

# 一种车载自组织网络中交通拥塞 自适应的出行计划方案\*

余玲飞, 余 堃, 宋 超, 刘 斌

(电子科技大学 计算机学院, 成都 611731)

**摘 要:** 交通堵塞现象越来越威胁正常的城市交通, 针对选择最短路径的出行方案往往不能取得最短的出行时间的现象, 提出了一种交通拥塞自适应的出行计划方案。该方案克服了现有方案在规划出行路线时未能考虑行车过程中实际交通状况的缺点, 根据车辆在各路段行驶的平均通过时间来判断路段当前的拥塞状况, 并动态优化行车路线, 从而提高交通效率。仿真实验表明该方案能够自适应路段的交通拥塞, 根据当前拥塞状况重新优化行车路线, 从而缩短平均行车时间。

**关键词:** 拥塞自适应; 出行计划; 车载自组织网络

中图分类号: TP393.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)02-0562-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.068

## Congestion adaptive travel planning for vehicular Ad hoc network

YU Ling-fei, SHE Kun, SONG Chao, LIU Bin

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** How to plan a trip route is one of the most important issues in vehicular Ad hoc network. This paper presented a congestion adaptive travel planning scheme. The previous schemes often employed the shortest path algorithms to plan their travel, computed a route to the destination by GPS navigation. However, these schemes were not adaptive to the current traffic conditions so that the route couldn't be modified while driving. In fact, the traffic jams occurred frequently in the city, increasingly threatened the city traffic. Consequently, the shortest path calculated by GPS navigation took more time to the destination because of congestion. The proposed scheme could adjust the travel route based on the current traffic conditions, which improved the traffic efficiency. Simulation results show that the scheme performs better and achieves shorter driving time by adjusting the trip route when traffic jams occur.

**Key words:** congestion adaptive; travel plan; VANET(vehicular Ad hoc network)

随着无线通信技术和汽车电子技术的迅速发展,车载自组织网络(VANET)逐渐由新兴网络研究的分支发展成为了一个重要的无线网络研究领域。车载自组织网络已经被应用到很多交通安全以及其他的商业应用之中,例如智能交通系统(intelligent transportation system)在美国、欧洲、亚洲都有不同程度的部署<sup>[1]</sup>,具有广泛的应用背景。其中交通监视和出行计划就是车载自组织网络的一个重要应用,能够提高道路交通的有效性。交通导航系统可以有效地把路况信息递交给行驶的车辆,因此促使开展了很多用来改进数据收集的工作。而传统的交通监控是依靠电子眼、交通拍摄设备等来规范驾驶行为的<sup>[2,3]</sup>,更为智能化一点的方式是通过蜂窝塔的切换率来估计交通状况。随着越来越多的车辆配备GPS等导航设备,以及未来车辆之间具有的通信,即V2V和车辆与路边设施之间的V2I的通信会让车辆在行驶过程中实时地收集所经过的道路交通状况信息,并利用这些信息为车辆制定出行计划。在文献[4]中,作者利用静态的历史统计数据来估计当前道路上的交通状况。然而在车辆行驶过程中,千变万化的交通流量使得

GPS导航计算出的最短路径并不能获得最短的行车时间。由于交通拥塞的影响,走最短路径很可能会拥堵在某些路段,导致行车时间急剧增加。造成这种现象的重要原因是因为GPS导航设备往往根据静态的预设的地图信息或历史交通流量信息来计算行车路径,不能反映行车时的当前交通状况。本文提出一种根据路段平均通行时间预先判断交通拥塞的动态出行计划方案,车辆在行驶过程中,根据路段拥塞情况及时对初始行车路线进行调整,从而提高道路交通效率。

### 1 相关工作

车载自组织网络的相关研究包括事故告警、辅助驾驶、出行计划、道路交通信息查询、乘客间通信和Internet信息服务等方面,许多学术机构和业界都对之展开了深入的研究。

文献[1]提出了利用车载网络能够有效改善传感器网络的感应和无线传输范围,指出将传感器嵌入到汽车中作为移动的节点,能够用于监视路面情况和其周围的环境。在出行计划的应用方面,提出汽车记录各路段在一天中不同时间段的交通情

收稿日期: 2012-06-14; 修回日期: 2012-07-23 基金项目: 国家“863”计划重大资助项目(2008AA04A107); 国家自然科学基金资助项目(61003229, 60903158)

