

基于 RSU 辅助的车载机会网络通信能力增强方案^①

杜华坤^{②*} 奎晓燕^{③**} 肖雪峰^{**} 李 勇^{***} 陈 零^{**}

(* 中南大学地球科学与信息物理学院 长沙 410083)

(** 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

(*** 清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要 针对传统车载机会网络通信能力的有限性及随机化的问题,提出一种通过部署路边单元(RSU)进行辅助通信来增强车载机会网络通信能力的方案。该方案利用 RSU 稳定的覆盖、存储和传输优势,有效克服传统车载机会网络通信时间间隔长、传输能力有限等缺点。以北京和上海各自一个月的出租车全球定位系统(GPS)数据为基础,对车辆与 RSU 的相遇特性进行了分析,发现该方案通过合理部署 RSU 对车辆信息进行缓存,可以极大地提高车辆间的通信概率。理论分析和仿真实验表明,利用 RSU 可以完成车与车之间大数据的传输,能极大提升车载机会网络的通信能力。

关键词 车载网络,路边单元(RSU),通信能力,机会网络

0 引 言

在城市职能交通系统中,车载网络现已成为信息高效传送的重要基础设施^[1-4]。随着车载数量的增加和车载网络规模的扩大,车载应用将朝着车载安全与车载娱乐等多样化方向发展,其产生的移动数据流量将急剧增加。因此,如何提升车载网络的传输能力与效率成为一个重要的研究课题^[5-7]。在车载自组织网络(vehicular ad hoc networks, VANET)中,由于节点移动性强且具有稀疏特性,因此,机会车载成为一种极为重要的形式。在这种形式下,通过车载间短距离高带宽通信,能有效支持大量趋同性数据的共享和传输。现在全球移动数据量高速增长^[1],在这种情况下,我们很难通过增加蜂窝网基础设施来满足增长需求,因此我们需要利用其他方式(如车载移动网络)来缓解移动网络的压力。车载移动网络可更有效地使行驶中的车辆通过车辆之间的通信来获取感兴趣的信息,使得交通系统更加有效安全,并且能够提高获得信息的效率。

考虑到车载机会网络是未来无线网络的重要组成部分,部署路边单元(road side unit, RSU)进行辅助通

信是提高车载机会网络性能的重要方法,本文提出了一种基于路边单元(RSU)的车载机会网络能力增强方案。按照该方案的设计,RSU 是车载机会网络中部署在路边进行辅助通信的设施,它与骨干网直接相连,可以与车辆进行无线通信。相比车载机会网络中的车辆,RSU 具有更好的通信能力、覆盖范围和传输速度,可以同时与多辆车辆进行通信。此外,RSU 还具有较大的存储空间,可以存储信息,提高通信概率^[8-10]。因此,本文提出的基于 RSU 辅助的车载机会网络通信能力增强方案,能充分利用 RSU 稳定的覆盖、存储和传输优势,有效克服传统车载机会网络中通信时间间隔长、传输能力有限等缺点。本研究已通过北京和上海两大城市的真实车载 GPS 移动数据,对该方案进行了详细分析和仿真,仿真结果表明,通过 RSU 缓存转发信息可以有效提高两辆车之间的通信机会,增加通信频率,极大地提升网络性能。

1 车载机会网络

1.1 RSU 辅助的车载机会网络

在 RSU 辅助的车载机会网络中,有两种基本数

① 国家自然科学基金(61232001/F02),国家自然科学基金青年基金(61103204)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0798)资助项目。
② 男,1977 年生,博士生,讲师;研究方向:信号处理;E-mail: hkdu@csu.edu.cn
③ 通讯作者,E-mail: xykui@csu.edu.cn, kuixiaoyan@126.com
(收稿日期:2014-02-27)

