



车辆自组织网络中基于信道传输环境的 网络连通性能

李扬,赵海涛,唐紫浩,张玉婷

(南京邮电大学通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:车辆间的传输干扰在车辆自组织网络中是影响车辆间通信质量的一个重要因素,车辆在同时发送信号过程中会对周围车辆接收的信号产生影响,从而对网络连通性预测产生更大的挑战。根据车辆密度及交通流量,提出一种基于 Nakagami 的车载网络连通预测模型。该模型采用 Nakagami 分布特性描述信号传输过程中的衰落信道,通过接收信号功率概率密度函数及信噪比获得车辆间连通概率。仿真结果表明,在传输信号车辆比例达到饱和之前,通过提高传输信号车辆比例可以提高连通概率,但若此比例超过了饱和值则会对车辆连通产生消极的影响。

关键词:车辆自组织网络;连通性;信道传输环境;Nakagami 分布

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016303

Network connectivity performance for vehicular Ad Hoc networks based on channel transmission environment

LI Yang, ZHAO Haitao, TANG Zihao, ZHANG Yuting

Institute of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University
of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: The inter-vehicle transmission interference is one of the key factors to impact the communication performance of vehicular Ad Hoc networks. When vehicles send signals at the same time, it will inevitably have an impact on the surrounding vehicles, which has a negative effect on network connectivity prediction. According to vehicle density and traffic flow, a vehicular network connectivity prediction model was presented based on Nakagami distribution. The Nakagami distribution was used to describe the fading channel in the signal transmission process. Form expression of the inter-vehicle connectivity probability was also derived with power probability density function and signal to noise ratio of received signals. Simulation results show that connectivity probability can be well improved with larger ratio of vehicles which transmit signals before the ratio reaches the maximum. However, negative effect will take place on vehicular connectivity when the ratio exceeds the maximum value.

Key words: VANET, connectivity, channel transmission environment, Nakagami distribution

收稿日期:2016-11-11;修回日期:2016-12-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB329005);国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2014AA01A705);国家自然科学基金资助项目(No.61302100);江苏省普通高校专业学位论文研究生实践创新计划项目(No.SJZZ16_0144)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2013CB329005), The National High-Tech R&D Program (863 Program)(No.2014AA01A705), The National Natural Science Foundation of China (No.61302100), Practice Innovation Program on College Professional Degree Master of Jiangsu Province (No.SJZZ16_0144)



1 引言

车联网是智能交通系统 (intelligent transport system, ITS) 的重要组成部分, 车辆自组织网络 (VANET) 在过去的十年间被广泛研究^[1], 其大体又可分为两个部分: 车辆与车辆之间的通信 (V2V) 和车辆与路边基础设施的通信 (V2I)^[2]。其中 V2V 更多考虑的是一些安全方面的问题, 比如车辆的紧急预警、交通拥堵控制等; V2I 考虑更多的是非安全方面的应用, 通过车辆和路边单元进行连通, 车辆可以进一步接入 4G 网络等移动蜂窝网络^[3]。

车辆自组织网络与传统自组织网络有很大的不同, 其主要因素就在于车辆之间的移动性导致车辆自组织网络拓扑的动态变化比较频繁。因此, 在车联网中车辆连通性是决定车辆间通信性能的一个基本性质。在过去的车联网研究中, 一些影响车联网连通性的重要因素都已得到广泛研究, 比如: 交通流量、车辆运动、无线环境^[4], 然而高速公路 VANET 场景中车辆之间的信号干扰对于车联网连通性的影响一直没有得到研究。

车辆之间的传输信号干扰对于车辆自组织网络的连通性有着重要的影响。在高速公路场景中, 以多跳和中继为基础的 V2V 车辆通信不可避免地会有多辆车在同时发送或者接收信号。一般而言, 在网络中存在着更多充当中继进行信息转发的车辆, 那么信息就能更好地在网络中传输, 车辆间的连通性能也就会更好。然而, 随着网络中进行中继的车辆越来越多, 就会有更多的车辆同时传输信息, 这就可能会导致车辆间产生严重的信号干扰, 使得网络的吞吐量减少。因此, 网络中进行信号传输的车辆数目增加能够提高连通性能和确保传输成功率, 但是一旦车辆的数目超过饱和值, 由于严重的传输信号互相干扰使得通信质量可能会恶化。因此, 在 VANET 中能够进行信号传输车辆的比例在平衡连通性能上尤为重要。

