

车辆自组织网仿真研究^{*}

和另一篇文章《车载自组网的仿真研究综述》差不多

霍梅梅¹, 郑增威¹, 周晓伟^{1,2}

(1. 浙江大学 城市学院 计算机系统工程研究所, 杭州 310015; 2. 浙江大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要: 由于车辆自组织网络(vehicular Ad hoc networks, VANETs)的网络节点移动速度快、网络拓扑变化频繁、节点移动要遵循道路规则等特性,现阶段对 VENET 的研究主要基于模拟仿真。VANET 仿真研究包括车辆移动模型的构建和无线网络的仿真,其中车辆移动模型的真实性是评价 VANET 网络仿真结果是否可靠的关键因素。概述了车辆移动模型的分类,提出了车辆移动模型构建的基本框架,介绍了文献中比较流行的车辆移动模型和网络仿真器,详细讨论了现有的 VANET 综合仿真软件以及 VANET 应用仿真研究,最后对 VANET 仿真的未来发展提出展望。

关键词: 车辆自组织网; 仿真; 移动模型; 路由协议

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1614-07

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.004

Research overview of simulation of vehicular Ad hoc networks

HUO Mei-mei¹, ZHENG Zeng-wei¹, ZHOU Xiao-wei^{1,2}

(1. Institute of Computer System & Engineering, City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. School of Computer Science & Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Simulation is an indispensable tool for the research of VANET(vehicular Ad hoc networks) due to its nodes moving quickly, topology changing quickly, nodes moving according to road rules, and so on. Mobility model and network simulation are two aspects of the simulation of VANET. The reality of mobility model is key to evaluate the reliability of VANET simulation. This paper first introduced a classification of mobility model, and then presented a framework of realistic mobility model. Thirdly, provided an overview and comparison of several mobility models and network simulation software, described existing integrated VANET simulation software and VANET application simulation. Finally, presented the proposal for the future of VANET simulation.

Key words: vehicular Ad hoc networks; simulation; mobility model; routing protocol

0 引言

车辆自组织网络(VANET)是一种特殊的移动自组织网络(mobile Ad hoc networks, MANET)。随着研究的不断深入,其应用领域越来越明确,范围也越来越广,目前主要包括道路交通安全类应用,如帮助驾驶员避免碰撞^[1],在交叉路口、高速公路入口等关键地点进行引导和协调^[2];交通状况查询与管理,主要查询的信息包括车辆速度、密度、堵车情况、道路情况等;信息服务类应用,如高速公路缴费、移动办公等;环境监测和保护类应用,如合理的红绿灯设计,有效地减少车辆发动机的空转,进而减少燃料消耗和尾气排放。由于应用前景广阔, VANET 已经引起世界各国研究机构和科研人员的密切关注^[1-3]。

VANET 在道路上构建一个自组织的、部署方便、费用低廉、结构开放的车辆间通信网络。VANET 本质上是一种特殊的移动 Ad hoc 网,它与一般移动 Ad hoc 网的相似之处在于其

快速运动的节点和不断变化的网络拓扑结构^[4]。不同之处体现在以下几个方面:车辆节点的分布受道路局限,呈现管状形态,网络容量有限;车辆节点的移动受到驾驶者行为、道路交通状况、交通控制机制的影响;具有比较丰富的外部辅助信息支持,如使用 GPS 可以获取节点的位置信息;车辆作为移动节点不受能量条件的限制,在建立路由时无须考虑节能因素等。

VANET 的两个关键特征就是节点的高移动性和移动模式自由度受限。这种特征使得标准网络协议以及应用于普通 MANET 的协议在 VANET 中应用不充分或者不能使用。Blum 等人^[5]的研究显示典型的基于拓扑结构的路由协议在 VANET 中表现很差;Yao 等人^[6]对现有的八个流行的可以用于 VANET 的路由协议进行了对比研究,每个协议都有自己的优势和缺陷,面向不同的应用情况,没有适用于任何场合的全能路由协议,所以路由协议的设计需要根据需求定制,对路由协议的研究是没有止境的。

收稿日期: 2009-11-13; **修回日期:** 2009-12-23 **基金项目:** 浙江省自然科学基金委员会资助项目(Y106809);杭州市科技创新资助项目(20070231H05)

作者简介: 霍梅梅(1977-),女,讲师,硕士,主要研究方向为嵌入式系统、无线传感器网络研究应用(huomm@zucc.edu.cn);郑增威(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为传感器网络、普适计算、高性能嵌入式计算、操作系统设计开发等;周晓伟(1984-),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

研究 VANET 的协议和应用最直接的方法就是做室外实验。但是室外实验存在很多限制条件:需要配备大量车辆和真实场景,需要消耗大量的人力、物力、财力,并且难以组织实施;VANET 内部复杂的网络关系在实验阶段分析起来很困难,并且同样的真实场景难以准确地反复重复。所以 VANET 协议和应用研究的第一步是采用仿真工具进行仿真而不是室外实验。

VANET 是 MANET 领域急速出现的一个新分支。ACM 在 2004 年开办第一次针对 VANET 的专题讨论,以后每年都有一次专题讨论。本文对近十年来出现在 ACM VANET 专题讨论文献中的 VANET 仿真研究以及其他相关会议和期刊文献进行了梳理,对 VANET 仿真研究进行了详细的描述。