据传输模式,一种是车载与 RSU 之间的通信,记为 V2I 的通信方式,另一种是车载与车载节点之间的通信,记为 V2V 的通信方式。在这两种方式中,RSU 可能与互联网等外部网络互联,从而使得 V2I 的通信可能从外面网络获得重要数据,进一步通过 V2V 的通信方式,实现数据在车载之间的进一步传输和高效扩散。对于有 RSU 辅助的车载机会网络,为了有效利用基础设施 RSU 带来的稳定性和可靠的通信能力,首先将数据传输到部分车载节点中,然后利用车载 V2V 的通信方式,实现消息的进一步传输。

利用 V2I 和 V2V 相结合进行数据传输的方法相对来说是比较成熟的,国内外对其关键技术进行了大量研究,本文也是采用 V2V 和 V2I 组合的方法来实现 RSU 辅助通信的。在机会网络中,节点之间的对等数据传输业务需求变得越来越重要,因此,如何高效使用 V2V 的通信能力是解决车载机会网络传输的关键问题之一。考虑到 V2I 具有一定的传输优势,因此,可以通过 V2I 的传输能力,来增强 V2V 的通信能力。例如,车载节点 A 和车载节点 B 由于行驶时间的差异,使得都经过了同一地点的它们却无法传送数据。因此,可以通过利用 V2I 的通信和缓存能力,当 A 经过该地点时将消息缓存于该点部署的 RSU 上面,然后,当 B 通过该位置时,再将该消息传输给 B 的车载节点,从而有效提高车载 A 和 B 之间的传输能力。在这种 RSU 辅助的车载机会网络中,将有效利用 V2I 的通信缓存优势和能力,提高 V2V 的效率,从而提升车载机会网络的通信能力。

1.2 相关研究

延迟容忍网络^[2] (delay tolerant networking, DTN)是为了解决通信中存在大延迟或受制于通信条件不能保证连续网络连接问题而提出的网络体系结构。车载机会网络是 DTN 网络的一个特殊领域,其相关研究将会在近几年内引起越来越多的人的关注。目前车载机会网络的主要的研究课题是车载网络中数据转发算法的设计。文献[11]对车载网络中的信息传输算法进行了研究,主要涉及如何选择信息传输对象。而文献[12]研究了存在路边设施辅助通信时车辆间的多跳传输性能。以上研究存在以下不足:由于车辆的移动性高和密度分布极度不均匀的特性,使得车辆之间无法维持稳定的多跳传输路径。然而,我们却可以采用 DTN 网络和部署 RSU 很好地解决以上问题。文献[13]在设计转发算法时加入了延迟容忍特性,并在路口设置了与

RSU 相似的固定节点(static node, SN)来辅助通信。研究表明在车辆较稀少的情况下,辅助通信可以有效地提高信息成功传输的概率。文献[14]提出了在车载机会网络的 RSU 中加入基于车辆关系的保护隐私的数据转发算法。文献[15]对 RSU 的部署方式进行了研究,然而 RSU 服务的对象是以中继通信为基础的 VANET,而且部署的 RSU 主要是关注如何在信息传输的同时保障用户隐私,与本文的研究对象并不相同。

2 基于 RSU 辅助的车载网络数据传输方案

2.1 车载机会网络建模

传统网络一般采用无向图建立网络模型: $G = (V, E)$, 其中 V 为节点集合, E 为链路集合。在传统网络中,在一定的时间控制下,图 $G = (V, E)$ 不会随着时间的变化而发生变化。当数据需要从源节点 $S(S \in V)$ 传送到终点节点 $D(D \in V)$ 时,我们需要从链路集合 E 中找到一条从源节点到目标节点的路径集合,记为 $p(S, D) = (S, l_0, l_1, \dots, l_n, D)$, 其中 $l_0, l_1, \dots, l_n \in V, (S, l_0), (l_0, l_1), \dots, (l_n, D) \in E$ 。