车联网建模是分析网络性能的基础^[5], 本文基于一个更加真实的信道传输模型, 在存在独立同分布的车辆间干扰情况下研究车辆间传输信号干扰对于连通概率的影响。推导出车辆之间连通概率的精确表达式, 并评估在衰落信道中, 交通流量和车辆间传输信号干扰对于连通性能的影响。此研究得出的传输信号车辆数目和车辆间连通性能之间寻求平衡的分析结果对于进一步研究高速公路场景 VANET 连通性有重要意义。

2 系统模型

系统模型如图 1 所示, 接下来对系统模型进行假设分析。

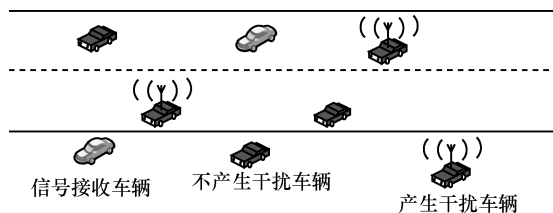


图 1 系统交通流量模型

(1) 交通流量模型

假设各辆车之间的相互运动都不互相干扰, 即每一辆车的移动都是相互独立的。在高速公路上, 每辆车不计其车辆体积的大小均被视为一个点, 并且车辆以服从交通流量率为 λ (车辆/s) 的泊松随机过程进入高速公路。在进入高速公路后, 每辆车都会获得一个随机的车辆速度 v 并且将会一直以这个速度在高速路上运动下去, 速度 v 在区间 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 内是服从独立均匀分布的, 概率密度函数 (PDF) 为 $f(v) = \frac{1}{v_{\max} - v_{\min}}, [v_{\min}, v_{\max}]$ 。因此可以得到速度 v 倒数的期望为:

$$E\left(\frac{1}{v}\right) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{1}{v} f(v) dv = \frac{\ln(v_{\max}/v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (1)$$

将车辆密度 n (单位为车辆/m) 定义为在高速路上每单位长度内的平均车辆数目。根据参考文献[6]中的交通流量理论, 在流量率 λ 、车辆密度 n 和速度 v 3 个参数之间存在一个基本关系式:

$$\lambda = n \cdot v \quad (2)$$

根据式(1)、式(2), 车辆密度 n 可以定义如下:

$$n = \frac{\lambda \ln(v_{\max}/v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (3)$$

(2) 信号连通性模型

在现实中由于 V2V 短距离通信无线环境的复杂性, 接收信号的包络往往会有严重的衰减和起伏。而在以往的理论研究中, Nakagami 分布通常被应用于描述严重的衰落^[7], 在研究过程中需要考虑到这种 V2V 环境无线信号的衰落特性, 所以将采用 Nakagami 分布用以真实准确地表述信道模型。

将车辆接收到的主要信号的包络定义为 R , 并假设信号在车辆环境衰落信道模型中服从 Nakagami(m, Ω) 分布。

接收信号包络 R 概率密度函数可以表示为:

$$f_R(r) = \frac{2}{\Gamma(m_r)} \left(\frac{m_r}{\Omega_r} \right)^{m_r} r^{2m_r-1} e^{-\frac{m_r}{\Omega_r} r^2}, r \geq 0 \quad (4)$$

在式(4)中 $\Omega_r = E(R^2)$ 是以期望形式表示的平均接收功率, m_r 是接收信号在信道中的衰落因子, 代表信道衰落的严重程度, 取 $m_r \geq 0.5$, 并且当 $m_r = 1$ 时, 信道衰落过程服从瑞利衰落。伽马函数表示为 $\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} e^{-x} dx$ 。

由参考文献[8]可知, 在 Nakagami 分布下, 信号的功率服从伽马分布, 即接收信号功率 $P = R^2$ 服从伽马分布, 用参数 m_r 和 Ω_r 来表示此伽马分布 $G(m_r, \Omega_r)$ 。根据接收信号包络 R 的概率密度函数, 可以得到接收信号功率 P 的概率密度函数为:

$$f_P(x) = \frac{1}{\Gamma(m_r)} \left(\frac{m_r}{\Omega_r} \right)^{m_r} x^{m_r-1} e^{-\frac{m_r}{\Omega_r} x}, x \geq 0 \quad (5)$$