1 VANET 仿真系统建立

构建 VANET 仿真系统需要两个部分,即网络仿真模块和车辆移动模型模块。许多学者和研究团体在这两个领域进行了大量的研究,得到了许多模型和仿真软件,但是这两者之间多数情况下是分离的,相互之间缺乏交流。想象一下 VANET 的实际应用情况应该是这样的:网络信息的传递(如前面有交通阻塞)能够改变车辆的移动性(遇到阻塞,降低车速或者更改路线),而车辆移动性的改变(如更改路线)能够修改无线网络的拓扑结构,进而影响网络的诸多性能。所以如何把网络仿真模块和车辆移动模型完美地融合在一起成为近几年来 VANET 仿真研究的热点。

2 车辆移动模型

仿真 VANET 的一个关键因素就是采用真实的车辆移动模型,移动模型指的是任意时刻移动节点的运动模式及其在拓扑地图中的位置。早期从事 VANET 的研究人员通常沿用 MANET 研究中简单的随机模型、图形限制的移动模型等,这些模型不能够以真实的方式描述车辆移动性,它们忽略了车辆交通中的特殊方面,如在附近有车情况下的车辆加速和减速行为、道路交叉口的排队、红绿灯导致的交通拥挤、交通阻塞等。所有这些实际情况大大影响 VANET 的网络性能。Choffnes 等人^[7]证明真实的移动模型对正确仿真 VANET 是非常重要的。以下对文献中出现的移动模型进行总结分析并提出真实车辆移动模型的概念框架。

2.1 车辆移动模型分类分析

对车辆移动模型的分类,传统的分类方法是根据模型表达的细节程度分为宏观模型、细观模型、微观模型和亚微观模型。宏观模型的参数如车流量、车辆密度和车辆平均速度,通常借助于流体动力学理论来计算;细观模型运用气体动力学和排队理论或者宏观范围的矩阵,如速度/密度关系来研究车辆的运动;微观模型仿真街道上每个单车辆的运动,主要假设车辆的行为依赖两种因素,即车辆的移动物理能力和驾驶员的控制行为。将每个车辆当成微观的,但是把它们更进一步划分成更小的结构,如可以描述发动机转速和车辆速度之间的关系。如图 1 所示^[8],长方形内的图从左向右依次是宏观模型、微观模型、亚微观模型,圆形内的图表示的细观模型。

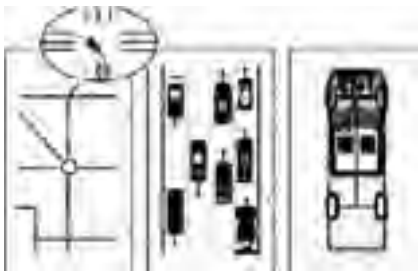


图 1 宏观、细观、微观和亚微观分类

Harri 等人^[8]根据车辆模型产生的来源不同,把车辆移动模型分为四类,即综合模型(synthetic models)、基于交通仿真器的模型(traffic simulators-based models)、基于调查的模型(survey-based models)和基于轨迹的模型(trace-based models),如图 2 所示。

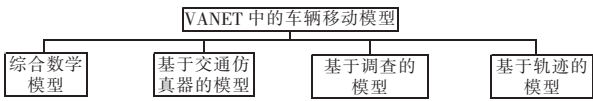


图 2 根据车辆模型产生方法分类

1) 基于交通仿真器的模型 交通仿真器的历史比较久,一些公司或者研究团队开发了很多软件,著名的如 PARAMICS、CORSIM、VISSIM、TRANSIMS,能够模拟城市微观交通、能量消耗,甚至污染或者噪声水平监测。这些商业模型参数复杂,并且许多细节也许并不是 VANET 网络仿真所需要的。

2) 基于调查的模型 基于对真实社会行为的调查所得到的模型。主要的大范围可获得的调查来源于美国劳动部,他们进行了调查并收集了美国劳动者行为的大量统计数据,如上下班时间、午餐时间、旅行距离等,该类模型的典型代表是 UDel 模型和 agenda-based 模型。这类模型的优点是能够真实地再现城市交通生活中的非随机行为,缺点是统计数据不易获取。

3) 基于轨迹的模型 该类模型中轨迹的来源有两种可能:从各种测量活动收集;用仿真器仿真真实轨迹。测量方法需要消耗较多的人力物力而且不能免费获取轨迹,仿真方法需要的计算量巨大。

4) 综合模型 实际上就是综合所有情况的数学模型。为了设计出能够反映真实物理效果的数学模型,许多学者一直在进行研究。Fiore^[9]撰写了一篇该范畴的详细综述。根据 Fiore 的分类,综合模型分成四类:随机模型(stochastic models),包含所有纯随机运动的模型;车流模型(traffic stream models),把车辆移动性看成流体动力学现象;跟车模型(car following models),每个驾驶员的行为根据他前面的车辆来建模;车流互相影响模型(flows-interaction models)。图 3 显示了 Fiore 的分类方法。