车载机会网络在以上传统网络模型的基础上主要有两点变化:第一,静态的网络链路变成了随着时间而发生变化的网络链路,可表示为 $G(t) = (V(t), E(t))$, 其中节点 $V(t)$ 可能由于节点移动、节能休眠等消失或出现在网络中,链路集合 $E(t)$ 可能由于节点移动和相对位置发生变化而改变。第二,发送数据的源节点和终点节点在同一时刻并不存在端到端的一条路径,而是需要依靠节点移动携带的消息带来通信机会,然后从随时间变化的网络节点和链路中找到机会路径 $p(S, D) = ((t_1, S, l_0), (t_2, l_0, l_1), \dots, (t_{n+1}, l_n, D))$ 来实现数据的传送。因此,当网络中的节点为数据找不到下一跳来进行转发时,需要将数据在本地进行缓存,利用节点的移动来携带消息,等待某一时刻出现通信机会时再进行路由和转发,这也就是“存储-携带-转发”机会通信的基本含义。

我们将所研究的车载机会网络建模成 N 个无线车载移动节点的集合,记为 $V, |V| = N, N > 0$, 并将网络中存在的路边单元记为 $R, |R| = M, M > 0$ 。在车载机会网络中,由于节点的快速移动和稀疏特性,只有当节点间的物理距离足够近,使得通信能量大于干扰和噪声门限时,才能进行正常通信。在

这种通信网络中,一个最为重要的指标是通信时间间隔,它表示两个节点多长时间可以进行一次消息的传输,直接影响到网络的传输能力。因此,在本研究中,我们将重点关注通信时间间隔这一重要指标。下面将对它进行形式化的数学定义。我们将两个节点的一次相遇,称为一次“通信机会”。同时,将两次通信机会之间的时间间隔称为通信时间间隔(inter-contact time, ICT)。具体定义如下:

定义 1 通信时间间隔 (ICT) 节点 i 和节点 j 的通信时间间隔定义为自上次相遇离开后到下一次机会通信开始之前的这一段持续时间。具体而言,假设上次相遇的结束时间为 t_0 , 则节点 i 和 j 之间的相遇时间间隔为 $ICT_{i,j} = \min_t(t - t_0) : \|L_i(t) - L_j(t)\| \leq CR, t > t_0$, 其中, $L_i(t)$ 和 $L_j(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 和 j 的物理位置, CR 为两节点之间的最大通信距离。基于以上定义,下面将详细介绍基于 RSU 辅助的车载机会网络能力提升及数据传输方案。

2.2 基于 RSU 辅助的车载机会网络数据传输方案

在能力提升方面,考虑到利用不同位置的 RSU 对通信能力的提升有着较大的影响和差别,本文主要对城市的交通枢纽和流量大的路口交叉点进行 RSU 部署和利用,主要是通过对车载数据的历史信息进行分析,得出相关车辆的相关特性,从而在频繁经过的地域进行 RSU 通信设施的部署。

在数据传输方面,当车载经过 RSU 设备的通信范围时,该车载将需要发送给其他车载节点的数据进行打包,在包头标记该数据的目的节点,将打包后的数据发送给 RSU;另一方面,RSU 通过识别车载标识,对本地存储的数据包进行查找,将目的地址属于该车载的数据进行推送。具体算法描述见算法 1。

在通信成功与否方面,考虑两辆车 c_1 、 c_2 之间的相遇。假设两辆车在路口 i 部署有 RSU_i , 且 c_1 在 t_1 时刻与 RSU_i 相遇, c_2 在 t_2 时刻与 RSU_i 相遇,假设 $t_1 < t_2$, 则在 t_1 时刻 c_1 将希望传输的内容存储在 RSU_i 内,而在 t_2 时刻 c_2 可以从 RSU_i 处获取 c_1 希望传输的内容,我们认为 c_1 、 c_2 在 t_2 完成了一次通信。考虑到信息传输的时效性和 RSU 中存储空间限制,我们为信息在 RSU 中的存在时间设定了一个时间限制 T_{RSU} , 信息在 RSU 中存储时间超过 T_{RSU} 将会被丢弃。在这种情况下,若 $t_2 - t_1 < T_{RSU}$ 则两车借助 RSU 的通信可以发生,反之则由于信息被删除,会造成车辆间的通信无法完成。

