

高速公路场景中车用自组织网络 1-连通的必要条件*

熊 炜^{1,2}, 李清泉^{2,3+}

¹(武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430079)

²(武汉大学 交通研究中心,湖北 武汉 430079)

³(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079)

Prerequisite to 1-Connected Vehicular Ad Hoc Networks in Highway Scenarios

XIONG Wei^{1,2}, LI Qing-Quan^{2,3+}

¹(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

²(Transportation Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

³(National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

+ Corresponding author: E-mail: qqli@whu.edu.cn, http://www.trc.whu.edu.cn

Xiong W, Li QQ. Prerequisite to 1-connected vehicular ad hoc networks in highway scenarios. Journal of Software, 2010,21(11):2906–2919. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3681.htm>

Abstract: Recent advances in micro-electromechanical systems (MEMS) technology, mobile computing, and wireless communications have enabled rapid deployment of a self-organizing, infrastructure-less, multi-hop, and distributed inter-vehicle communication (IVC) network based on pre-existing road layouts. Vehicular traffic scenarios pose great challenges to physical topology connectivity, which is a prerequisite to providing reliable applications to the users of a vehicular ad hoc network (VANET). This paper provides a probability analysis algorithm to calculate the necessary condition of 1-connected VANETs in highway scenarios. Extensive experiments were undertaken to verify the derived analytic expression via realistic mobility traces. Results demonstrate that the radio communication range of each node must be subject to $\Theta(|\log(1-p^{1/n})|/n)$ in order to ensure that there is no isolated nodes within the entire network.

Key words: vehicular ad hoc network; vehicular mobility model; network topology model; physical connectivity; probability analysis; necessary condition

摘 要: 微机电技术、移动计算技术和无线通信技术的飞速发展,促使在现有道路网上快速构建一个自组织、分布式控制的车辆间多跳通信网络成为现实,随之引起了一系列问题亟待解决,例如高速运动车辆间的物理拓扑连通性,它是车用自组织网络(vehicular ad hoc network,简称 VANET)对用户提供服务的首要条件.针对上述问题,推

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB705500 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Program for Cheung Kong Scholars and Innovative Research Team in University of China under Grant No.40721001-2 (长江学者和创新团队发展计划); the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20070486001 (国家教育部博士点基金)

Received 2008-08-08; Accepted 2009-07-06; Published online 2009-12-31

导得出了一种用于高速公路场景中车用自组织网络 1-连通必要条件的概率计算方法,并借助真实的车辆运动轨迹数据做了大量模拟实验.实验结果表明,为了确保网络中不存在孤立节点,每个节点的通信距离应满足 $\Theta(\log(1-p^{1/n})/n)$.

关键词: 车用自组织网络;车辆运动模型;网络拓扑模型;物理连通性;概率分析;必要条件

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

车用自组织网络(vehicular ad hoc network,简称 VANET)^[1]是一种特殊的自组网形式.作为移动自组织网络(mobile ad hoc network,简称 MANET)^[2]与无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)^[3]在智能交通领域中的具体应用,它允许车辆在高速行驶过程中,能够与其他临近车辆(vehicle-to-vehicle,简称 V2V)以及路旁基础设施(vehicle-to-infrastructure,简称 V2I)之间直接通信,从而在现有道路上动态、快速地构建一个自组织、分布式控制的车辆间多跳通信网络,具有广阔的应用前景.通过运用新兴的车车/车路通信技术,可以实现车辆协同安全驾驶^[4,5]、交叉路口决策支持^[6]、区域交通智能调度^[7]、实时交通信息发布^[8]、无限增值信息服务(例如天气预报、加油站或停车场位置服务^[9,10]),以及诸如 P2P 文件共享^[11,12]、视频传输^[13]、在线游戏^[14]等交互式流媒体通信方面的应用.

VANET 具有无线自组网的一般特征^[15],但同时也存在很大的差异^[16-18]:① 车辆节点数目巨大、分布区域广泛(例如城市中心或高速公路上),具有丰富的外部辅助信息(例如车载定位/导航、激光雷达、视觉传感装置等);② 车辆只能沿着道路作高速、受限、约束运动;③ 节点间的网络拓扑变化频繁,并且频繁的拓扑变化又将导致频繁的网络分裂;④ 网络极易受驾驶员行为(例如变更车道或行驶方向)以及周围环境(例如,无线信道传播特征、信源/信宿之间是否存在障碍物)等因素的影响;⑤ 节点没有明显的电源约束.鉴于此,针对 MANET/WSN 所得出的研究成果并不能直接应用于新兴的 VANET 系统.

车辆间通信(inter-vehicle communication,简称 IVC)网络的拓扑结构有赖于节点的时空分布、车辆的运动特征以及无线信号的空间传播等.拓扑结构对网络性能的影响也很大.良好的拓扑机制不仅能够提高路由算法以及媒体接入控制(media access control,简称 MAC)协议的效率,还能够为数据融合、时间同步和目标定位等应用提供支撑,而且也有利于延长网络的生命周期.因此,网络连通性研究是 VANET 的一个基本问题.

按照网络分层的思想,连通性研究可以分为两个层次:物理连通性和逻辑连通性.物理连通性是指节点之间在物理层面上的连通,实际应用中可由接收电平加以指示,它是 VANET 对网络用户提供可靠服务的先决条件,也是逻辑连通性的基础.逻辑连通性则是指在满足网络物理连通的前提下,网络中运行的 MAC 协议、路由协议以及拓扑控制机制等能否保证所有网络节点之间的信息可达性.

本文在已有研究的基础之上,着重研究高速公路场景中车辆节点的时空分布及其对车用自组织网络物理拓扑连通性的影响,推导得出了一种用于高速公路场景中车用自组织网络 1-连通性必要条件的概率分析算法,并借助经过验证的车辆运动轨迹数据做了大量模拟实验.该研究结果在以下几个方面取得了较好的研究进展:

- 高速公路场景中 VANET 车辆运动模型;
- 高速公路场景中 VANET 网络拓扑模型;
- 高速公路场景中 VANET 无孤立节点的概率计算.