作者简介: 余玲飞(1979-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为车载自组织网络、无线传感器网络(linphie@163.com); 余堃(1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能中间件计算、云安全; 宋超(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为车载组织网络; 刘斌(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为车载组织网络。

况的统计信息,就能够很好地帮助用户完成出行计划。

文献[2]中提出在典型的汽车安全应用中,每辆汽车都周期性地广播其当前 GPS 位置、速度、方向以及其他传感器信息,如刹车状态、加速度等,以便其邻居汽车能够接收并估计与其行驶关系是否有潜在的危险。文献[3]中,作者假设汽车都安装了预先载入的电子地图,并且提供了不同时段各路段的交通统计的历史信息,包括车辆密度和汽车行驶速度等。在数据传递方面,文献[5]提出了利用有规律移动的节点来实现。例如公交车,由于其运动线路和发车时间相对较固定,可以很好地帮助数据传递。

SOTIS 系统<sup>[6]</sup>则通过车辆节点收集城市当前交通流量,车辆携带并转发这些信息给其他车辆。由于信息由车辆携带,因此当发生交通堵塞时,这些信息将无法及时传递并可能导致其他车辆获得的信息过时。

文献[7]提出并设计了一种更为精确的智能传输系统的仿真方案,并使用 VISSIM 和 QualNet 作为传输层和网络层的仿真器验证车载自组织网络的协议性能。

笔者在前期的工作中提出了一种基于分布式实时机制的车载网络出行计划算法<sup>[8]</sup>,其核心思想是通过对各路段的行车时间的统计,实时地获得当前地图中各路段的车辆通行时间,在此基础上运行 Dijkstra 算法获得最优的行车路线。但是此方案仅在出发时收集各路段的平均通过时间,在行驶过程中没有反映对当前路况的分析,因此本质上是一种静态的出行计划。此外,在路段发生拥塞的情况下,车辆通行极有可能非常缓慢甚至停止不前,若车辆因拥塞停止无法通过路口,就不能获得该路段当前的通过时间,此路段的拥塞状况将无法传递,导致更多的车辆行驶至此路段,加剧拥塞。

此外,笔者在前期工作中还提出了一种基于车流量的出行计划方案 FBTV<sup>[4]</sup>,该方案的思想是通过预先部署在各路段的路边设施观察本路段的车流量,当车流量超过特定的阈值时,路边设施将认为本路段交通拥塞,并向周围通知此情况;即将经过此路段的车辆收到此信息后,将重新计算新的行车路线,绕过此拥塞路段,从而达到路线优化的目的。相比于文献[8],本方案能够根据当前路况信息及时更新行车路线。但是本方案需要有路边设施的支持,且路边设施的数量直接决定了 FBTV 的性能,因此前期投资成本较高。

## 2 网络模型

假设在一个合理的时间段内(如 1 d),城市道路上的车辆数量保持稳定;其次,假设每辆车都已配备 GPS 导航设备和预先下载的城市交通地图。对于现代车辆来说这些设备已经很流行,而且在将来会更加普及。再次,路段没有路边设施的存在,信息仅在车辆之间以多跳的方式传递。路口  $i$  用  $I_i$  表示,从路口  $I_i$  到  $I_j$  的路段记为  $R_{ij}$ ,如图 1 所示。

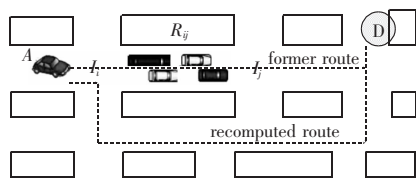


图 1 出行计划示意图

**定义 1 邻居车辆。**一辆车的邻居车辆是指在其通信范围内的所有车辆。车辆通过 beacon 消息发现其邻居车辆,这

在文献[1]中有讨论。例如图 2 中车辆 A 的邻居车辆包括车辆 B、C、D 和 E。

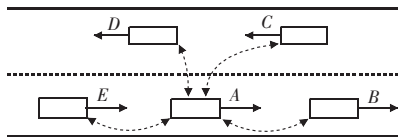


图 2 车辆 A 的邻居车辆

**定义 2 路段通行时间。**路段通行时间是指一辆汽车从路口  $I_i$  进入路段  $R_{ij}$  的时刻到该车从路段  $R_{ij}$  驶离进入另一路段的时刻之间所耗费的时间,该时间包括等待信号灯的时间。记进入路口的时间为  $t_i$ ,驶离路段  $R_{ij}$  进入另一路段的时间为  $t_j$ ,则路段通行时间为

