L_{DATA}) \quad (13)$$

其中,  $d_{X-Y}$  表示节点 X 到节点 Y 的跳数距离。

基于代理 MR 的情况下,  $n$  个节点全部切换所用时间表示为:

$$T_{HL}^{\text{proxyMR}} = n_{MR} \cdot T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{EF} \quad (14)$$

不使用代理 MR 的情况下,令  $k=0$ , 则  $n$  个节点全部切换所用时间表示为:

$$T_{HL}^{\text{MR}} = n \cdot T_{\text{proxyMR\_NEMO}}^{EF} \quad (15)$$

## 6 仿真实验

本节使用网络仿真工具 NS2 对上述方案进行仿真模拟,并与文献[11]提出的 EfNEMO 协议在切换时延和网络吞吐量方面进行对比分析,参数设定如表 2 所列。

表 2 参数取值表

参数	值	参数	值
Bw	1Gb/s	Bw1	54Mb/s
Tprocess	0.5ms	pwlf	0.5
$\eta$	1	Tr	117.22s
LRS	52B	LRA	92B
LFBU	72B	LMNP	92B
L <sub>MNPack</sub>	92B	LHI	52B
LHack	52B	LFBBack	52B
LUNA	52B	LDATA	1k
d <sub>AR-AR</sub>	1hop	d <sub>HA-AR</sub>	5hops
d <sub>MR-MV</sub>	2hops	T <sub>w1</sub>	2ms
T <sub>w</sub>	0.5ms	T <sub>1,2</sub>	243.9ms

### 6.1 切换时延分析

在保持 AR 处理能力一定的情况下,分别运行 EfNEMO 协议和 proxyMR 协议,通过不断增加 MN 的数量比较二者在切换时延方面的性能,通过观察 NAM 演示和分析 trace 跟踪记录,实验结果如图 2 所示。设定节点数目参数为 10 时, EfNEMO 协议链路断开时间段在 54.98~56.12s 之间,相同协议下设定节点数目参数为 30 时,链路断开时间段为 54.98~

57.58s,由此可见,随着实验参数节点数目的变化,EfNEMO协议的链路断开时间增大了一倍多。图3的实验结果表明了在相同参数设定情况下 proxyMR 协议所带来的性能优化,节点数目为10的情况下设定代理 MR 数量为1,节点数目为30的情况下设定代理 MR 数量为3,观察实验结果发现,即使在节点数目增幅相同的情况下,proxyMR 协议的链路断开时间仍维持在1000ms以内。这是由于代理 MR 参与了相关移动信令的发送与接收,绝大多数车辆不需要与 AR 交互快速切换信令,因此 proxyMR 协议较 EfNEMO 协议有更短的切换时延,在车辆增多的情况下,这一点尤为明显;同时这也意味着车辆的紧急信息,例如紧急刹车、救援信息等能够及时广播至附近车辆,避免了由于网络层的切换延迟而延误最佳时机的情况。