1 国内外研究现状

近 20 年来,国内外对自组织网络连通性的研究主要集中在一维或二维 MANET 连通性建模与分析等方面,相关研究工作的主要目标就是建立一种以网络连通概率来度量系统服务等级(grade of service,简称 GoS)的计算方法.文献[19]首先研究了自组网中的临界连通性现象,并基于泛洪广播机制讨论了节点成泊松分布的无限区域内,节点通信距离 r 、节点分布密度 ρ 与网络连通性之间的关系.文献[20]通过研究节点服从泊松分布的无限区域内网络的非连通性问题,从而得出网络连通所需的临界邻居数不应为常数 6,并给出了其上、下边界值 $2.195 < k < 10.526$.另一篇早期文献[21]则对文献[20]中的部分结论提出了异议,通过研究一维泊松分布的网络连

通性以及网络覆盖度问题,得出两者的临界范围不相同,并由此猜想二维问题中两者的临界范围也不相同的结论.文献[22]从临界发射功率角度出发,首先研究了均匀分布于单位圆平面内的所有节点间路径渐近连通性问题,即当 $n \rightarrow \infty$ 时,如果 $r(n) = \sqrt{(\log(n) + c(n))/n\pi}$,那么当且仅当 $c(n) \rightarrow +\infty$ 时,网络渐近连通,即 $\text{Pr}_{\text{conn}}(n, r(n)) \rightarrow 1$.文献[23]提出了一种计算临界通信距离(critical transmission range,简称 CTR)以保证网络连通的模拟算法,其实验结果表明,CTR 服从 $\sqrt{\log(n)/n}$ 的规律递减,并且得出与节点运动模型无关的结论.文献[24]基于概率统计模型研究了 d -维($1 \leq d \leq 3$)独立、均匀分布的节点临界通信距离问题,计算了一维场景中网络强连通时的上、下边界值 $\Theta(r^d n) \sim l - \Theta(rn)$,并模拟仿真了高维场景中网络连通的上、下边界.文献[25]借助模拟仿真实验讨论了无线自组网中存在的阈值效应,即当节点通信距离 r 超过某一临界值时,全网连通性将随着 r 的增加而产生 0-1 突变,这非常类似于电路中的相位跃变现象.文献[26]着重研究了自组网中两方面的基本属性(即最小节点度及 k -连通性问题),并推导出随机均匀分布网络中无孤立节点与全连通概率之间的关系.在考查节点的运动性对二维均匀分布网络的 k -连通性影响时,文献[26,27]没有考虑边界效应,文献[28,29]则考虑了边界效应.文献[30]指出,为了保证网络的连通性,随机分布的每个节点至少需要与 $\Theta(\log(n))$ 个最近邻节点相连,并讨论了当节点的单跳邻居数 $k < 0.074 \log(n)$ 时,网络将随着节点数 n 的递增呈渐近非连通;当每个节点的单跳邻居数 $k > 5.1774 \log(n)$ 时,网络则随着节点数 n 的递增呈渐近连通.

在此之前,移动自组织网络连通性研究主要集中在渐近连通性分析之上,文献[31]首先对有限自组网连通性进行了研究,并推导出在有限范围内节点均匀分布的一维 MANET 连通概率公式,国内在此方面的研究还包括文献[32]等.文献[33]则针对大规模稀疏网络分别在有基础设施(即混合架构)和无基础设施(即完全自组网)两种情况下的连通性进行了深入研究,发现在有基础设施(如基站)时,对一维分布以及有限宽度带状区域内的网络连通性具有显著改善作用,然而对二维分布的网络连通性的改善作用却并不明显.文献[34]主要研究了一维均匀分布的网络连通时节点通信距离 r 、节点数 n 以及一维场景尺度 l 之间的关系,即当且仅当 $rn \sim \Theta(l \cdot \log(l))$ 时网络完全连通,这也是对文献[24]中所做结论的一个重要补充.此外,该文还研究了两种不同的节点运动模式分别对网络连通性的影响.对于其中在自组织网络模拟仿真实验中使用最为频繁的随机路点(random way-point,简称 RWP)运动模型,文献[35]进行了详尽的理论分析与研究,得出了 RWP 节点空间分布由 3 个独立分量的加权和组成,即静止分量、暂停分量以及运动分量,并由此推导出二维渐近稳态分布方程.文献[36,37]从不同方面分析了为保证 MANET 连通所需的临界传输距离.文献[38,39]则重点研究了一维 MANET 网络连通的闭合表达式,并给出了在确知节点数 n 及其分布(独立、均匀)条件下的网络连通概率 $\text{Pr}_n(d) = \{(0, n < d-1 @ (1-(1-1/d)^n)^{n+1}, n \geq d-1)$.

纵观国内外的研究现状,研究的重点主要集中在节点均匀分布或泊松分布的一维或二维 MANET 连通性方面.对于节点的运动性也主要是采用 RWP 运动模型,这显然不能很好地反映车辆的实际运动特征.目前,还很少有文献专门研究 VANET 连通性问题.文献[40]首先验证了存储转发机制有助于信息在高速运动的车辆之间实现可靠的分发,并借助广泛应用于美国和其他欧洲国家的道路网仿真模型 CORSIM 生成车辆运动轨迹,通过研究消息的平均时延,从而得出存储转发适合于在(双向多车道)运动场景稀疏网络内的分发.文献[41]研究了自组网路由算法可以实现车辆间的数据交互,并借助 FARSIM(daimlerchrysler)驾驶员行为模型(driver behavior model,简称 DBM)微观仿真器生成车辆的运动场景.实验结果表明,即使在车辆密度较高时,也会频繁出现网络分裂现象,通过增加节点通信距离以及借助反向运动车辆实现信息转发可以有效减低网络分裂现象.文献[42]则分析了不同高速公路场景中车辆节点间通信链路持续时间的概率分布.文献[43]研究了影响车辆间通信网络连通性的诸多关键因素,例如车流密度、相对速度、车道数等.然而,通信节点间距对 IVC 网络连通性的影响则有赖于节点的通信距离,同时给出了类似于幂函数规律变化的链路生命周期概率分布.文献[44]通过模拟实验研究了不同环形道路场景中,为保证 VANET 连通所需的最小通信距离(minimum transmission range,简称 MTR).实验结果表明,当车辆密度增至某一临界值时,MTR 将递减并保持某一定值;当发生交通拥塞时,MTR 并不受车辆密度变化的影响.该文最后建议节点通信距离为 $r \geq 0.12l$ (即 450m),此时,网络分裂数在所有被研究场景中都小于 5.文献[45]讨论了车辆节点的非均匀分布(如交通拥塞)对 VANET 连通性的影响,分析推导得出了 MTR 的

下边界值,并通过模拟实验给出了 MTR 上边界的经验估计.文献[46,47]研究了单向有限长度高速公路场景中的 VANET 连通性问题,分析结果表明,随着单跳邻居节点数的增加,全网的连通性将得以提升;同时,边界效应将得以减弱;并证明,当 $k \sim \Theta(\log(n^\xi))$, $\xi > 2$ 时,网络渐近连通.

2 VANET 系统建模

2.1 车辆运动模型

根据对研究对象描述程度的不同,车辆运动模型可分为微观运动模型和宏观运动模型.其中,微观运动模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度较高,它对交通流的描述是以单个车辆为基本单元的.车辆在道路上的跟车、超车以及车道变换等微观行为都能得到真实的反映,其特征参数主要包括车头时距和车头间距.宏观运动模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度较低,例如,交通流可以通过流(量)、密(度)、速(度)关系等一些集聚性的宏观参数来加以描述,对于车辆的车道变换等细节行为则不予考虑.

