



车载自组织网络中连通概率的预测与建模

王慧敏^{1,2}, 赵海涛^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 江苏南邮物联网科技园有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要:近年来,随着车载通信技术的快速发展,作为物联网应用之一的车联网基础应用越来越引起人们的关注。连通概率是车辆通信的基本要素之一。提出了一个基于公路模型的连通概率预测算法,并对高速公路上车辆的联合分布进行了研究,定量地分析出了段的连通概率上下界的计算式,用 Rstudio 推导出了段连通概率和每个元胞平均车辆数目的关系图,最后根据路径的连通概率,计算路径包含的所有段的连通概率的乘积,得出路径的连通概率计算模型。分析结果表明,可以通过增大通信距离或者车辆密度的方法来提高整个路径的连通概率。

关键词:车载自组织网络; V2V; 连通概率; 有效性

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016037

Prediction and modeling of connectivity probability in vehicular Ad Hoc networks

WANG Huimin^{1,2}, ZHAO Haitao^{1,2}

1.College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Nanyou IoT Science Park Co., Ltd., Nanjing 210003, China

Abstract: Recently, with the rapid development of vehicular communication technology, IoV(internet of vehicles) as one of the applications of IoT (internet of things), is attracting more and more attention as well as its basic applications. The algorithm of predicting the connectivity probability based on highway model was proposed. Also, the joint distribution of vehicles on highway was studied, and the equation calculating the boundaries of connectivity probability on one road segment was analyzed quantitatively. The diagram presenting the relationship between the connectivity probability on one road segment and the average number of vehicles in each tuple was depicted by Rstudio. As a consequence, the model of connectivity probability on one path was achieved by calculating the products of the connectivity probability on all road segments along one path. The analysis result shows that the connectivity probability on one path can be improved by increasing the communication range or the density of vehicles.

Key words: VANET, vehicle to vehicle, connectivity probability, availability

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2015-12-16

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); 国家自然科学基金资助项目(No.61302100, No.61471203, No.61201162); 教育部博士点基金资助项目(No.20133223120002); 南京邮电大学科研启动基金资助项目(No.NY211006)

Foundation Items: The National Key Basic Research Program of China (973 Program)(No.2013CB329005), The National Natural Science Foundation of China (No.61302100, No.61471203, No.61201162), The Ministry of Education of Doctoral Funded Project(No.20133223120002), Nanjing University of Posts and Telecommunications Research Initial Funding(No.NY211006)

1 引言

物联网的重要应用之一是车载自组织网络 (vehicular Ad Hoc network, VANET)。近来,作为车载自组织网络形式之一的车间通信 (inter vehicle communication, IVC) 系统发展迅速,可提供主动安全类应用,如变道预警、故障报告、弯道减速预警、非法停车警告、道路状况报告等;也可提供非安全应用,如软件下载、车辆信息提醒、广告推送、电子支付。IVC 主要分为车与车之间 (vehicle to vehicle, V2V) 的通信和车与路边基础设施 (vehicle to infrastructure, V2I) 的通信。

车载自组织网络与其他移动自组织网络有很大的不同,比如由于车辆的快速移动而引起的通信中断频繁发生。因此,研究通信的连通概率是非常有必要的。不少参考文献研究了 VANET 中的网络连通概率。例如:参考文献[1]中确定了形成单簇的概率,如果所有车辆能够直接或间接通信,则这些车辆的集合称为一个簇。连续有效通信和无效通信的持续时间是衡量通信质量是否满足 QoS 的重要指标。参考文献[2]提出了动态的通信范围以适应频繁的拓扑变化。参考文献[3]提出了一种衡量速度对连通概率影响的模型。参考文献[4]提出了在衰落信道情况下的连通概率。上述参考文献考虑的是单向单通道上的连通概率及其与速度、通信范围等因素的关系。而本文在提出双向多通道模型的基础上研究了每段路的连通概率的上下界,最终计算出整条路径的连通概率。

2 公路模型

假设 N 条公路是任意拓扑结构,公路编号分别为 1、2、3、 $\dots$ 、 N ,如图 1 所示,AB、EF、CD、AC 和 BD 分别编号

为双向多通道公路 1、2、3、4、5。每条公路由连续的段组成,每段的开始和结尾允许节点的进入和离开。 Q_j 是第 j 条公路上的段的数目, S_{ji} 是第 j 条公路上的第 i 个段。 Ω_k 是第 k 条路径, $|\Omega_k|$ 是这条路径中包含的段的数目。每个段又由许多固定长度的元胞组成^[5]。例如:图 1 中源为 A、目的地为 X 的路径 Ω_1 由 5 个路段组成,即 $\Omega_1=\{S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}, S_{33}\}$ 。