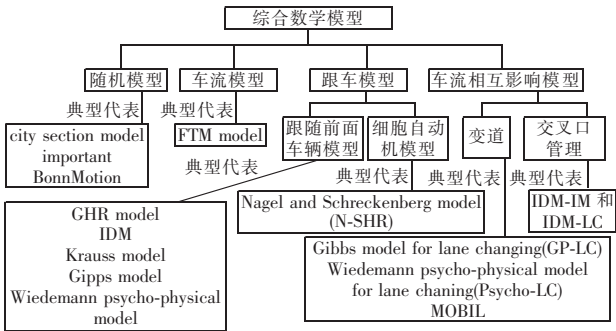


图 3 数学综合模型分类

从车辆模型的不同分类来看,构建车辆移动模型的过程是非常复杂的。区分主要不同分类的参数,如拓扑地图、汽车产生方法、驾驶者行为方法等不能随机的选择,必须反映真实配置。那么模型怎样配置才能够反映真实 VANET 网络中的车辆交通呢?下一节是笔者总结文献中提出的车辆移动模型的一些关键参数构建的真实车辆移动模型所建立的概念框架。

2.2 真实车辆移动模型框架

如 2.1 节分析,车辆移动模型通常被分为微观的或者宏观的。从宏观角度看,要考虑运动约束条件,如公路、街道、交叉路口和交通灯等;同时,车流密度、车流量、初始车辆分布等需要定义,这些因素会产生车辆交通的宏观效果。从微观角度看,重点考虑每一个单个个体车辆的运动和考虑驾驶员行为以及道路交通状况时车辆的行为。

从真实生活交通的角度看,车辆移动模型的构建需要地图、车辆和驾驶者三个基本部分。地图对车辆的运动产生约束,车辆和驾驶者共同决定车辆交通产生。如图 4 所示,该框架描述的真实车辆移动模型应该包括以下关键因素:

- a) 准确和真实的拓扑地图。这样的地图能够管理道路的不同密度和不同分类、多车道、道路限速、交叉路口管理、交通标志和交通灯、树木和建筑物等障碍物、桥梁、转弯等诸多因素。
- b) 车辆。真实的车辆应该具有车速、加速和减速、车辆数目、车辆类型、车—车安全距离等行为特征。
- c) 驾驶者。自由行使、靠近、跟车、刹车、变道、超车、变更路线等行为特征。
- d) 目的地(有些文献把目的地称为吸引点(attraction point))。任何驾驶员都知道,出发点和目的地绝不是随机的,而且大多数时候,驾驶员都驶向相似的最后目的地,这就导致了交通瓶颈。所以宏观地讲,驾驶者按照他偏爱的路线从出发点(有文献称其为排斥点(repulsion point))驶向目的地。
- e) 仿真时间。车辆密度在全天并不是均匀分布的。在一些特殊的时刻,如上下班交通高峰时间,总会出现异常的车流密度。
- f) 车辆非随机的分布。真实生活中可以观察到车辆的初始位置并不能在仿真区域均匀随即地分布。根据生活规律,车辆密度更集中在特别兴趣中心,如家、办公室、大型购物中心等。
- g) 智能驾驶模式。驾驶者与周围环境的交互,不仅限于静态障碍物,更有动态障碍物,如邻近车辆和行人。因此,移动模型应该能控制车辆与周围环境的交互影响,如超车、交通阻塞、优选道路、遇到行人时的预防行为等。

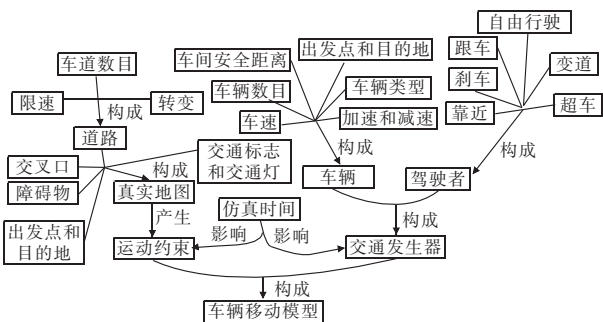


图 4 产生真实车辆移动模型的概念框架

在讨论应用于 VANET 仿真时的车辆移动模型时,一个基本问题就是车辆移动模型的真实性和真实性。理论上,车辆移动模型越详细就越能再现实生活中的交通现象,那么如何证实车辆移动模型是可靠的呢? Fiore^[9]对该问题进行了详细的仿真实验分析,得出如下结论:跟车模型能够如实地再现实世界车辆动力学,而随机模型在所有的实验中都失败了。基于交通流的模型可以获得部分成功,因为它们能够再现大范围的交通现象,不能充分考虑车辆之间的相互影响。基于跟车模型的交叉路口管理在有道路连接点时是必须有的,尤其在城市环境下特别重要。

2.3 综合车辆移动模型开源软件

构建真实的车辆移动模型的过程是非常复杂的,而从事 VANET 研究的团体和个人多数情况下是为了研究 VANET 的协议和应用。所以采用现有的免费可得到的车辆移动模型成为单纯从事协议和应用研究的快捷方法。下面简单介绍文献中出现频率最高的两个免费开源综合车辆移动模型软件 VanetMobiSim^[10]和 SUMO^[11]。本文第 4 章介绍的 VANET 综合仿真系统很多是基于这两个开源软件的。

1) VanetMobiSim VanetMobiSim^[10]是在 CanuMobiSim 基础上采用 Java 语言开发的,是目前最真实和包含综合配置的车辆移动模型,它能够产生城市区域和高速场景的真实车辆移动轨迹。其宏观特征包括多样的道路拓扑结构(用户自定义、GDF 地图、Tiger 地图、Voronoi 图);道路拓扑特征(单向或者双向、单车道或者多车道道路特征、分段限速、车辆类型限制、交叉路口交通标志、交通灯);车辆运动模式选择(行程产生、路线计算)。其微观特征包括速度模型、加速度模型、IDM-IM 模型、IDM-LC 模型。