根据对研究对象生成方法的不同,车辆运动模型又可分为^[48]基于数学的综合模型、基于交通仿真的模型、基于调研的统计模型、基于运动轨迹的模型.其中,基于数学的综合模型是交通系统仿真中最重要的一类模型,它通过建立一系列数学表达式,以期反映真实的物理作用.文献[49]将此类模型进一步细分为随机模型、交通流模型、车辆跟驶模型、排队模型、行为模型.为了验证数学模型的准确性,需要与真实的车辆运动做比对;另外,数学模型的表达式通常比较复杂,也不具有通用性,并且缺乏对驾驶员行为的真实性描述.然而,基于调研的统计模型通过大规模问卷调查可以获取人的行为及其特征,但由于工作量巨大,可操作性差.基于运动轨迹的模型虽然不具有外推性(例如,针对公交系统的运动轨迹模型就不适用于私家车的运动模拟),但它可以随时重现真实的车辆运动行为,这一点在 VANET 模拟中显得尤为重要.基于交通仿真的模型则主要是借助商业化的交通仿真软件,运用系统仿真技术来研究宏观/微观交通行为.遗憾的是,这些交通仿真软件都不能直接进行网络通信模拟,而且数据格式也彼此不兼容,配置参数比较复杂.

本文采用基于交通仿真的微观模型,它对交通流的描述是以单个车辆为基本单元,车辆在道路上的跟车、超车以及车道交换等微观行为都能得到真实的反映.原始的车辆运动轨迹数据由 DaimlerChrysler 内部的驾驶员行为模拟器产生^[50],其数据格式为每个车辆节点(id)在采样时刻(ts)具有的瞬时位置(x)、速度(v)、加速度(a)及车道($lane$)等信息,并转换成 NS-2 兼容的 tcl 运动格式,相当于车辆在如图 1 所示的双向四车道模型中连续运动.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(如图中箭头所示)高速运动,每个方向再具体划分为行车道(行进方向右手侧)和超车道(行进方向左手侧).为了便于叙述,本文将以上、下来区分图中车辆向左、向右行驶的两个方向,并规定行车道、超车道宽度 $LaneWidth=3.75m$,中央分隔带宽度 $MedianWidth=2.00m$.

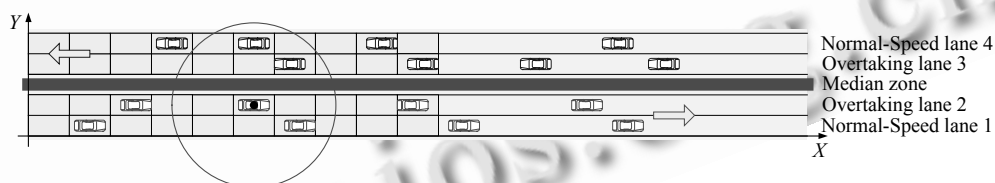


Fig.1 Highway scenario model

图 1 高速公路场景模型

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(0.5s)内完成.为了简化实验数据处理,我们将车辆所在的车道信息映射为该车道中线的位置信息(y),若采用如图 1 所示的坐标系统,则映射关系式为

$$Y = \begin{cases} 0.5 \times LaneWidth, & Lane = 1 \\ 1.5 \times LaneWidth, & Lane = 2 \\ 2.5 \times LaneWidth + MedianWidth, & Lane = 3 \\ 3.5 \times LaneWidth + MedianWidth, & Lane = 4 \end{cases}$$

2.2 网络拓扑模型

目前,研究人员从不同的角度出发提出了各种各样的网络拓扑模型,主要包括^[51,52]规则网络、随机网络、小世界网络以及无标度网络模型.规则网络是平移对称性晶格,其任意格点的近邻数都相同,如全局耦合网络(完全图)、最近邻耦合网络(点阵图)、星形耦合网络等.然而,现实中的车辆网络很少具有严格的规则拓扑结构,将其作为 VANET 网络模型具有明显的局限性.与完全规则网络相反的是完全随机网络,其中一个典型的模型是 Erdős-Rényi 随机图模型.根据随机图理论,假设网络中有 n 个节点,任意节点对之间的邻接概率均为 p ,这样就会得到一个具有 n 个节点、 $n(n-1)p/2$ 条边的 ER 随机图实例.事实上,随机图中任意两个节点之间边的存在与否以及彼此相互独立的假设并不符合 VANET 中节点通信距离有限的特点.于是,对 ER 随机图的一个自然的推广就是具有局部链路相关性的几何随机图(geometric random graph,简称 GRG)模型^[53].它假设节点服从某种概率密度散布于被研究区域内,节点之间的连通概率取决于它们之间的欧氏空间距离.当且仅当两节点之间的空间距离小于给定的节点通信距离时,两节点之间存在一条通信链路,这种扩展更接近真实的网络.小世界网络^[54]是一类既有较短的平均路径长度又有较高的聚类系数的网络,而无标度网络^[55]则是节点度分布具有幂律形式的网络,它们也都不适合作为 VANET 的模型,原因就在于高速公路场景中的车辆网络通常都是稀疏网络,其车辆节点的度分布也明显不具有马太效应.

本文将 VANET 建模为路径损耗几何随机图.我们采用一个简单无向图 $G_{p(r)}(V,t)$ 为高速公路场景中每个采样时刻 t 所对应的车辆网络建立模型,其中, V 表示场景中的所有车辆节点,网络规模为 $n=|V|$; $p(r)$ 则表示节点通信距离为 r 时,场景中任意两个节点之间边(即通信链路)的存在概率.如果记符号 $\|\cdot\|$ 为 d -维向量空间 \mathbb{R}^d 上某向量的范数,则对于给定分布的有限点集 $V \subset \mathbb{R}^d$,当且仅当 $\|v_j - v_i\| \leq r$ 时,节点对 $\{v_i, v_j\}$ 之间存在通信链路.显然,几何随机图模型的可信度直接依赖于对节点通信概率的精确描述.换言之,理论分析若要与实际结果相符合,我们就必须精确描述场景中节点的时空分布,并以此为基础讨论节点间的通信概率.为了突出对高速公路场景中车辆网络连通性的研究,我们提出以下假设,以便简化理论分析:

- 场景中所有车辆节点都相同.例如,考虑每个车辆节点都具有相同的射频功率及接收灵敏度(即通信距离相等),并采用全方向天线.
- 链路和路径对称,其主要表现为带宽与通信距离的对称.如果节点 v_i 可以与节点 v_j 通信,那么我们认为节点 v_j 也一定可以与节点 v_i 通信.
- 不考虑多径效应(它是由多条路径传播引起的干涉时延效应).如果场景中任意两个节点彼此处于对方的通信范围之内,那么我们认为它们之间只存在唯一的一条无线通信链路(无重边).当然,我们也假定场景内的任何节点都不能够与自己发生通信(无自环).
- 不考虑多普勒效应(它是当信源和信宿之间存在相对运动时,信宿接收到的无线电波频率与信源发射的频率并不相同的现象).在专用短距离通信(dedicated short-range communications,简称 DSRC)5.8GHz 频段,其最大多普勒频偏 $\Delta f \approx 19.35 \Delta v$,其中, Δv 为相对运动速度(单位:m/s).但在实际应用中,可采用锁环技术来稳定收、发频率.
- 考虑场景边界效应.如果某节点在某时刻不处于有效的观测场景内,则设置其为无效节点,因此不能参与组网,也不能参与信息转发等活动;只有位于有效观测场景内的节点才能参与组网,并参与信息的转发.