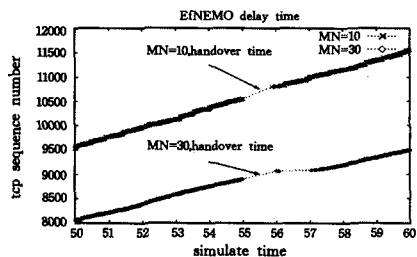


图2 EfNEMO 协议切换时延

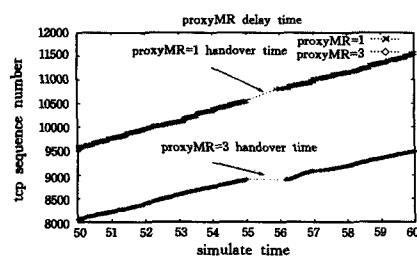


图3 基于代理 MR 协议切换时延

## 6.2 网络平均吞吐量分析

本节对车辆在切换过程中的平均吞吐量加以分析验证,实验数据截取模拟时间在50~60s之间的数据,以便在 MN 吞吐量状态稳定时加以分析。

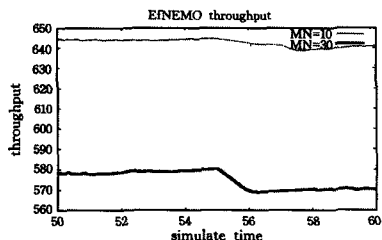


图4 基于 EfNEMO 协议的平均吞吐量

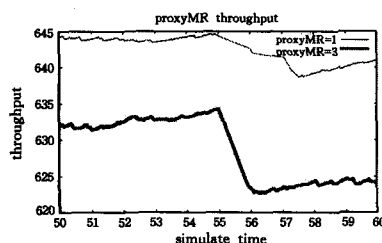


图5 基于代理 MR 协议的平均吞吐量

图4的实验结果表明,在节点数目参数由10调整至30时,EfNEMO 协议下 MN 的平均吞吐量下降了约65Mbps;而

图5的实验结果表明,在节点数目增幅相同的情况下,proxyMR 协议下 MN 的平均吞吐量仅下降了13Mbps左右。在节点数目增加的情况下,吞吐量性能提升的原因在于 AR 的处理能力不再是整个网络性能优化的瓶颈,AR 仅需要与少数的代理 MR 进行数据传输即可,而数据分发到终端节点则由终端节点所属的代理 MR 完成交付,交通的拥堵会导致车辆的通信业务平均吞吐量下降,这对于某些实时性应用例如 VoIP 业务、视频通话等是不可接受的,因此网络平均吞吐量的提升对于车联网来说具有重要意义。

**结束语** 随着智能交通的发展与普及,在城市交通流量日益增长的情况下,如何在车辆高速移动的过程中实现不同基站之间的快速切换,以达到无缝接入的目的,从而提升用户的网络体验,已成为研究热点。本文在 NEMO 网络及其相关移动性支持协议的基础上提出通过代理 MR 的方式实现批量切换的方法,从而减少了切换时延,进一步提升了切换效率。

## 参考文献

- [1] Devarapalli V, Wakikawa R, Petrescu A, et al. Network Mobility (NEMO) basic support protocol, IETF RFC 3963[S]. Fremont: IETF, 2005
- [2] Perkins C, Johnson D, Arkko J. Mobility support in IPv6, IETF RFC 6275[S]. Fremont: IETF, 2011
- [3] Pack S, Kwon T, Choi Y, et al. An adaptive network mobility support protocol in hierarchical mobile IPv6 networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3627-3639
- [4] Moravejsharieh A, Modares H. A Proxy MIPv6 Handover Scheme for Vehicular Ad-hoc Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(1): 609-626
- [5] Arnold T, Lloyd W, Zhao J, et al. IP address passing for VANETs[C]// Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2008(PerCom 2008). IEEE, 2008: 70-79
- [6] Fazio M, Palazzi C E, Das S, et al. Facilitating real-time applications in VANETs through fast address auto-configuration[C]// Proc. of IEEE CCNC/NIME. 2007: 981-985
- [7] Koodli R. Mobile IPv6 Fast Handovers, RFC 5568 [S]. Ietf Internet Draft, 2009: 931-934
- [8] Yoo S J, Choi S J, Su D. Analysis of fast handover mechanisms for hierarchical mobile IPv6 network mobility[J]. Wireless Personal Communications, 2009, 48(2): 215-238
- [9] Kim M S, Lee S K, Golmie N. Enhanced fast handover for proxy mobile IPv6 in vehicular networks [J]. Wireless Networks, 2012, 18(4): 401-411
- [10] Lee J H, Ernst T, Chilamkurti N. Performance analysis of PMIPv6-based network mobility for intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(1): 74-85
- [11] Ryu S, Park K J, Choi J W. Enhanced Fast Handover for Network Mobility in Intelligent Transportation Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(1): 357-371
- [12] Manna Z, Pnueli A. Verification of Concurrent Programs: A Temporal Proof System[M]// Foundations of Computer Science IV, Distributed Systems; Part 2, Semantics and Logic. DeBakker J W, Leeuwen J V, eds, Mathematical Centre Tracts 169, 1983
- [13] Hossain M S, Atiquzzaman M. Cost analysis of mobility protocols[J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(4): 2271-2285