实际上,笔者比较了 VanetMobiSim 和 CORSIM^[12]在相似城市配置下的轨迹文件。结果显示,两个模型产生的空间分布、速度分布和交通冲击波是相似的。VanetMobiSim 和 CORSIM 都是正式经过真实城市轨迹验证的。

VanetMobiSim 还有一个优点就是它可以产生各种流行的网络仿真器可以用的轨迹文件,方便地与网络仿真软件结合。

2) SUMO SUMO^[11]是一个微观的、空间上连续、时间上离散的交通仿真,采用 C++ 语言开发。其宏观特征包括带变道的多车道道路、基于道路交叉口的靠右侧行驶规则,支持动态路由,可以管理超过 10 000 条街道的网络。其微观特征包括允许碰撞自由的车辆移动模式,支持单车路由。

该软件特点是具有快速的 OpenGL 图形用户界面,执行速度快,支持多种网络格式的输入(OpenStreetMap, Visum, Vis-sim, ArcView, XML-Descriptions)。缺点是 SUMO 本身不能提供网络仿真器所需要的轨迹文件。其他研究团体采用 SUMO 开发了可以方便快速产生车辆移动模型的软件如 MOVE^[13]和 TraNSLite^[14]。

3 网络仿真

网络仿真的功能是控制 VANET 中移动车辆节点之间的通信。调查显示,绝大多数的 VANET 仿真研究采用了成熟的

网络仿真器,著名的如 NS2^[15]、GloMoSim^[16]和 QualNet^[17]、JiST/SWANS^[18]、OMNeT++^[19]、J-Sim^[20]、OPNET^[21]。其中 VANET 仿真应用最多的就是 NS2,其次是 JiST/SWANS,也有一些研究团体采用 GloMoSim、J-Sim、OMNeT++、这些软件都是开源的,可以很容易地免费得到,而 QualNet 和 OPNET 是商业软件,由于费用和版权的问题,VANET 研究者更倾向于采用免费开源的工具进行研究。所有这些网络仿真器都支持无线通信,至少都包含一个简单的节点移动模型。

1) NS2 NS2^[15]是一个开源的离散事件网络仿真器,支持有线网络和无线网络,包括许多 MANET 路由协议,也包括 802.11 MAC 的实现。NS2 有好几个移动模型,如 random trip mobility 和 semi-markov smooth mobility,NS2 可以模拟无线物理层,重要的参数(如信道衰落)影响它的行为。NS2 是学术领域研究无线网络应用最广泛的仿真器。NS2 核心代码用 C++ 语言,用户与 NS2 的交流采用 TCL 或者 Otcl 脚本文件;当仿真完成以后,NS 将会产生一个或多个基于文本的跟踪文件。只要在 Tcl 脚本中加入一些简单的语句,这些文件中就会包含详细的跟踪信息。这些数据可以用于下一步的分析处理,也可以使用 NAM 将整个仿真过程展示出来。

2) GloMoSim/QualNet GloMoSim^[16]是采用 Parsec、一种高度优化的类 C 语言开发的无线网络仿真器,它包含大量无线和 MANET 路由协议,同时也有物理层的实现。GloMoSim 也支持 Random WayPoint、Random Drunken 和基于轨迹的移动模型。GloMosim 的协议代码,一般来说只有头文件(.h 文件)和对应的实现文件(.cpp 文件),是通用结构,而且查看其代码干净利落。GloMosim 基于已经验证过的 Parsec 并行仿真内核,每个节点都独立进行运算,从仿真速度上得到很大的提升。QualNet 是 GloMoSim 的商业版本。

3) Jist/SWANS SWANS (scalable wireless Ad hoc network simulator)^[18]是建立在 JiST 平台上的可扩展无线网络仿真软件。据文献[22~24]对 SWANS、GloMoSim 和 NS2 的比较分析,SWANS 被认为是最易扩展、内存效率最高和运行时间最快的仿真系统。除了这些优点以外,SWANS 至少在网络模块部分得到与 NS2 相似的仿真结果。

SWANS 的输入是 Java 文件,这个 Java 文件用来创建节点和指定这些节点如何运动(节点运动场景)以及节点之间的通信(通信场景)。用户可以选择 SWANS 中现成的应用,把这些应用与节点联系起来并在应用层执行;而且,SWANS 允许用户灵活地定制应用并在节点的应用层执行。

4) OMNeT++/INET Framework/OMNEST OMNeT++^[19]是一个为大型网络提供开源的、基于组件的、模块化的开放网络仿真平台。OMNeT++ 是离散事件仿真器,具备强大完善的图形界面接口和可嵌入式仿真内核,可运行于多个操作系统平台,简便定义网络拓扑结构,具备方便快捷的编程、调试和跟踪支持等功能。OMNeT++ 的场景采用 C++ 语言编写,模块之间的关系和它们之间的通信存储在网络描述(network description, NED)文件中。INET framework 是 OMNeT++ 的通信网络仿真包,包括数个网络协议包:UDP、TCP、SCTP、IP、IPv6、