3 车辆网络 1-连通的必要条件

按照图论的观点,如果对网络中的任意节点 $v_i, v_j \in V$ 都存在一条 (v_i, v_j) 路径,则称图 G 是连通的;否则,称图 G 是非连通的.因此,网络中不存在孤立节点即是网络连通的必要条件.对于简单无向图 $G_{p(r)}(V, E)$,节点 $v \in V$ 的顶点度被定义为图 G 中与 v 关联边的数目,记为 $d_G(v)$.顶点度为 k 的节点称为 k 度点,零度点称为孤立点.用 $\Delta(G)$ 和 $\delta(G)$ 分别表示图 G 的最大和最小顶点度,即 $\Delta(G) = \max\{d_G(v): v \in V\}$, $\delta(G) = \min\{d_G(v): v \in V\}$.

在交通流理论中,车头间距(h_s)和车头时距(h_t)是表征同一概念的两种不同量度单位,它们分别描述在同向行驶的车流中,前、后相邻两车之间的空间距离及驶过道路某一断面的时间间隔,其取值与驾驶员的行为特征、车辆性能、道路具体情况密切相关,同时也受交通量、交通控制方式、交叉口几何特征等因素的影响.在实际工程应用中,由于对车头间距的实时测量是非常困难的,因此一般仅使用车头时距这个指标.在自由流(如高速公路上的交通流)条件下,车头时距服从指数分布^[47,56,57],可以证明,车辆的到达数在任意计时周期内一定是泊松分布,反之亦然.如果车流速度 v_s 同时满足均匀分布,车头间距与车头时距就具有完全相同的指数分布形式($h_s = v_s \cdot h_t$)^[47,56].由于交通密度被定义为 $\kappa = n/(m \cdot L)$,其中, n 为车辆数目, m 为车道数, L 为观测路段的长度,则 $\kappa m = n/L = 1/h_s = 1/(v_s \cdot h_t)$.于是,在任意车辆节点通信范围 A 内至少存在 1 个邻居车辆的概率为

$$\Pr\{k > 0\} = 1 - \Pr\{k = 0\} = 1 - e^{-\lambda A},$$

其中, $\lambda = 1/(v_s \cdot h_t \cdot m \cdot \text{LaneWidth})$ 是一个与高速公路模型、车头时距、车辆运动速度有关的物理量.

由于车辆节点只可能分布于道路网内部,当节点通信距离 r 足够大(例如 $r=250\text{m}$)以至于能够覆盖整个道路宽度时,对组网真正产生贡献的有效作用面积即为道路边界与无线覆盖区域的交集(如图 1 所示).为此,我们分阶段讨论不同节点通信距离 r 及其与道路边界相交的情况.

3.1 第1阶段($0 < r_1 \leq 0.5 \times \text{LaneWidth}$)

不妨记 A_{i1} 和 A_{i2} 分别为第 i 阶段时道路路面与位于行车道、超车道上车辆节点的通信覆盖范围所形成的共同区域的面积,于是 $A_{i1} = A_{i2} = \pi r_i^2$.另记 c_{i1} 和 c_{i2} 分别为第 i 阶段的行车道与超车道系数(有关车道系数的说明,请读者参见附录部分),则 $c_{i1} = c_{i2} = \pi$.

3.2 第2阶段($0.5 \times \text{LaneWidth} < r_2 \leq 0.5 \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth}$)

$$A_{21} = \int_0^{y_1+r_2} \int_{x_1-\sqrt{r_2^2-(y-y_1)^2}}^{x_1+\sqrt{r_2^2-(y-y_1)^2}} dx dy = c_{21} r_2^2,$$

其中, $c_{21} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_1}{r_2} + \frac{y_1}{r_2} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_2}\right)^2}$, $y_1 = 0.5 \times \text{LaneWidth}$ (下同);

$$A_{22} = \pi r_2^2 - \int_{2LW}^{y_2+r_2} \int_{x_2-\sqrt{r_2^2-(y-y_2)^2}}^{x_2+\sqrt{r_2^2-(y-y_2)^2}} dx dy = c_{22} r_2^2,$$

其中, $c_{22} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_2} + \frac{2LW - y_2}{r_2} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_2}\right)^2}$, $y_2 = 1.5 \times \text{LaneWidth}$ (下同).

3.3 第3阶段($0.5 \times \text{LaneWidth} + \text{MedianWidth} < r_3 \leq 1.5 \times \text{LaneWidth}$)

$$A_{31} = \int_0^{y_1+r_3} \int_{x_1-\sqrt{r_3^2-(y-y_1)^2}}^{x_1+\sqrt{r_3^2-(y-y_1)^2}} dx dy = c_{31} r_3^2,$$

其中, $c_{31} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_1}{r_3} + \frac{y_1}{r_3} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_3}\right)^2}$;

$$A_{32} = \pi r_3^2 - \int_{2LW}^{y_2+r_3} \int_{x_2-\sqrt{r_3^2-(y-y_2)^2}}^{x_2+\sqrt{r_3^2-(y-y_2)^2}} dx dy = c_{32} r_3^2,$$

其中,
$$c_{32} = \pi - \left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_2}{r_3} - \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_3} + \frac{2LW + MW - y_2}{r_3} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_2}{r_3} \right)^2} - \frac{2LW - y_2}{r_3} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_3} \right)^2} \right].$$

3.4 第4阶段 ($1.5 \times \text{Lane Width} < r_4 \leq 1.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width}$)

$$A_{41} = \int_0^{2LW} \int_{x_1 - \sqrt{r_4^2 - (y-y_1)^2}}^{x_1 + \sqrt{r_4^2 - (y-y_1)^2}} dx dy = c_{41} r_4^2,$$

其中,
$$c_{41} = \arcsin \frac{2LW - y_1}{r_4} + \arcsin \frac{y_1}{r_4} + \frac{2LW - y_1}{r_4} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_1}{r_4} \right)^2} + \frac{y_1}{r_4} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_4} \right)^2};$$

$$A_{42} = \int_0^{y_2 + r_4} \int_{x_2 - \sqrt{r_4^2 - (y-y_2)^2}}^{x_2 + \sqrt{r_4^2 - (y-y_2)^2}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW + MW} \int_{x_2 - \sqrt{r_4^2 - (y-y_2)^2}}^{x_2 + \sqrt{r_4^2 - (y-y_2)^2}} dx dy = c_{42} r_4^2,$$

