

高速公路场景中车用自组织网络节点平均度的快速计算方法

李清泉^{1,2} 熊 炜^{2,3}

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学交通研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 武汉大学电子信息学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:推导得出了高速公路场景中车用自组织网络节点平均度的快速计算方法,结合车辆运动的约束性,在简化计算复杂度的同时,建立了其与宏观交通特征参数之间的联系,并得出网络的节点平均度随交通密度或通信距离线性增加的结论。
关键词:车用自组织网络;几何随机图;节点平均度
中图法分类号:P208

车用自组织网络(vehicular ad hoc networks, VANET)是一类迅速崛起并富有挑战的移动自组织网络(mobile ad hoc networks, MANET)。通过运用新兴的车-X 通信技术,可以实现诸如道路行车安全、交通运输管理、在途信息娱乐等方面的应用^[1]。车辆间通信网络具有无线自组网的一般特征,同时也存在很大的差异^[2,3]:① 车辆只能沿道路网进行高速、受限的约束运动;② 网络规模巨大,且节点密度随时空变化快;③ 频繁的拓扑变化以及网络分裂现象;④ 网络极易受驾驶员行为等因素的影响;⑤ 节点具有丰富的外部辅助信息,且无明显的硬件和电源方面的约束。鉴于此,针对 MANET 所作的研究成果并不能直接应用于新兴的 VANET 系统^[4,5]。本文结合车辆节点运动的约束性,在简化计算复杂度的同时,还建立了车辆网络的节点平均度与宏观交通特征参数之间的联系。

1 车辆网络建模

1.1 车辆运动模型

对 VANET 的研究表明,协议性能的优劣在很大程度上取决于所选的节点运动模型^[6],然而,

MANET 研究中经常采用的随机路点模型已不适合模拟车辆高速、受限的约束运动特征。此外,通过大规模现场实验获取真实的车辆运动轨迹代价太大,因此,微观交通仿真系统可用于生成研究所需的车辆运动数据。

本文使用的原始车辆运动数据由 Daimler-Chrysler 内部的驾驶员的行为模拟器产生,并同高速公路上采集到的真实车辆的运动数据进行了统计比较。它对交通流的描述以单个车辆为基本单元,车辆在道路上的跟车、超车以及车道变换等微观行为都能够得到真实的反映。

轨迹数据格式为每个车辆节点(ID)在采样时刻(T_s)具有的瞬时位置(X)、速度(V)、加速度(A)及车道(lane)信息。不同密度的车流可沿着被中间带分隔且与车道平行的两个方向高速运动。不失一般性,抽取如封三彩图 1 所示的 3×2 模型的高速公路场景,即双向六车道模型,并规定车道宽度 LaneWidth=3.75 m,中央分隔带宽度 MedianWidth=2.00 m。

由于每个车辆节点在高速公路上的坐标位置均由二元组(X , Lane)表示,因此在模拟实验中,车辆的车道变换过程总是在相邻两次采样间隔(0.5 s)内完成。为了简化数据处理,用车辆所在

车道的中线表示其在 Y 方向上的投影(Y)。采用的坐标系如图 1 所示,其映射关系为:

$$Y = \begin{cases} (i - 0.5) \times \text{LaneWidth}, i = 1, 2, 3 \\ (j - 0.5) \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth}, \\ j = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (1)$$

1.2 无线传播模型

信号通过无线信道时,会遭受各种衰落的影响,可分为大尺度衰落和小尺度衰落^[7]。虽然复杂的统计模型(如瑞利、莱斯、Nakagami^[8]等分布)可以用来较为精确地描述无线传播的多径衰落,但是对无线链路的性能及无线通信方式的研究表明,基于几何光学的双线模型(即同时考虑视距直接传播和地面反射路径)在预测高速公路场景中的专用短距离通信时也具有良好的效果^[9]。

采用式(2)所示的对数距离路径损耗为无线信道建模,并假定节点采用全向天线,仅考虑双向链路:

$$[\overline{\text{PL}(d)}]_{\text{dB}} = \overline{\text{PL}(d_0)} + 10\beta \lg(d/d_0) \quad (2)$$

其中, d 为收发之间的距离; d_0 为近地参考距离,由测试决定; β 为路径损耗(PL)指数,它表明路径损耗随距离增长的速率,在视距以及非视距车辆通信场景中分别为 1.4~3.5 和 2.8~5.9^[10]。