设定 P_1 为某个固定的功率值, 由得出的接收信号功率 P 的概率密度函数可知:

$$\begin{aligned} P\{P \geq p_1\} &= \int_{p_1}^\infty f_P(x) dx \\ &= \int_{p_1}^\infty \frac{1}{\Gamma(m_r)} \left(\frac{m_r}{\Omega_r} \right)^{m_r} x^{m_r-1} e^{-\frac{m_r}{\Omega_r} x} dx \end{aligned} \quad (6)$$

由不完全伽马函数表达式 $\Gamma(n, t) = \int_t^\infty x^{n-1} e^{-x} dx$, 可将式(6)重写为:

$$P\{P \geq p_1\} = \frac{\Gamma\left(m_r, \frac{m_r}{\Omega_r} p_1\right)}{\Gamma(m_r)} \quad (7)$$

对于任何在 Nakagami 信道模型情况下的第 i 个传输干扰信号, 其功率 I_i 是一个参数为 m_i 和 Ω_i 的伽马分布随机变量, 即 $I_i \sim G(m_i, \Omega_i)$, 其中 $m_i = m$ 表示第 i 个干扰信号的衰落因子, $\Omega_i = \Omega$ 表示第 i 个干扰信号的平均功率, 则有 $I_i \sim G(m, \Omega)$ 。因此, N 个独立同分布的总干扰信号功率 I 可以表示为:

$$I = \sum_{i=1}^N I_i \quad (8)$$

根据伽马分布的特性, 接收端总传输干扰信号功率 I 服从伽马分布, 且有 $I \sim G(mN, \Omega)$, 其概率密度函数为:

$$f_I(y) = \frac{1}{\Gamma(mN)} \left(\frac{m}{\Omega} \right)^{mN} y^{mN-1} e^{-\frac{m}{\Omega} y}, y \geq 0 \quad (9)$$

设定 N_0 是接收端的噪声功率, 以接收端信噪比 η 来表示车辆间的连通状态, 即:

$$\eta = \frac{P}{I + N_0} = \frac{P}{\sum_{i=1}^N I_i + N_0} \quad (10)$$

如果接收车辆信噪比大于或等于某一个阈值 ξ , 则车辆之间的通信链路就被视为是连通的。因此, 可以定义车辆间连通概率 P_{con} 是接收信噪比 η 大于或等于阈值 ξ 的概率, 则 P_{con} 可以表示为:

$$P_{\text{con}} = P\{\eta \geq \xi\} = P\left\{\frac{P}{I + N_0} \geq \xi\right\} \quad (11)$$

3 车辆间连通性分析

具体分析在 Nakagami 信道衰落模型下, 并且存在其他车辆传输干扰信号情况下的车辆间连通概率。

设产生传输信号干扰车辆占总车辆的比例为 p_a , 观察路段的高速公路长度为 l , 在这一路段中将会对接收车辆产生信号干扰的车辆数目为 N_l , 自由车辆密度 n , 干扰车辆比例 p_a 和观察路段长度 l 共同决定, 根据车辆密度式(3)可知干扰车辆数目 N_l 的期望为:

$$E(N_l) = E(nlp_a) = \frac{\lambda l p_a \ln(v_{\max}/v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (12)$$

接下来导出在传输独立同分布信号情况下的车辆间连通性概率。给定接收信号功率 $P \sim G(m_r, \Omega_r)$, 接收端由于信号传输产生的干扰功率为 $I \sim G(mN, \Omega)$, 噪声功率为 N_0 , 传输信号车辆数目为 N_l , 将式(7)、式(9)、式(12)带入式(11), 则车辆间连通性概率 P_{con} 为:

$$\begin{aligned} P_{\text{con}} &= P\{\eta \geq \xi\} = P\left\{\frac{P}{I + N_0} \geq \xi\right\} \\ &= \int_0^\infty \frac{\Gamma\left(m_r, \frac{m_r}{\Omega_r} (y + N_0) \xi\right)}{\Gamma(m_r)} f_I(y) dy \\ &= \frac{\left(\frac{m}{\Omega}\right)^{mN_l}}{\Gamma(m_r) \Gamma(mN_l)} \int_0^\infty y^{mN_l-1} e^{-\frac{m}{\Omega} y} \times \\ &\quad \Gamma\left(m_r, \frac{m_r}{\Omega_r} (y + N_0) \xi\right) dy \end{aligned} \quad (13)$$

