

## 车联网 RSU 单元下行流量的性能研究<sup>\*</sup>

刘 业<sup>1,2,4</sup>, 刘林峰<sup>3</sup>, 郑 隆<sup>1,2</sup>, 王华锋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(中国科学技术大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215123)

<sup>2</sup>(中国科学技术大学 软件学院, 江苏 苏州 215123)

<sup>3</sup>(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

<sup>4</sup>(阳立电子(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000)

通讯作者: 刘业, E-mail: yeliu@ustc.edu.cn, http://www.ustc.edu.cn

**摘 要:** 基于 802.11p/WAVE 的车联网是一项涉及道路交通、无线通信、自组织系统等多学科综合性的技术领域, 车联网中, RSU 单元可作为 AP, 让在行驶的汽车中的人们可以随时随地接入 Internet, 其中, 如何建立 RSU 单元的下行流量模型是一个关键问题. 通过引入车辆密度概率质量函数, 分析车联网 MAC 层车辆通过 RSU 设备访问 Internet 的信道竞争情形, 提出了适用于高速公路交通场景的 RSU 单元网络吞吐量模型, 并推导出 RSU 上行及下行流量的性能解析式. 针对 RSU 单元通信范围有限、相邻 RSU 单元之间可能存在盲区的问题, 提出了一种利用同向行驶的车辆协助数据下载的 VCoDS 方案, 以达到提高某时间段 RSU 的下行流量的目标. 仿真实验结果证实, VCoDS 方案可有效提高 RSU 单元的下行流量.

**关键词:** 车联网; 802.11p; 协助下载; 下行性能; 流量

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 刘业, 刘林峰, 郑隆, 王华锋. 车联网 RSU 单元下行流量的性能研究. 软件学报, 2015, 26(7): 1700–1710. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4616.htm>

英文引用格式: Liu Y, Liu LF, Zheng L, Wang HF. Study on the downlink performance of roadside unit in vehicular ad-hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(7): 1700–1710 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4616.htm>

### Study on the Downlink Performance of Roadside Unit in Vehicular Ad-Hoc Networks

LIU Ye<sup>1,2,4</sup>, LIU Lin-Feng<sup>3</sup>, ZHENG Long<sup>1,2</sup>, WANG Hua-Feng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

<sup>2</sup>(School of Software Engineering, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

<sup>3</sup>(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>4</sup>(Nettech Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** VANET (vehicular ad-hoc network) based on 802.11p/WAVE is a comprehensive and systematic field of study which involves many subjects such as intelligent traffic system, wireless communication and self-organizing system. Roadside unit (RSU) works as IEEE 802.11p access points (APs) to open up services to clients from traveling vehicles for anytime and anywhere connection to Internet, thus making the modeling of downlink performance of RSU a key challenge. By introducing the vehicle density probability on freeway, the channel access contention scenarios of CSMA/DCF-based MAC layer well adapted to the time-varying vehicle arrivals are analyzed in detail. Then on that basis, the throughput performance model of VANET, including both the data downlink and the uplink through RSU for travelling vehicles, is presented. To address the issue of intermittent connectivity caused by RSU's inability to cover all the highway areas,

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61373139); 教育部重点实验室开放基金(K93-9-2010-14); 江苏省自然科学基金(BK2012833); 江苏省博士后基金(1101136C); 江苏省高校自然科学研究项目(12KJB520011)

收稿时间: 2013-05-17; 定稿时间: 2014-04-03

VANET cooperative downloading scheme (VCoDS) is constructed to extend the downlink output of RSU. Simulations also verify the effectiveness of the proposed VCoDS scheme.

**Key words:** vehicular ad-hoc network; 802.11p; cooperative downloading; downlink performance; through output

无线局域网是指基于 802.11 协议,利用无线网卡、接入控制点 AP 等设备建立的局部互联互通的网络,使得用户能够摆脱有线的束缚,随时随地接入 Internet 的用户需求,推动了无线局域网技术的发展,近 10 多年来,IEEE 相继发布 IEEE 802.11a/b/g/n 等系列标准,使得无线局域网在带宽或传输速率上得到了极大的提高,从最初的 1Mbps~2Mbps 到目前传输速率可达 54Mbps,802.11n 甚至可以达到 300Mbps.但是对于快速移动性支持、大覆盖、节能等方面的支持还有所欠缺,这些领域则成为近年来 802.11 协议研究领域的热点课题.802.11p 协议就是在对网络节点快速移动性的支持背景下提出来的,这样,人们即便在行驶的汽车里,5.850G~5.925GHz 也能通过路边单元 RSU(AP)接入 Internet.

我们认为,基于 802.11p/WAVE 协议栈的无线局域网是车联网的重要组成部分.联邦通信委员会 FCC 将之间的 75MHz 频段用于基于 802.11p<sup>[1]</sup>的车联网<sup>[2,3]</sup>的通信,其中,第 1 个 5MHz 频段预留作为安全空白边界使用,后续分为 7 个相邻的 10MHz 频段,如图 1 所示,信道依次编号为 Ch172,Ch174,...,Ch184.其中,Ch178 是车联网的控制信道 CCH,用于控制、管理其他 6 个频段的业务信道 SCH 分配;Ch172 用于交通事故避免及应急,作为安全警戒的紧急消息的传递信道使用;Ch184 是高功率大范围信道,适合较远距离的公共安全信息的传输;Ch174,Ch176,Ch180,Ch182 是普通业务信道,通过 RSU(AP)单元用来传输传统的网络应用数据,可根据应用对带宽的需求,将相邻普通 SCH 合并为 20MHz 频段的业务信道来使用,即可令 Ch175={Ch174,Ch176},Ch181={Ch180,Ch182},此时,20MHz 信道上所传递的数据优先级相对较低.

