

# 基于 802.11p/WAVE 的车联网连通性模型及其应用研究

刘业<sup>1,2,3</sup>, 吴国新<sup>4</sup>

(1. 中国科学技术大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215123; 2. 中国科学技术大学 软件学院, 江苏 苏州 215123;  
3. 阳立电子(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000; 4. 东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 首先对高速公路交通场景的车联网连通性模型进行了研究, 分析推导了某特定路段上任意两车之间的连通概率、连通集直径长度以及连通集数目等连通性模型参数指标与车辆密度及传输距离之间关系的数学解析式, 并在此基础上分析出车联网的节点位置是满足伽马分布的结论。接着根据车联网报文存储转发的特点, 设计了一种车联网的报文格式, 并应用连通性模型中的相关参数解析式给出了广播消息报文的 TTL 字段的初始值设定方案, 从而能够有效地控制广播报文的泛滥情形, 仿真实验证实了所建模工作的有效性, 为车联网 WAVE 协议栈上层协议的设计提供了重要的理论基础。

**关键词:** 车联网; 802.11p; 连通性; 泊松过程; 伽马分布

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)06-0085-07

## Study on the connectivity model of VANET based on 802.11p/WAVE and its application

LIU Ye<sup>1,2,3</sup>, WU Guo-xin<sup>4</sup>

(1. Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China;  
2. School of Software Engineering, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China;  
3. Nettech Technology (Suzhou)Co. Ltd., Suzhou 215000, China;  
4. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China )

**Abstract:** Firstly, a vehicular mobility model was proposed for the freeway traffic scenarios. Then the connectivity parameters of VANET, such as the connected probability between any two cars, the diameter size of connected cluster and the number of connected cluster, were analyzed. And on the basis of these, the conclusion that the location of VANET node at one time snapshot meets the gamma distribution was drawn. Furthermore, a VANET message package format considering flooding message number was designed, in which TTL field was discussed in detail by introducing the analytic expression of connectivity model. Finally, simulations also verify the conclusion. The connectivity model proposed should provide an important theoretical basis for the upper-level protocols of VANET WAVE stack.

**Key words:** VANET; 802.11p; connectivity; Poisson process; Gamma distribution

## 1 引言

人们对道路交通安全问题的关注度持续上升, 使得车联网 (VANET, vehicular ad hoc network) 的研究成为当前学术界和工业界研究领域的热点课

题。VANET 的本质<sup>[1]</sup>是在车辆与车辆之间、车辆与路边设施之间实现单跳或者多跳的无线通信, 并能够自组织地建立起一个临时的无线网络通信环境, 通信内容包括交通事故地理位置信息、车辆移动速度信息、车辆故障预警信息、道路拥塞状况信息以

收稿日期: 2012-12-10; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903181); 东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室开放研究基金资助项目(K93-9-2010-14); 江苏省博士后基金资助项目(1101136C)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60903181); Open Research Fund from Key Laboratory of Computer Network and Information Integration in Southeast University of Ministry of Education (K93-9-2010-14); Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (1101136C)

及其他应用信息等。鉴于 VANET 网络的应用前景, ITS America 协会的数十位学术界、工业界顶尖级专家在 2008 年 12 月向美国国会提交建议书<sup>[2]</sup>, 呼吁国会资助并将基于 802.11p/WAVE 的 ITS 系统的研究和部署, 即将基于 VANET 网络在智能交通领域的研究和部署, 纳入到美国基础架构的建设中。传统意义上的智能交通系统都是以监测为主的辅助交通管理方式, 而 VANET 网络技术是在道路上动态地构建出一个自组织、易部署、费用低、开放的无线通信网络, 及时有效地将事故、路况等警示信息在同一路段行驶的车辆之间传递, 降低二次事故的发生, 从而减少交通事故的危害, 其进展性研究成果的实用价值<sup>[3]</sup>是非常大的。可预测 VANET 技术成熟后, 因其对行车便利性与安全性的改善, 短期内将成为机动车的标准配备, 市场与经济效益看好。学术界最初提出 VANET 概念的想法是作为无线传感器网络的衍生应用, VANET 的物理层、数据链路层及网络层协议基本沿用了无线传感器网络或者移动自组织网络 (MANET, mobile ad hoc network) 的相关协议<sup>[4-6]</sup>。但是车辆高速移动的特点使得支持 MANET 网络的 ZigBee、Bluetooth 等协议并不适用于 VANET 网络, 另外由于频繁的通信中断, AODV 和 DSR 等路由协议也不再适合 VANET 网络<sup>[7,8]</sup>。国外相关研究机构近几年来在 VANET 网络的数据链路层/物理层的协议研究上逐步达成一致并取得了一定的突破, 即基于 802.11p/WAVE<sup>[9,10]</sup>技术来开展研究。

