

## 基于移动模型的车载自组织网络连通特征

冯慧芳\*, 孟玉如

(西北师范大学 数学与统计学院, 兰州 730070)

(\* 通信作者电子邮箱 hffeng@nwnu.edu.cn)

**摘要:**针对车载自组织网络(VANET)的连通性问题,分析了其拓扑动态变化过程中网络的连通性的演化特征。首先,提出以连通分支数、连通概率及连通长度为评价指标的VANET拓扑连通性参数;然后,结合车辆换道功能的智能驾驶移动模型(IDM-LC),应用VanetMobiSim仿真软件建立VANET;最后,通过仿真实验分析了节点通信半径与平均连通分支数、平均连通率及平均连通长度之间的关系,同时分析了VANET连通分支数的统计分布特征,用Q-Q图和T检验验证得出结论:连通分支数服从正态分布,且该统计分布特征与节点通信半径无关。

**关键词:**车载自组织网络;连通性;统计分布;换道功能的智能驾驶模型;VanetMobiSim

**中图分类号:** TP393.1 **文献标志码:** A

### Connectivity characteristics based on mobility model for vehicular Ad Hoc networks

FENG Huifang\*, MENG Yuru

(College of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of connectivity in Vehicular Ad Hoc Network (VANET), the evolution characteristics of connectivity characteristics for VANET were analyzed. Firstly, the number of connected components, connectivity probability and connectivity length were proposed to be used for the evaluation connectivity metrics for VANET. Then, based on Intelligent Driver Model with Lane Changes (IDM-LC), the VANET was set up through VanetMobiSim software. Finally, the relation of node communication radius and the average number of connected components, average connectivity probability and average connectivity length were given. At the same time, the statistical distribution of the number of connected components was also analyzed. The results show that number of connected components follows a normal distribution by using Q-Q plot and T-test. Moreover, the results also show that the statistical distribution of the number of connected components is independent of the node communication radius.

**Key words:** Vehicular Ad Hoc Network (VANET); connectivity; statistical distribution; Intelligent Driver Model with Lane Changes (IDM-LC); VanetMobiSim

## 0 引言

车载自组织网络(Vehicular Ad Hoc Network, VANET)是一种特殊的无线Ad Hoc网络<sup>[1]</sup>,可以适应不断变化的网络拓扑结构,为道路车辆之间、车辆与路边固定接入点之间提供通信。VANET作为智能交通系统(Intelligent Transport Systems, ITS)的一个重要组成部分,由于其具有巨大的经济价值和社会价值引起了各国职能部门、科研和工业研究机构的高度关注<sup>[2]</sup>。通过VANET可实现车辆协同安全驾驶、交叉路口决策支持、区域交通智能调度、实时交通信息发布、无限增值信息服务,以及诸如对等网络(Peer to Peer, P2P)文件共享、视频传输、在线游戏等交互式流媒体通信方面的应用。

VANET作为一种新型的移动自组织网络,它既具有传统自组织网络的特点,如拓扑结构动态变化、自组织无中心、低带宽等,又有自己的特点:比如快速移动性、拓扑变化频繁、间歇连通性、网络规模大、充足的能量供应等。动态的网络拓扑结构直接影响着VANET连通特性,再加上无线信道的恶劣环境,使网络连通性问题研究十分复杂。连通性是VANET

对用户提供可靠服务的先决条件,意义格外重要。

文献[3]应用随机路点模型、曼哈顿模型及DIVERT(Development of Inter-Vehicular Reliable Telematics)模型分析了链路连接特性与节点无线通信半径的关系。Stamatiou等<sup>[4]</sup>研究了车辆速度、密度与链路连接特性的关系。文献[5]应用渗透理论研究了车辆密度、无线传输范围与网络连通度之间的关系,分析了节点无线通信半径与网络连接稳定性之间的联系。文献[6-7]中假设车辆按Poisson过程到达,分析了在交通畅通状态下车辆的直接和间接连通性的统计特征。文献[8]从理论上分析了车辆间链路平均可用时间及车辆间链路的平均变化率。文献[9]推导得出了一种用于高速公路场景中车载自组织网络不存在孤立节点的概率分析算法。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 $O(|\log(1-p^{1/n})|/n)$ ,其中: $n$ 为网络中有的节点数, $p$ 为任意节点对之间的邻接概率。文献[10-11]应用排队理论模型研究了高速公路上车辆的连通性,分别给出了车辆连通距离分布函数、平均连通距离及连通概率。文献[12]从链路连接特性、网络连通性和网络中心性等三个方面分析网络