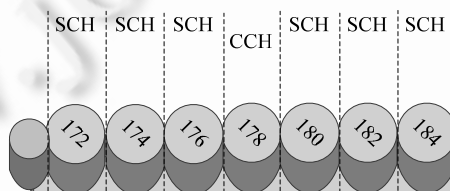


Fig.1 Channel allocation of IEEE 802.11p Mac Layer

图 1 IEEE 802.11p 介质访问控制层信道频谱分配

下面我们结合 802.11p 网络适配器的接口配置情况,对 MAC 层的信道复用方式作进一步讨论.802.11p 标准草案中已经明确使用多个正交信道技术的发展方向,但网络适配器使用单接口多信道技术还是多接口多信道技术尚未有定论,多接口多信道产品价格贵,但单接口多信道模式中信道切换时延往往高达毫秒级,远大于传播时延,且信道存在大量浪费,多接口多信道模式对车联网更具现实意义.Ch172 信道、Ch184 信道用于安全信息的广播传递,信息数据量相对较少、传输实时性要求高,适合于使用基于预约的时分多址复用(time division multiple access,简称 TDMA)协议<sup>[4]</sup>.在基于预约 TDMA 协议中,如果一个车辆节点竞争到某时隙,只要该节点不主动放弃,则可一直占用该时隙传输数据,从而达到一定的实时性要求,即,传输时延可预期.但是由于增加了预约时隙的过程,对于单接口多信道来说,其平均时延往往大于 CSMA/DCF;而对于多接口多信道,则可利用 CCH 信道以并行流水线的方式处理预约时隙及数据传输过程,极大地缩短了时延.但是,为了保证所有车辆节点都能占有时隙发送数据,则需要预留一定的时隙数目,从而导致信道的吞吐量不高,这正好适用于数据量较少的安全信息.Ch174,Ch176,Ch180,Ch182 等普通业务信道用来传输传统的网络应用数据,则存在流量突发性、时延要求低、吞吐量要求高等特征,适合于使用基于竞争的 CSMA/DCF 协议<sup>[5]</sup>.本文中,我们考虑使用 CSMA/DCF 技术竞争普通 SCH 信道时隙,占用该时隙将网络报文通过 1 跳或者 2 跳的方式传递给 RSU 单元,并由 RSU 单元将网络报文注入 Internet,而从 Internet 发往各车辆节点的报文则由 RSU 单元通过竞争下行信道的时隙并通过 1 跳或者至多 2 跳的方式转发给各车辆.

加拿大 Pan 课题组的 Zhuang 等人<sup>[6]</sup>对 RSU 单元的上行流量进行了建模.文献[7]对通过 RSU 接入 Internet 的车辆节点的下行流量进行了建模,但没有考虑节点占用信道时隙竞争时的相互影响.Trullois-Cruces 等人<sup>[8]</sup>提出了一种协助下载以增强下行性能的框架,但没有具体的算法实现.文献[9]给出了一种在 VANET 网络中通过对向行驶的车辆节点帮助同向车辆传递信息的方案.国内的中国科学院计算技术研究所课题组<sup>[10]</sup>延续了通过对向行驶的车辆辅助下载 Internet 数据的研究思路,并对车速变化带来的下载效率的影响进行了深入的分析.文献[11]中提出了一种通过车间中继延伸 AP 通信范围的方法,以便于车辆有更大的机会通过 AP 接入 Internet.

基于 802.11p 的局域网中上行信道时隙竞争的特征是:RSU 不参与上行流量信道的时隙竞争,充当 AP,负责将上行流量转发至 Internet.而 RSU 在转发下行流量时,RSU 具有下行流量的信息,但局域网内部的车辆节点之间也会有流量发生,所以 RSU 在转发下行流量时需要与车辆节点竞争信道的使用.本文的切入点即是对车联网 RSU 单元的下行流量的性能及其性能提升方案进行研究.

## 1 系统模型

### 1.1 网络拓扑模型

802.11p 协议目前支持的最大传输距离为 1 000m,可满足行驶速度均值为 33m/s(约为 120km/h)的车辆(OBU 单元)之间以及车辆与路边单元(RSU 单元)之间的通信.受天线发射功率的限制,设 RSU 最大传输半径  $R_r=1000m$ ,OBU 之间的传输半径为  $R_o \in [50m, 300m]$ .

图 2 给出了一种高速公路交通场景下的车联网网络拓扑模型,假设高速公路上某路段长度为  $x$ ,车辆密度为  $\rho$ (vehicular numbers per meter),则该路段内的车辆数目满足  $\lambda=\rho x$  的泊松分布<sup>[12,13]</sup>,该路段存在  $n$  辆车的概率质量函数为  $p(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$ .上述模型中的泊松过程对应于一则计数过程,即,某时刻  $x$  路段的车辆总数目  $N(x)$  为符合泊松过程的计数过程.根据泊松分布函数的性质, $x$  路段车辆总数目的  $N(x)$  期望与方差均为  $\lambda$ ,有:

$$p(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} = \frac{(\rho x)^n e^{-\rho x}}{n!}, \text{即 } p(n, x) = \frac{(\rho x)^n e^{-\rho x}}{n!} \quad (1)$$

则图 2 中  $AP_1$  通信覆盖范围内的车辆节点数目的概率质量函数为

$$p(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} = \frac{(\rho \cdot 2R_r)^n e^{-\rho \cdot 2R_r}}{n!} \quad (2)$$

其中,  $E[N]=\lambda=\rho \cdot 2R_r$ ,  $D[N]=E[N^2]-(E[N])^2=\lambda=\rho \cdot 2R_r$ .



Fig.2 VANET topology model in the freeway

图 2 高速公路场景车联网网络拓扑模型

### 1.2 RSU覆盖范围内信道访问机制

下面我们基于经典的 CSMA/DCF 协议原理<sup>[5]</sup>来分析 802.11p 中 MAC 层车辆节点通过 RSU(AP)设备访问 Internet 的信道竞争情形,并在此基础上分析 RSU 上行及下行流量的性能模型.