Ethernet、PPP、IEEE 802.11、MPLS、OSPF 以及其他协议。OMNEST 是 OMNeT++ 的商业版。

5) J-Sim J-Sim^[20]是一个由 Java 开发的基于组件的复合网络仿真软件,使用 TCL 语言作为构建网络拓扑的脚本。J-Sim 采用实时进程驱动机制,同时兼容离散事件驱动机制。J-Sim 提供两种移动模型,即基于轨迹的和随机模型。J-Sim 采用分裂对象模型,其基本实体是组件。J-Sim 采用了较为宽松的组件组织体系结构,一个组件可以单独设计、执行、测试,各组件间相互独立,甚至在系统运行时还可以添加或删除组件。这种基于组件的开发模式增强了模块间的耦合性、可重构性和可扩展性。J-Sim 输出轨迹文件和动画文件,能够在 NAM 中使用。

4 车辆移动模型与无线网络仿真的耦合

通过第 2、3 章的描述可以看到,VANET 仿真不仅要研究车辆之间的无线通信,也要研究车辆的移动性。很多的研究团体在这两个领域做了大量的工作,得到了许多模型和仿真软件。现在的问题是,如何把网络仿真器和车辆移动模型仿真器融合在一起构成完整的 VANET 仿真系统?根据文献中出现的 VANET 仿真模式,本文把车辆移动模型与无线网络仿真模块的耦合关系分为松散开环、紧密开环、松散闭环和紧密闭环四种模式。

4.1 松散开环模式

松散开环模式指的是单独构建车辆移动模型,把输出作为现有的移动 Ad hoc 网络仿真系统的输入。例如 2.3 节描述的 VanetMobiSim 和 SUMO 车辆移动模型,把输出做成 NS2 或者 Qualnet 等网络仿真软件支持的格式,然后在 NS2 或者 Qualnet 中进行 VANET 网络特性的分析。这样做的缺陷是车辆移动模型一旦产生,在网络仿真中不能再修改,车辆移动节点和网络仿真本质是分离的,而实际情况是车辆移动模型会根据网络的变化而实时变化。这种方式可以称之为开环模式。本质上 VANET 的仿真是在两个空间上和时间上都分离的软件上进行的,结构如图 5 所示。

1) MOVE MOVE^[13]基于开放源码的微观交通仿真器 SUMO,允许用户快速产生一个用于 VANET 仿真的真实移动模型。通过采用真实世界的地图数据库如 Tiger 和 Google 地图,MOVE 允许用户方便地将真实道路地图融入到仿真中。MOVE 的输出是一个真实的移动模型,可以直接被流行的网络仿真器如 NS2 和 QualNet 使用。除此之外,采用图形用户界面,MOVE 允许用户快速地产生真实的仿真情景,而不需要撰写复杂的脚本或者学习仿真器的内在细节。MOVE 的结构如图 6 所示,其中圆角矩形内容是 MOVE 软件包含的内容。

2) TraNS Lite TraNS Lite^[14]也是基于 SUMO 的,它是后续要介绍的软件 TraNS 的一个功能部分,可以从 SUMO 快速地产用于 NS2 的真实移动轨迹文件。

4.2 紧密开环模式

紧密开环模式指的是车辆移动模型集成在网络仿真器软

件当中,但是网络仿真的结果不会对车辆的移动性产生反馈,结构如图 7 所示。

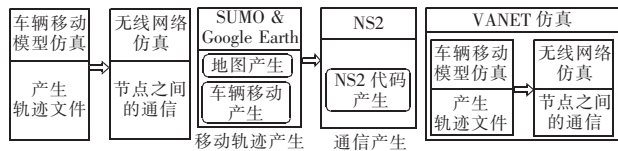


图 5 开环模式

图 6 MOVE 的结构示意图

图 7 紧密开环模式

1)SWANS ++ SWANS ++^[25] 在网络仿真器 SWANS 的基础上添加了 GUI,使场景和移动模型可以可视化。SWANS ++ 中的移动模型是 STRAW (street random waypoint)^[26]。STRAW 采用的是简单随机运动模型,但是车辆的运动限制在真实地图数据文件(Tiger)上。尽管 STRAW 支持多车道,但是却不允许变道,并且起始位置不能配置。SWANS ++ 是采用 Java 开发的,尽管它把网络仿真器 SWANS 和移动模型 STRAW 集成在一个软件中,但是却没有从网络模块向车辆移动模块的反馈,所以 SWANS ++ 属于紧密开环模式。

2)GrooveNet GrooveNet^[27] 是拓扑准确的街道地图车辆网络仿真器,可以提供几种不同的操作方式:驾驶模式、方式模式、回放模式、综合仿真模式、测试产生模式。GrooveNet 可以处理从 GPS 获得的数据,提供车辆当前位置的真实地图。它还可以用来作为街道上真实车辆和仿真环境中虚拟车辆的结合仿真,真实场景和虚拟场景可以相互影响。GrooveNet 也提供了分析仿真结果的工具。与 SWANS ++ 类似,GrooveNet 不提供从网络模块向车辆移动模块的反馈。

4.3 松散闭环模式

松散闭环模式指的是设计接口软件,把已有的车辆移动模型和网仿真系统连接在一起。把设计上分离并且互不相干的两个软件系统集成起来是非常困难的,并且用针对一般应用的移动 Ad hoc 网仿真系统难以仿真真实的交通情景,可能得到大量的冗余无用网络信息,干扰对 VANET 网络性能的正常分析。这种方式与后面讨论的独立开发方式都可以称为闭环模式。这种方式本质上仍然是在两个独立的软件上运行,但是这两个独立的通过接口的连接同时运行,两个模块之间的连接关系松散,可以称之为松散闭环方式,结构如图 8 所示。

