

Analysis of the Connectivity for Platoon-Based Vehicle-to-RSU by Traffic Property

Mingsha Li, Zhiping Zhou, Jiasheng Kang

School of Architecture and Transportation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi
Email: 824931161@qq.com

Received: May 4th, 2020; accepted: May 15th, 2020; published: May 22nd, 2020

Abstract

In view of the connection between vehicles and the roadside units in the Vehicular Ad Hoc Network, taking the platoon as the research unit, by studying the traffic property of the vehicles arriving on the road, the connectivity probability analysis had transformed into the probability calculation of the arrived platoon length. This paper proposed that when vehicles are driving in a platoon, the headways of vehicles were subject to a lognormal distribution, in the case of large traffic flow, and then deduced the probability model of the platoon length by convolution formula, and the results verified the correctness of the proposed probability model.

Keywords

Vehicular Ad Hoc Network, Headway, Road Side Unit, Network Connectivity

基于移动属性的车队与路侧单元连通度分析

李明莎, 周志平, 康家胜

桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林
Email: 824931161@qq.com

收稿日期: 2020年5月4日; 录用日期: 2020年5月15日; 发布日期: 2020年5月22日

摘要

本文针对车载自组织网络中车辆与路侧单元的网络连接性问题, 以车队为研究单位, 分析道路上到达车辆的移动属性, 将车队与路侧单元的连通概率计算转变为到达车队长度概率的计算。提出车流较大情况

下, 车辆以车队行驶时的车头时距服从对数正态分布, 并在此基础上用卷积公式推导出车队长度的概率模型, 实例分析结果验证了提出的概率模型的准确性。

关键词

车载自组织网络, 车头时距, 路侧单元, 网络连通度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

车载移动网络通信主要由车与车之间的通信(V2V)和车与路边单元间(V2I)的通信 2 种方式组成。车辆通过搭载的无线通信设备与其他车辆或布设在路边的路侧单元(Roadside Unit, RSU)通信, 以实现路况预告、危险预警和辅助驾驶等功能。与传统的移动网络相比, 车载移动网络具有高的动态拓扑结构、可预测的节点轨迹、多样化的通信场景和严格的延迟要求, 因此车辆与 RSU 之间的连接概率往往与道路上车辆的运动模式有关。在交通繁忙时, 车辆很容易聚集形成车队, 车队中的车辆通常以相对稳定的速度行驶, 而且在短期内它们具有一致的行进方向, 需要共享的交通信息大致相同, 车队中的车辆可以相互通信, 本文将通过分析车队移动规律, 研究车辆与 RSU 之间的连接概率。

目前有不少文献集中于车辆之间的 V2V 通信中的连接概率。张莉华等人在文献[1]中针对车联网的数据传输问题, 基于车辆到达分布规律推导了车间通信的连接概率, 即成功连接的车辆簇中车辆的数量以及车辆间的间隔, 进而提出了基于连通概率的路由协议。在此基础上, 臧冠男等人在文献[2]中计算车辆链路的连通率时, 考虑了车辆的高速移动对路由稳定性的影响, 并以连通概率最高的路径作为决策路由的依据, 以降低数据包传输时延迟并提高吞吐量。与上述研究不同, 为了分析路侧单元在车辆自组织网络中的部署问题, 王振宇等人针对一维高速公路场景下, 在文献[3]中提出车辆在路侧单元的辅助下, 在两跳通信覆盖范围内的下行连通概率分析模型, 为部署路侧单元的最小间隔提供参考依据。Yu Wang 等人在文献[4]中分析了在间歇连接的车载网络中路边单元部署的信息传递延迟。利用解析模型来描述平均信息传递延迟与沿途两个相邻 RSU 之间的距离之间的关系。所建立的模型考虑了相邻的两个 RSU 之间随机生成道路状况信息, 还考虑了包括车速、车辆密度、发生事故的可能性以及两个 RSU 之间的距离。旨在某些关键时间应用的延迟要求下计算了两个相邻 RSU 之间允许的最大距离。