$$\text{pass}T_{ij} = t_j - t_i \quad (1)$$

车辆将保存通行时间作为该路段的通行时间记录,并保存  $t_j$  作为该记录的时间戳。以二元组记录该信息:

$$\langle \text{pass}T_{ij}, t_j \rangle$$

此通行时间记录是车辆通过路口后,向周边车辆进行扩散,使将通过该路段的车辆获得此信息后可以重新计算对该路段交通情况的评估,并依此决定是否变更行车路线。

**定义 3 路段通行时间上限值  $T$ 。**该值表示某路段是否发生拥塞,当路段通行时间大于上限值  $T$  时,表示该路段产生拥塞或即将拥堵。显然, $T$  与路段设计通行时间  $DT$  相关,并且随交通状况的变化而变化。所谓路段设计通行时间,即车流量正常情形下通过该路段的时间,可以定义为该路段长度与该路段设计时速的比值。定义为

$$T = \varepsilon \times DT + ST \quad (2)$$

其中: $\varepsilon$  为一常数且  $\varepsilon > 1$ ,  $ST$  为路口信号灯时间。

**定义 4 路段停留时间。**路段停留时间是指一辆汽车从路口  $I_i$  进入路段  $R_{ij}$  后的行驶时间。正常情况下,若该路段未发生拥堵,则路段停留时间与路段通信时间相同;若路段发生拥塞,显然路段停留时间将大于路段通行时间。当路段停留时间大于正常通行时间的上限值  $T$  时,此时记录当前时间  $t$ ,并按式(3)计算该车辆路段停留时间。

$$\text{stay}T_{ij} = t - t_i \quad (3)$$

若路段拥堵严重,则该时间周期性地更新并向周围扩散停留时间记录,该记录形式和路段通行时间记录类似,即  $\langle \text{stay}T_{ij}, t \rangle$ ,其他车辆根据此信息判断是继续选择该路段还是绕行。

## 3 CATP 方案

在本文的出行计划方案中,通过对交通地图中各路段的平均通行时间的统计,帮助驾驶者寻找一条最为省时的行车路线。这个过程是一个动态的过程,在出发前,车辆可以根据各路段平均通行时间的历史信息或者根据地理上的最短路径计算最初的行车方案。在行驶过程中再根据车辆从车载自组织网络中所获得的实时路况信息不断地修改行车路线,比如遇到交通堵塞或者潜在的交通堵塞,那么车辆将可能放弃原有的行车路径而利用 CATP 来选择一条新的路径。与 FBTV 不同, CATP 不依赖于路边设施,而是通过车辆之间的多跳传输来获得各路段的当前平均通行时间。

### 3.1 平均通行时间

车辆每通过路口时将广播其通过前一路段的通行时间记

录  $\langle \text{pass}T_{ij}, t_j \rangle$ , 这一信息将在网络中扩散。假设某车辆接收到经过此路段的  $n$  辆汽车的通行时间记录, 则可根据记录中的时间戳  $t_j$  作为权重, 计算该路段的平均通行时间 (mean pass time, MPT)  $\text{MPT}_{ij}$ , 作为当前对该路段的通行时间的估计。

$$\text{MPT}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \text{pass}T_{ijk} \times t_{jk}}{\sum_{k=1}^n t_{jk}} \quad (4)$$

其中:  $\text{pass}T_{ijk}, t_{jk}$  表示第  $k$  辆车通过路段  $R_{ij}$  的通行时间和通过路口  $I_j$  的时刻。将时间戳作为通行时间记录的权重, 是因为时间戳的值越大, 记录就越新, 这样既保证了通行时间估计的实时性, 又能考虑到该路段通行时间的历史统计。

但是这样估计通行时间的方法需要汽车保存所有接收的  $n$  个通行时间记录信息, 存储代价会比较大。事实上, 每辆车一旦收到某路段通行时间的更新记录, 可根据当前记录中的通行时间和历史平均通行时间立即计算当前平均通行时间。例如当一辆汽车接收到第  $n$  个更新路段  $R_{ij}$  的记录为  $\langle \text{pass}T_{ijn}, t_{jn} \rangle$  后, 该车辆就要重新计算该路段的平均通行时间  $\text{MPT}_{ijn}$  和时间戳总和, 即

$$\text{MPT}_{ijn} = (\text{MPT}_{ijn-1} \times \text{sum}T_{ijn-1} + \text{pass}T_{ijn} \times t_{jn}) / (\text{sum}T_{ijn-1} + t_{jn}) \quad (5)$$