其中,
$$c_{42} = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_2}{r_4} + \frac{y_2}{r_4} \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{r_4} \right)^2} \right] - \left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_2}{r_4} - \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_4} + \frac{2LW + MW - y_2}{r_4} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_2}{r_4} \right)^2} - \frac{2LW - y_2}{r_4} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_4} \right)^2} \right].$$

3.5 第5阶段 ($1.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width} < r_5 \leq 2.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width}$)

$$A_{51} = \int_0^{y_1 + r_5} \int_{x_1 - \sqrt{r_5^2 - (y-y_1)^2}}^{x_1 + \sqrt{r_5^2 - (y-y_1)^2}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW + MW} \int_{x_1 - \sqrt{r_5^2 - (y-y_1)^2}}^{x_1 + \sqrt{r_5^2 - (y-y_1)^2}} dx dy = c_{51} r_5^2,$$

其中,
$$c_{51} = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_1}{r_5} + \frac{y_1}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_5} \right)^2} \right] - \left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_1}{r_5} - \arcsin \frac{2LW - y_1}{r_5} + \frac{2LW + MW - y_1}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_1}{r_5} \right)^2} - \frac{2LW - y_1}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_1}{r_5} \right)^2} \right];$$

$$A_{52} = \int_0^{y_2 + r_5} \int_{x_2 - \sqrt{r_5^2 - (y-y_2)^2}}^{x_2 + \sqrt{r_5^2 - (y-y_2)^2}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW + MW} \int_{x_2 - \sqrt{r_5^2 - (y-y_2)^2}}^{x_2 + \sqrt{r_5^2 - (y-y_2)^2}} dx dy = c_{52} r_5^2,$$

其中,
$$c_{52} = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_2}{r_5} + \frac{y_2}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{r_5} \right)^2} \right] - \left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_2}{r_5} - \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_5} + \frac{2LW + MW - y_2}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_2}{r_5} \right)^2} - \frac{2LW - y_2}{r_5} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_5} \right)^2} \right].$$

3.6 第6阶段 ($2.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width} < r_6 \leq 3.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width}$)

$$A_{61} = \int_0^{y_1 + r_6} \int_{x_1 - \sqrt{r_6^2 - (y-y_1)^2}}^{x_1 + \sqrt{r_6^2 - (y-y_1)^2}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW + MW} \int_{x_1 - \sqrt{r_6^2 - (y-y_1)^2}}^{x_1 + \sqrt{r_6^2 - (y-y_1)^2}} dx dy = c_{61} r_6^2,$$

其中,
$$c_{61} = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{y_1}{r_6} + \frac{y_1}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_6} \right)^2} \right] - \left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_1}{r_6} - \arcsin \frac{2LW - y_1}{r_6} + \frac{2LW + MW - y_1}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_1}{r_6} \right)^2} - \frac{2LW - y_1}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_1}{r_6} \right)^2} \right].$$

$$\frac{2LW + MW - y_1}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_1}{r_6}\right)^2} - \frac{2LW - y_1}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_1}{r_6}\right)^2} \Bigg];$$

$$A_{62} = \int_0^{4LW+MW} \int_{x_2 - \sqrt{\frac{r_6^2 - (y-y_2)^2}{2}}}^{x_2 + \sqrt{\frac{r_6^2 - (y-y_2)^2}{2}}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW+MW} \int_{x_2 - \sqrt{\frac{r_6^2 - (y-y_2)^2}{2}}}^{x_2 + \sqrt{\frac{r_6^2 - (y-y_2)^2}{2}}} dx dy = c_{62} r_6^2,$$

其中, $c_{62} = \left[\arcsin \frac{4LW + MW - y_2}{r_6} + \arcsin \frac{y_2}{r_6} + \frac{4LW + MW - y_2}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{4LW + MW - y_2}{r_6}\right)^2} + \frac{y_2}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{r_6}\right)^2} \right] -$

$$\left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_2}{r_6} - \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_6} + \frac{2LW + MW - y_2}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_2}{r_6}\right)^2} - \right.$$

$$\left. \frac{2LW - y_2}{r_6} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_6}\right)^2} \right].$$

3.7 第7阶段($r_7 > 3.5 \times \text{Lane Width} + \text{Median Width}$)

$$A_{71} = \int_0^{4LW+MW} \int_{x_1 - \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_1)^2}{2}}}^{x_1 + \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_1)^2}{2}}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW+MW} \int_{x_1 - \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_1)^2}{2}}}^{x_1 + \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_1)^2}{2}}} dx dy = c_{71} r_7^2,$$

其中, $c_{71} = \left[\arcsin \frac{4LW + MW - y_1}{r_7} + \arcsin \frac{y_1}{r_7} + \frac{4LW + MW - y_1}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{4LW + MW - y_1}{r_7}\right)^2} + \frac{y_1}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{r_7}\right)^2} \right] -$

$$\left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_1}{r_7} - \arcsin \frac{2LW - y_1}{r_7} + \frac{2LW + MW - y_1}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_1}{r_7}\right)^2} - \right.$$

$$\left. \frac{2LW - y_1}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_1}{r_7}\right)^2} \right];$$

$$A_{72} = \int_0^{4LW+MW} \int_{x_2 - \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_2)^2}{2}}}^{x_2 + \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_2)^2}{2}}} dx dy - \int_{2LW}^{2LW+MW} \int_{x_2 - \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_2)^2}{2}}}^{x_2 + \sqrt{\frac{r_7^2 - (y-y_2)^2}{2}}} dx dy = c_{72} r_7^2,$$

其中, $c_{72} = \left[\arcsin \frac{4LW + MW - y_2}{r_7} + \arcsin \frac{y_2}{r_7} + \frac{4LW + MW - y_2}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{4LW + MW - y_2}{r_7}\right)^2} + \frac{y_2}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{r_7}\right)^2} \right] -$

$$\left[\arcsin \frac{2LW + MW - y_2}{r_7} - \arcsin \frac{2LW - y_2}{r_7} + \frac{2LW + MW - y_2}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW + MW - y_2}{r_7}\right)^2} - \right.$$

$$\left. \frac{2LW - y_2}{r_7} \sqrt{1 - \left(\frac{2LW - y_2}{r_7}\right)^2} \right].$$