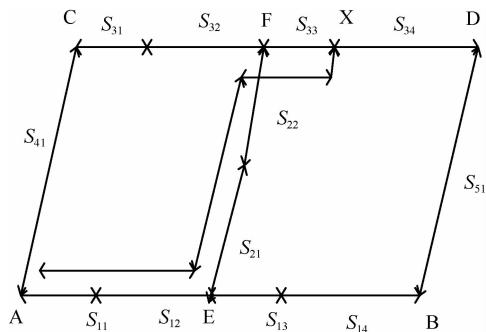


图 1 公路模型

考虑实际场景中, S_{12}, S_{13}, S_{21} 的详细路况如图 2 所示。 S_{12} 为双向三通道公路,3 个通道从左到右分别为快速 (fast) 通道、中速 (middle) 通道、慢速 (low) 通道。车辆进入每个通道,开始进入加速阶段,对应图 2 中的 front 路段,这段距离比较短;接着进入匀速行驶阶段,对应于图 2 中的 middle 路段,这段距离是最长的;在进入 end 路段时,由于进入交叉路口或者遇到红灯,都需要减速运行,这段距离也较短。所以,可以忽略进入段和离开段的路段,即在一个段中的节点速度是固定的,是从正态分布中随机选取的,与段中的节点密度相关。所以,每个段中节点的行驶速度 (逗留时间的倒数) 与对应的段中节点的密度有关,即节点数量的概率分布 $P(n)$ 与密度 h_{ji} 密切相关。

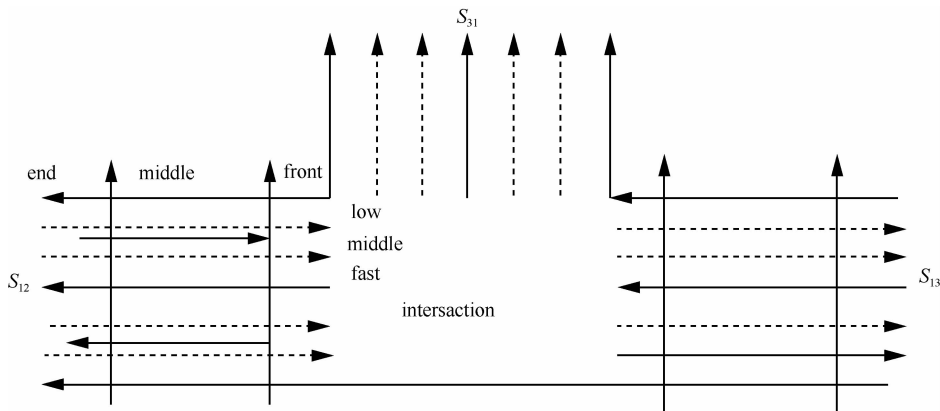


图 2 公路交点 E 的详细路况



3 车辆联合分布

车辆节点的联合分布为 $P(n)$, 其中向量 $n=(n_{11}, \dots, n_{NQ_N})$, $1 \sim N$ 是路径编号, Q_N 是编号为 N 的路径上的段的数目, n_{ji} 是段 S_{ji} 中车辆的数目。根据 BCMP 理论^[6], 车辆的联合分布为 $P(n) = \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^{Q_j} \frac{e^{-D_{ji}f(h_{ji})} (D_{ji}f(h_{ji}))^{n_{ji}}}{n_{ji}!}$, 可知其边缘分布为:

$$P(S_{ji} = k) = \frac{e^{-D_{ji}f(h_{ji})} D_{ji}f(h_{ji})^k}{k!} \quad (1)$$

边缘分布即段 S_{ji} 上车辆节点数目 n_{ji} 的分布函数, 服从泊松分布, 且平均值为^[7]:

$$\varphi_{ji} = D_{ji}f(h_{ji}) = D_{ji}f\left(\frac{\phi_{ji}}{R_{ji}}\right) \quad (2)$$

其中, h_{ji} 为 S_{ji} 中车辆的密度, 且 $f(h_{ji})$ 是 h_{ji} 的递增函数, 验证了之前分析的节点数量的概率分布 $P(n)$ 与密度 h_{ji} 密切相关。