算法 1: 基于 RSU 辅助的车载机会网络数据传输算法

```

1)  WHILE 车载节点  $i$  与 RSU 节点  $R$  在通信范围之内
   THEN
2)  车载初始化传输数据集合  $\mathfrak{R} = \{1, 2, \dots, K\}$  和  $sum = 0$ 
3)  IF 车载节点  $i$  中含有需要发送的数据 THEN
4)      FOR  $\mathfrak{R} \neq \emptyset$  DO
5)          将数据  $j \in \mathfrak{R}$  进行数据封装和打包;
6)          将该打包数据发送到相遇的 RSU 设备上;
           RSU 接收后将数据进行缓存;
7)          更新待发送的数据包  $\mathfrak{R} \leftarrow \mathfrak{R} \setminus \{j\}$ ;
8)      END FOR
9)  END IF
10) RSU 初始化缓存数据集合  $\mathfrak{Z} = \{1, 2, \dots, Z\}$  和  $sum = 0$ 
11) IF RSU 中包括目标为车载节点  $i$  的数据 THEN
12)     FOR  $\mathfrak{Z} \neq \emptyset$  DO
13)         将数据  $z \in \mathfrak{Z}$  进行数据解封装和重新打包;
14)         将该打包数据发送到车载  $i$  上; RSU 将该
           数据包进行删除;
15)         更新等待发送的数据包  $\mathfrak{Z} \leftarrow \mathfrak{Z} \setminus \{z\}$ ;
16)     END FOR
17) END IF
18) END WHILE

```

3 性能评估与仿真分析

3.1 数据集介绍与预处理

首先介绍性能评估时所用到的车辆移动轨迹数据,这是我们进行仿真的基础。这些数据是分别在上海和北京记录的。上海的数据利用了 SG 项目^[13]所测得 2058 辆出租车数据,在 2007 年 2 月内,不间断地利用 GPS 定位,再通过 GPRS 向数据中心传递数据。数据记录的规则为,如果车上有乘客,那么每 15s 记录一次数据,如果车上没有乘客,那么每 1min 记录一次数据。北京的数据也是采用类似的方法在 2010 年 5 月通过对 27000 辆出租车进行记录。出租车比公交、私家车等其他车辆更能反映车载网络的移动特性。

由于取得的数据在记录频率上并不统一,并且会有噪声影响,需要对数据进行预处理。首先根据北京和上海两地地图上标注的道路坐标来修正一些坐标记录数据。其次通过线性回归算法进行地理位置插值,这样位置数据就按每 15s 的间隔进行了记录。举一个简单例子。假设有一辆车的地点记录序列为 $l_1 l_2 \dots l_n$, 相应的记录时间为 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ 。如果想在其中插入 t 时刻的点 c_t , 并且满足 $t_n \leq t <$

t_{n+1} , 那么我们可以通过线性回归算法, 得到 t 时刻的位置 l_t 为

$$l_t = \frac{t_{n+1} - t}{t_{n+1} - t_n} l_n + \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} l_{n+1} \tag{1}$$

此外, 为了区分不同的地点, 我们将整个地图根据重要十字路口进行分区。利用了 Voronoi 算法, 按照粒度由大到小进行分区。分区示例效果图如图 1 所示。根据所分区域, 通过对区域的中心位置部署 RSU 来仿真整个系统的运行情况, 通过仿真本文提出的算法, 在算法执行过程中对通信时间间隔这个重要指标进行度量, 用仿真实验有效验证和证实通信能力的有效提高。