图 3 给出了两个车辆节点利用 CSMA/DCF 竞争信道发送数据的示意图,车辆节点侦听 SCH 信道连续空闲时长达到 DIFS 后,节点认为信道处于空闲状态,则可以向目标节点 RSU 发送数据.为了增强在 MAC 层传输的可靠性,RSU 检验所收到的数据帧的循环冗余校验码 CRC:若校验码正确,则在等待 SIFS 时长间隔后向发送节点发送一个 ACK;否则,等同于数据帧传输失败,发送节点需要重传该数据.为了避免发送数据时产生的冲突,在

发送数据帧前增加了一个退避(backoff slot)过程,首先产生一个随机的退避时间  $BackoffTime$ ,如果一个节点在退避过程中,侦听到的信道的空闲时间达到 1 个时隙,则将退避时间减 1;若信道忙,则退避时间变量不发生变化.直至退避时间减为 0,节点再发送数据. $BackoffTime=Random(\cdot)\cdot CW\cdot aSlotTime$ ,其中, $CW$  为竞争窗口参数,为一正整数; $Random(\cdot)$ 为 0~1 的随机数; $aSlotTime$  为一个竞争时隙的长度; $BackoffTime$  为取整后的值.设最小竞争窗口为  $CW_{min}$ ,最大竞争窗口为  $CW_{max}$ ,有  $CW$  初始值为  $CW_{min}$ .当一个车辆节点发送数据失败时,即可判定当前网络流量较大,则将  $CW$  窗口增加 1 倍,有  $CW = 2^m \cdot \frac{CW_{min}}{2}$ ,其中, $m$  为重传次数.这里的  $m$  也被称为退避阶段参数,当  $CW$  值增加为  $CW_{max}$  时, $CW$  值保持不变,直至该节点发送数据成功,或者达到了最大重传次数  $m'$ , $CW$  被重置成  $CW_{min}$ ,一般可设  $m'=m$ .

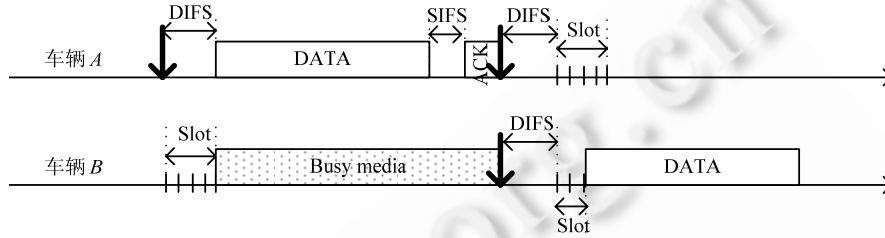


Fig.3 Basic access mode of CSMA/DCF  
图 3 CSMA/DCF 的基本访问模式

在 AP 覆盖范围内的  $n$  个车辆节点中,假设任一车辆节点  $i$  在一个随机时隙内发送一个数据帧的概率为  $\tau$ ,则该数据帧与其他节点发出的数据帧发生碰撞的概率为  $\eta$ ,在  $n$  值一定时, $\eta$ 始终独立且保持恒定,有如下关系式:

$$\eta=1-(1-\tau)^{n-1} \tag{3}$$

即:

$$\tau=1-(1-\eta)^{\frac{1}{n-1}} \tag{4}$$

Bianchi 利用马尔可夫链对图 3 所示的退避过程进行了建模和分析.令  $W=CW_{min}$ ,则  $CW_{max}=2^{m-1}\cdot W$ ,设图 2 中的  $AP_1$  覆盖范围内有  $n$  个车辆节点竞争该区域的无线信道的使用.我们知道, $\tau$ 与  $\eta$ 两个变量都是未知的,利用马尔可夫链分析退避过程,可推出:

$$\tau(\eta)=\frac{2}{1+W+\eta W\sum_{i=0}^{m-1}(2\eta)^i} \tag{5}$$

由公式(4)、公式(5)<sup>[5]</sup>联立可得非线性方程的数值解,由此可以得到后文仿真实验部分中图 5 所示车辆数据发送碰撞概率与车辆密度关系图的理论分析曲线. $\tau$ 与  $\eta$ 均只与初始竞争窗口  $W=CW_{min}$  及最大重传次数  $m$  有关,与车辆节点的传输帧长等无关.接下来,我们将 Bianchi 的结论应用于 RSU 流量模型的分析中.

### 1.3 车联网吞吐量

假设在一个时隙中至少有一个帧在传输的概率为  $P_{tr}$ ,有且仅有一个帧传输成功的概率为  $P_s$ ,有:

$$P_{tr}=1-(1-\tau)^n, P_s=\frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}}=\frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}$$

下面我们来计算 802.11p 某一帧的帧时长.若某车辆节点成功传输 1 帧,则对于其他节点来说是信道忙,这段过程的概率为  $Succ_n=P_sP_{tr}$ ,平均时间为  $TSucc_n$ ;节点侦听信道为闲时,同时占用信道发送数据从而导致竞争冲突这一过程的概率为  $Coll_n=P_{tr}(1-P_s)$ ,平均时间为  $TColl_n$ ;整个时隙的信道空闲概率为  $Idle_n=1-P_{tr}$ ,信道空闲的平均时间为  $T_\sigma$ .其中, $TSucc_n=T_{DIFS}+T_{DATA}+T_{SIFS}+T_{ACK}$ , $TColl_n=T_{DIFS}+T_{DATA_{max}}^*+T_{SIFS}+T_{ACK}$ ;  $T_{DATA}$  为一帧中的数据

时长,  $T_{DATA_{max}}^*$  为每次冲突发生时的最大数据帧长. 假设所有数据帧的帧长都是一样的, 有  $TColl_n = TSucc_n$ , 则一个系统时隙的累积平均时长  $T_{SLOT}$  为

$$\begin{aligned} T_{SLOT} &= Idle_n \cdot T_\sigma + Succ_n \cdot TSucc_n + Coll_n \cdot TColl_n \\ &= (1 - P_r) \cdot T_\sigma + P_s P_r \cdot TSucc_n + P_r \cdot (1 - P_s) \cdot TColl_n \\ &= (1 - \tau) \cdot T_\sigma + (1 - (1 - \tau)^n) \cdot (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK}) \end{aligned} \quad (6)$$

802.11pDCF 协议对于上层应用数据的传输效率  $\psi_{DCF}$  为

$$\begin{aligned} \psi_{DCF}(n) &= \frac{P_s P_r \cdot T_{DATA}}{Idle_n \cdot T_\sigma + Succ_n \cdot TSucc_n + Coll_n \cdot TColl_n} \\ &= \frac{P_s P_r \cdot T_{DATA}}{(1 - P_r) \cdot T_\sigma + P_s P_r \cdot TSucc_n + P_r \cdot (1 - P_s) \cdot TColl_n} \\ &= \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1} \cdot T_{DATA}}{(1 - \tau)^n \cdot T_\sigma + (1 - (1 - \tau)^n) \cdot (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})} \end{aligned} \quad (7)$$