网络连通性是数据传输协议研究的基石, 用于保证消息的广播或者单播转发。结合车辆速度、道路形状等信息建立 VANET 网络连通性模型, 在模型的指导下进而设计出适用于不同交通通信场景数据传输协议<sup>[11]</sup>。VANET 网络中节点的动态性导致 VANET 网络拓扑的连通性问题是一个开放问题, 这个领域还比较新<sup>[12,13]</sup>。Jin 等人<sup>[14]</sup>沿用了 MANET 连通性模型研究思路, 利用渗流理论对于 VANET 网络的连通性进行研究, 在仿真中未考虑车辆速度、道路形状以及 VANET 数据链路层基于 802.11p 协议实现的事实影响, 802.11p 协议目前支持最大传输距离为 1 000 m, 因此文中提出的 Bollobas 大饼模型的实际意义略显不足。Seh Chun 等人<sup>[15]</sup>在考虑道路上的车辆到达满足泊松过程的假设前提下, 对 2 个相邻 RSU 之间车辆的连通性概率做了一定的探讨。Zhuang 等人<sup>[16]</sup>结合消息分层编码和

VANET 网络连通性的研究提出了一种紧急消息的分发方法。国内武汉大学课题组<sup>[13]</sup>对 VANET 网络的全网连通性进行了研究, 提出了一种用于高速公路场景中 VANET 网络不存在孤立节点的概率分析算法, 并明确给出了确保网络中不存在孤立节点的节点间通信距离的阈值。

本文提出了一种高速公路交通场景的车联网移动性模型, 推导出某路段任两车辆间的连通概率、连通集直径长度, 连通集数目的数学解析式, 并在此基础上分析出车联网的节点位置是满足伽马分布的这一结论, 然后根据车联网报文存储转发的特点, 设计出一种车联网的报文格式, 并应用连通性模型中的相关参数给出了广播消息报文的 TTL 字段的初始值设定方案, 仿真实验表明了本文建模工作的有效性。

## 2 系统模型

### 2.1 高速公路交通场景网络拓扑

联邦通信委员会 (FCC) 将 5.850 ~ 5.925 GHz 之间的 75 MHz 频段用于基于 802.11p 车联网的通信, 其中, 第 1 个 5 MHz 频段预留以后使用, 后续分为 7 个相邻的 10 MHz 频段, 如图 1 所示。车联网适配器 (网卡) 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。802.11p 协议目前支持最大传输距离为 1 000 m, 可满足行驶速度均值为 33 m/s (约为 120 km/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。

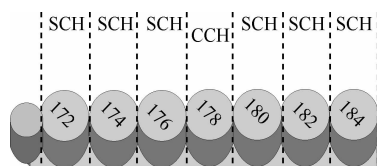


图 1 IEEE 802.11p 信道频谱分配

考虑高速公路交通场景, 某时刻某区段高速公路上的车辆运行情况如图 2 所示。基于 802.11p/WAVE 的车辆在组网时需要考虑如下事实: 对向行驶的车辆, 相对行驶速度达到 240 km/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组

网用于传递信息则更为合理，其信道衰落慢，且连接保持时间长。所以高速公路 VANET 网络在组网时考虑同向行驶的车辆间组网更加符合实际情形。

FCC 分配了 1 个公共控制信道 CCH, 6 个数据信道 SCH, 可以考虑双向道路按照奇偶时隙划分的 TDM 方式使用 CCH, 单向道路分别使用 3 个 SCH。下面对高速公路车辆拓扑模型做进一步简化, 考虑在高速公路上同一车道车辆之间的前后相邻距离一般为 20~1 500 m, 在数量级上远远大于车道之间的左右相邻距离(3~4 m), 所以认为单向多车道的车辆可以建模为一维单车道来进行分析研究, 如图 3 所示。