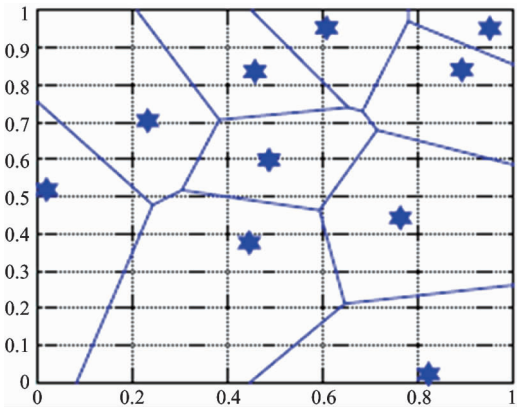


图 1 区域划分示意图

3.2 V2V 通信能力提升评估

部署 RSU 和利用 RSU 的通信能力能有效增加车载之间的通信频率, 减少通信时间间隔 (ICT), 因此, 我们首先对采用 RSU 辅助之后的车载机会网络的节点 ICT 进行评估, 量化采用 RSU 辅助后车载机会网络通信能力提升的空间和幅度。我们首先研究当 $T_{RSU} = 10\text{min}$, $T_{RSU} = 30\text{min}$ 和 $T_{RSU} = 60\text{min}$ 时, 在所有选定路口均设置有 RSU 的情况下, 两辆车借助 RSU 进行通信的通信间隔时间的分布。同时将 V2V 通信中车辆相遇时间间隔的分布情况绘制在同一图中作为对比, 观察在不同的情况下, 本文所提出的基于 RSU 辅助的车载机会通信能力的提升幅度。

图 2 显示了在北京车载数据下, 没有 RSU 辅助 (实线) 和有 RSU 辅助 (其他曲线) 下的车载通信时间间隔 (ICT) 的累计分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 曲线图。从图中可以看出, 在没有 RSU 辅助下, 有 50% 的节点相遇时间间隔大于 1h; 有接近 10% 的节点相遇时间间隔大于 5h。然

而, 在采用本文提出的 RSU 辅助通信方案后, 当延时为 10min 时, 可以有效降低延时, 只有 10% 的节点相遇时间大于 1h, 而 80% 的节点相遇时间只有几分钟。此外, 我们进一步降低了 T_{RSU} , 可以使得 ICT 进一步减少, 从而实现通信能力的有效提升。

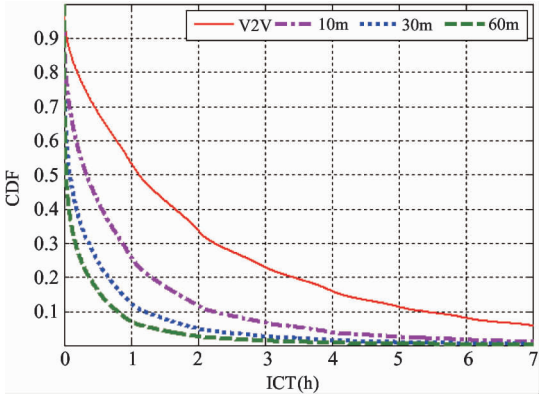


图 2 北京车载数据下的 RSU 辅助的通信时间间隔 (ICT) 分布图

图 3 中显示了在上海车载数据下, 没有 RSU 辅助 (实线) 和有 RSU 辅助 (其他曲线) 下的车载 ICT 的 CDF 曲线图。从图中可以看出, 与北京的情

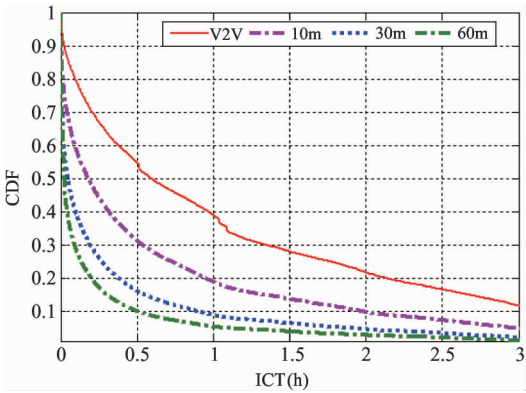


图 3 上海车载数据下的 RSU 辅助的通信时间间隔 (ICT) 分布图

况类似, 在没有 RSU 辅助下, 有 50% 的节点 ICT 大于 0.5h; 有将近 10% 的节点 ICT 大于 3h。然而, 在采用本文提出的基于 RSU 辅助通信方案后, 可以有效降低延时, 从而实现通信能力的提升。从图 2 和图 3 中可以看出, 利用 RSU 缓存转发信息可以为车载之间创造更多的通信机会。RSU 内存存储信息的最长时间 T_{RSU} 越大, 则车辆之间的通信机会越多。