对于一个车辆节点来说, 假设数据链路层的上层所需传输的数据为一个帧中可传的数据  $DATA$ , 其数据量为  $D_{DATA}$ , 利用某一帧成功发送的数据量  $D_{DATA}^\circ$  为

$$D_{DATA}^\circ = \psi_{DCF}(n) \cdot D_{DATA} \quad (8)$$

之前提到的  $T_{DATA}$  为一帧中的数据帧传输时长, 802.11p 规范中定义的一帧中所传的数据量  $D_{DATA}$  一般为 1KB (1 024 字节), 在 802.11p 规范中定义  $T_{DATA} = 2949\mu s$ , 且 802.11p 规范中标称的数据速率  $\omega$  约为 3Mbit/s, 有:

$$\frac{1024 \times 8}{2.949 \times 10^{-3}} \approx 3 \times 10^6 \text{ bit/s.}$$

即:

$$\omega \approx \frac{D_{DATA}}{T_{DATA}} \quad (9)$$

则对于一个车辆节点来说, 设数据链路层的上层所需传输的数据为  $DATA_{ULayer}$ , 将该数据按照长度切分成多个  $DATA$ , 则考虑多帧的数据量情况与单帧的数据量情况是一致的. 这里的吞吐量指的是上层用户的净数据吞吐量. 考虑将公式(2)中的 AP 通信范围内的车辆节点数目的概率质量函数, 纳入到一个车辆节点的网络吞吐量  $\gamma$  的计算中来, 则有:

$$\begin{aligned} E[\gamma] &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \left( p(n) \cdot D_{DATA}^\circ \cdot \frac{\omega}{n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}} \right) \right] \\ &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho \cdot 2R_r)^n e^{-\rho \cdot 2R_r}}{n!} \cdot \psi_{DCF}(n) \cdot D_{DATA} \cdot \frac{\omega}{n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}} \right] \\ &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho \cdot 2R_r)^n e^{-\rho \cdot 2R_r}}{n \cdot n!} \cdot \psi_{DCF}(n) \cdot \omega \right] \end{aligned} \quad (10)$$

同样, 考虑整个 AP 范围内  $n$  辆车的网络吞吐量  $\Gamma$ , 有:

$$\begin{aligned} E[\Gamma] &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \left( n \cdot p(n) \cdot D_{DATA}^\circ \cdot \frac{\omega}{n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}} \right) \right] \\ &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \frac{(\rho \cdot 2R_r)^n e^{-\rho \cdot 2R_r}}{n!} \cdot \psi_{DCF}(n) \cdot D_{DATA} \cdot \frac{\omega}{n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}} \right] \\ &= E \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho \cdot 2R_r)^n e^{-\rho \cdot 2R_r}}{n!} \cdot \psi_{DCF}(n) \cdot \omega \right] \end{aligned} \quad (11)$$

在车联网网络吞吐量分析的基础上, 接下来对作为 AP 功能使用的 RSU 的上行及下行流量性能进行讨论.

### 1.4 RSU流量分析

与之前的 802.11 系列协议相比,802.11p 为了降低由于多径传播时延加上多普勒频移效应引起的相互干扰带来的影响,将 OFDM 参数在时域内的值扩大了 1 倍,从而使得 802.11p 不仅支持节点的高速移动,而且使得通信范围达到 1 000m,与 802.11b/n 系列的数据传输速率 6~54Mbit/s 相比,802.11p 在 10MHz SCH 频段通常的传输速率为 3Mbit/s,支持的最高传输速率则降为 27Mbit/s<sup>[3]</sup>。以下我们将结合两种不同的 RSU 上下行信道分配方案对 RSU 的流量进行分析。

方案 1. 上下行等分信道频谱。

基于 802.11p 的局域网内上行信道时隙竞争的特征是 RSU 不参与上行流量信道的时隙竞争,充当 AP,负责将上行流量转发至 Internet,流量分析模型中暂不考虑 RSU 范围内的节点内部之间的信息传输。根据当前 Internet 网络应用对带宽需求的特征,可以考虑将 10MHz 频谱等分为上行专用频谱 5MHz 及下行专用频谱 5MHz,则此时 AP 范围内的  $n$  辆车利用 CSMA/DCF 方案竞争 5MHz 上行信道的使用,上行流量等同于公式(11)所对应的车联网网络吞吐量,而 RSU 在转发下行流量时,因为 RSU 是知道所有由其转发的下行数据发送的具体要求,所以可以最大化地利用下行信道带宽。

方案 2. RSU 参与信道竞争。

RSU 在转发下行流量时,需要与车辆节点竞争信道的使用,但我们必须要考虑的事实是:从数据量的角度来看, $n$  辆车节点发往 RSU 进而访问 Internet 的上行数据量与从 RSU 中转 Internet 发往  $n$  辆车节点的下行数据量是相对持平的,若假设任一车辆节点  $i$  在一个随机时隙内发送一数据帧的概率为  $\tau$ ,则 RSU 发送一个数据帧的概率为  $n\tau$ 。

我们可以将 RSU 看成一个超级节点,这个超级节点内有  $n$  个  $i_{rsu}$  子节点,其中, $i_{rsu}$  与  $n$  辆车中的任一车辆节点  $i$  是一一对应的,则流量分析模型中可看成是  $2n$  个节点竞争信道的使用,关于车辆数目  $n$  的讨论,我们说在车辆密度  $\rho$  很大时, $n$  将有可能取一个比较大的值  $C$ ,有:

$$E\left[\sum_{n=0}^C p(n)\right] \approx 1 \tag{12}$$

结合公式(10)、公式(11),则有:

$$\begin{aligned} E[\Gamma_{DownLink}] &= E\left[\sum_{n=0}^C \left(n \cdot p(2n) \cdot D_{DATA}^{\circ} \cdot \frac{w}{2n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}}\right)\right] / E\left[\sum_{n=0}^C p(n)\right] \\ &\approx E\left[\sum_{n=0}^C \left(n \cdot p(2n) \cdot \psi_{DCF}(2n) \cdot D_{DATA} \cdot \frac{w}{2n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}}\right)\right] \\ &= E\left[\sum_{n=0}^C \frac{(\rho \cdot 2R_r)^{2n} e^{-\rho \cdot 2R_r}}{2 \cdot (2n)!} \cdot \psi_{DCF}(2n)\right] \cdot \omega \end{aligned} \tag{13}$$

$$E[\Gamma_{UpLink}] = E\left[\sum_{n=0}^C \left(n \cdot p(2n) \cdot D_{DATA}^{\circ} \cdot \frac{w}{2n} \cdot \frac{1}{D_{DATA}}\right)\right] / E\left[\sum_{n=0}^C p(n)\right] = E(\Gamma_{DownLink}) \tag{14}$$