其中:  $\text{MPT}_{ijn-1}$  为之前维护的历史平均通行时间;  $\text{sum}T_{ijn-1}$  为之前该车辆收到的通行时间记录中的时戳和。随后该车将更新时戳和为

$$\text{sum}T_{ijn} = \text{sum}T_{ijn-1} + t_{jn} \quad (6)$$

### 3.2 平均停留时间

平均停留时间 (mean stay time, MST) 的计算和平均通行时间相似。需要强调的是, 平均停留时间仅当某路段发生拥堵, 无法获得该路段的当前通行时间时才需要在网络中扩散。在正常情况下, 车辆在特定路段的停留时间不会超过阈值  $T$ , 因此车辆不会扩散此消息。若停留时间超过了阈值  $T$ , 则该车辆将广播其路段的停留时间, 且该时间将周期性地向周围扩散, 以通知其他车辆当前该路段的拥堵状况。其他路段的车辆收到此信息后, 如下式更新其停留时间:

$$\text{MST}_{ijn} = (\text{MST}_{ijn-1} \times \text{sum}T_{ijn-1} + \text{stay}T_{ijn} \times t_n) / (\text{sum}T_{ijn-1} + t_n) \quad (7)$$

### 3.3 CATP 算法

CATP 探测到潜在拥堵的原理是统计特定路段上经过车辆的平均通行时间。如前所述, 若车流量正常, 那么显然通过一条路段的时间将有一个上限值  $T$ 。如果当前该路段的平均通行时间或平均停留时间超过了  $T$ , 即可认为会引发交通堵塞, 车辆要发出该路段的拥堵警告。例如, 在图 1 所示的情形中, 车辆 A 驶向十字路口  $I_i$ , 其目的地为  $D$ 。根据 CATP 的最初算法, 车辆 A 选择的出行路径经过路段  $R_{ij}$ , 然而路段  $R_{ij}$  中随着越来越多的车辆的到来, 平均通行时间将急剧增大, 可能会引起堵塞, 这样车辆 A 选择的最短出行路径并不能取得最短的行车时间。而当路段  $R_{ij}$  严重堵塞, 如路口出现车祸, 该路段的车辆无法通过路口时, 将得不到路段通行时间  $\text{pass}T_{ij}$ 。此时, 滞留在路段  $R_{ij}$  上的车辆将周期性地将其在此路段的停留时间  $\text{stay}T_{ij}$  进行采样并扩散。如果此时未达到该路段路口的车辆发现该路段的平均停留时间超过了预设值  $T$ , 则该车辆意识到即将进入可能发生拥堵的路段, 车辆将计算一条新的路径, 如图 1 中的 recomputed route, 并建议驾驶员改变原有的行车路线。

CATP 算法如下所示:

```

enter intersection  $I_i$ ;
record  $t_i$ ;
 $t = \text{current time}$ ;
while stay in  $R_{i,j}$  //若车辆未驶离路口
if  $(t - t_i) > T$  //停留时间超过阈值, 路段可能拥塞
    broadcasting  $\langle \text{stay}T_{ij}, t \rangle$  //发出拥塞警告
    get  $t$  periodically
end if
if receive  $\langle \text{pass}T_{mn}, t_n \rangle$  or  $\langle \text{stay}T_{mn}, t' \rangle$  //收到其他路段  $R_{mn}$  的通行时间记录或停留时间记录, 更新该路段的平均通行时间或平均停留时间, 并取其大者作为路段权重进行路线重规划 */
    calculate  $\text{MPT}_{mn}$  or  $\text{MST}_{mn}$ 
     $\text{weight}_{mn} = \max(\text{MPT}_{mn}, \text{MST}_{mn})$ 
    recompute driving route
end if
end while
leave the intersection  $I_j$ 
record  $t_j$ 
 $\text{pass}T_{ij} = t_j - t_i$ ;
broadcasting  $\langle \text{pass}T_{ij}, t_j \rangle$ 

```

如果车辆同时收到多个通行时间记录或多个停留时间记录, 则分别按式 (5) 和 (7) 计算平均通行时间或平均停留时间。若同时收到相同路段的同一辆车的通行时间记录和停留时间记录, 则仅计算平均通行时间。若车辆同时维护了某路段的平均通行时间和平均停留时间, 在规划行车路线时取其较大者作为路段的权重并运行 Dijkstra 算法进行计算, 获得当前路况下到达目的地的最短时间的路径。