针对非自由流交通中, 车辆易聚集成车队的特性, 一些路侧单元部署间隔的研究围绕交通流中的车队长度的分析展开。朱利旻等人在文献[5]中把目标车辆划分为簇, 以研究路侧单元的部署问题。分析车辆到达分布和车辆簇内间隔和簇间间隔的概率, 并以此推算出车辆簇的长度的期望值, 提出了基于簇的路侧单元部署方法。Shao C.等人[6]分析了车辆在不同交通密度分布下的网络连接概率。并分别考虑了 V2V 通信场景和 V2I 通信场景, 他们研究了连接概率与关键参数之间的关系, 包括交通密度、普通车辆的传输范围、基于车队的传输范围、RSU 的传输范围、相邻两个 RSU 之间的距离和 VANET 中车队的比率。

虽然目前的研究中不乏针对车队与路侧单元连接概率的研究, 但鲜有把关注点放在车队中车辆的移动属性研究上, 假设同向行驶车队中的车辆可相互通信, 本文试通过研究到达车队的移动属性, 分析其与路侧单元的连通度, 将车队与路侧单元的连通概率计算转变为到达车队长度的计算, 并进行实例

分析验证。

2. 连通模型

根据车辆联网协议标准 IEEE802.p, RSU 的传输半径远大于道路宽度, 因此其对车辆连通性的影响可以忽略不计。因此, 道路模型可以简化为一维单向路段, 如图 1 所示。

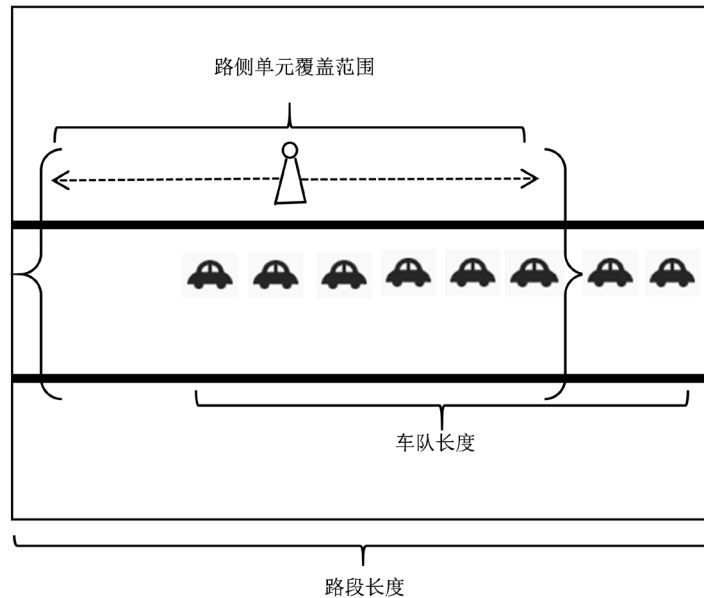


Figure 1. Model of the connectivity for vehicle-to-RSU
图 1. 车队与路侧单元连通模型

假设目标路段旁只部署了一个路侧单元, 车队经过时, 车队中的任何车辆一旦与路侧单元连接上, 则车队中的所有车辆都可以共享路侧单元广播的信息, 避免单个车辆因故障而无法与网络连通的情况, 且车辆以车队的形式在道路上行驶有利于交通信息的共享, 同时降低交通资源的消耗。

3. 车队长度概率模型

3.1. 车头时距分布特性

现有文献中研究车辆连续的到达多以车头时距为基础, 车头时距指的是路段中向同一方向行驶的连续的两辆车经过某个断面的时间差。车辆的到达一般服从参数为 λ 的泊松分布, 其分布函数可表示为:

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (1)$$

式中, $P(n)$ 表示在 t 时间段内到达了 n 辆车的概率。

而车头时距是连续型的分布, 一般用指数分布来表示。根据(1)式, 没有车辆到达的概率 $P(0)$ 相当于连续两辆车车头的的时间间隔至少为计数时间 t , 于是车头时距小于 t 的概率密度函数可表示为:

$$f(h < t) = \frac{d}{dt} P(h < t) = \frac{d}{dt} [1 - P(h \geq t)] = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2)$$

观察式(2), 该函数的曲线是随 t 单调递减的, 车头时距越短概率越大, 但车辆间的距离至少有一个车身的长度, 故车辆间存在一个最小的时距 Δ , 则式(2)可改进为移位负指数分布:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(t-\Delta)}, & t \geq \Delta \\ 0, & t < \Delta \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[7]指出,该分布在路段车流小于 750 veh/h 时适用,只适用于拟合在到达率较小的单列车流,此时道路上的车辆是自由流状态,不符合本文所要研究的可形成车队行驶的非自由流拟合。在道路上的车流密度比较大时,形成车队的车辆不能随意行驶,紧跟前车的驾驶员只能根据前车的状况而调整行车速度,出现较大或较小的车头时距的可能性比较小,所以车队中的车头时距维持在一个相对稳定的值,符合正态分布的特点,又车辆的到达是相互独立的,逐车队中的车头时距可用对数正态分布函数来描述:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t}} e^{-\left(\frac{\ln t - \mu}{2\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

式中, σ 和 μ 分别表示变量对数的标准差和平均值。

将道路简化为单向一维的线段,假设车辆集结形成车队后以相同的恒定速度 v 行驶,车辆的间隔为车辆的行驶速度 v 和车头时距 t 的乘积。由概率论的知识易知,到达的车辆间的间隔的概率密度函数可表示为:

$$f_d(d) = f(t \cdot v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t \cdot v}} e^{-\left[\frac{\ln t \cdot v - \mu}{2\sigma}\right]^2} \quad (5)$$

3.2. 车队长度概率

在形成车队之际,车辆的跟驰行为由于受到干扰而引起车辆相应的加速或减速,车辆间距也会随之受到影响[8]。间距变化的规律可近似看成正弦变化,则间距扰动函数表示为:

$$f_k(x) = A \sin(\omega \cdot t \cdot v) \quad (6)$$

式中, A 表示变化的振幅, ω 表示变化的角频率。

在观测车队形成的过程中,车辆间距的变化是一个持续更新的过程,车辆间的距离不仅与车辆的到达概率有关,还和车辆跟驰行为的扰动影响有关,而且这个过程是连续的,所以车队的长度应为车辆间隔与间隔扰动在路段上各点的叠加,定义 d_2 为 2 辆连续的车辆组成的车队的长度(即前车车头到后车车头的距离),则 d_2 的概率密度函数可由卷积公式得到:

$$f(d_2) = f_d * f_k = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f_d(d_2) f_k(d_2 - x) dd_2 \quad (7)$$

式中, f_d 为到达车辆的间隔的概率密度函数, f_k 为车辆间距的正弦扰动函数, $f_d * f_k$ 表示这两个函数的卷积运算公式, d_{\max} 和 d_{\min} 分别表示积分的上限和下限, d_{\min} 可由车辆所在路段的最小安全车距确定, d_{\max} 由可接受穿越间隙的车距确定,表示如下式:

$$\begin{cases} d_{\min} = \bar{l} + \alpha \\ d_{\max} = \bar{l} + \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中, \bar{l} 表示车辆的平均长度, α 表示最小安全车距,根据车辆所在路段的限制有不同的取值, β 表示车辆间不能接受一辆车穿越的最大距离。

当车队由 n 量车组成时,易知车队总长度的概率密度函数 $f(d_n)$ 由 $f(d_2)$ 的 n 重卷积可得:

$$f(d_n) = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \cdots \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f_d(d_2) f_d(d_3) \cdots f_d(d_n) f_k(x - d_2 - d_3 - \cdots - d_n) dd_2 dd_3 \cdots dd_n \quad (9)$$