我们在第 2 节使用方案 2 的信道分配方案,公式(13)给出了 RSU 单元下行流量的性能解析式。

## 2 车联网协作下载方案研究

### 2.1 单用户下载请求流量性能分析

在本文中,我们考虑面向单用户下载请求的应用场景。高速公路中的车辆行驶路线易被预测,假设某车辆  $I$  进入图 2 所示  $AP_1$  的覆盖范围,车速为  $\bar{v}_i$ ,应用场景考虑只有车辆  $i$  有从 Internet 下载数据的请求。在  $AP_1$  范围内,车辆  $i$  的下载时长为  $\Delta t = \frac{2R_r}{|\bar{v}_i|} = \frac{2R_r}{v_i}$ 。在这段时间内,仅有 1 个用户(RSU)竞争信道发送数据,即,该数据帧与其他

节点发出的数据帧发生碰撞的概率  $\eta=0$ ,由公式(3)得  $\tau(0) = \frac{2}{1+W}$ 。此时,在  $AP_1$  覆盖范围内,必须至少存在 1 辆车,

即,车辆  $i$  是存在的,其概率为  $1 - e^{-\rho \cdot 2R_r}$ . 结合公式(13),有:

$$\begin{aligned}
 E[\Gamma_{DownLink}] &\approx 1 \cdot (1 - e^{-\rho \cdot 2R_r}) \cdot \psi_{DCF}(1) \cdot \omega \\
 &= (1 - e^{-\rho \cdot 2R_r}) \cdot \frac{\tau \cdot T_{DATA}}{(1 - \tau) \cdot T_\sigma + \tau \cdot (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})} \cdot \omega \\
 &= \frac{(1 - e^{-\rho \cdot 2R_r}) \cdot \omega \cdot T_{DATA}}{\left(\frac{2W-1}{2}\right) \cdot T_\sigma + (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})}
 \end{aligned} \tag{15}$$

则车辆  $i$  在  $AP_1$  覆盖范围内的经由 RSU 直接数据下载(1跳方式)的总流量为

$$E[W] = E[\Gamma_{DownLink} \cdot \Delta t] \approx \frac{(1 - e^{-\rho \cdot 2R_r}) \cdot \omega \cdot T_{DATA}}{\left(\frac{2W-1}{2}\right) \cdot T_\sigma + (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})} \cdot \frac{2R_r}{v_i} \tag{16}$$

若是下载任务数据总流量较大,可能需要经过多个 RSU 覆盖区域才能完成数据下载.

### 2.2 车联网协作下载方案(VCoDS)

当车辆  $i$  自左向右驶入图 4 所示的盲区左侧  $R_o$  范围区间内时,因为超出  $AP_1$  的覆盖范围,无法直接从 RSU 下载数据,我们考虑利用尚在  $AP_1$  覆盖范围内的与车辆  $i$  同向行驶的车辆中选择一辆车  $j$  来帮助  $i$  完成下载任务,我们把这种车联网协作下载方案称为 VCoDS(VANET cooperative downloading scheme).

选择同向行驶车辆协助下载较之于对向车辆协助下载的优势分析如下:高速公路上对向行驶的车辆,相对行驶速度达到 240km/h 以上,倘若建立连接,则连接保持时间短、信道衰落快,且多普勒效应显著增大;而同向行驶的车辆之间构建 1 跳连接协助数据下载则更为合理,其信道衰落慢,且连接保持时间长.从简化模型及实用性方面考虑,模型中目前仅考虑数据的 1 跳协助数据转发.

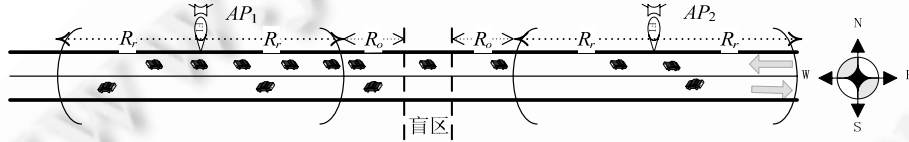


Fig.4 VANET cooperative downloading scheme model

图 4 车联网协作下载方案模型

车辆  $j$  的选择策略讨论:RSU 单元易于获得车辆  $i$  及当前覆盖范围内所有车辆位置及行驶速度信息.假设车辆  $j$  与  $i$  可进行协助的最长通信距离为  $R_o$ ,则 RSU 在车辆  $i$  的后方邻居节点集中选择距离相对较远的车辆担当车辆  $j$  的角色完成协助下载,而不是直接相邻的邻居节点,当车辆密度较大时,易造成频繁地断开连接,重新选择新的协助车辆  $j$ ,继而再建立数据连接的情形.在协助下载过程中,只要车辆  $i$  未进入盲区,RSU 可重新选择车辆担当车辆  $j$  的协助下载角色.