收稿日期:2015-01-29;修回日期:2015-03-29。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61363081);甘肃省高等学校基本科研业务费;甘肃省科技计划资助项目(1308RJZA294)。

作者简介:冯慧芳(1971-),女,甘肃古浪人,教授,博士,CCF会员,主要研究方向:计算机网络;孟玉如(1990-),女,甘肃秦安人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络。

连通特性。

上述研究中存在问题:在理论分析中,假设车流服从指数分布,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,而且都是建立在节点具有固定通信半径的理想路径损耗信道模型的基础之上。在仿真研究中,采用的移动模型可能与真实车辆交通环境相差甚远,比如随机路点模型、曼哈顿模型等。这与现实车载自组织网络中真实的环境存在较大差异,从而导致这些研究结论只能为实际的VANET部署提供有限的指导意义。另外,大部分研究中都没有考虑移动网络的动态时空特性,仅仅研究了网络的部分静态特征。事实上,VANET为含有时间的复杂网络,也称为动态网络。

移动模型被广泛应用于VANET相关协议和算法的性能评价中。智能驾驶模型(Intelligent Driver Model, IDM)由Treiber等<sup>[13]</sup>提出,是一种微观交通流模型,在仿真中将车辆视为移动的节点,因此能够在任意时刻获取仿真中任意车辆的状态,即车辆所处的位置、速度、加速度、所处车道等。换道功能的智能驾驶模型(Intelligent Driver Model with Lane Changes, IDM-LC)<sup>[14]</sup>是在IDM的基础上增加了车辆在十字路口的管理及车辆换道功能的智能移动模型,与随机路点模型、曼哈顿模型等移动模型相比较,IDM-LC更加符合真实的交通场景<sup>[15-16]</sup>,因此,本文采用IDM-LC研究车载自组织网络的动态连通特征。

## 1 IDM-LC

智能驾驶模型(IDM)是连续确定性模型,属于尾随模型,当前车辆的速度与前车的速度相关。假设车辆 $a$ 长度为 $l_a$ ,该车速度为 $v_a(t)$ ,与前车的距离为 $s_a(t) = x_{a-1}(t) - x_a(t) - l_a$ ,其中 $x_a(t)$ 为车辆在时刻 $t$ 时的位置,该车与前车的速度差 $\Delta v_a(t) = v_a(t) - v_{a-1}(t)$ 。当前车辆 $a$ 的瞬时加速度为:

$$\frac{dv}{dt} = a[1 - (v/v_0)^4 - (s^*/s)^2]$$

其中: $s^* = s_0 + (vT + v\Delta v)/(2\sqrt{ab})$ ;  $v$ 是车辆的当前速度, $v_0$ 是期望速率; $s$ 是与前车辆之间的距离, $s^*$ 是与前车的理想距离, $s_0$ 是车辆阻塞距离,即车辆之间的最小距离; $T$ 是最小的安全车头时距; $a, b$ 分别为最大加速度和减速度。

十字路口管理功能的智能驾驶模型(Intelligent Driver Model with Intersection Management, IDM-IM),在IDM的基础上增加了对车辆在十字路口的管理。有车辆换道功能的智能驾驶模型(IDM-LC)在IDM-IM的基础上增加了车辆变换车道的可能性和利用多车道来实现超车功能,使其更加符合真实的交通场景。当满足下列条件时允许车辆改变车道:

$$a^l - a \pm a_{\text{bias}} > p(a_{\text{cur}} - a_{\text{cur}}^l + a_{\text{new}} - a_{\text{new}}^l) + a_{\text{thr}};$$

$$a_{\text{new}}^l > -a_{\text{safe}}$$

其中: $a^l - a$ 为当前车辆移动变道后的加速度增量, $a_{\text{cur}} - a_{\text{cur}}^l$ 为当前车道尾随车辆加速度的损失, $a_{\text{new}} - a_{\text{new}}^l$ 为候选车道车辆加速度的损失。当车辆向右变换车道时将加上 $a_{\text{bias}}$ ,而向左变换车道时则减去 $a_{\text{bias}}$ , $p$ 为礼貌参数。 $a_{\text{thr}}$ 表示变道最小加速度增益阈值,车辆变道后要保证车道上后面的车辆不需要明显的刹车行为,即减速度必须大于安全值 $a_{\text{safe}}$ 。