假设在短距离内的车辆密度是固定不变的, 即把每个段 S_{ji} 分成多个固定长度的元胞, 可知每个元胞中的节点的均值为:

$$\overline{\phi_s} = \frac{\phi_{ji}}{|S|} \quad (3)$$

即每个元胞中节点的平均数目等于相应的段中的平均节点数目除以每个段中元胞的数目。所以每个元胞中的节点数目 P_{ji} 的分布服从平均值为 $\overline{\phi_s}$ 的泊松分布, 即

$$P(P_{ji} = n) = \frac{e^{-\overline{\phi_s}} \overline{\phi_s}^n}{n!}, \text{代入式(1)、式(2)得:}$$

$$P(P_{ji} = n) = \frac{e^{-\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{|S|}} \left(\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{|S|}\right)^n}{n!} \quad (4)$$

设每段的长度为 L , 则 $|S|=L/X$, 其中 X 为每个元胞的长度。

4 连通概率上下界的计算

基于上述提出的公路模型和对车辆联合分布的计算, 假设每辆车具有相同的通信范围, 考虑当车辆之间的欧氏距离小于或等于它们之间的最短通信距离时, 车辆之间是连通的^[8]。

下面分两种情况分别讨论连通概率的上下界(假设两车之间的通信距离为 R)。

(1) 每个元胞的长度等于通信距离 R , 即 $X=R$

这种情况下只要有一个元胞距离内没有车辆, 网络就肯定不连通(每个相邻的车辆的距离大于 R); 但是当每个元胞中都至少有一辆车时, 网络也不一定连通。所以考虑有一个元胞中无车辆的情况可求得网络的最大连通概率 $P_{\max}$ 。

(2) 每个元胞的长度等于通信距离的一半 $R/2$, 即 $X=R/2$

这种情况下只要保证每个元胞中均至少有一辆车, 则网络肯定连通; 但是当有些元胞中无车辆时, 网络也有可能连通(每个相邻的车辆的距离小于 R)。所以考虑到所有元胞中均至少有一辆车的情况可求得网络的最小连通概率 $P_{\min}$ 。从而可求出连通概率的范围 $P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$ 。

将 $X=R$ 和 $X=R/2$ 代入式(4)中得每个独立同分布的元胞内的节点分布分别为:

$$P(P_{ji} = n) = \frac{e^{-\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{\frac{L}{R}}} \left[\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{\frac{L}{R}}\right]^n}{n!} \quad (5)$$

$$P(P_{ji} = n) = \frac{e^{-\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{\frac{L}{R/2}}} \left[\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{\frac{L}{R/2}}\right]^n}{n!} \quad (6)$$

根据前面的分析得:

$$P_{\max} = 1 - P(\exists P_{ji} = 0) \quad (7)$$

$$P_{\min} = P(\forall P_{ji} \geq 1) \quad (8)$$

将式(5)代入式(7)中, 因为每个段中的元胞是独立同分布的, 所以可以用任意元胞中车辆数量为零的概率乘以段中元胞的个数 $\frac{L}{R}$, 得:

$$P_{\max} = 1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{D_{ji}f(h_{ji})}{\frac{L}{R}}} \quad (9)$$

将式(6)代入式(8)中, 同理得:

$$P_{\min} = \frac{L}{2} \left[1 - e^{-\frac{D_{ji} f(h_{ji})}{\frac{L}{R} \frac{1}{2}}} \right] \quad (10)$$

每个路段中的连通概率 P_L 的范围为:

$$\frac{L}{2} \left[1 - e^{-\frac{D_{ji} f(h_{ji})}{\frac{L}{R} \frac{1}{2}}} \right] \leq P_L \leq 1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{D_{ji} f(h_{ji})}{\frac{L}{R}}} \quad (11)$$

如图1所示,路径 Ω_i 由 N 个路段组成,每个段上车辆的分布是独立同分布的,所以可求得每条路径的连通概率为所有段的连通概率的累积。

$$P = \prod_{L=1}^N P_L \quad (12)$$

5 结果分析

当元胞的距离为车辆通信距离 R 时,每个元胞中的车辆服从平均值为 $\frac{D_{ji} f(h_{ji})}{L/R}$ 的泊松分布;当元胞的距离为车辆通信距离一半 $R/2$ 时,每个元胞中的车辆服从平均值为 $\frac{D_{ji} f(h_{ji})}{L/2R}$ 的泊松分布,此时,仅需考虑平均车辆数和连通概率上界。将每个元胞中车辆的平均数目作为自变量 x ,连通概率作为因变量 y ,假设每个段上车辆节点的平均个数 ($\phi_{ji} = D_{ji} f(h_{ji})$) 为 5,用 Rstudio 作出每个元胞中车辆平均数目和连通概率上界 P 的关系,如图3所示。由图3可知,随着每个元胞中车辆数目的增加,连通概率增加。因为车之间的距离减少了,在通信范围 R 内的概率也增加了。图3中,当有一个元胞中的车辆数目小于 1 时,连通概率为零。这与前面的连通概率上界的分析结果完全一致,即只要有一个元胞距离中没有车辆,该路段上的连通概率肯定为零。因为路径上各个路段的连通概率是独立的,所以路径的连通概率是路段连通概率的乘积。假设路段长度不变,为 1 000 m,图4为连通概率上界 P 与通信距离 R 的关系。由图4可知,随着通信距离的增加,路段的连通概率也增大,且当通信距离达到 700 m 左右时,连通概率达到饱和状态。