从图 2 可以清楚地看出,随着节点通信距离 r 的增加,行车道系数 c_1 与超车道系数 c_2 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 $c = (c_1 + c_2)/2$.考虑到在高速公路场景中,车辆节点的无线通信距离较小时并无太大的实际应用价值,例如当 $r < 13\text{m}$ 时,上、下两个行车道之间不能直接通信,因此,我们仅对第 7 阶段的车道平均系数作最小二乘拟合,借以直观地反映车道平均系数 c 随节点通信距离 r 的变化关系(从图 2 的双对数坐标系中可以看出,它们之间存在幂律关系).假定其函数关系式为 $c = a/r$,表 1 列出了不同节点通信距离下得到的最优拟合系数以及相应的残差平方和.不妨取 $a = 28.6$,则 $A = cr^2 = 28.6r$.于是,我们可以得出 VANET 节点通信范围 A 内至少存在 1 个邻居车辆的概率为

$$\Pr\{k > 0\} = 1 - e^{-\lambda A} = 1 - e^{-2cr^2};$$

相应地,VANET 节点通信范围 A 内不存在任何邻居(即为孤立节点)的概率为

$$\Pr\{k = 0\} = 1 - \Pr\{k > 0\} = e^{-\lambda cr^2}.$$

考虑到高速公路场景中的交通流一般都属于自由流,如果平均车头间距大于车辆之间所需的最小安全距离,则可以认为 VANET 车辆的分布是相互独立的^[58].于是,在全网范围内不存在孤立节点(即网络的最小节点度大于 0)的概率为

$$\Pr\{\delta(G) > 0\} = C_n^n [\Pr(k > 0)]^n [\Pr(k = 0)]^0 = (1 - e^{-\lambda cr^2})^n.$$

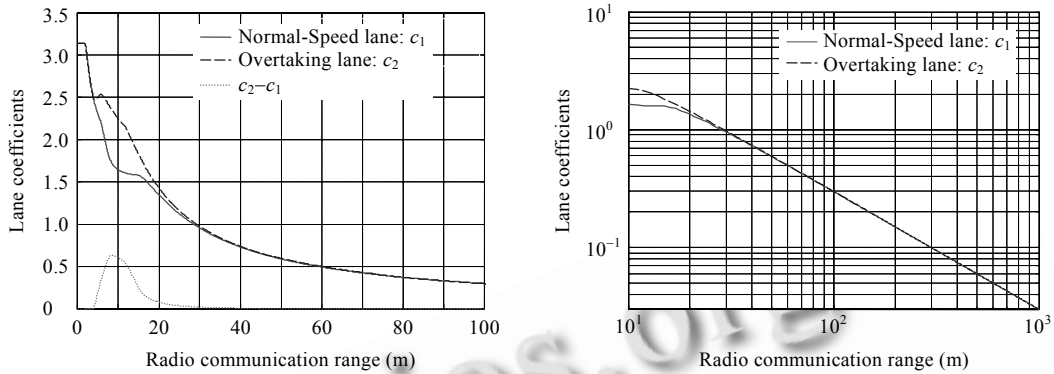


Fig.2 Coefficients of normal-speed and overtaking lanes

图 2 行车道与超车道系数

Table 1 Nonlinear least-squares data fitting results

表 1 非线性最小二乘数据拟合结果

Maximum communication range (m)	Best fit coefficient	Residual sum of squares
50	28.282 602 44	0.048 857 522
100	28.559 380 88	0.067 860 639
250	28.697 182 81	0.078 380 327
500	28.738 513 38	0.081 619 523
1 000	28.758 322 02	0.083 178 882
10 000	28.775 662 66	0.084 545 683
100 000	28.777 371 41	0.084 680 397
1 000 000	28.777 541 99	0.084 693 849

4 实验与分析

为了检验本文推导得出的理论分析结果与实际车辆网络模型之间的匹配效果,我们选取了 5 组不同车流密度下的高速公路场景数据进行实验,场景中车辆节点的部分运动数字特征见表 2.其中,交通密度参数中的两个数字分别表示被中间带分隔的上、下两个方向的车流密度,实验场景中的活动节点数、车辆运动速度以及实验场景长度中的 3 个数字分别表示对应参数的最小值、平均值和最大值.

Table 2 Numerical characteristics of experimental scenes

表 2 实验场景的运动数字特征

Scenario	Traffic density (veh./km.lane)	Duration (s)	Number of active nodes	Speed (km/h)	Scenario length (m)
Scene 1	2-2	300	82/92/102	75/140/243	11 146/11 599/12 288
Scene 2	2-6	300	189/203/212	66/131/240	11 741/11 881/12 022
Scene 3	6-6	300	276/305/326	66/128/223	11 688/12 112/12 484
Scene 4	6-11	300	379/420/441	49/123/223	12 080/12 336/12 515
Scene 5	15-15	300	725/749/787	46/111/207	12 410/12 561/12 656

图 3 所示为在给定场景中($L=12000m$)不存在孤立节点的理论概率分布曲线,图中任意两条曲线的交点即为给定(n,r)场景内无孤立节点的概率.例如,当场景中节点数为 300、通信距离为 150m 时,场景中无孤立节点的

概率为 84.58%;而当场景中节点的通信距离为 500m 时,只需 100 个节点,其无孤立节点的概率就高达 97.62%.

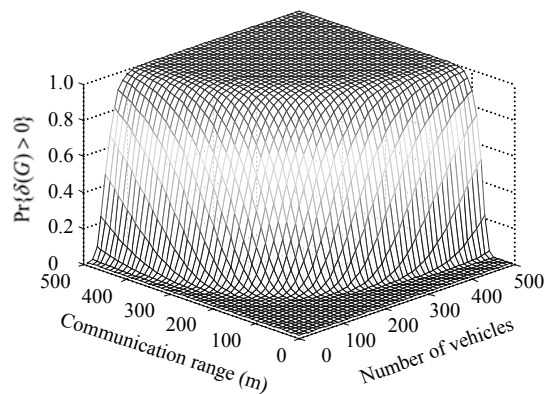


Fig.3 Theoretical probability of non-isolated nodes within VANETs

图 3 车辆网络中无孤立节点的理论概率

图 4 所示为这 5 组高速公路场景中车辆网络无孤立节点的实验概率分别与相同参数条件下的理论概率之间的比较.我们可以看出,除了实验场景 2 中理论计算的概率要比实际测量的概率在趋近于 1 处稍高之外,其他场景内的理论曲线与实验曲线都吻合得较好;并且随着网络规模的增大,网络中不存在孤立节点的概率跃迁宽度明显变窄,例如,在实验场景 5 中,这种现象近似于阶跃变化.