## 2 网络模型及网络连通性度量

### 2.1 网络拓扑模型

事实上,VANET为含有时间的复杂网络,即含时复杂网

络<sup>[17]</sup>,也称为动态网络,在该网络中节点和连线都带有时间标签,设 $G(V(t), E(t))$ 为时刻 $t$ 时车载自组织网的瞬时拓扑图,其中 $V(t)$ 是时刻 $t$ 是点的集合,即 $V(t) = \{v_i\}$ ,时刻 $t$ 时的节点数定义为 $N(t) = \|V(t)\|$ 。 $E(t)$ 是时刻 $t$ 是边的集合,即 $E(t) = \{e_{ij}(t) | v_i, v_j \in V(t), \|v_i - v_j\| \leq r, i \neq j\}$ ,其中 $r$ 为节点通信半径。假设 $G(V(t), E(t))$ 是无向图,即 $e_{ij}(t) = e_{ji}(t)$ , $\forall i, j, t$ ,时刻从节点(车辆) $v_i$ 到 $v_j$ 的多跳最短路径用路径上的有序节点表示,即 $p_{ij}(t) = \{v_i, \dots, v_j\}$ ,那么,如果 $v_i$ 到 $v_j$ 不存在最短路径,则 $p_{ij}(t) = 0$ 。

### 2.2 连通性度量

设 $V_i(t) = v_i \cup \{v_j | p_{ij}(t) \neq 0\}$ , $E_i(t) = \{e_{ij}(t) | v_i, v_j \in V_i(t)\}$ ,定义子图 $C_i(t) = G(V_i(t), E_i(t))$ 为 $t$ 时刻包含节点 $v_i$ 连通分支,即连通分支 $C_i(t)$ 表示在 $t$ 时刻车辆 $i$ 能够通过多跳到达的网络,由此可知 $C_i(t) = C_j(t)$ 的充要条件是 $p_{ij}(t) \neq 0$ 。一个连通分支规模是指该连通分支中的节点数目,即 $S_i(t) = \|V_i(t)\|$ ,节点数最多的连通分支称为最大连通分支。

定义1 连通分支数。设连通分支的集合 $C(t) = \{C_i(t) | C_i(t) \cap C_j(t) = \emptyset, \forall i < j\}$ ,则 $t$ 时刻的连通分支数 $c(t) = \|C(t)\|$ ,平均连通分支数 $\bar{c} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c(t)$ 。

定义2 连通率。连通率 $p(t)$ 定义为最大连通分支的规模/节点总数,即 $p(t) = (\max_{i \in N(t)} S_i(t)) / N(t)$ ,平均连通率 $\bar{p} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p(t)$ 。

定义3 连通性长度。全局网络效率表示为 $E_{\text{global}}(G(t)) = [\sum_{i>j} 1/d_{ij}(t)] / [N(t)(N(t)-1)/2]$ ,其中 $d_{ij}(t)$ 为时刻 $t$ 网络中任意两个节点 $u_i$ 与 $u_j$ 之间的距离,定义为连接这两个节点的最短路径上的边数,那么连通性长度定义为 $D(G(t)) = 1/E_{\text{global}}(G(t))$ <sup>[18]</sup>,平均连通性长度 $\bar{D} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D(G(t))$ 。

## 3 仿真实验

### 3.1 参数设置

首先采用VanetMobiSim<sup>[19]</sup>软件建立VANET环境,移动模型中车辆长度为5 m,加速度 $a$ 和减速度 $b$ 分别为 $0.6 \text{ m/s}^2$ 和 $0.9 \text{ m/s}^2$ ,礼貌参数 $p$ 为0.5, $a_{\text{thr}}$ 为0.2 m,其他参数设置如表1。