6 结束语

本文提出了一种双向多车道道路模型,并在此模型

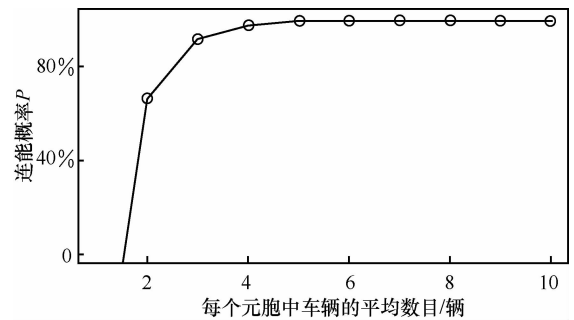


图3 元胞车辆平均数量和连通概率的关系

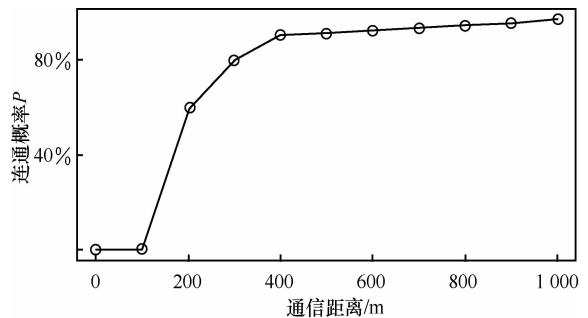


图4 通信距离与路段连通概率的关系

上提出了路段的连通概率上下界的计算模型,由于路段的连通概率是相互独立的,所以也推算出整个路径的连通概率。分析结果表明,在车辆通信距离不变的情况下,如果元胞中的车辆密度增大,路段的连通概率也增大;在元胞中车辆密度不变的情况下,如果通信距离增大,路段的连通概率也会随之增大。由此推算出,可以通过增大通信距离和增加车辆密度的方法来提高整个路径的连通概率。

参考文献:

- [1] KHAZIAN M, MEHMET-ALI M K. A performance modeling of connectivity in vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Trans Vehicular Technol, 2008, 57(4): 2440-2450.
- [2] ARTIMY M M, ROBERTSON W, PHILLIPS W J. Connectivity with static transmission range in vehicular ad hoc networks[C]// The 3rd Annual Conference on Communication Networks and Services Research, May 16-18, 2005, Halifax, NS, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2005: 237-242.
- [3] MUHAMMAD AJEER V K, NEELAKANTAN P C, BABU A V. Network connectivity of one dimensional vehicular ad hoc networks[C]//2011 IEEE ICCSP, February 10-12, 2011, Calicut, India. New Jersey: IEEE Press, 2011: 241-245.



- [4] BABU A V, MUHAMMAD V K. Analytical model for connectivity of vehicular ad hoc networks in the presence of channel randomness [J]. Wiley International Journal on Communication Systems, 2013, 26(7): 927-946.
- [5] KHABAZIAN M, MEHMET ALI M, AISSA S. Analysis of continuous communication availability in vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(1): 137-150.
- [6] KHABAZIAN M, MEHMET-ALI M K. A performance modeling of connectivity in vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2440-2450.
- [7] MOHIMANI G H, ASHTIANI F, JAVANMARD A, et al. Mobility modeling spatial traffic distribution and probability of connectivity for sparse and dense vehicular ad hoc networks in vehicular technology [J]. IEEE Transactions, 2009, 58 (4): 1998-2007.
- [8] 饶毓, 戴翠琴, 黄琼. 车联网关键技术及连通性研究[J]. 数字通信, 2011, 38(5): 36-40.
- RAO Y, DAI C Q, HUANG Q. Research on key technologies

and connectivity of vehicle networking [J]. Digital Communication, 2011, 38(5): 36-40.

[作者简介]



王慧敏 (1991-), 女, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为车联网。



赵海涛 (1983-), 男, 博士后, 南京邮电大学副教授、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。