**定理 1** 考虑一维车道中的频谱分配情况, 有 3 个 SCH 频段  $\{f_1, f_2, f_3\}$  用于 OBU 之间通信, 在自组织分布式频谱分配算法下, 足够分配。

**证明** 车辆节点如图 3 编序,  $f_1, f_2$  在相邻链路间交替使用, 即如果  $\text{Link}(V_1, V_2)$  使用  $f_1$ , 则  $\text{Link}(V_2, V_3)$  使用  $f_2$ ,  $\text{Link}(V_3, V_4)$  使用  $f_1$ , 后继链路交替使用互不干扰的频段  $f_1$  与  $f_2$ , 则 2 个频段足够。但因为频谱使用过程中是自组织分布式的动态分配算法, 节点的某一侧随机使用  $\{f_1, f_2\}$  中的一个频段, 而其相邻链路交替分配下去,  $\exists \text{Link}(V_{i-2}, V_{i-1})$  分配  $f_1$ , 且同时  $\text{Link}(V_i, V_{i+1})$  分配使用频段  $f_2$ , 则此时  $\text{Link}(V_{i-1}, V_i)$  无论使用  $f_1$  或  $f_2$  都会产生干扰。而  $\text{Link}(V_{i-1}, V_i)$  选择使用不同于  $\{f_1, f_2\}$  的频段  $f_3$ 。使用频段  $f_3$  的节点间  $\text{Link}(V_{i-1}, V_i)$  在任何触发下, 比如定时器超时或链路中断, 判断若从频段  $f_3$  跳频到  $\{f_1, f_2\}$  中的某个频段是否存在冲突干扰, 若不存在干扰, 则尽快完成  $\text{Link}(V_{i-1}, V_i)$  从频段  $f_3$  回退跳频

到  $\{f_1, f_2\}$  中的任一频段。

得证。

**假设 1** 相邻车辆节点在使用某一频段进行通信时, 若是通信距离长, 则 802.11p 网卡的发射功率大, 若是通信距离短则发射功率小, 发射功率根据信道情况动态调整。

**2.2 网络连通性模型**

建立图 3 所示的某时刻车辆位置坐标系, 设某一路段的长度为  $x$  (单位: m),  $x \geq 0$ , 从右至左的车辆的位置分别记为  $V_i$ , 其中,  $i=1, 2, \dots$ , 高速公路上单位里程内的车辆密度为  $\rho$  (每米车辆数), 则该路段内的车辆数目满足  $\lambda = \rho x$  的泊松分布<sup>[15]</sup>, 该路段存在  $k$  辆车的概率质量函数是  $p(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$ , 上述模

型中的泊松过程对应于一则计数过程, 即某时刻  $x$  路段的车辆的总数目  $K(x)$  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  $K(x)$  期望与方差均为  $\lambda$ , 有

$$p(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} = \frac{(\rho x)^k e^{-\rho x}}{k!}$$

即

$$p(k, x) = \frac{(\rho x)^k e^{-\rho x}}{k!} \tag{1}$$

$$E[K] = \lambda = \rho x \tag{2}$$

$$D[K] = E[K^2] - (E[K])^2 = \lambda = \rho x \tag{3}$$

**定义 1**  $R$  为车辆中支持 802.11p 协议的无线网卡的最大传输距离。

令  $x = R$ , 则在  $R$  通信距离内至少有 1 辆车的概率为

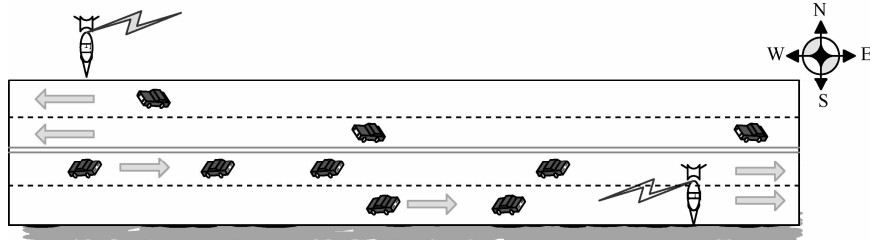


图 2 高速公路交通场景某时刻车辆网络拓扑 (位置信息)

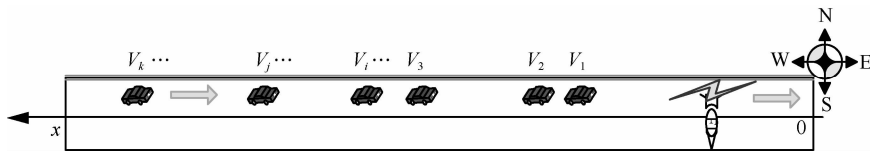


图 3 高速公路单向车道交通场景一维网络拓扑模型

$$\Pr\{k \geq 1\} = 1 - \Pr\{k = 0\} = 1 - e^{-\rho R}$$

令  $x$  路段中, 任意两辆相邻的车间距离为  $d_{(i,i+1)} = V_{i+1} - V_i$ , 可以把  $d_{(i,i+1)}$  看成是临近车辆相继进入该路段的到达时间间隔, 下面来确定  $d_{(i,i+1)}$  的分布情况。为了便于叙述, 推导中有时以  $d_i$  来替代  $d_{(i-1,i)}$ 。令  $V_0$  为图 2 中的坐标原点, 则在序列  $\{d_i, i=1, 2, \dots\}$  中, 有  $d_1 = |V_1| - |V_0|$ 。