1)TraNS TraNS^[28] 是通过接口 TraCI 连接交通仿真器 SUMO 和网络仿真器 NS2。从 SUMO 抽取轨迹文件转换到 NS2,反过来,NS2 的指令被发送到 SUMO 进行交通调节。TraNS 将来可能扩展到其他网络仿真器。TraNS 有两种工作模式,在以网络为中心的模式中,只需要将 SUMO 中获取的轨迹文件经过解析传递给 NS2 即可,不需要来自 NS2 的反馈信息,这就是上面描述的开环模式;在以应用为中心的模式中,SUMO 与 NS2 之间通过 TraCI 实时反馈,即松散闭环模式。

2)Veins 文献[29]提出集道路交通仿真和网络仿真的双向耦合模型 Veins(vehicules in network simulation)。Veins 中车辆移动模型采用 SUMO,网络仿真器采用 OMNeT ++,两者之间通过一个复杂的通信模块进行交互。当仿真器运行时,这些通信模块通过 TCP 连接交换命令和移动轨迹。

4.4 紧密切环模式

紧密切环模式指的是开发一个独立的 VANET 仿真软件,

把车辆移动模型和网络仿真器集成在一起。这样做的惟一问题就是任务艰巨、工作量大。这种方式本质上是一个包含车辆移动模型和网络仿真器的独立软件,可以称之为紧密切环方式,结构如图 9 所示。

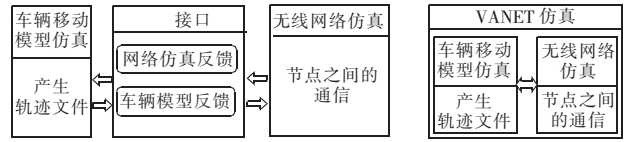


图 8 松散闭环模式

图 9 紧密切环模式

1)NCTUns NCTUns^[30] 是台湾交通大学研制的一种新的网络模拟仿真软件。NCTUns 开发了很多支持智能交通(ITS)仿真的工具,它把交通仿真和网络仿真紧密地耦合在一个模块中,提供单一的车辆网络环境。自 NCTUns 4.0 版本之后,添加了支持 ITS 仿真的以下模块:a)智能驾驶行为模型,包括交通灯、附近车辆、变道、转弯以及跟车模型;b)网络道路构建;c)路边单元仿真;d)车载设备;e) IEEE 802. 11 (b) Ad hoc 模式;f) IEEE 802. 11 (b) 基础设施模式;g) GPRS 射频;h) DVB RCTS 卫星射频。

网络仿真方面,NCTUns 5.0 支持 IEEE 802. 11a、IEEE 802. 11b、IEEE 802. 11g、IEEE 802. 11p。毫无疑问,NCTUns 5.0 是集成网络仿真和车辆交通仿真的闭环 VANET 仿真模式。NCTUns 5.0 也有缺陷,与其他允许多个版本 TCP/IP 协议的网络仿真器不同,NCTUns 5.0 只支持一个版本的 TCP/IP 协议栈,而且单次仿真节点最大规模数是 4 096 个。

2)Gorgorin 等人研发的传真器 Gorgorin 等人^[31] 提出了一个集成微观交通仿真和无线网络通信仿真的离散时间仿真器。采用 C ++ 语言开发,用 Java 的 OpenGL (JOGL) 来实现 GUI。该时间离散仿真器以固定时间分辨率运行,起点从当前运行代码开始;在仿真的任何时刻,所有现在的事件从一个事件队列中拉出来,以随机次序执行。事件队列处理三种类型事件:发送、接收或者 GPS。采用的车辆移动模型包括真实地图产生、驾驶员行为模式以及交通控制信号。驾驶员行为有四个模式,即自由驾驶、靠近、跟车和刹车,具有基本的宏观模型处理多车道和交叉口管理。然而,网络仿真器部分是其主缺陷,因为它仅是一个简单的离散事件仿真器,处理简单的射频波和 CSMA/CA MAC 层协议。由于该模型是自主开发的,仿真结果难以与其他著名仿真软件包比较。

3)ASH ASH^[32] 是在 SWANS 基础上扩展的 VANET 仿真器,包含了 IDM 车辆移动模型和 MOBIL 变道模型。ASH 支持车辆移动模型和网络仿真模块的双向反馈,并且还允许用户设置高速场景。网络方面,ASH 包含 IVG 以及概率版的 IVG 协议。ASH 目前还没有可视化界面。

4)VGSim VGSim^[33] 是一个集成网络和微观车辆移动模型的仿真平台。VGSim 采用的移动模型是基于细胞自动机模型(cellular automata (CA) model),网络仿真采用 JiST/SWANS。通过把车辆运动和应用转换为 JiST 的事件驱动平台能够处理的事件,网络仿真和车辆模型运行在一个反馈环上,VGSim 有效地实现了移动模型和网络仿真的闭环控制。VG-Sim 采用 Java 语言开发,而且除了模型开发时采用 CA 模型,还能够灵活地采用不同的移动模型,可以容易地仿真 VANET