表1 移动模型参数

参数	值
信号辐射半径	20,60,100,140,180,220,260,300 m
仿真时间	500 s
节点数目	200
仿真区域面积	3 km × 3 km
节点速度	[2,20] m/s
车道数	双向四车道

### 3.2 VANET连通特征分析

仿真实验中车辆数的初始值为200,仿真时间为500 s,考虑到系统初始时存在的不稳定性,对100 s以后的数据进行分析研究。图1(a)~(d)分别为 $t = 100 \text{ s}, 200 \text{ s}, 300 \text{ s}$ 和 $400 \text{ s}$ ,通信半径为220 m时网络拓扑的瞬时结构,图1中可连通节点用线段连接。

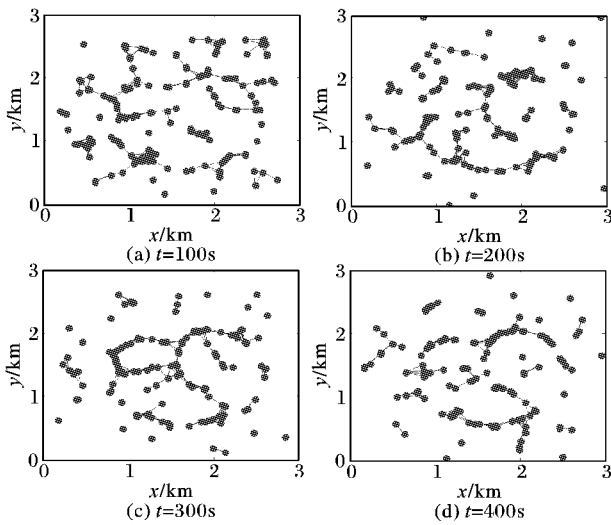


图1 网络不同时刻的瞬时拓扑

连通分支的数目是刻画网络连通性能的主要参数,图2为不同通信半径下的连通分支数随时间的变化。由图2可知当通信半径比较小时,网络连通分支数较多,网络分割现象较为严重,无法形成较大规模的连通分支;随着网络半径的增大,连通分支数减少,且当通信半径比较大时,连通分支数变化率会急剧下降。利用Q-Q图鉴别样本数据是否近似于正态分布,检验结果如图3(a)~(d)所示,Q-Q图上的点近似地在一条直线附近,同时用T检验进一步验证得出连通分支数服从正态分布。

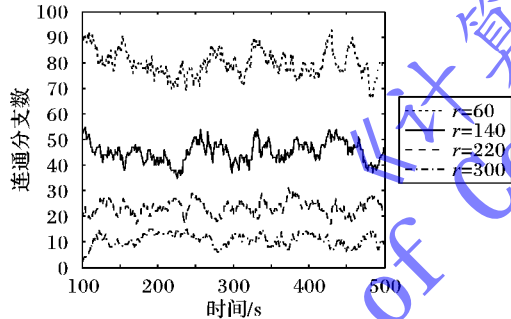


图2 网络的连通分支数

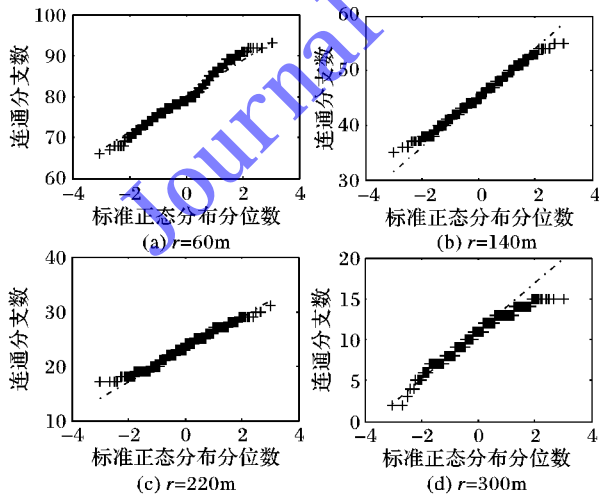


图3 网络连通分支数的Q-Q图

图4(a)~(d)分别为不同半径时连通分支数的累积分布函数 $F(x)$ ,当通信半径为60 m时,网络的连通分支数大于75的占80%,这时网络分割严重,存在大量孤立节点,很多节