## 4 仿真实验

实验采用 VanetMobiSim + NS2 作为仿真模型, VanetMobiSim 用来生成节点的移动轨迹。实验使用了中国成都市的真实地图仿真, 其区域范围为  $4500 \times 3500 \text{ m}^2$ , 包括 36 个路口, 62 条双向通行的路段, 如图 3 所示。

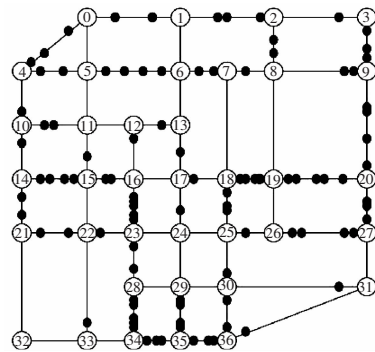


图3 仿真地图拓扑

汽车速度在  $40 \sim 80 \text{ km/h}$  范围内随机选择, 每进入路段时设定一次速度, 并与该路段设计时速有关, 路段设计时速可以认为是该路段的限速。车辆的通信协议采用 802.11, 假设其有效通信半径为  $200 \text{ m}$ 。实验中选取了三种车辆密度, 随机分布在仿真地图上, 分别是: 节点密度宽松, 即 100、200; 密度较大, 即 400、600; 密度很大, 即为 800、1000 的时候。实验参数如表 1 所示, 在仿真中将 CATP 与 FBTV 和最短路径算法进行行车路线的方案作比较。

### 4.1 $\varepsilon$ 对 CATP 的影响

$\varepsilon$  的值对判断路段是否拥塞有着至关重要的作用。仿真中, 对  $\varepsilon$  从 1 ~ 5 取值, 记录了 5 辆汽车运行 CATP 算法从出发地到达目的地所耗费的平均行车时间, 其结果如图 4 所示。

显然, 当  $\varepsilon$  较小时, 将会导致路段假拥塞的通告, 即实际上



没有产生拥塞,但是由于阈值  $T$  设置较小,使得车辆在路段上的停留时间容易超过  $T$ ,将发出拥塞通告,其余车辆将重新规划路线绕行该路段,这样反而使得到达目的地的行车时间增大。而当  $\varepsilon$  设置较大时, $T$  值过大,即使路段真正发生了拥塞也可能导致车辆并不发出拥塞警告,使得其余车辆继续经由该路段去往目的地,从而增加了在该路段的通行时间,导致平均行车时间增大。从图4中可以看出, $\varepsilon$  的值在2~2.5时平均行车时间较小。 $\varepsilon < 2$  时,由于错误的拥塞警告导致车辆绕行而使得行车时间增加;而  $\varepsilon > 3$  时,平均行车时间显著提高,且高于某值时基本不怎么变化。因此,在后面的仿真实验中取  $\varepsilon = 2.2$ 。

表1 仿真参数设置

| 参数            | 值                             |
|---------------|-------------------------------|
| 仿真区域大小        | 4500 m × 3500 m               |
| 路口数量          | 36                            |
| 路段数量          | 62                            |
| 车辆数           | 100, 200, 400, 600, 800, 1000 |
| 车速范围/km/h     | 40 ~ 80                       |
| 通信半径/m        | 200                           |
| MAC 协议        | 802.11                        |
| $\varepsilon$ | 1 ~ 5                         |
| 路边设施的数量       | 30(仅对 FBTV)                   |

#### 4.2 平均行车时间的比较

跟踪5辆汽车,统计它们在六种车辆密度情形下的平均行车时间,结果如图5所示。

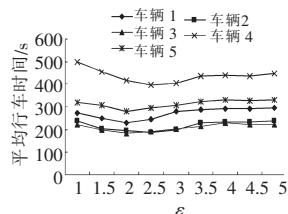
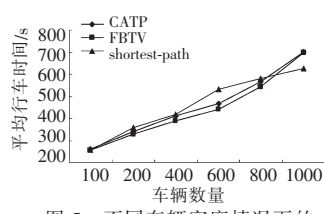
图4  $\varepsilon$  对 CATP 的影响

图5 不同车辆密度情况下的平均行车时间

由图5中可发现,在车辆密度较小的情况下,如车辆数量为100或200时,三种出行方案的平均行车时间不是很明显。这是由于车辆的数量较少时,车流量在路段的承载范围内,不会产生路段拥塞的情况,因此无须作出行车路线的修正,CATP和FBTV实际上就是运行Dijkstra算法,因此三者的平均行车时间差不多。