的各种应用。文献[33]展示了其在事故预警(accident alert)和变化的速度限制方面的应用研究。

5) MoVES MoVES^[34]是VANET的并行和分布式仿真平台,能够产生车辆移动轨迹,包含综合和基于轨迹的移动性、驾驶者行为模型、基于GPS的地图、交叉口管理和交通灯控制;网络方面包含一个基本的网络仿真器。该项目主要的贡献是它能够把几何地理区域分成簇,进行并行和分布式处理,这就改进了仿真性能。尽管移动模型已经充分详细,这个项目的缺点是粗劣的网络仿真,仅包含了基本的物理层和MAC层结构,完全没有路由协议。

6) DIVERT DIVERT^[35]是一个应用于城市环境的大规模车辆—车辆间通信的仿真软件。DIVERT的移动模型采用真实地图,可以仿真两种类型的车辆,一种车辆只可以运动,另一种车辆既可以运动也可以通信,车辆行走的路线既可以预先设定也可以随机产生,还可以添加新的车辆。网络仿真部分仅限于OSI模型的应用层;该软件采用C++开发。在改进后的版本中将包含四个部分,即交通仿真器、网络仿真器、可视化部分和应用部分^[35]。

5 VANET应用仿真研究

优秀的VANET仿真系统可以很好地仿真节点间通信,并且能够进行相关应用设计的仿真。Gorgorin等人用自己的仿真系统设计了自适应交通灯控制系统^[36],并用TrafficView^[37]系统进行了验证。Wegener等人^[38]用TraNS系统设计的交通灯辅助应用系统可有效地降低汽车在交叉口附近的燃料消耗。

VANET的应用主要有两大方向:a)信息服务类应用,如汽车连接到Internet、多媒体娱乐、商业广告等。这类应用单纯地把车辆移动模块和网络仿真模块集成在一起,用车辆交通轨迹文件来决定网络仿真中节点运动就足够了,也就是开环模式就可满足需要。b)驾驶安全和交通控制类应用,如事故预警、实时交通状况更新等。这类应用需要明确驾驶者对网络通信发布的消息是如何反应的以及车辆移动性改变之后对网络拓扑结构的改变,网络仿真模块和车辆交通仿真模块的实时交互是必要的,所以需要采用闭环模式。

6 结束语

VANET成长最快的应用领域就是安全,车辆通信的目的就是改进驾驶者在遇到交通事故时的反应能力和确保交通安全。VANET的特征在于车辆移动节点的高移动性和必须在实际的道路拓扑地图上运动的受限自由度。VANET网络的复杂性以及实验测试的经济因素使得仿真成为研究VANET协议和应用的首选手段。

VANET仿真研究的一个关键因素就是采用尽可能接近真实交通环境的车辆移动模型。本文首先归类了现有的车辆移动模型,论述了车辆移动模型分类的不同方法,提出了产生真实移动模型所遵循的框架,并介绍了几款优秀的开源软件。VANET作为MANET的一种特殊情况,其网络仿真是研究的一个重要模块,本文概述了几款可用于VANET仿真的开源网络仿真软件。针对如何把网络仿真器和车辆移动模型仿真器融

合在一起构成完整的VANET仿真系统,本文根据现有VANET仿真框架,分四种情况描述了VANET的仿真现状。

从本文分析可以得出,迄今尚无完善的能够对真实的VANET特性进行仿真的软件系统。不依赖现有的仿真系统,独立开发VANET仿真软件,理论上可以定制出任何需要的功能,而且不受现有仿真系统的限制。车辆移动模型和网络仿真之间实时交互的紧密闭环模式是VANET仿真系统发展的必然趋势。目前针对VANET协议的仿真多数是在NS2上的,NS2虽然也提供移动节点模型,但是与真实的车辆移动模型差别很大,所以基于紧密闭环模式VANET仿真平台的协议仿真是接下来的一个重要的研究方向。VANET作为智能交通系统未来发展的一个重要组成部分,在真正实施进入市场化运作之前,其对智能交通系统的实际效果也需要先进行仿真评估。在物联网概念迅速普及的情况下,针对车辆无线传感器网络的应用研究将会更加深入,车辆无线传感器网络也将为交通系统和日常生活带来巨大的效率。

参考文献:

- [1] BATOOL F, KHAN S A. Traffic estimation and real-time predication using Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Emerging Technologies. 2005;321-329.
- [2] BISWAS S, TATCHIKOU R, DION F. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(1):74-82.
- [3] 王笑京. 智能交通系统研发历程与动态述评[J]. 城市交通, 2008, 6(1):6-12.
- [4] TALEB T, SAKHAE E, AMALIPOUR A J, et al. A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2007, 56(6):337-347.
- [5] BLUM J, ESKANDARIAN A, HOFFMAN L J. Challenges of intervehicular Ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(4):347-351.
- [6] YAO H H, AI H H, KIEN A H. Routing protocols for inter-vehicular networks: a comparative study in high-mobility and large obstacles environments[J]. Computer Communications, 2008, 31(12):2767-2780.
- [7] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks[C]//Proc of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2005:69-78.
- [8] HAERRI J, FILALI F, BONNET C. Mobility models for vehicular Ad hoc networks: a survey and taxonomy[C]//Proc of IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2008.
- [9] FIORE M. Vehicular mobility model[M]//Vehicular networks: from theory to practice. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [10] VanetMobiSim[EB/OL]. [2009-03-21]. <http://vanet.eurecom.fr/>.
- [11] SUMO[EB/OL]. [2009-03-21]. <http://sumo.sourceforge.net/index.shtml>.
- [12] CORSIM: microscopic traffic simulation model[EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm>.
- [13] KARNADI F K, MO Zhi-hai, LAN Kun-chan. Rapid generation of re-