点之间无法通信;当半径增大为300 m时,连通分支数大于13的占10%,这充分说明了通信半径对网络连通性的影响。图5为平均连通分支数与通信半径之间的关系,用指数函数拟合得到曲线为 $\bar{c}(r) = -97.84r^{0.1821} + 285.7$ ,各参数95%的置信区间、和方差(Sum of Squares for Error, SSE)、确定系数 $R$ -square、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)的值如表2所示, $R$ -square = 0.9995,说明拟合效果很好。

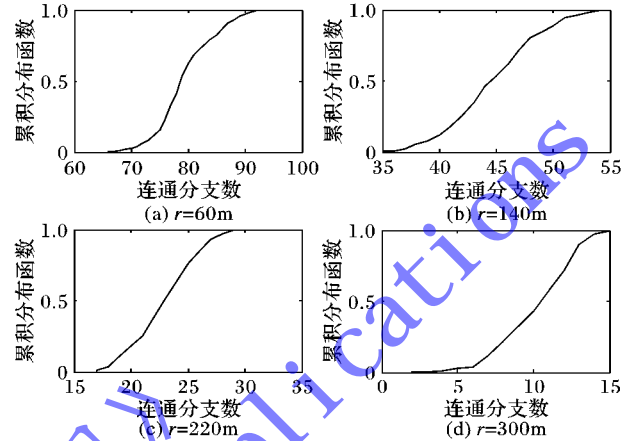


图4 网络连通分支数的累积分布函数

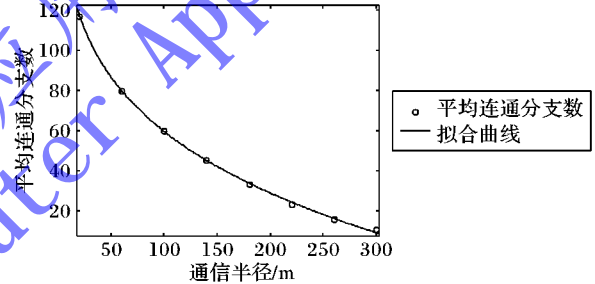


图5 网络连通分支数与通信半径的关系

表2 曲线拟合参数

函数	各参数值	95% 置信区间	其他参数
$\bar{c}(r) = ar^b + c$	$a = -97.84$	$(-159, -36.69)$	$SSE = 4.419$
	$b = 0.1821$	$(0.1196, 0.2446)$	$R\text{-square} = 0.9995$
	$c = 285.7$	$(210.3, 361.1)$	$RMSE = 0.9401$
$\bar{p}(r) = ae^{-(\frac{r-b}{c})^2}$	$a = 2.186$	$(-2.308, 6.68)$	$SSE = 0.003476$
	$b = 551.4$	$(124.2, 978.5)$	$R\text{-square} = 0.9938$
	$c = 255.1$	$(85.29, 425)$	$RMSE = 0.02637$
$\bar{D}(r) = ar^b + c$	$a = 3.306$	$(2800, 3812)$	$SSE = 8.841$
	$b = -0.8603$	$(-0.9171, -0.8034)$	$R\text{-square} = 0.9998$
	$c = -18.33$	$(-24.17, -12.5)$	$RMSE = 1.33$

在网络受到持续的攻击时,最大连通子图(分支)规模大小是测量网络连通功能一个重要的量。在这个子图内所包含的节点比其他子图的都多,并且任意两个节点之间都存在连接通路,通常用节点数来表示这种最大连通分支规模,它与网络连通性长度,共同作为复杂网络连通性和稳定性的一种度量。图6为不同通信半径时最大连通分支的规模的变化,当半径为60 m、140 m、220 m和300 m时,其均值分别为12.0375、23.9600、61.9700和128.2800,标准差分别为4.9042、6.8341、21.1698和21.2213,变异系数为0.4074、0.2852、0.3416和0.1654,可见当半径较小时,变异系数越大,其相对变化率越大;反之则最大连通分支规模的变化率越小。由图7知,连通率随传输半径增加而增大,特别是半径较大时,曲线变化很快,可以达到较高的连通率。通信半径和连



通率之间的关系可用高斯函数表示  $\bar{p}(r) = 2.186e^{-\left(\frac{r-551.4}{255.1}\right)^2}$ , 其余拟合参数如表2所示。