3.3. 连接概率

对车辆到达进行观测,而车辆可能在开始观测很早之前就已经在行驶了,在观测过程中相互独立的

连续到达的车辆间隔，与初始车辆间隔有着不同的分布概率，这个过程可以用延迟更新理论来描述。而当观测时间较长时，车辆的到达概率可视为与初始到达概率无关的常数，于是到达车辆的间隔可用平衡更新理论来描述。

假设路侧单元部署在观测路段中点处，在观测路段的两端有部分路段是处于覆盖范围之外的，即盲区路段，若整个车队都在覆盖范围内时，车辆与路侧单元必定连通，则可将连通概率定义为车队长度大于盲区路段长度的概率。根据前文所述的覆盖模型，车队在驶入路侧单元覆盖范围时分为如下两种情况：一是车队中所有车辆均在覆盖范围内；二是车队中只有部分车辆在覆盖范围内。由 n 辆车组成的车队中首车前轴至末车前轴的距离 d_n 大于盲区路段长度 l_n 的概率可表示如下：

$$P_n = 1 - \left[\int_0^{L-l_n} f_e(y) \int_0^{l_n} f_{d_n}(x) f_k(L-x) dx dy + \int_{L-l_n}^L f_e(y) \int_0^{l_n} f_{d_n}(x) f_k(L-x) dx dy \right] \quad (10)$$

式中， L 为观测路段的长度， $f_e(y)$ 表示初始分布概率密度函数， $f_{l_n}(x)$ 为到达车辆的 n 重卷积。

由于模型表达式复杂，难以通过直接积分计算获得闭合解，将 l_n 按一定长度 Δ 划分为离散值，采用积分区间上下限差值的方法来求解，再利用积分的可列可加性质求得最终概率。各划分区间的连通概率为：

$$\Delta P_n(l_n, L) = P_n\left(l_n + \frac{\Delta}{2}, L\right) - P_n\left(l_n - \frac{\Delta}{2}, L\right) \quad (11)$$

4. 实例分析

实验中使用的车流数据来源于德国航空航天中心(ITS-DLR)交通系统研究所的 TAPASCologne 项目 [9]。项目根据关于德国人的交通和地区中交通设施信息，模拟场景还原了德国科隆市内一整天的交通情况。模拟项目以交通软件 SUMO 作为载体，将所需数据导入 Matlab 进行计算。

4.1. 车辆移动属性分析

选取交通高峰期作为观测时间，当车辆集结成车队行驶时，获取连续两辆车的经过检测器的时间，计算出车头时距，检测次数为 200 次。将得到的 200 组车头时距分为 50 个区间统计作柱状图，如图 2 所示，在检测时段中车队的车头时距分布在 1.8 s 至 3 s 之间，拟合得到的图像符合参数为 $\mu = 0.7984$ ， $\sigma = 0.1037$ 的对数正态分布，验证了上文所提出的假设。