不完全伽马函数与伽马函数之间存在如下关系:

$$\frac{\Gamma(n, t)}{\Gamma(n)} = \frac{1}{(n-1)!} \int_t^\infty x^{n-1} e^{-x} dx = e^{-t} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{t^k}{k!} \quad (14)$$

同时, 由二项定理:

$$(y + N_0)^k = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} y^i N_0^{k-i} \quad (15)$$



将式(14)、式(15)带入式(13)中,可以得到在有车辆干扰情况下的车辆间连通概率 P_{con} 的最终表达式:

$$P_{\text{con}} = \frac{\left(\frac{m}{\Omega}\right)^{mN_I}}{\Gamma(mN_I)} e^{-\frac{m_r}{\Omega_r} \xi N_0} \sum_{k=0}^{m_r-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_r}{\Omega_r} \xi\right)^k \times \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} N_0^{k-i} \Gamma(i+mN_I) \left(\frac{m}{\Omega} + \frac{m_r}{\Omega_r} \xi\right)^{-(i+mN_I)} \quad (16)$$

其中:

$$N_I = \frac{\lambda p_a \ln(v_{\max}/v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (17)$$

4 数值仿真

为了评估交通流量、信道参数和车辆传输信号干扰对于车辆间连通性能的影响,采用 MATLAB 搭建仿真平台。由以上理论分析得出车辆间连通性影响因素,通过改变车辆到达率,车辆车速和传输信号干扰车辆占总车辆的比例进行了仿真以验证分析结果。表 1 给出了仿真参数。

在高速公路场景网络中传输信号干扰车辆数目主要取决于传输信号车辆占总车辆比例 p_a 和交通流量参数,如车辆到达率 λ 、车辆最大车速 $v_{\max}$ 及车辆最小车速 $v_{\min}$ 。为了评估传输信号干扰车辆对于车辆间连通性能的影响,当信道参数设定为 $m_r=5$, $\Omega_r=1$, $m=1$ 及 $\Omega=0.1$ 时,通过改

表 1 仿真参数

仿真参数	数值	参数意义
$\lambda/(\text{车辆} \cdot \text{s}^{-1})$	0.25, 0.5, 0.75	车辆到达率
l/m	1 000	高速公路长度
$v_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	25, 60	车辆最高车速
$v_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10, 20	车辆最低车速
p_a	[0.1, 1]	传输信号干扰车辆占总车辆的比例
ζ/dB	3	接收信噪比阈值
N_0/W	0.01	噪声功率
m_r	5	接收信号的衰落参数
Ω_r/W	1	
m	1	干扰信号的衰落参数
Ω/W	0.1	

变 λ 、 $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ 及 p_a 获得车辆间连通概率 P_{con} 的仿真结果。

仿真结果如图 2 所示。当车辆的最大车速设定为 60 m/s, 最小车速为 20 m/s 时, 显然, 在一个特定的范围内车辆连通概率 P_{con} 会随着传输信号干扰车辆比例 p_a 的增加而增加, 当 p_a 超过了一个特定的比例后车辆连通概率反而会下降。此外, 当车辆到达率 λ 更高的时候, 传输信号干扰车辆比例 p_a 应该保持一个较小的值来获得更高的连通概率。因此, 为了获得更好的连通性能, 进行信号传输的车辆数目在一个更为密集的车联网络中应该更低。