因为  $V_0 = 0, V_i > 0$ , 所以可以省掉取绝对值的运算符, 有  $d_1 = V_1 - V_0 = V_1; d_2 = V_2 - V_1 = V_2 - d_1$ 。

$x$  路段中, 出现一辆车  $\{d_1 > x\}$  的事件发生, 当且仅当式 (1) 所述的泊松过程在区间  $[0, x]$  中没有车辆出现, 即

$$\Pr\{d_1 > x\} = \Pr\{k(x) = 0\} = e^{-\rho x} \quad (4)$$

得出,  $d_1$  是具有均值为  $\frac{1}{\rho}$  的指数分布。考虑

$$\Pr\{d_2 > x\} = E[\Pr\{d_2 > x | d_1\}]$$

然而,  $\Pr\{d_2 > x | d_1 = v\} = \Pr$  在区间  $(v, v+x]$  没有车辆出现  $|d_1 = v$

$$\begin{aligned} &= \Pr\{\text{在区间}(v, v+x]\text{没有车辆出现}\} \\ &= e^{-\rho x} \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (5) 可以看出,  $d_2$  也是具有均值为  $\frac{1}{\rho}$  的指数分布的随机变量, 可以得出推论 1。

**推论 1**  $\{d_i, i=1, 2, \dots\}$  是独立同分布的指数随机变量, 均值为  $\frac{1}{\rho}$ 。

进一步考虑

$$\Pr\{d_1 \leq x\} = 1 - e^{-\rho x}$$

$$\Pr\{d_2 \leq x\} = 1 - e^{-\rho x}$$

有

$$\Pr\{d_i \leq x\} = 1 - e^{-\rho x} \quad (6)$$

$$E[d_i] = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

$$D[d_i] = E[d_i^2] - (E[d_i])^2 = \frac{1}{\rho^2} \quad (8)$$

对于长度为  $L$  的某特定  $x$  路段来说, 若其中有  $k$  辆车, 车辆节点  $i, i+1$  之间的连通概率为  $\Pr\{d_{(i,i+1)} \leq R\} = 1 - e^{-\rho R}$ 。

对于该路段上的车辆, 有

$$E[d_{(i,i+1)}] = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

$L$  路段的车辆之间的连通概率为

$$P\_Connection(L) = \prod_{i=1}^k (\Pr\{d_i \leq R\}) = \prod_{i=1}^k (1 - e^{-\rho R})$$

其中,  $k = \rho L$

$$= (1 - e^{-\rho R})^{k-1} = (1 - e^{-\rho R})^{\rho L - 1} \quad (10)$$

进一步分析第  $k$  辆车的位置坐标  $V_k$  的分布情形:

由  $d_{(i,i+1)} = V_{i+1} - V_i$  知,  $V_k = \sum_{i=1}^k d_i, k \geq 1; k$  为  $x$  路段中的车辆总数目;  $V_k$  的累积分布函数推导过程如下: 第  $k$  辆车在  $x$  路段中出现, 当且仅当路段  $[0, x]$  上车辆数目至少是  $k$ 。即  $K(x) \geq k \Leftrightarrow V_k \leq x$ , 得出

$$\Pr\{V_k \leq x\} = \Pr\{K(x) \geq k\} \quad (11)$$

将式 (1) 代入, 有  $V_k$  的累积分布函数

$$\Pr\{V_k \leq x\} = \Pr\{K(x) \geq k\} = \sum_{j=k}^{\infty} e^{-\rho x} \frac{(\rho x)^j}{j!}$$

由上式求微分, 得到  $V_k$  的概率质量函数

$$p(V_k, x) = \rho e^{-\rho x} \frac{(\rho x)^{k-1}}{(k-1)!} \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出,  $V_k$  是具有参数为  $k$  和  $\rho$  的伽马  $\Gamma$  分布。

服从伽马分布的期望及方差分别为

$$E[V_k] = \frac{k}{\rho} \quad (13)$$

$$D[V_k] = E[V_k^2] - (E[V_k])^2 = \frac{k}{\rho^2} \quad (14)$$

以上结论将应用于 VANET 连通性模型重要参数指标解析式的推导。

### 2.3 连通性模型参数指标

VANET 网络连通性的重要参数指标包括: 连通集最大直径期望  $E(Cluster\_size)$ ; 连通集个数期望  $E(Cluster\_number)$ 。