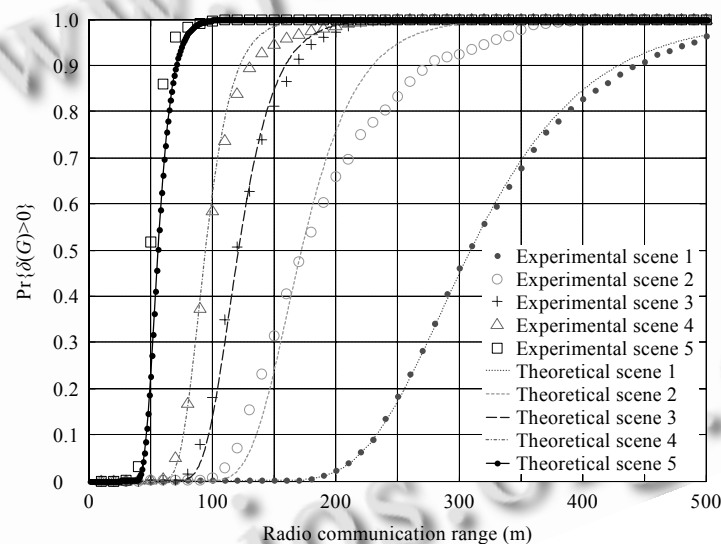


Fig.4 Experimental probability vs. theoretical probability

图 4 实验概率与理论概率

5 结论与建议

网络的物理拓扑连通已经成为高速公路场景下构建车用自组织网络的一大挑战.孤立节点的存在限制了信息在车辆网络中的正常传播,也加剧了信息在网络中传播的时延.此外,网络中所有节点的最小度值也是反映全网连通性的一个重要指标^[26].本文在已有研究的基础上推导得出了一种用于高速公路场景中车用自组织网络不存在孤立节点的概率分析算法,并借助真实的车辆运动数据做了大量比对实验.该分析结果在以下几个方

面取得了较好的研究进展:

- 采用经过验证的高速公路场景数据模拟车辆节点的运动,并将车辆网络建模为路径损耗几何随机图,考虑场景的边界效应,使得实验结果更符合真实环境.
- 提出了弧边矩形有效组网面积的概念,即高速公路带状行车区域与节点通信覆盖范围的交集,并将其由二维场景中的 πr^2 紧缩为 cr^2 ,其中,

$$c = \arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r} - \arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r} + \frac{y_{ub} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{ub} - y_0}{r}\right)^2} - \frac{y_{lb} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{lb} - y_0}{r}\right)^2} < \pi.$$

- 推导得出了高速公路场景中无孤立节点的概率计算表达式.根据此式,我们可以计算出场景中所需的节点总数 n 、节点通信距离 r 以及无孤立节点的概率 p 之间的数学关系,并得出 $r \sim \Theta((\log(1-p^{1/n}))/n)$.

本文是我们在车用自组织网络领域内的初步研究成果.文中运用交通工程等学科理论,并基于车头时距在自由交通流条件下服从指数分布的特点.然而,真实车辆的时空分布及其运动绝不可能是完全随机的,对于高速公路场景中车用自组织网络连通性方面还存在一些问题需要做进一步的分析与研究,例如 VANET 在实际时空分布下的连通概率函数以及网络的 k -连通性问题等.另外,高层应用中数据分发算法也依赖于网络的连通特性.因此,今后的工作可结合本文的实验结果,研究孤立节点对全网范围内数据传播的影响程度以及信息分发算法的设计中如何更好地避免孤立节点的影响等.

References:

- [1] Hartenstein H, Laberteaux KP. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2008,46(6): 164–171.
- [2] Chlamtac I, Conti M, Liu JIN. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(1):13–64.
- [3] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422.
- [4] ElBatt T, Goel SK, Holland G, Krishnan H, Parikh J. Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Los Angeles: ACM, 2006. 1–9.
- [5] Biswas S, Tatchikou R, Dion F. Vehicle-to-Vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Communications Magazine*, 2006,44(1):74–82.
- [6] Hartong M, Goel R, Farkas C, Wijesekera D. PTC-VANET interactions to prevent highway rail intersection crossing accidents. In: *Proc. of the 65th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC-2007-Spring)*. Dublin: IEEE, 2007. 2550–2554.
- [7] Gradinescu V, Gorgorin C, Diaconescu R, Cristea V, Iftode L. Adaptive traffic lights using car-to-car communication. In: *Proc. of the 65th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC-2007-Spring)*. Dublin: IEEE, 2007. 21–25.
- [8] Nadeem T, Dashtinezhad S, Liao C, Iftode L. TrafficView: Traffic data dissemination using car-to-car communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2004,8(3):6–19.
- [9] Caliskan M, Graupner D, Mauve M. Decentralized discovery of free parking places. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Los Angeles: ACM, 2006. 30–39.
- [10] Panayappan R, Trivedi JM, Studer A, Perrig A. VANET-Based approach for parking space availability. In: *Proc. of the 4th ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Montreal: ACM, 2007. 75–76.
- [11] Nandan A, Das S, Pau G, Gerla M, Sanadidi MY. Co-Operative downloading in vehicular ad-hoc wireless networks. In: *Proc. of the 2nd Annual Conf. on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2005)*. 2005. 32–41.
- [12] Lee KC, Lee SH, Cheung R, Lee U, Gerla M. First experience with CarTorrent in a real vehicular ad hoc network testbed. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE 2007)*. Anchorage: IEEE, 2007. 109–114.
- [13] Bonuccelli MA, Giunta G, Lonetti F, Martelli F. Real-Time video transmission in vehicular networks. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE)*. 2007. 115–120.
- [14] Palazzi CE, Rocchetti M, Ferretti S, Pau G, Gerla M. Online games on wheels: Fast game event delivery in vehicular ad-hoc networks. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM 2007)*. Istanbul: IEEE, 2007.

- [15] Luo J, Hubaux JP. A survey of research in inter-vehicle communications. In: Lemke K, Paar C, Wolf M, eds. Proc. of the Embedded Security in Cars: Securing Current and Future Automotive IT Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 111–122.
- [16] Blum JJ, Eskandarian A, Hoffman LJ. Challenges of intervehicle ad hoc networks. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2004,5(4):347–351.
- [17] Torrent-Moreno M, Killat M, Hartenstein H. The challenges of robust inter-vehicle communications. In: Proc. of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC). Dallas, 2005. 319–323.
- [18] Yousefi S, Mousavi MS, Fathy M. Vehicular ad hoc networks (VANETs): Challenges and perspectives. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on ITS Telecommunications. 2006. 761–766.
- [19] Cheng YC, Robertazzi TG. Critical connectivity phenomena in multihop radio models. IEEE Trans. on Communications, 1989, 37(7):770–777.
- [20] Philips TK, Panwar SS, Tantawi AN. Connectivity properties of a packet radio network model. IEEE Trans. on Information Theory, 1989,35(5):1044–1047.
- [21] Piret P. On the connectivity of radio networks. IEEE Trans. on Information Theory, 1991,37(5):1490–1492.
- [22] Gupta P, Kumar PR. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. In: McEneaney WM, Yin G, Zhang Q, eds. Proc. of the Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications: A Volume in Honor of WH Fleming. Birkhauser, 1998. 547–566.
- [23] Sánchez M, Manzoni P, Haas ZJ. Determination of critical transmission range in ad-hoc networks. In: Proc. of Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications (MMT'99). 1999. 293–304.
- [24] Santi P, Blough DM, Vainstein F. A probabilistic analysis for the range assignment problem in ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Long Beach: ACM, 2001. 212–220.
- [25] Krishnamachari B, Wicker SB, Bejar R. Phase transition phenomena in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf., Vol.5. San Antonio, 2001. 2921–2925.
- [26] Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network. In: Proc. of the 3rd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Lausanne: ACM, 2002. 80–91.
- [27] Bettstetter C. On the connectivity of wireless multihop networks with homogeneous and inhomogeneous range assignment. In: Proc. of the 56th IEEE Vehicular Technology Conf. Vancouver, 2002. 1706–1710.
- [28] Bettstetter C, Zangl J. How to achieve a connected ad hoc network with homogeneous range assignment: An analytical study with consideration of border effects. In: Proc. of the 4th Int'l Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. Stockholm, 2002. 125–129.
- [29] Bettstetter C. Topology properties of Ad hoc networks with random waypoint mobility. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003,7(3):50–52.
- [30] Xue F, Kumar PR. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. Wireless Networks, 2004,10(2): 169–181.
- [31] Desai M, Manjunath D. On the connectivity in finite ad hoc networks. IEEE Communications Letters, 2002,6(10):437–439.
- [32] Wang HX, Lu GL, Jia WJ, Zhao W. Connectivity in finite ad-hoc networks. Science in China—Series F: Information Sciences, 2008,51(4):417–424.
- [33] Dousse O, Thiran P, Hasler M. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks. In: Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. 2002. 1079–1088.
- [34] Santi P, Blough DM. An evaluation of connectivity in mobile wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 2002 Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks. IEEE Computer Society, 2002. 89–102.
- [35] Bettstetter C, Resta G, Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003,2(3):257–269.
- [36] Santi P, Blough DM. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003,2(1):25–39.