图 3 显示了车辆在更低的移动速度情况下的车辆间

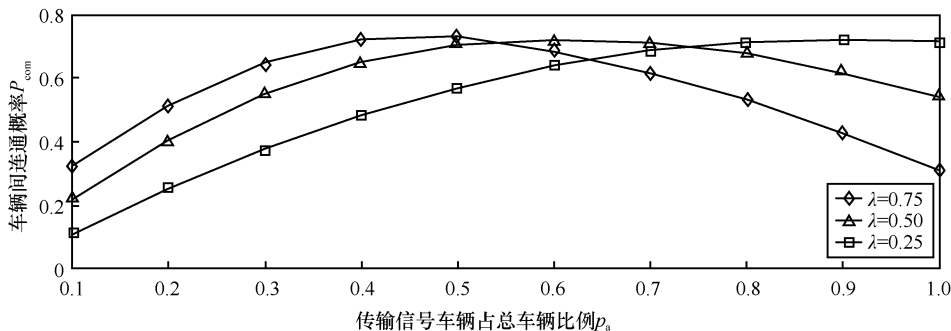


图 2 车辆速度较高时的车辆间连通概率

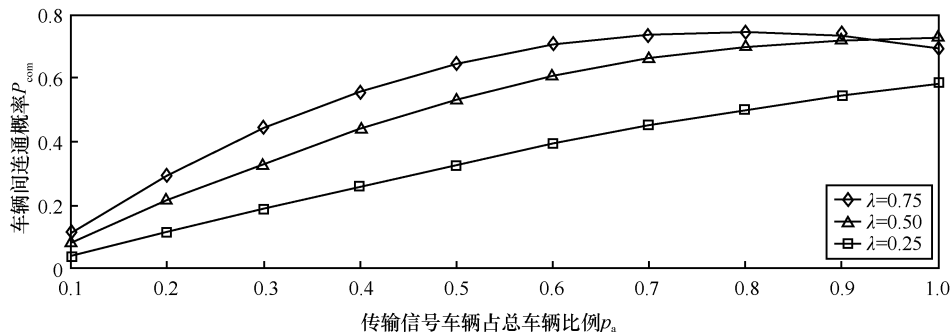


图 3 车辆速度较低时车辆间连通概率

连通概率 P_{con} , 显然图 3 中的曲线要类似于图 2。在车辆密度比较低的时候, 如 $\lambda=0.25$, 连通概率随着传输信号干扰车辆比例 p_a 的增加而增加。此外, 图 3 对于连通性最优的传输比例要比图 2 的高, 在车辆活动性较差的系统中最优的传输比例应该更大。

以上的仿真结果显示了传输信号车辆数目的增加可以提高车辆间通信的性能, 但是这只在一个特定的范围内有效。这是因为产生信号干扰车辆本质是由于车辆间的收发信号会对相邻车辆造成干扰, 信号之间的频繁交互是可以在一定程度上促进车辆间连通的, 只是随着这种频繁程度超过一定比例才会对相邻车辆造成影响。可以发现, 在超过某一个阈值时, 传输信号车辆比例的增加将会对系统性能产生消极的影响。

5 结束语

论述了在高速公路场景中 Nakagami 衰落信道模型下的车辆间传输信号干扰对于车辆连通概率的影响。可以得出结论, 较大的传输信号车辆比例可以带来更高的连通概率, 但是当此比例超过某个阈值时连通性能反而会下降。这个结论可以应用于在高速公路车辆自组织网络中寻求一个合适的传输比例保持与连通性能之间的平衡, 从而获得理想的连通性能的场景中。

参考文献:

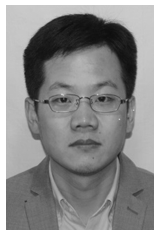
- [1] PANDIT K, GHOSAL D, ZHANG H M, et al. Adaptive traffic signal control with vehicular Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1459-1471.
- [2] ZHAO J, CHEN Y, GONG Y. Study of connectivity probability of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication systems[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2016, Nanjing, China. New Jersey: IEEE Press, 2016.
- [3] 杨伟. 论 4G 技术与智能交通系统的融合 [J]. 通讯世界, 2015(23): 39-40.
YANG W. Research on interaction of 4G and intelligent transportation system [J]. Communications World, 2015 (23): 39-40.
- [4] NG S C, MAO G, ANDERSON B D O. On the properties of one-dimensional infrastructure-based wireless multi-hop networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11 (7): 2606-2615.

- [5] ROS F J, MARTINEZ J A, RUIZ P M. A survey on modeling and simulation of vehicular networks: communications, mobility, and tools[J]. Computer Communications, 2014, 43(5): 1-15.
- [6] BELLOMO N, DELITALA M, COSCIA V. On the mathematical theory of vehicular traffic flow I: fluid dynamic and kinetic modelling [J]. Mathematical Models & Methods in Applied Sciences, 2011, 12(5): 1801-1843.
- [7] LUAN T H, SHEN X, BAI F. Integrity-oriented content transmission in highway vehicular Ad Hoc networks [J]. IEEE INFOCOM, 2013, 12(11): 2562-2570.
- [8] DERSCH U, BRAUN W R. A physical mobile radio channel model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(2): 472-482.

[作者简介]



李扬(1992-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为车联网。



赵海涛(1983-), 男, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授、院长助理, 主要研究方向为下一代网络技术、车联网、网络编码等。



唐紫浩(1992-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为异构网络。



张玉婷(1993-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为车联网。