2 车辆网络的节点平均度

基于前述的 VANET 系统模型,将高速公路场景中每个采样时刻 t 对应的车辆网络表示为一个简单无向图 $G_{p(d_{ij})}(V, t)$, 其中, V 表示实验场景中的车辆节点,其网络规模为 $N = |V|$; $p(d_{ij})$ 表示当节点通信距离为 r 时,场景中空间距离为 d 的两个节点 v_i 和 v_j 之间发生通信的概率。不妨记符号 $\|\cdot\|$ 为实 s -维向量空间 R^s 上的范数,对于给定分布的有限点集 $V \subset R^s$, 当且仅当 $\|v_j - v_i\| \leq r$ 时,节点对 $\{v_i, v_j\}$ 互为邻居。于是,网络或图中存在的总链路数 e 即为任意两个节点之间通信的概率之和:

$$e = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N p(d_{ij}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N p(d_{ij}) \quad (3)$$

假设这 N 个节点均匀分布于高速公路的带

$$S_j = \int_{y_{lb}}^{y_{ub}} \int_{x_j - \sqrt{r^2 - (y - y_j)^2}}^{x_j + \sqrt{r^2 - (y - y_j)^2}} dx dy - \int_{y_{lb}}^{y_{ub}} \int_{x_j - \sqrt{r^2 - (y - y_j)^2}}^{x_j + \sqrt{r^2 - (y - y_j)^2}} dx dy = r^2 \left[\arcsin \frac{y_{ub} - y_j}{r} - \arcsin \frac{y_{lb} - y_j}{r} + \frac{y_{ub} - y_j}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{ub} - y_j}{r} \right)^2} - \frac{y_{lb} - y_j}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{lb} - y_j}{r} \right)^2} \right]_{(r, y_{lb}, y_{ub}, y_j)}^{(r, y_{lb}, y_{ub}, y_j)} = c_j r^2 \quad (7)$$

状行车区域 Ω 内,为了求得网络中通信链路的数学期望 $E[e]$,将高速公路带状行车区域(不含中央分隔带)分割为 $M > N$ 个矩形占位区域 $\Delta\Omega$,如图 1 所示,并规定其宽度为车道宽度,长度为车辆长度。这样,在同一时刻、同一占位区域内,最多只能够容纳一个车辆节点。因此, N 个节点随机均匀分布于 M 个矩形占位区域的所有可能取法共有 C_M^N 种情况。若记每种情况下的随机图为 $G_1, G_2, \dots, G_{C_M^N}$, 每个随机图中的链路总数分别为 $e_1, e_2, \dots, e_{C_M^N}$, 则:

$$E[e] = \sum_{k=1}^{C_M^N} Pr[G_k] e_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{C_M^N} Pr[G_k] \cdot \left[\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N p(|\Delta\Omega_{k,i} - \Delta\Omega_{k,j}|) \right] = \frac{C_{M-2}^{N-2}}{2C_M^N} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M p(|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|) = \frac{N(N-1)}{2M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M p(|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|) \quad (4)$$

其中, $|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|$ 表示序号分别为 i 和 j 的两个矩形占位区域之间的几何距离。根据图论中的“度和公式”可以得出网络的节点平均度为:

$$E[D] = 2E[e]/N = \frac{N-1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M p(|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|) \quad (5)$$

文献[11]也得出了类似的结论。然而式(4)和式(5)的时间复杂度均为 $\Theta(M^2)$, 计算开销相对较高。为此,结合车辆网络的运动特殊性,在简化其时间复杂度的同时,建立网络的节点平均度与某些宏观交通参数之间的联系。考虑到节点 v_i 通信范围内的矩形占位数 m_i 即为 VANET 有效组网面积 S_{area} 与车辆占位面积 $S_{\Delta\Omega}$ 的比值:

$$m_i = \frac{S_{\text{area}}}{S_{\Delta\Omega}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M p(|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|) \quad (6)$$

这里,本文仅对多车道场景中节点通信距离足够大的情况进行分析。若记 S_j 为位于车道 j ($j = 1, 2, \dots$) 的无线覆盖区域与带状行车区域之间的公共面积(如图 1 所示), 则有:

其中,位于车道 j 的节点组网系数为:

$$c_j = \left[\arcsin \frac{y_{ub} - y_j}{r} - \arcsin \frac{y_{lb} - y_j}{r} + \frac{y_{ub} - y_j}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{ub} - y_j}{r} \right)^2} - \frac{y_{lb} - y_j}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{lb} - y_j}{r} \right)^2} \right]_{\langle r, y_{lb}, y_{ub}, y_j \rangle}^{\langle r, y'_{lb}, y'_{ub}, y_j \rangle}$$

采用封三彩图 1 所示的坐标系统,则有 $y'_{lb} = 3 \times \text{LaneWidth}$, $y'_{ub} = 3 \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth}$ 。对于双向四车道场景,车辆节点只能分布于车道 2~5 内,即 $y_{lb} = \text{LaneWidth}$, $y_{ub} = 5 \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth}$;对于双向六车道场景, $y_{lb} = 0$, $y_{ub} = 6 \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth}$ 。

双向四车道场景中的节点组网系数如封三彩图 2 所示。可以看出,随着节点通信距离 r 的增加,行车道系数 $c_{\text{行}}$ 与超车道系数 $c_{\text{超}}$ 之间的差异越来越小。由于上/下对称,不妨取两者的均值,并记车道平均系数为 $c = (c_{\text{行}} + c_{\text{超}}) / 2$,于是,VA-NET 的节点有效组网面积为 $S_{\text{area}} = cr^2$ 。在嵌入的双对数坐标系中还发现,当节点通信距离较大时,其与车道平均系数之间具有幂律特征(对应为一条直线),即 $c \sim r^{-\gamma}$ 。考虑到节点的无线通信距离较小时并无太大的实际应用价值,仅对 100~1 000 m 处的车道平均系数作非线性最小二乘拟合得 $\gamma = 0.998\ 8$,而此时对应的残差平方和仅为 $1.057\ 5 \times 10^{-6}$ 。也可以从另一方面来佐证这个结论,即当节点通信距离足够大时,其与带状行车区域的交集可看作两个弧边矩形,长近似为 $2r$,宽为行车区域的宽度,即 $4 \times \text{LaneWidth} = 15$,该弧边矩形的总面积近似为 $S_{\text{area}} \approx 30r$ 。对于不同车道数的高速公路场景,也可以得出类似的结果。因此,当 $M > N \gg 1$,并且忽略边界效应时,车辆网络的链路平均数 $E[e]$ 可以简化为:

$$E[e] = \frac{N(N-1)}{2M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M p(|\Delta\Omega_i - \Delta\Omega_j|) \approx \frac{N^2}{2M^2} \sum_{i=1}^M \frac{S_{\text{area}}}{S_{\Delta\Omega}} = \frac{\kappa N S_{\text{area}}}{2n \times \text{LaneWidth}} \times 10^{-3} \quad (8)$$

其中, n 为往来两个方向上的车道数; κ 为车流密度,它表示单位道路长度上的车辆数目[veh/km]。于是,车辆网络的节点平均度 $E[D]$ 为:

$$E[D] = \frac{2E[e]}{N} = \frac{\kappa cr^2}{n \times \text{LaneWidth}} \times 10^{-3} \quad (9)$$

可以看出,当不考虑场景的边界效应,如场景长度 $L_a \rightarrow \infty$ 时,车辆网络的链路平均数和节点平均度均与 M 无关。由前面的讨论可知,当无线通信距离 r 较大时,节点的有效组网面积 cr^2 成一维特性,因此,高速公路场景中车辆间通信网络的节点平均度将随车流密度、无线传输距离线性增加,并随车道数、车道宽度线性递减。封三彩图 3 为根据式(9)计算得出的 VANET 理论平均度,其双向四车道场景长度为 12 000 m。虽然该式是由双向四车道场景推导得出的,但它同样适用于不同车道设置的高速公路。