3.3 V2I 与 V2V 通信能力提升评估对比

在获得借助 V2I 通信和利用 V2V 通信的相遇性质后, 我们进一步研究在车载延迟网络中同时使

用 V2V 通信和 RSU 辅助通信时车辆之间通信概率的变化情况。

首先,表 1 和表 2 分别给出了在北京和上海两地车载数据下的平均相遇时间情况。可以发现,采用 RSU 的方案能有效降低平均延迟。对比不同通信类型下相遇间隔时间的平均值以及分布情况,可以很容易发现,利用 RSU 辅助通信能够在很大程度上增加车辆之间通信的概率。

表 1 北京不同通信类型平均 ICT

通信类型	平均 ICT 长度(h)		
	$T_{RSU} = 10min$	$T_{RSU} = 30min$	$T_{RSU} = 60min$
RSU	28.1	12.7	7.8
RSU + V2V	26.4	12.4	7.7
V2V	117.9		

表 2 上海不同通信类型平均 ICT

通信类型	平均 ICT 长度(h)		
	$T_{RSU} = 10min$	$T_{RSU} = 30min$	$T_{RSU} = 60min$
RSU	10.2	4.2	2.4
RSU 和 V2V 合作	9.2	4.1	2.4
V2V	49.7		

同时,为了分析本文提出的 RSU 辅助方案下的 V2V 与 V2I 不同通信模式下相遇时间的分布特性,对北京和上海两个车载移动数据下的结果进行进一步分析,分析结果如图 4 和图 5 所示。从分析结果可以很容易看出,通过部署 RSU 进行辅助通信,车辆之间的通信概率明显增加,即使在 $T_{RSU} = 10min$ 的情况下,利用 RSU 进行通信时的平均通信次数是单纯使用 V2V 通信情况下的 4 倍。此外, T_{RSU} 对通信的概率也有很大影响,当 T_{RSU} 提高时,车辆的通信概率明显增加。

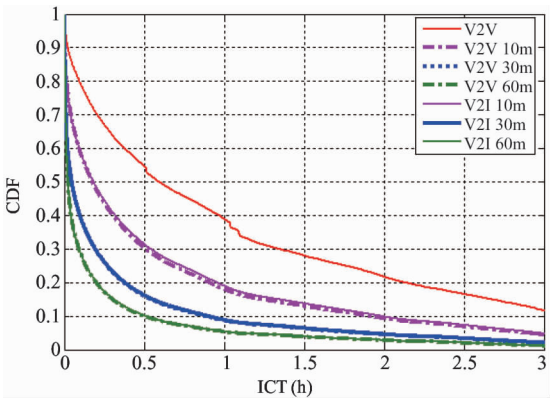


图 5 上海车载数据下的 V2V / V2I ICT 分布图

4 结 论

车载机会网络是未来无线网络中的重要组成部分,部署 RSU 进行辅助通信是提高车载机会网络性能的重要方法。本文提出了一种基于 RSU 辅助的车载机会网络通信能力增强方案,并以北京和上海两地一个月的出租车 GPS 数据为基础,对车辆与 RSU 的相遇特性进行了理论分析和仿真实验。研究表明,通过合理部署 RSU 对车辆的信息进行缓存,可以极大地提高车辆间通信的概率,同时,利用 RSU 可以完成车与车之间大数据的传输,能极大地提升车载机会网络的通信能力。

参考文献

[1] Index C V N. Global mobile data traffic forecast update, 2012-2016. *Cisco white paper*, 2012

[2] Li Y, Su G, Wu D, et al. The impact of node selfishness on multicasting in delay tolerant networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(5) : 2224-2238