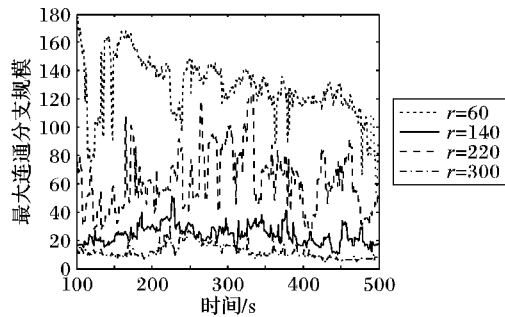


图6 最大连通分支规模

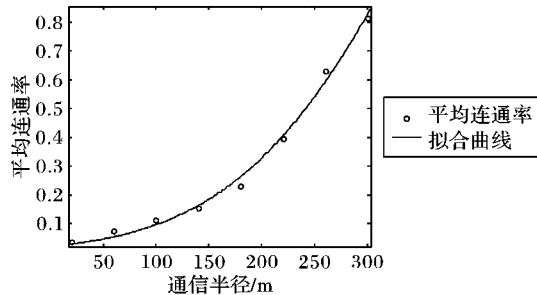


图7 网络平均连通率

当网络频繁分割时,可用网络连通性长度来描述其连通特征,图8给出了不同通信半径时连通性长度随时间的变化曲线;图9为平均连通性长度随通信半径的变化曲线。通信半径较小时,网络连通性长度很大,这是由于网络严重分割,故拓扑结构很不稳定,网络的连通性得不到保证;随着通信半径的增加,连通性长度迅速减小,当半径大于200 m时,趋于平稳。通信半径和连通性长度之间的关系可用函数  $\bar{D}(r) = 3306r^{-0.8603} - 18.33$  近似表示,其余参数如表2所示,确定系数的值接近于1,表明该函数能较好地描述通信半径与平均连通性长度之间的关系。

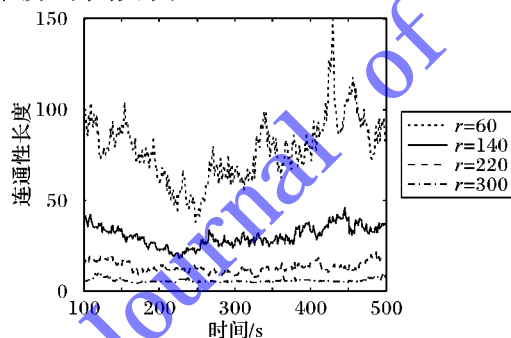


图8 网络的连通性长度随时间的变化

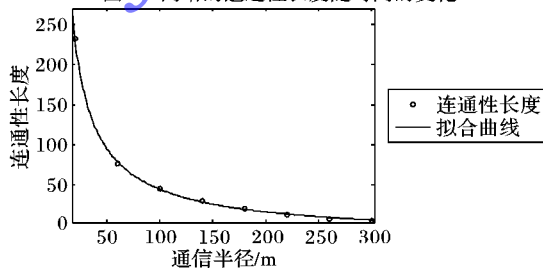


图9 网络的连通性长度随通信半径的变化

#### 4 结语

在VANET中,连通性对于分析整个网络性能来说十分

重要,尤其是在增强安全性和舒适性方面的应用。本文基于IDM-LC对车载自组织网络动态连通特征作了研究,仿真结果分析表明当通信半径比较小时,网络分割严重,连通性差,增加通信半径可有效改善VANET的连通性;另外,研究了网络连通分支数的统计特征。真实车载自组织网络拓扑连通性呈现怎样的特征?根据连通特征,建立合理的连通性数学模型,为VANET路由协议设计、数据分发机制、移动性管理等方面的研究提供理论支撑,这些将是下一步工作。