由公式(1)可知,在  $x$  范围内至少有 1 辆车的概率:  $\Pr_{(x)}\{k \geq 1\} = 1 - \Pr_{(x)}\{k = 0\} = 1 - e^{-\rho x}$ ,  $x = R_o - v_i \cdot t$ .

$$\Pr_{(x)}\{k \geq 1\} = 1 - e^{-\rho(R_o - v_i \cdot t)} \tag{17}$$

$AP_1$  覆盖范围内信道竞争使用情况如下:① RSU 占用信道将下载数据发往车辆  $j$ ;② 车辆  $j$  占用信道将下载数据转发给车辆  $i$ ,在这段时间内,有 2 个用户竞争信道发送数据,即,该数据帧与其他节点发出的数据帧发生碰撞的概率为  $\eta_{(n=2)}$ ,由公式(4)、公式(5)联立方程解得  $\tau_{(n=2)}$ ,则:

$$\begin{aligned}
 \Gamma'_{DownLink} &\approx 1 \cdot (1 - e^{-\rho \cdot (R_o - v_i \cdot t)}) \cdot \psi_{DCF}(2) \cdot \frac{\omega}{2} \\
 &= (1 - e^{-\rho \cdot (R_o - v_i \cdot t)}) \cdot \frac{2\tau(1 - \tau) \cdot T_{DATA}}{(1 - \tau)^2 \cdot T_\sigma + (1 - (1 - \tau)^2) \cdot (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})} \cdot \frac{\omega}{2}
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \text{令 } B &= \frac{\tau(1-\tau) \cdot T_{DATA}}{(1-\tau)^2 \cdot T_{\sigma} + (1-(1-\tau)^2) \cdot (T_{DIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK})} \cdot \omega, \text{ 其中, } \tau = \tau_{(n=2)}: \\ E[W_{extra}] &= \int_{t=0}^{R_0} \Gamma'_{DownLink} \cdot dt = B \cdot \int_{t=0}^{R_0} \frac{1}{v_i} (1 - e^{-\rho \cdot (R_0 - v_i \cdot t)}) \cdot dt = \frac{B}{v_i} \cdot \left( R_0 - \frac{1}{\rho} (1 - e^{-\rho \cdot R_0}) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

则车辆  $i$  在经过  $AP_1$  区域时,经由车辆  $j$  协助,目前的数据下载总流量为

$$E[W'] = E[W] + E[W_{extra}] \quad (20)$$

若下载任务数据总流量较大,可能需要经过多个 RSU 覆盖区域才能完成下载.考虑到  $AP_1$  及后续  $AP_i$  都是连入 Internet 的,即互联互通的,则车辆  $i$  可以通过定时发送询问报文及后续  $AP_i$  根据车辆速度计算的方式完成即将进入覆盖区域的协助下载方案.在进入新的覆盖区域时,通过前方的车辆节点中继协助下载数据.那么在后续某一  $AP_i$  的覆盖范围内的数据下载总流量为  $E[W'] = E[W] + 2E[W_{extra}]$ .

考虑当前 IP 网络中任一款要求可靠性的应用都需要在端到端的传输层(TCP)完成数据的确认(ACK)工作,若采用我们的方案,也是能够满足需求的.而在利用对向行驶车辆协助下载方案的过程中,由于数据传输时延的固有限制,不适合于可靠性保证的应用数据传输.对于数据传输中无需可靠性保证,比如视频点播网络应用,则可考虑在图 4 中的盲区增加利用对向车辆中继转发 UDP 报文,从而增加整个过程的下载数据量.但视频点播应用中一般会考虑带有时间戳字段的媒体传输协议,如 RTP,因为盲区对向行驶的车辆间存在相互超车的情况,所以接收端上层协议栈的缓存大小及对应漏桶的算法设计将面临较大的困难.

### 3 仿真实验

NS2 仿真环境中,802.11p 的 MAC 层的重要参数设置见表 1.车辆节点的移动性仿真过程如下:利用 MATLAB 生成符合泊松过程的多条序列,每条序列的长度为 12 000,存放在一维数组中,数组下标可当成图 2 所示坐标系中对应  $x$  轴的值,即车辆位置坐标,若某下标对应的数组变量对应的值为 1,说明在该位置有 1 辆车.利用 MATLAB 生成多组满足均值  $\mu=30\text{m/s}$ ,标准差  $\sigma=5\text{m/s}$  的正态分布数据,将这些数据赋值给上述泊松过程中的每一辆车,即车辆行进速度为  $Speed_i$ ,从而完成图 2 所示交通流的模拟,进入仿真实验.

**Table 1** 802.11p MAC layer parameters for NS2 setting (Mac/802\_11Ext set)

**表 1** NS2 仿真环境中 802.11p 介质访问子层参数设置(Mac/802\_11Ext set)

| NS2 参数         | 对应文中变量       | 含义                          | 值                   |
|----------------|--------------|-----------------------------|---------------------|
| $CW_{min\_}$   | $CW_{min}$   | Minimum backoff window      | 16/32/32/64         |
| $CW_{max\_}$   | $CW_{max}$   | Maximum backoff window 1024 | 1024/1024/2048/2048 |
| $RetryLimit\_$ | $m$          | Retry limit                 | 7/6/7/6             |
| $SlotTime\_$   | $T_{\sigma}$ | A slot time                 | 0.000 013s          |
| $SIFS\_$       | $T_{SIFS}$   | SIFS time                   | 0.000 032s          |
| $DIFS\_$       | $T_{DIFS}$   | DIFS time                   | 0.000 058s          |
| $DataTime\_$   | $T_{DATA}$   | 1KB data transmission time  | 0.002 949s          |
| $AckTime\_$    | $T_{ACK}$    | ACK transmission time       | 0.000 229s          |

图 5 给出了某 RSU(AP)覆盖范围内行驶的车辆在数据发送时的碰撞概率与车辆密度的关系图.随着车辆密度的增加,同一 AP 下的车辆在发送数据时的碰撞概率增大,较大的  $CW_{min}$  初始值可有效降低碰撞概率.在文献[5]中推导出  $W_{opt} \approx n \cdot \sqrt{2 \cdot TColl_n}$ ,可知  $W_{opt} \approx E[n] \cdot \sqrt{2 \cdot TColl_n} \approx \rho \cdot 2R_r \cdot \sqrt{2 \cdot TColl_n} = \rho \cdot C_{const}$ ,最优的  $W=CW_{min}$  取值是与车辆的密度密切相关的.当车辆密度较大时, $CW_{max}$  决定了曲线的收敛值.

随着车辆密度的增加,车辆在一个随机时隙里传输数据帧的概率  $\tau$  逐渐减小,当  $W=CW_{min}$  的初始值较大时, $\tau$  也相对较大,如图 6 所示.从图中也可以看出, $\tau$  与  $\eta$  的值只与道路上的车辆密度、初始竞争窗口  $CW_{min}$ 、最大重传次数  $m$  有关.