- [37] Santi P. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005,4(3): 310–317.
- [38] Foh CH, Lee BS. A closed form network connectivity formula one-dimensional MANETs. In: *Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2004. 3739–3742.
- [39] Foh CH, Liu G, Lee BS, Seet BC, Wong KJ, Fu CP. Network connectivity of one-dimensional MANETs with random waypoint movement. *IEEE Communications Letters*, 2005,9(1):31–33.
- [40] Chen ZD, Kung HT, Vlah D. Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways. In: *Proc. of the 2nd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. Long Beach: ACM, 2001. 247–250.
- [41] Fübler H, Mauve M, Hartenstein H, Käsemann M, Vollmer D. A comparison of routing strategies for vehicular ad hoc networks. Technical Report, TR-02-003, Department of Computer Science, University of Mannheim, 2002.
- [42] Rudack M, Meincke M, Jobmann K, Lott M. On traffic dynamical aspects of inter vehicle communications (IVC). In: *Proc. of the 58th IEEE Vehicular Technology Conf.* 2003. 3368–3372.
- [43] Artimy MM, Robertson W, Phillips WJ. Connectivity in inter-vehicle ad hoc networks. In: *Proc. of Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*. 2004. 293–298.
- [44] Artimy MM, Phillips WJ, Robertson W. Connectivity with static transmission range in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conf.* IEEE Computer Society, 2005. 237–242.
- [45] Artimy MM, Robertson W, Phillips WJ. Minimum transmission range in vehicular ad hoc networks over uninterrupted highways. In: *Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conf.* Toronto, 2006. 1400–1405.
- [46] Du L, Ukkusuri S, Kalyanaraman S. Geometric connectivity of vehicular ad hoc networks: Analytical characterization. In: *Proc. of the 4th ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Montreal: ACM, 2007. 79–80.
- [47] Ukkusuri S, Du L. Geometric connectivity of vehicular ad hoc networks: Analytical characterization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008,16(5):615–634.
- [48] Haerri J, Filali F, Bonnet C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: A survey and taxonomy. Technical Report, RR-06-168, Sophia-Antipolis: Institut Eurecom, Department of Mobile Communications, 2006.
- [49] Fiore M. Mobility models in inter-vehicle communications literature. Technical Report, Department of Electronics, Polytechnic Institute of Torino, 2006.
- [50] Fübler H, Torrent-Moreno M, Transier M, Krüger R, Hartenstein H, Effelsberg W. Studying vehicle movements on highways and their impact on ad-hoc connectivity. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2006,10(4):26–27.
- [51] Albert R, Barabási AL. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002,74(1):47–97.
- [52] Newman MEJ. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 2003,45(2):167–256.
- [53] Penrose MD. *Random Geometric Graphs*. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [54] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998,393(6684):440–442.
- [55] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999,286(5439):509–512.
- [56] Tsugawa S, Kato S. Evaluation of incident information transmission on highways over inter-vehicle communications. In: *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV 2003)*. Columbus: IEEE, 2003. 12–16.
- [57] Schönhof M, Kesting A, Treiber M, Helbing D. Coupled vehicle and information flows: Message transport on a dynamic vehicle network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006,363(1):73–81.
- [58] Thiemann C, Treiber M, Kesting A. Longitudinal hopping in intervehicle communication: Theory and simulations on modeled and empirical trajectory data. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 2008,78(3):036102.1–036102.9.

附录

在计算车辆节点的有效组网面积时我们注意到,所有二重积分的形式非常相似,差异仅在于积分变量 y 的上、下限不同.

为此,只需要计算以下二重积分:

$$S = \int_{y_{lb}}^{y_{ub}} \int_{x_0 - \sqrt{r^2 - (y - y_0)^2}}^{x_0 + \sqrt{r^2 - (y - y_0)^2}} dx dy = 2 \int_{y_{lb}}^{y_{ub}} \sqrt{r^2 - (y - y_0)^2} dy.$$

不妨令 $y - y_0 = r \sin(t)$, 则有 $t = \arcsin \frac{y - y_0}{r}$, $\sqrt{r^2 - (y - y_0)^2} = r \cos(t)$, $dy = r \cos(t) dt$,

于是得到:

$$\begin{aligned} S &= 2r^2 \int_{\arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r}}^{\arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r}} \cos^2(t) dt = 2r^2 \left[\frac{t}{2} + \frac{1}{4} \sin(2t) \right]_{\arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r}}^{\arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r}} = r^2 [t + \sin(t) \cos(t)]_{\arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r}}^{\arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r}} \\ &= r^2 \left[\arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r} - \arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r} + \frac{y_{ub} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{ub} - y_0}{r} \right)^2} - \frac{y_{lb} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{lb} - y_0}{r} \right)^2} \right], \end{aligned}$$

并记 $c = \arcsin \frac{y_{ub} - y_0}{r} - \arcsin \frac{y_{lb} - y_0}{r} + \frac{y_{ub} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{ub} - y_0}{r} \right)^2} - \frac{y_{lb} - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{lb} - y_0}{r} \right)^2}$, 则有 $S = cr^2$.

若 $y_0 = y_1 = 0.5 \times \text{LaneWidth}$, 则称对应的 c 为行车道系数; 若 $y_0 = y_2 = 1.5 \times \text{LaneWidth}$, 则称对应的 c 为超车道系数.



熊炜(1976—),男,湖北宜昌人,博士生,主要研究领域为多传感器集成与智能传感器网络技术,车路协同与车车通信技术.



李清泉(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 GIS-T,车载导航与智能交通技术,移动 GIS 与空间信息服务技术.