#### 参考文献:

- [1] IEEE. IEEE Std. 802.11p Draft Amendment. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) [S]. Piscataway: IEEE, 2005.
- [2] ZEADALLY S, HUNT R, CHEN Y S. Vehicular Ad Hoc networks (VANETs): status, results, and challenges [J]. Telecommunication Systems, 2012, 50(4): 217-241.
- [3] CONCEIC H, FERREIRA M, BARROS J. A cautionary view of mobility and connectivity modeling in vehicular Ad Hoc networks [C]// VTC Spring 2009: Proceedings of the 2009 IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2009: 1-5.
- [4] EL-ATTY S M A, STAMATIOU G K. Performance analysis of multi-hop connectivity in VANET [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Wireless Communication Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 335-339.
- [5] JIN X, SU W J, WEI Y. A study of the VANET connectivity by percolation theory [C]// Proceedings of the 2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 85-89.
- [6] CHEN C, LIU L, DU X, et al. Available connectivity analysis under free flow state in VANETs [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012: 270.
- [7] CHEN C, DU X, PEI Q, et al. Connectivity analysis for free flow traffic in VANETs: a statistical approach [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013: 1-15.
- [8] ZHANG L, LAKAS A, EL-SAYED H, et al. Mobility analysis in vehicular Ad Hoc network (VANET) [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(3): 1050-1056.
- [9] XIONG W, LI Q. Prerequisite to 1-connected vehicular Ad Hoc networks in highway scenarios [J]. Journal of Software, 2010, 21(11): 2906-2919. (熊伟, 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[J]. 软件学报, 2010, 21(11): 2906-2919.)
- [10] MUHAMMED AJEER V K, NEELAKANTAN P C, BABU A V. Network connectivity of one-dimensional vehicular Ad Hoc network [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 241-245.
- [11] NEELAKANTAN P C, BABU A V. Connectivity analysis of one-dimensional vehicular Ad Hoc networks in fading channels [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012: 1-16.
- [12] YANG W, FENG L, LIU J, et al. Network connectivity characteristics for vehicular Ad Hoc network [J]. Journal on Communications, 2012, 33(z1): 48-52. (杨卫东, 冯琳琳, 刘伎昭, 等. 车载自组织网络中网络连通特性研究[J]. 通信学报, 2012, 33(z1): 48-52.)

(下转第1848页)

进一步证实了这一点。统计方法为在随机的 100 个问题中, 每 10 个一组, 计算 Closed 表平均长度和平均加速比, 并按平均长度递增排序。15 数码问题和 24 数码问题在相同长度上的加速比符合较好, Closed 表长与加速比呈正相关关系。平均加速比 PSFI 为 3.2, 而 PBNF 约为 2.7。

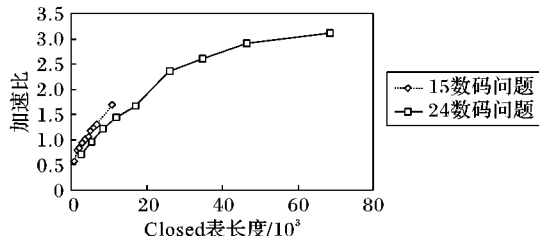


图5 Closed 表长与加速比的关系

此外, 在串行算法中, Search 操作是所占比例最大的串行分量, 查找成功时的扩展次数, 即 Closed 表长度也从侧面反映了算法的时间性能。PSFI 是严格的 Best-First 算法, 而 PBNF 被设计为具有近似的 Best-First 查找顺序, 以便引入优化减少通信开销, 但不可避免地造成了冗余扩展。统计数据显示, 在所测 15 数码问题中, ISA\* 的扩展次数在 20 万以内, 远小于 PBNF。总之, ISA\* 具有更好的时间性能, 而并行的 PSFI 进一步提升了算法的效率, 且具有更好的加速性能。

#### 4 结语

A\* 算法是智能控制领域中得到广泛应用的重要算法, 但通常由于状态空间巨大而搜索效率低下。并行化是提升算法效率的重要手段, 目前已有众多文献探讨了并行的 A\* 算法。PSFI 是一种严格的最佳优先算法, 它借鉴了共享存储平台上常见的并行启发式搜索算法, 对串行的 A\* 算法进行了改进, 借助于新的数据结构, 并行化了耗时较多的查找操作, 同时实现了快速的插入操作。本文通过实验对算法的改进进行了实验证明和分析, 最后与另一共享存储平台上的算法 PBNF 进行了比较。实验结果表明, PSFI 显著提升了 A\* 算法的性能。