RSU 覆盖范围内每辆车节点的饱和吞吐量如图 7 所示,其中,802.11p 数据速率  $\omega$  为 3Mbit/s.可以看出:随着车辆密度的增加,每辆车节点在数据传输时的饱和吞吐量也随之降低.图 8 给出了整个 RSU 范围内网络饱和和吞吐量随着道路车辆密度变化的情形,随着车辆密度的增大,整个网络的饱和吞吐量因为车辆发送数据产生



的协议固有冲突逐渐降低;但是因为退避窗口机制的实施,随着车辆密度的进一步增大,网络吞吐量基本保持稳定,如图 8 中横坐标从 0.06 开始,曲线基本保持稳定.

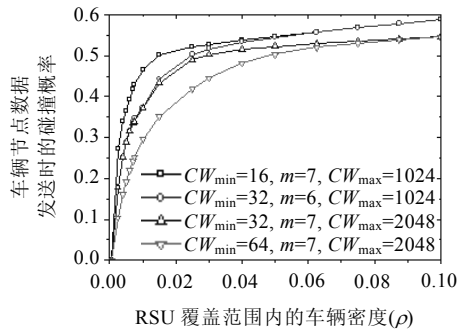


Fig.5 Collision probability vs. traffic density  
图 5 车辆数据发送碰撞概率 vs. 车辆密度

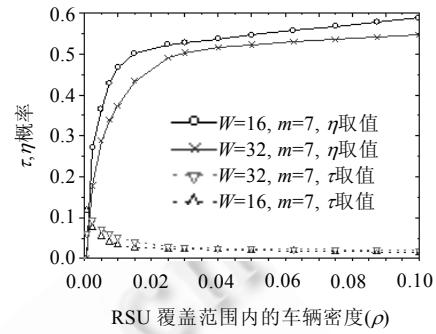


Fig.6 Value of  $\tau$  and  $\eta$  vs. vehicular density  
图 6 不同车辆密度下  $\tau$  与  $\eta$  的值

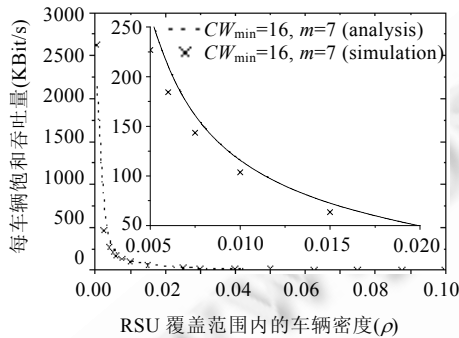


Fig.7 Throughput per vehicle vs. vehicular density  
图 7 RSU 覆盖范围内单位车辆饱和吞吐量

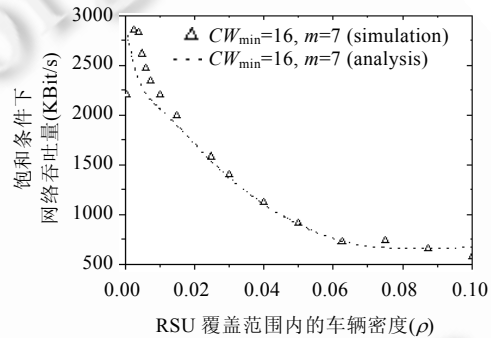


Fig.8 Saturation throughput of VANET in the range of RSU  
图 8 RSU 覆盖范围内网络饱和吞吐量

以某辆车经由 RSU 单元从 Internet 下载数据为例,考察 RSU 下行流量的性能.仿真实验场景及参数设置如下:高速公路上 AP(RSU)单元的通信范围是 1 000m,车辆 OBU 之间的通信范围分别为 50m,150m,300m,500m,高速公路上这一路段的车辆密度为 0.025,路段总长度为 12 000m,该路段共部署 3 个 RSU,间隔距离为 5 000m,其中某一辆车进入该路段开始下载 400M 的电影文件.考虑高速公路上车辆速度的变化并不大,设在仿真环境中一旦车辆速度确定,则在某一路段内车速不发生变化,车辆速度是满足均值  $\mu=30\text{m/s}$ ,标准差  $\sigma=5\text{m/s}$  的正态分布.

图 9 中,Origin\_downlink 表示不采用任何车辆协助经由 RSU 单元下载流量情形,Origin\_downlink 的理论曲线由公式(15)、公式(16)联立推出.此时,车辆在驶入该路段 360s 前后,经由 3 个 RSU 单元完成下载任务.如果图 2 所示盲区与图 4 所示盲区的不重合范围内利用同向行驶的车辆完成 1 跳的辅助下载,则可利用公式(19)、公式(20)得出 VCoDS\_downlink 的下载情形.可以发现:只要经过 2 个 RSU 单元,即可完成下载任务.实际的仿真测试中,因为考虑到车速的变化带来的影响,所以下载所花费的时间皆长于理论曲线.结果表明:利用同向行驶的车辆进行协助下载,从而在车辆驶入盲区时也能增加 RSU 单元的下行流量,其方案是切实有效的.

图 10 给出了 OBU 之间的通信范围分别为 50m,150m,300m,500m 时,VCoDS 协助方案的下行流量情况.可以看出:随着  $R_0$  范围的增加,通过 VCoDS 协助下载以增加 RSU 单元下行流量的效果愈加明显.为验证 VCoDS 方案的有效性,目前实验仿真场景参数设置中,RSU 间的盲区长度远大于车辆之间的最大通信距离.而实际上,随着 802.11p 技术的发展、RSU 单元成本的降低,RSU 的部署也将会基本全覆盖高速公路网络.在演进过程中,

盲区的长度会逐渐缩短,我们的 VCoDS 方案在整个演进过程中的实用性也愈发明显.