1) 连通集直径 ( $Cluster\_size$ )

对于长度为  $L$  的某  $x$  路段来说, 若其中有  $k$  辆车, 设已存在一个连通集, 其直径 (长度) 为  $Cluster\_size$ , 该路段中存在某一辆车跟这个连通集的最后一辆车保持连通, 根据这一段路径的连通概率及这一段路径长度的期望, 得出递归式 (15), 有

$$E(Cluster\_size) = \Pr\{V_1 \leq R\} \times (E[V_1 | V_1 \leq R] + E(Cluster\_size)) + \Pr\{V_1 > R\} \times 0 \quad (15)$$

其中,  $\Pr(V_1 \leq R) = 1 - e^{-\rho R}$ ,  $E[V_1 | V_1 \leq R] = \frac{k}{\rho}$  (这里  $k=1$ )  $= \frac{1}{\rho}$

代入式 (15) 求得连通集合直径期望

$$E(Cluster\_size) = \frac{1 - e^{-\rho R}}{e^{-\rho R}} \frac{1}{\rho} = \frac{1 - e^{-\rho R}}{\rho e^{-\rho R}} \quad (16)$$

2) 连通集个数 (Cluster\_number)

$$E(Cluster\_number) = \frac{L}{E(Cluster\_size)} = \frac{\rho L e^{-\rho R}}{1 - e^{-\rho R}} \quad (17)$$

从以上公式可以看出, 连通集最大直径、连通集个数与高速公路车辆密度  $\rho$  及车辆间传输距离  $R$  之间的关系。

### 3 VANET 消息报文

#### 3.1 消息广播机制

图 4 描述了车辆节点最大通信距离及网络连通性的几种可能情形, 篇幅所限, 仅讨论节点连通与不连通情形下的消息转发机制。

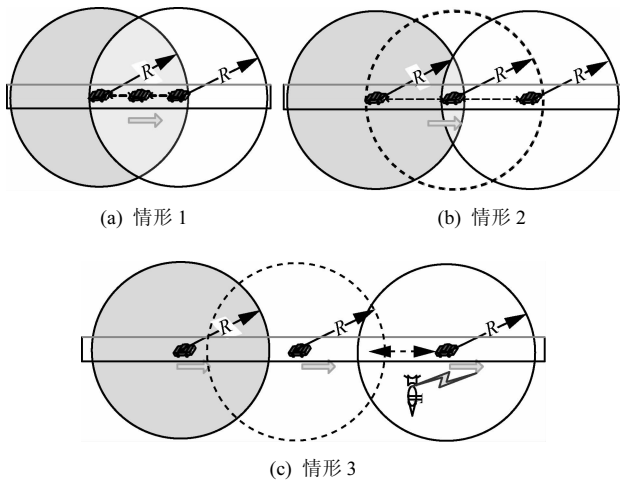


图 4 网络拓扑与通信距离  $R$

对于图 4 (a), 考虑到节点之间处于各自的最大传输距离之内, 通信过程中存在相互干扰, 一种可行的方案是通过调整发射功率来减小对应车辆的最大通信半径距离, 从而降低节点在通信过程中的相互干扰; 这样图 4 (a) 就演化为图 4 (b), 车辆间广播消息报文, 采用多跳泛洪的方式进行, 为