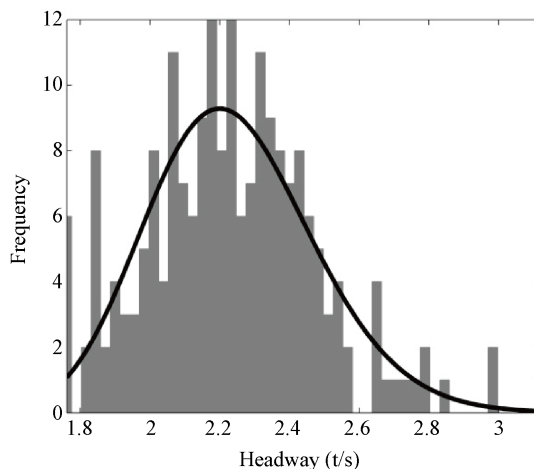


Figure 2. Distribution fitting of headway
图 2. 车头时距分布拟合

4.2. 车队与路侧单元连通度分析

为验证提出的车队与路侧单元连通模型，计算在不同观测路段长度 L 值下的连通概率。假设路侧单元的覆盖范围为 200 米，将 L 设置为 200 m 至 1000 m 的 9 种不同大小，观测其中路段上 100 个到达车队的长度，分别计算连通度，得到的实际连通曲线如图 3。将观测得到的平均车速、平均车辆长度、平均到达车队中的车辆数带入所提出的模型计算得到理论曲线。验证了提出的车队长度模型基本符合实际。由图 3 可看出，当 L 等于路侧单元覆盖距离 200 米时，车队与路侧单元必定连通，连通度随所观测路段长度的减小而降低。

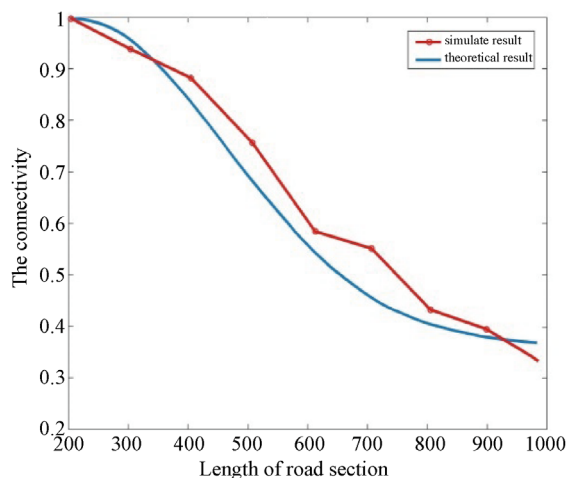


Figure 3. Comparison of practical and theoretical results of connectivity

图 3. 连通概率实际与理论结果比较

5. 结语

本文以车队为单位，通过分析路段上车队的移动属性，研究了车辆与路侧单元的连通概率，主要得到的结论如下：

(1) 一般运行状态下的车辆到达间隔分布并不符合车队中车辆间隔的分布，分析得出车辆在密集行驶状态下的车头时距符合对数正态分布的结论。

(2) 本文结合提出的车头时距分布，利用卷积公式建立了车队长度概率模型，采用平衡更新理论描述车队中车辆的间隔，在提出的模型中考虑了车辆跟驰行为特性对车辆间隔的扰动，将车队与路侧单元的连通概率计算转化为车队长度概率计算，并通过实例分析验证了模型计算结果与实际基本一致，该研究结果可对路侧单元的部署间隔提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] 张莉华, 张得生. 基于连接概率的 VANETs 路由协议研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(7): 19-23.
- [2] 臧冠男, 沈继伟, 林洋. 车载网中面向高速场景的路由算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(4): 164-168.
- [3] 王振宇. 车载自组织网络路侧单元部署方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [4] Wang, Y., Jun, Z. and Nathalie, M. (2015) Delivery Delay Analysis for Roadside Unit Deployment in Intermittently Connected VANETs. *Global Communications Conference*, Austin, 8-12 December 2014, 155-161. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7036800>
- [5] 朱利旻. 车载自组织网络中 RSU 部署和控制方案的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.

- [6] Shao, C., Leng, S. and Zhang, Y. (2015) Performance Analysis of Connectivity Probability and Connectivity-Aware MAC Protocol Design for Platoon-Based VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **64**, 5596-5609. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2479942>
- [7] 段力, 过秀成, 姚崇富. 车头时距分布函数的验证分析与选择[J]. 公路交通科技, 2014, 31(5): 147-152.
- [8] 李全艳, 詹晓松. Hoefs 标定下 GM 跟驰模型仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(5): 95-99.
- [9] TAPAS (2011) "TAPAS Cologne" Scenario. <http://kolntrace.project.citi-lab.fr/>