#### 参考文献:

- [1] STURTEVANT N R, FELNER A, LIKHACHEV M, *et al.* Heuristic search comes of age [C]// Proceedings of the 26th AAAI Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park: AAAI Press, 2012: 2186–2188.
- [2] LI W, DAI F. Research of increased best-first-search diversity [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(9): 3237–3239. (李伟生, 代飞. 基于增加最优优先搜索多样性的研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(9): 3237–3239.)
- [3] BURNS E, LEMONS S, ZHOU R, *et al.* Best-first heuristic search for multi-core machines [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2010, 39(1): 689–743.
- [4] ZHOU R, HANSEN E A. Edge partitioning in external-memory graph search [C]// Proceedings of the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2007: 1666–1671.
- [5] SANZ V, de GIUSTI A, NAIIOUF M. 4-(N<sup>2</sup>-1) puzzle: parallelization and performance on clusters [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 10(2): 87–96.
- [6] YAN J, HE J, HAN W, *et al.* How OpenMP applications get more benefit from Many-Core era [C]// IWOMP'10: Proceedings of the 6th International Conference on Beyond Loop Level Parallelism in OpenMP: Accelerators, Tasking and more, LNCS 6132. Berlin: Springer, 2010: 83–95.
- [7] RIOS L H O, CHAIMOWICZ L. A survey and classification of A\* based best-first heuristic search algorithms [C]// SBIA'10: Proceedings of the 20th Brazilian Conference on Advances in Artificial Intelligence, LNCS 6404. Berlin: Springer, 2010: 253–262.
- [8] MAHAFAZAH B A. Parallel multithreaded IDA\* heuristic search: algorithm design and performance evaluation [J]. International Journal of Parallel Emergent and Distributed Systems, 2011, 26(1): 61–69.
- [9] PACHECO P S. An introduction to parallel programming [M]. DENG Q, translated. Beijing: China Machine Press, 2012: 153–161. (PACHECO P S. 并行程序设计导论[M]. 邓倩妮, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012: 153–161.)
- [10] WEN A, LI S. One direct solution of N-puzzle problem and its optimization [J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(5): 266–267. (温安国, 李松年. N 数码问题直接解及优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(5): 266–267.)
- [11] LI W, YING T, LI Y, *et al.* Analysis of parallel computing environment overhead of OpenMP for loop with multi-core processors [C]// PDCAT 2010: Proceedings of the 2010 International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Piscataway: IEEE, 2010: 515–517.
- [12] THOMAN P, JORDAN H, PELLEGRINI S, *et al.* Automatic OpenMP loop scheduling: a combined compiler and runtime approach [C]// IWOMP'12: Proceedings of the 8th International Conference on OpenMP in a Heterogeneous World, LNCS 7312. Berlin: Springer, 2012: 88–101.
- [13] KISHIMOTO A, FUKUNAGA A, BOTE A. Evaluation of a simple, scalable, parallel best-first search strategy [J]. Artificial Intelligence, 2013, 195(1): 222–248.
- [13] TRIEBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations [J]. Physical Review E—Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 2000, 62(2A): 1805–1824.
- [14] TRIEBER M, HELBING D. Realistische Mikrosimulation von Strassenverkehr mit einem einfachen Modell (in German) [C]// Symposium Arbeitsgemeinschaft Simulation 2002. Rostock: [s. n.], 2002: 514–520.
- [15] HARRI J, FILALI F, BONNET C. Mobility models for vehicular Ad Hoc networks: a survey and taxonomy [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(4): 19–41.
- [16] WEI D, WANG Y, WANG J, *et al.* A survey on mobility models of vehicular Ad Hoc networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(4): 677–700. (魏达, 王沿锡, 王健, 等. 车载自组网移动模型综述[J]. 计算机学报, 2013, 36(4): 677–700.)
- [17] HOLME P, SARMAKI J. Temporal networks [J]. Physics Reports, 2012, 519(3): 97–125.
- [18] SIMARD D, NADEAU L, KROGER H. Fastest learning in small-world neural networks [J]. Physics Letters A, 2005, 336(1): 8–15.
- [19] VanetMobiSim. VanetMobiSim Project [EB/OL]. [2014-12-18]. <http://vanet.eurecom.fr>.

(上接第 1832 页)