抑制泛洪报文在连通集内部的多次转发, 消息报文格式如图 5 所示。

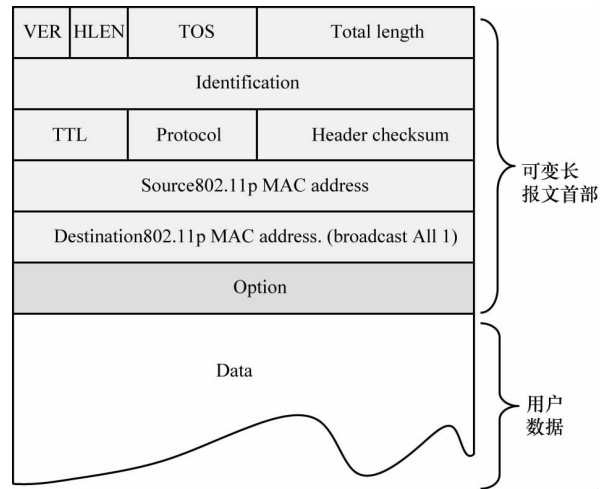


图 5 VANET 链路层报文格式  
HLEN: 报文首部长度; TOS: 报文优先级; Total length: 报文总长度; TTL: 报文生命周期, 每经过 1 次转发, 减 1; Identification: 报文标志符, 报文区分使用; Protocol: 用于区分 WAVE 协议栈所用的不同上层协议, 这里默认为全 0, 表示 Data 字段部分放入用户原始数据; Header checksum: 校验和校验, 差错控制; Option: 选项部分可有可无, 由 HLEN 减去固定首部长度的值决定, 用于记录多跳中继节点的地址、时间戳等信息; 802.11p MAC address: MAC 地址是跟网卡硬件绑定的, 可作为车辆的设备标志码使用

图 5 VANET 链路层报文格式

图 4 (c) 中, 车辆节点之间是不连通的, 分别记为  $V_{i-1}, V_i, V_{i+1}$ , 则需要通过“存储-转发”的方式完成消息的广播。方案 a: 在车辆行进过程中, 利用固定位置的路边 RSU 单元完成信息在不同连通集车辆间的中继转发工作,  $V_{i+1}$  将消息广播给 RSU, 消息由 RSU 暂时存储, 一段时间之后,  $V_i$  进入与 RSU 的通信范围, RSU 完成消息的转发; 方案 b: 考虑车辆行进速度  $Speed_i$  满足均值  $\mu = \overline{Speed}$ , 标准差为  $\sigma$  的正态分布, 分布函数为  $f(Speed_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(Speed_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ 。由于相邻车辆车速的不同,  $\exists \Delta t$  时间后,  $V_i$  与  $V_{i-1}$  由不连通状态变成连通状态, 若  $V_{i-1}$  有消息需要在该路段进行广播, 则由  $V_{i-1}$  完成先存储  $\Delta t$  后, 再转发的过程。

#### 3.2 报文格式设计

报文格式设计及字段功能说明如图 5 所示。考虑在某路段进行消息广播的应用场景: 报文考虑了发送车辆的设备标志码、车辆移动速度矢量、TTL 生命期、记录路由等报文头信息及用户数据信息。其中 TTL 字段和 Option 字段用于控制广播报文泛滥, 接下来给出应用连通性模型中的相关参数对广

播消息报文的 TTL 字段初始值进行设定的方案。

若广播消息源节点欲在  $L$  路段进行广播, 源节点期望的广播地理距离为  $L_b$ , 由式 (2) 知  $L_b$  长度的路上存在的车辆数期望为  $\rho L_b$ , 式 (17) 给出连通集数目的期望为  $\frac{\rho L_b e^{-\rho R}}{1 - e^{-\rho R}}$ , 假设不同连通集之间通过 RSU 以存储转发的模式中继广播消息, 有

$$E(TTL) = \left[ \rho L_b + \frac{\rho L_b e^{-\rho R}}{1 - e^{-\rho R}} - 1 \right] \quad (18)$$

TTL 字段用于控制报文的最大转发跳数, TTL 值可由节点根据参数  $(\rho, L_b)$  依据式 (18) 计算出。RSU 根据所在路段的实际车辆交通流统计出 24 h 不同时间区间里的车辆密度  $\rho$ , 利用 CCH 信道发布给行进中的车辆节点, 参数  $L_b$  由广播消息源节点根据实际应用给出广播所涉及的地理范围, 默认为相邻 RSU 的距离, 这个值也可由 RSU 给出。

Option 字段用于记录中继转发节点本身的信息, 在泛洪广播的过程中可避免泛洪过程中环路 (loop) 转发情形。而对于车辆移动速度矢量、车辆位置等应用信息, 可作为 DATA 数据部分, 根据 WAVE 应用层相应协议来封装与解析。

### 4 实验与分析

为了验证高速公路交通场景下移动性模型与实际场景的车辆网络模型之间的匹配性, 本文利用 MATLAB 生成符合泊松过程的多条序列, 每条序列的长度为 5 000, 存放在一维数组中, 数组下标可当成图 3 坐标系中对应  $x$  轴的值, 即相对位置信息, 若某下标对应的数组值为 1, 说明在该位置有 1 辆车。利用 MATLAB 生成多组满足均值  $\mu=30$  m/s, 标准差  $\sigma=5$  m/s 的正态分布数据, 将这些数据分配给上述泊松过程中的每辆车, 即车辆行进速度  $Speed_i$ , 从而完成图 3 中的交通流的模拟, 进入仿真实验。实验参数设定如下: 节点间的最大传输距离为 1 000 m, 某路段长度  $L=5 000$  m,  $\rho \in [0.001, 0.05]$ 。