- alistic mobility models for VANET [C]//Proc of Wireless Communications and Networking Conference. 2007;2506-2511.
- [14] TraNSLite [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://trans.epfl.ch/>.
- [15] Network simulator 2 [EB/OL]. [2009-03-21]. http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/user_information.
- [16] GloMoSim [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/gloimosim/>.
- [17] QualNet [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.scalable-networks.com/products>.
- [18] JiST/SWANS [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://jist.ece.cornell.edu>.
- [19] OMNeT++ [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.omnetpp.org>.
- [20] J-Sim [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.j-sim.zcu.cz/>.
- [21] OPNET technologies [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.opnet.com/>.
- [22] BARR R, HAAS Z, RENESSE R van. Scalable wireless Ad hoc network simulation [R]//Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks. Boca Raton: CRC Press, 2005; 297-311.
- [23] SCHOCH E, FEIRI M, KARGL F, *et al.* Simulation of Ad hoc networks: NS2 compared to JiST/SWANS [C]//Proc of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. 2008.
- [24] KARGL F, SCHOCH E. Simulation of MANETs: a qualitative comparison between JiST/SWANS and NS2 [C]//Proc of the 1st International Workshop on System Evaluation for Mobile Platforms. New York: ACM Press, 2007; 41-46.
- [25] SWANS++ [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/swans++/>.
- [26] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks [C]//Proc of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2005; 69-78.
- [27] MANGHARAM R, WELLER D S, RAJKUMAR R, *et al.* GrooveNet: a hybrid simulator for vehicle-to-vehicle networks [C]//Proc of International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications. 2006; 1-8.
- [28] PIORKOWSKI M, RAYA M, LEZAMA R, *et al.* TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs [EB/OL]. [2009-03-21]. http://icapeople.epfl.ch/panos/trans_mczr.pdf.
- [29] SOMMER C, YAO Zheng, GERMAN R, *et al.* On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation [C]//Proc of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models Networking Research. New York: ACM Press, 2008; 41-48.
- [30] WANG S Y, CHOU C L. NCTUns 5.0 network simulator for advanced wireless vehicular network researches [C]//Proc of the 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. 2009; 375-376.
- [31] GORGORIN C, GRADINESCU V, DIACONESCU V, *et al.* An integrated vehicular and network simulator for vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 20th European Simulation and Modeling Conference. 2006.
- [32] IBRAHIM K, WEIGLE M C. ASH: application-aware SWANS with highway mobility [C]//Proc of IEEE INFOCOM Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE). 2008.
- [33] LIU Bo-jin, KHORASHADI B, DU Hai-ning, *et al.* VGSim: an integrated networking and microscopic vehicular mobility simulation platform [J]. *Communications Magazine*, 2009, 47(5): 134-141.
- [34] BONONI L, Di FELICE M, D'ANGELO G, *et al.* MoVES: a framework for parallel and distributed simulation of wireless vehicular Ad hoc networks [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(1): 155-179.
- [35] CONCEIC H, DAMAS L, FERREIRA M, *et al.* Large-scale simulation of V2V environments [C]//Proc of ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2008; 28-33.
- [36] GRADINESCU V, GORGORIN C, DIACONESCU R, *et al.* Adaptive traffic lights using car-to-car communication [C]//Proc of the 65th Vehicular Technology Conference. 2007; 21-25.
- [37] NADEEM T, DASHTINEZHAD S, LIAO Chun-yuan, *et al.* Traffic-View: traffic data dissemination using car-to-car communication [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(3): 6-19.
- [38] WEGENER A, HELLBRUCK H, WEWETZER C, *et al.* VANET simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance [C]//Proc of GLOBECOM Workshops. 2008; 1-7.
- [39] SUMO manual [EB/OL]. (2008-02-14) [2009-03-21]. <http://sumo.sourceforge.net/docs/documentation.shtml>.

(上接第 1613 页)

- [12] HUANG P, OKI H, WANG Y. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet [J]. *ACM Operating System Review*, 2002, 36(5): 96-107.
- [13] WANG Yu, WU Hong-yi. Replication-based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN) [C]//Proc of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshop. 2006; 485-489.
- [14] WANG Yong, JAIN S, MARTONOSI M. Erasure-coding based routing for opportunistic networks [C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. New York: ACM Press, 2005; 229-236.
- [15] WANG Yu, WU Hong-yi. Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): a new paradigm for pervasive information gathering [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2007, 6(9): 1022-1034.
- [16] 孙利民, 熊用平, 马健. 机会移动传感器网络中的自适应数据收集机制 [J]. *通信学报*, 2008, 29(11): 186-193.
- [17] LI Ze, SHEN Hai-ying. Utility-based distributed routing in intermittently connected networks [C]//Proc of the 37th International Conference on Parallel Processing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008; 604-611.
- [18] PASZTOR B, MUSOLESI M, MASXOLO C. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR [C]//Proc of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE Press, 2007; 1-12.
- [19] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(D): 35-45.
- [20] ZHU Jin-qi, CAO Jian-nong, LIU Ming, *et al.* A mobility prediction-based adaptive data gathering protocol for delay tolerant mobile sensor network [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans: IEEE Press, 2008; 1-5.