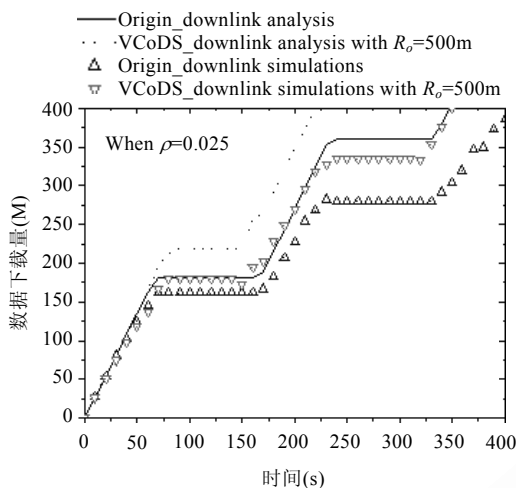


Fig.9 Origin\_downlink vs. VCoDS\_downlink

图 9 下载流量性能对比

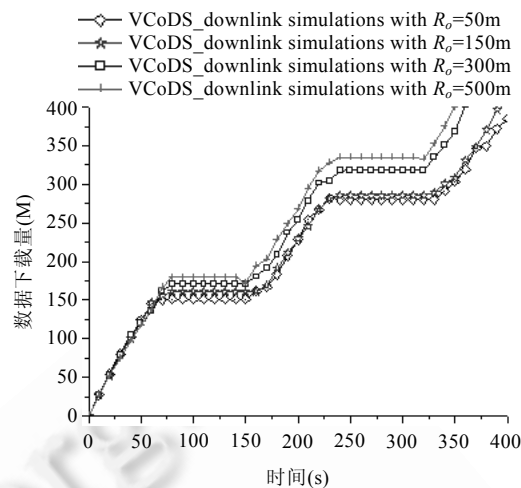


Fig.10 Data downloaded with VCoDS in the different cases

图 10 不同  $R_o$  情形下, VCoDS\_downlink 下载流量性能图

#### 4 结束语

本文应用交通流里的车辆分布理论,结合经典的 CSMA/DCF 协议原理分析 802.11p 中 MAC 层信道竞争的情形,通过将 RSU 通信范围内的车辆密度概率质量函数纳入到网络吞吐量的计算中来,对作为 AP 功能使用的 RSU 单元的流量性能进行讨论,并针对相邻 RSU 单元之间可能存在盲区的问题,以高速公路单用户下载数据应用场景为例,提出了利用同向行驶的车辆 1 跳协助数据下载的 VCoDS 方案,以达到提高某时间段 RSU 的下行流量性能的目标.另外,若是利用 P2P 的思想在车辆之间进行 Internet 数据协助下载,本文的研究成果也可以应用进来.

我们的后续研究将由单用户下载请求拓展到多用户下载请求的情形.另外, Gerlough<sup>[14]</sup>指出,车速变化这一变量满足对数正态分布,考虑车速变化对 VCoDS 方案 RSU 单元下行流量的影响,这两部分是课题研究成果走向实用化的重要内容.

#### References:

- [1] IEEE Std 802.11p-2010, IEEE standard for information technology-local and metropolitan area networks-specific requirements—Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, amendment 6: Wireless access in vehicular environments. 2010. 1–51. [doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5514475]
- [2] Toor Y, Muhlethaler P, Laouiti A. Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues. IEEE Communications Surveys&Tutorials, 2008,10(3):74–88. [doi: 10.1109/COMST.2008.4625806]
- [3] 1609.3-2010/Cor 1-2012, IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE)—Networking services corrigendum 1: Miscellaneous corrections. 2012. 13–19. [doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6239546]
- [4] Cozzetti HA, Scopigno RM, Casone L, Barba G. Comparative analysis of IEEE 802.11p and MS-Aloha in Vanet scenarios. In: Proc. of the IEEE Asia-Pacific Services Computing Conf. Biopolis, 2009. 64–69. [doi: 10.1109/APSCC.2009.5394140]
- [5] Giuseppe B. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535–547. [doi: 10.1109/49.840210]
- [6] Zhuang YY, Pan JP, Viswanathan V, Cai L. On the uplink MAC performance of a drive-thru Internet. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2012,61(4):1925–1935. [doi: 10.1109/TVT.2012.2189424]

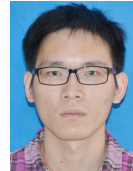
- [7] Tan WL, Lau W, Yue O. Modeling resource sharing for a road-side access point supporting drive-thru Internet. In: Proc. of the 6th ACM Int'l Workshop on Vehicular Inter-Networking. Beijing, 2009. 33–42. [doi: 10.1145/1614269.1614277]
- [8] Trullols-Cruces, O, Morillo-Pozo J, Barcelo JM, Garcia-Vidal J. A cooperative vehicular network framework. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2009). Dresden, 2009. 14–18. [doi: 10.1109/ICC.2009.5198586]
- [9] Wischhof L, Ebner A, Rohling H. Information dissemination in self-organizing intervehicle networks. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2005,6(1):90–101. [doi: 10.1109/TITS.2004.842407]
- [10] Liu JH, Sun JM, Bi JP, Bian YC, Liu XY, Li ZC. VANET cooperative downloading approach study based on dynamic slot. Chinese Journal of Computers, 2011,34(8):1378–1386 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.01378]
- [11] Zhao J, Arnold T, Zhang Y, Cao G. Extending drive-thru data access by vehicle-to-vehicle relay. In: Proc. of the ACM VANET 2008 in Conjunction with Mobicom 2008. San Francisco, 2008. 66–75. [doi: 10.1145/1410043.1410055]
- [12] Ng SC, Zhang WX, Zhang Y, Yang Y, Mao GQ. Analysis of access and connectivity probabilities in vehicular relay networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(1):140–150. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110114]
- [13] Woensel T, Vandaele N. Modeling traffic flows with queueing models: A review. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2007,24:435–461. [doi: 10.1142/S0217595907001383]
- [14] Gerlough DL. Poisson and traffic: Use of Poisson distribution in highway traffic. In: Proc. of the Eno Foundation for Highway Traffic Control. Washington, 1956. 1–58. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=115234>

#### 附中文参考文献:

- [10] 刘建航,孙江明,毕经平,边永超,刘新宇,李忠诚.基于动态时槽的车联网协助下载方法研究.计算机学报,2011,34(8):1378–1386. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.01378]



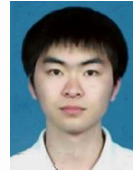
刘业(1977—),男,江苏建湖人,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为高性能网络,自组织网络.



郑隆(1988—),男,硕士生,主要研究领域为电信软件工程,自组织网络.



刘林峰(1981—),男,博士,副教授,主要研究领域为移动机会网络,无线传感网.



王华锋(1988—),男,硕士生,主要研究领域为电信软件工程,自组织网络.