图 6 给出了  $L$  路段的任意两车之间的连通概率, 在车辆密度不变的情况下, 随着车辆间的最大通信距离的增加, 进入同一连通集的车辆数增多, 车辆间的连通概率增大。随着该路段车辆密度的增加, 该路段任意两辆车连通的概率跃迁宽度明显变窄, 当  $\rho$  取 0.05, 这种现象近乎于阶迁变化。

图 7 给出了连通集直径 (长度) 与车辆间最大

通信距离的关系, 可以看出连通集直径随着车辆间的最大通信距离的增加呈现指数级增长的趋势, 而且随着车辆密度的增加, 连通集直径增长速度更快。图 8 给出了连通集数目与车辆密度的关系, 内在涵义与图 7 一致。

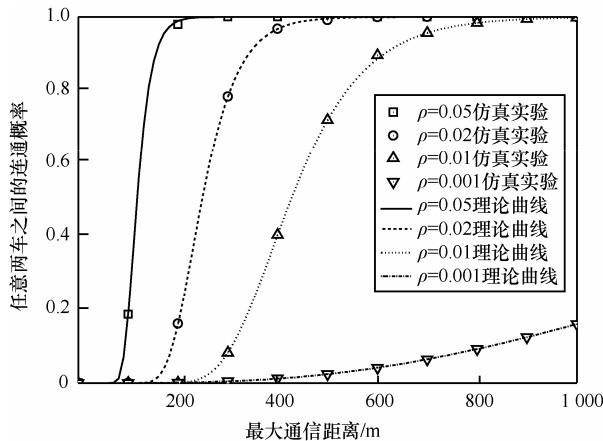


图 6 L 路段的任意两车之间的连通概率与车辆密度、传输距离关系

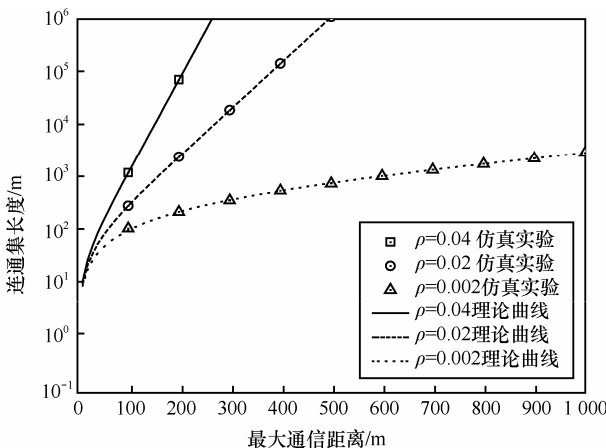


图 7 连通集直径 (长度) 与 R 车辆的通信距离关系

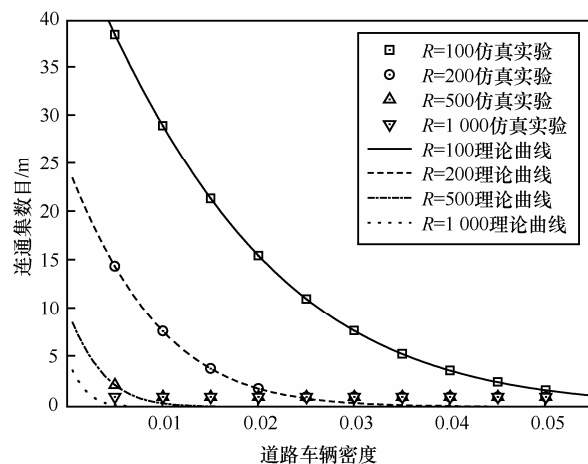


图 8 连通集数目与车辆密度关系

图9给出了某广播报文中TTL字段的设定可能值, 由于采用的是泛洪的向邻居节点转发报文的广播方式, TTL与车辆密度密切相关, 当车辆欲广播的地理距离 $L_b$ 越大, 则TTL设定值越高。