[3] Li Y, Wang Z. Collaborative vehicular content dissemination with directional antennas. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 2012, 11(4) :1301-1306

[4] Wireless access for the vehicular environment (WAVE), <http://grouper.ieee.org/groups/802/11>

[5] Fior M. Vehicular Mobility and Network Simulation. *Handbook on Vehicular Networks*, 2013

[6] 李繁,金明录. 基于网络编码的车载移动网络数据传输优化. *计算机科学*, 2013, 40(3) :170-174

[7] Filali F, Bonnet C. Mobility models for vehicular ad hoc networks; a survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(4) :19-41

[8] Zheng Q, Hong X, Liu J. An agenda-based mobility model. In: *Proceedings of IEEE 39th annual Symposium on Simulation*, IEEE Computer Society, 2006. 188-195

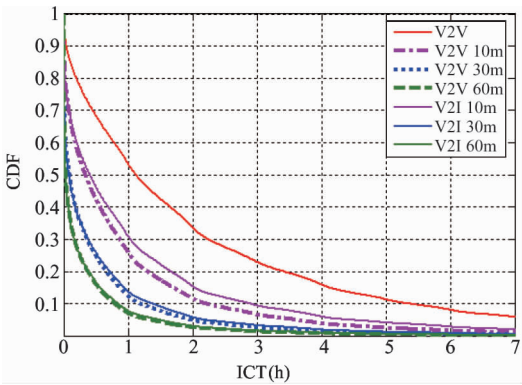


图 4 北京车载数据下的 V2V / V2I ICT 分布图

- [9] Community resource for archiving wireless data at dartmouth (Crawdad). <http://crawdad.cs.dartmouth.edu>, 2012
- [10] Li Y, Jin D, Wang Z, et al. Exponential and power law distribution of contact duration in urban vehicular ad hoc networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20 (1):110-113
- [11] Song C, Liu M, Wen Y, et al. Buffer and switch: an efficient road-to-road routing scheme for VANETs. In: Proceedings of IEEE 2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, Beijing, China, 2011. 310-317
- [12] Nekoui M, Eslami A, Pishro-Nik H. The capacity of vehicular ad hoc networks with infrastructure. In: Proceedings of IEEE 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops, Berlin, Germany, 2008. 267-272
- [13] Ding Y, Xiao L. SADV: Static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2445-2455
- [14] Lu X L R, Shen X. SPRING: a social-based privacy-preserving packet forwarding protocol for vehicular delay tolerant networks. In: Proceedings of 29th IEEE International Conference on Computer Communications, San Diego, USA, 2010. 632-640
- [15] Li Y, Jin D, Hui P, et al. Modeling the communication contacts in roadside unit aided vehicles opportunistic networks. In: Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications, Budapest, Hungary, 2013. 2376-2380

RSU based communication capacity enhancement scheme for vehicular opportunistic networks

Du Huakun^{*}, Kui Xiaoyan^{**}, Xiao Xuefeng^{**}, Li Yong^{***}, Chen Ling^{**}

(^{*} School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083)

(^{**} School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(^{***} Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

In consideration of the problem that the communication capability of traditional vehicular opportunistic networks is limited and random, a scheme for enhancing the communication capability of a vehicular opportunistic network by arranging road-side units (RSU) to achieve aided communications is proposed. The scheme can effectively overcome traditional vehicular opportunistic networks' shortcomings of long inter-contact time (ICT) in communication and low transmission capacity by utilizing road-side units' advantages of stable coverage, storage and transmission. Based on the one month GPS data of taxicabs in Beijing and Shanghai, an analysis of the vehicle-RSU communication property was conducted by simulation, and it was found that the use of the proposed scheme, greatly improved the inter-vehicle communication probability because of the RSU-based cache vehicle information, thus the communication capability of vehicular opportunistic networks was greatly enhanced.

Key words: vehicular networks, road-side unit (RSU), communication capacity, opportunistic networks