然而,当车辆的数量逐渐增大时,如在400或600时,某些路段将产生拥塞,对于shortest-path方案,由于一旦计算好路径就不再更改,所以当拥塞时将增大路段的通行时间,导致平均行车时间增大。而对于CATP和FBTV,则可以根据拥塞情况作出行车路线的调整,因此平均行车时间比shortest-path方案要少。此外,FBTV由于有路边设施的存在,相比于CATP更能

明确掌握对路段的拥塞情况,而CATP则有可能产生误判,因此FBTV比CATP的行车时间更些。

但是当车辆密度很高时,使道路上的交通状况达到一个非正常的拥挤状态,此时FBTV和CATP方案相比于shortest-path的方案来说优势已经不明显。这是因为车辆密度很大时,多个路段将产生拥塞,FBTV和CATP将不断重新计算路线绕行,但是并不能取得较好的效果,反而会由于绕行带来更长的平均行车时间。

#### 5 结束语

出行计划是车载自组织网络中的一个重要应用。本文提出了一种拥塞自适应的动态出行计划方案CATP,每辆汽车能够获取各路段的平均通行时间或平均停留时间,根据这些信息判断是否要经过这些路段,并重新计算新的行车路径,从而帮助用户优化其出行计划。通过仿真实验可以看出,在车辆密度中等的情形下,CATP能够获得较短的平均行车时间,优化了驾驶者的行车路线,从而提高道路交通效率。

#### 参考文献:

- [1] U S Department of Transportation. Ten-year national program plan and research agenda for intelligent transportation systems in the United States [R]. Washington DC: The Intelligent Transportation Society of America and the United States Department of Transportation, 2001.
- [2] HOH B, GRUTESER M, HERRING R, et al. Virtual trip lines for distributed privacy-preserving traffic monitoring [C]//Proc of the 6th International Conference on Mobile Systems. 2008; 15-28.
- [3] FERNANDEZ-CABALLERO A, GOMEZ F J, LOPEZ J. Road-traffic monitoring by knowledge-driven static and dynamic image analysis [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 701-719.
- [4] YU Yi-min, LIU Bin, WU Ting, et al. Flow-based travel plan via VANET [J]. *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 2011, 5(6): 16-17.
- [5] ZHAO Jing, CAO Guo-hong. VADD: vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of Conference on Information Communications. 2006; 1-12.
- [6] ROHLING H, BUSCHE H. SOTIS: a self-organizing traffic information system based on car-2-car communications [C]//Proc of Workshop on Self-Organising Wireless Sensor and Communication Networks. 2009; 329-339.
- [7] YANG Yi, BAGRODIA R. Evaluation of VANET-based advanced intelligent transportation systems [C]//Proc of the 6th ACM International Workshop on Vehicular Internet Working. 2009; 3-12.
- [8] SONG Chao, LIU Ming, GONG Hai-gang. Distributed real-time scheme based algorithm for travel plan in vehicular Ad hoc networks [J]. *Journal of Application Research of Computers*, 2009, 26(9): 3440-3441.

(上接第561页)

- [2] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M. Draft-IETF-MPTCP-multiaddressed-02, TCP extensions for multipath operation with multiple address [S]. Valencia: IETF, 2010.
- [3] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M, et al. Draft-IETF-MPTCP-multiaddressed-03 [S]. Valencia: IETF, 2010.
- [4] RAICIU C, HANDLEY M, WISCHIK D, et al. Draft-IETF-MPTCP-congestion-00 [S]. Valencia: IETF, 2010.
- [5] BAGNULO M. Draft-IETF-MPTCP-threat-06 [S]. Valencia: IETF, 2010.

- [6] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M, et al. RFC 6182, Architectural guidelines for multi-path TCP development [S]. 2011.
- [7] NS-3 project. NS-3 manual and model library and tutorial [EB/OL]. (2011-12). <http://www.nsnam.org/docs/release/3.15/manual/html/index.html>.
- [8] BERNARDI G. MPTCP: a delay-tolerant transport protocol for Ad hoc networks [D]. Dublin: University of Dublin, 2006.
- [9] BARRE S, PAASCH C, BONAVENTURE O. Multi-path TCP: from theory to practice [S]. Valencia: IETF Networking, 2011.