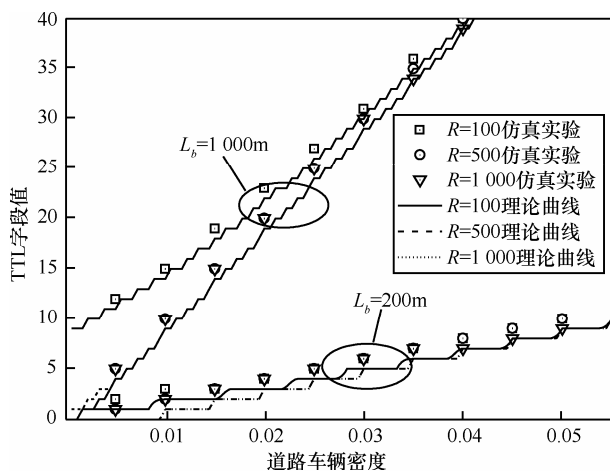


图9 TTL与车辆密度关系

## 5 结束语

本文分析了高速公路交通场景的车联网移动性模型, 在假设车辆进入高速公路是满足泊松过程的基础之上, 分析了任意两辆车之间的连通性、连通概率、连通集直径长度、连通集数目等方面, 并在此基础上分析出车联网的节点位置是满足伽马分布的结论, 设计了一种可用于车联网的报文格式, 并应用移动性模型的相关结论提出了一种广播消息报文的TTL字段初始值的设定方案, 仿真实验表明了本文建模工作的有效性。交通领域车辆流量的自相似模型如何跟本文的车联网连通性模型相结合将是课题组的下一步研究重点。

## 参考文献:

- [1] TOOR Y, MUHLETHALER P, LAOUI A. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(3):74-88.
- [2] ITS AMERICA[EB/OL]. <http://www.itsa.org/files/pdf/ITSAEconStimPelosi.pdf>.
- [3] MEGHANATHAN N, SKELTON G. Risk notification message dissemination protocol for energy efficient broadcast in vehicular ad hoc networks[J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2010, 37(1):1-10.
- [4] RAO S A, PAI M, BOUSSEJRA M, et al. GPSR-L: greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETS[A]. IEEE 8th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2008)[C]. Phuket, THAILAND, 2008.299-304
- [5] LAOUI A, MUHLETHALER P, SAYAH F, et al. Quantitative

- evaluation of the cost of routing protocol OLSR in a vehicle ad hoc network[A]. Proceedings of the IEEE 67th Vehicular Technology Conference[C]. Singapore, Singapore, 2008. 2986-2990.
- [6] ABEDI O, FATHY M, TAGHILOO J. Enhancing AODV routing protocol using mobility parameters in VANET[A]. Proceedings of the 6th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA 08)[C]. Doha, Qatar, 2008. 229-235.
- [7] JAKUBIAK J, KOUCHERYAVY Y. State of the art and research challenges for VANETS[A]. Proceedings of the 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, USA, 2008. 912-916.
- [8] YE F, ROY S, WANG H. Efficient data dissemination in vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4):769-779.
- [9] BILSTRUP K, UHLEMANN E, STROM E G, et al. Evaluation of the IEEE 802.11p MAC method for vehicle-to-vehicle communication[A]. Proceedings of the IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC 2008)[C]. Calgary, CANADA, 2008. 2152-2156.
- [10] P802.11p D11.0. IEEE Unapproved Draft Std, IEEE Draft Standard for Amendment to Standard Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Networks-Specific Requirements-Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications-Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments[S]. 2010.
- [11] YANG Q, LIM A, AGRAWAL P. Connectivity aware routing in vehicular networks[A]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC 2008)[C]. Las Vegas, USA, 2008. 2218-2223
- [12] BAKO B, WEBER M. Efficient information dissemination in VANETS [J]. Advances in Vehicular Networking Technologies, 2011, (4):45-64.
- [13] 熊炜, 李清泉. 高速公路场景中车用自组织网络1-连通的必要条件[J]. 软件学报, 2010, 21(11):2906-2919.  
XIONG W, LI Q Q. Prerequisite to 1-connected vehicular ad hoc networks in highway scenarios[J]. Journal of Software, 2010, 21(11):2906-2919.
- [14] JIN X, SU W J, WEI Y. Quantitative analysis of the VANET connectivity: theory and application[A]. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC2011)[C]. Budapest, Hungary, 2011.1-5.
- [15] NG S C, ZHANG W X, ZHANG Y. Analysis of access and connectivity probabilities in vehicular relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2011, 29(1):140-150.
- [16] ZHUANG Y Y, PAN J P, LUO Y Q. Time and location-critical emergency message dissemination for vehicular ad-hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC) Special Issue on Vehicular Communications and Networks, 2011, 29(1):187-196.

## 作者简介:



刘业(1977-), 男, 江苏建湖人, 博士, 中国科学技术大学讲师, 主要研究方向为高性能网络、车联网。

吴国新(1956-), 男, 安徽歙县人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络。