3 实验与分析

选取八组不同交通密度、不同车道数的车辆运动轨迹数据进行实验,表 1 列出了实验场景中车辆网络的部分运动数字特征。

表 1 实验场景中车辆网络的运动数字特征
Tab. 1 Numerical Characteristics of Experimental Scenes

高速公路 实验场景		运动模拟 时间/s	交通密度 /veh · (km · lane) ⁻¹	平均节点数 /veh	场景长度 /m	平均车速/m · s ⁻¹
双向 四车道	场景 1	60	2-2	92.43	12 006.20	39.12
	场景 2	60	2-6	204.01	11 850.70	36.49
	场景 3	60	6-6	314.23	12 380.70	35.86
	场景 4	60	6-11	431.68	12 492.10	34.02
	场景 5	60	15-15	768.49	12 654.80	30.90
双向 六车道	场景 6	60	2-2	136.74	11 398.10	39.38
	场景 7	60	6-6	459.04	12 450.10	33.84
	场景 8	60	11-11	837.74	12 585.80	34.42

考虑到位于实验场景边界的节点,其节点度会因边界效应而比位于观测场景中部的节点度要小,为此,在模拟实验中,将封三彩图 1 所示的高速公路场景模型的左边界与右边界连接起来,从而形成一个圆柱面,观测场景内任意两个节点 v_i

和 v_j 之间的环形距离 d_{ij} 定义为:

$$d_{ij} = \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}$$

其中, $\Delta x_{ij} = \min\{|x_j - x_i|, |x_i - x_{\min}| + |x_{\max} - x_j|, |x_{\max} - x_i| + |x_j - x_{\min}|\}$, $\Delta y_{ij} = |y_j - y_i|$ 。

封三彩图 4(a)和 4(b)分别为这八组高速公

路场景中车辆网络的节点平均度(实验值)与相同参数条件下的节点平均度(理论值)。可以清楚地看出,在双向四车道和六车道场景中,车辆网络的理论平均度与实验平均度之间的最大绝对偏差分别不超过 0.749 8 和 0.767 6。

对于高速公路场景中车用自组织网络的节点平均度与网络连通性之间的关系,有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] Hartenstein H, Laberteaux K P. A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6): 164-171

[2] Yousefi S, Mousavi M S, Fathy M. Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives[C]. The 6th International Conference on ITS Telecommunications, Chengdu, China, 2006

[3] Toor Y, Muhlethaler P, Laouiti A, et al. Vehicle Ad Hoc Networks: Applications and Related Technical Issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(3): 74-88

[4] 熊炜,李清泉. 高速公路场景中车用自组织网络的节点度[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1-6

[5] 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[OL]. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3681.htm>, 2009

[6] 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[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1 998-2 007

[7] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002

[8] Torrent-Moreno M, Schmidt-Eisenlohr F, Füßler H, et al. Effects of a Realistic Channel Model on Packet Forwarding in Vehicular Ad Hoc Networks[J]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC-2006), Las Vegas, NV, USA, 2006

[9] Gallagher B, Akatsuka H, Suzuki H. Wireless Communications for Vehicle Safety: Radio Link Performance and Wireless Connectivity Methods [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(4): 4-24

[10] Yin J, Elbatt T, Yeung G, et al. Performance Evaluation of Safety Applications over DSRC Vehicular Ad Hoc Networks[J]. The 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Philadelphia, PA, USA, 2004

[11] Hekmat R, Miegheem P V. Degree Distribution and Hopcount in Wireless Ad-Hoc Networks[J]. The 11th IEEE International Conference on Networks (ICON-2003), Sydney, Australia, 2003

第一作者简介:李清泉,教授,博士,博士生导师,主要研究领域为 GIS-T、车载导航与智能交通、移动 GIS 与空间信息服务。
E-mail:qqli@whu.edu.cn

A Fast Estimation for the Average Node Degree of Vehicular Ad Hoc Networks in Highway Scenarios

LI Qingquan^{1,2} XIONG Wei^{2,3}

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Transportation Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 School of Electronic Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper derives a rapid algorithm that enables the determination of the average node degrees of a vehicular ad hoc network (VANET) in highway scenarios. Extensive experiments were undertaken to verify the derived analytic expression via realistic mobility traces. Results demonstrate that the mean degree increases linearly with respect to traffic density and radio transmission range.

Key words: vehicular ad hoc networks; geometric random graph; average node degree

About the first author: LI Qingquan, professor, Ph.D., Ph.D supervisor, majors in GIS-T, vehicle navigation and intelligent transportation, mobile GIS technology and spatial information services.

E-mail: qqli@whu.edu.cn