

高稳定被动群集车联网连通性研究

邱恭安, 包志华, 章国安, 张士兵

(南通大学电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 提出了基于车辆相对运动速度的车联网被动群集车间通信模型, 通过选择平均相对速度和邻居节点数作为输入参数, 应用模糊逻辑推举群首, 建立高稳定性车节点群集, 推导了群集模型的存活时间函数。交通安全消息在车间通过群内广播和群间中继进行传播, 针对群内链路连通性, 推导了群内节点连通概率与车辆分布密度间的关系。针对群间路径连通性, 推导了群间连通概率与群间间距、车辆分布密度间的关系。最后, 在满足车辆分布密度前提下计算仿真结果, 验证了理论分析结论的合理性, 分析结论为高速交通安全消息的车间传播机制应用提供理论参考。

关键词: 被动群集; 模糊逻辑; 连通概率; 相对速度; 车载无线网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Connectivity analysis of passive cluster with high stability in vehicular wireless network

QIU Gong-an, BAO Zhi-hua, ZHANG Guo-an, ZHANG Shi-bing

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: A passive cluster model with the maximum lifetime was proposed for vehicle to vehicle communication based on the relative velocity. The cluster head was elected based on the average relative velocity and the neighbor list. The cluster lifetime was deduced as the function of the average relative velocity. The traffic safety messages were disseminated to all cluster members by inter-cluster message broadcasting and intra-cluster message relaying in interconnected vehicular network. The link connectivity probability between the cluster head and members were deduced as the function of the vehicle density for inter-cluster broadcasting. The path connectivity probability between the cluster head and the neighbor cluster head was deduced as the function of the vehicle density and intra-cluster distance for on intra-cluster dissemination. Simulation results show that the connected probability is suitable for vehicular network under the traffic density constraints.

Key words: passive cluster, fuzzy logic, connectivity probability, relative velocity, vehicular wireless network

1 引言

智能交通系统 (ITS, intelligent transportation system) 能够提高交通安全和交通效率, 减小能源消耗和环境污染。车联网是 ITS 交通状态消息实时获取与传播的载体, 它依靠车载专用短距离通信 (DSRC, dedicated short-range communica-

tions) 设备实现车与车 (V2V, vehicle to vehicle)、车与路边设施 (V2I, vehicle to infrastructure) 间的通信, 具有高效计算、持续能量、既定拓扑和车辆定位等优势, 也因高速移动特征带来动态网络拓扑和多径衰落, 存在控制信道带宽和通信距离受限的问题, 导致 V2V 通信链路随机中断, 难以维持稳定、可靠的车间通信^[1]。将行驶模式相

收稿日期: 2015-09-08; 修回日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61371111, No.61371112, No.61371113); 交通运输部应用基础研究基金资助项目(No.2013319825110)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61371111, No. 61371112, No. 61371113), Application Foundation of the Ministry of Transport of China (No.2013319825110)

近的车节点进行群集能有效降低 70% 的冗余广播消息^[2], 减小车联网拓扑动态性, 提高 V2V 消息传播的可靠性^[3], 因此, 基于车辆群集模型进行交通安全告警消息的实时可靠传播有可能预警并避免交通连环碰撞事故。

车辆群集通信模型通过提供冗余的通信链路来提高车载通信的可靠性。目前, 主动群集方法被广泛研究^[4], 包括基于消息信号特征的群集、基于车辆移动特征的群集、基于车辆密度的群集和动态群集方法, 其共同特征是在群集建立和维护过程中需要周期性交换较多的控制负载消息, 降低了有限带宽的控制信道资源效率, 较适应于车节点密集、绝对运动速度低的城市交通。被动群集是一种实时群集方法, 不需要主动交换控制消息, 仅当有邻居节点消息产生时才启动群集机制, 推举群首 (CH, cluster head) 并建立节点群。虽然在高密度车联网中, 被动群集模式降低了群连通时间和连通范围, 但在节点密度稀疏的高速公路网络中, 其群集灵活性和带宽效率具有优势^[5]。

在车联网中, 要实时、可靠传播交通事故告警消息, 连通的网络是必要条件, 因此, 基于群集模式的网络通信连通性是消息传播机制应用的基础。Mohamed 等^[6]根据车间间距与节点通信范围参数进行节点群集, 基于车辆碰撞避免性能指标分析了车间间距与 V2V 链路连通性、车间间距与链路连接持续时间的关系。刘业等^[7]按照路段长度建立群集, 从车节点通信范围分析了连通群集直径长度和连通群集数目间的关系, 但实际上基于路段的群集方法仅适用于车速较慢的城市交通流。Sooksan 等^[8]分析了单车道和两车道中车辆跟随模型的连通概率, 没有群集相关车节点, 连通概率因竞争接入碰撞而下降。熊炜等^[9]推导了双向行驶的车节点与车辆通信距离间的一跳连通概率, 但在双向相对速度极高的高速交通中, 连接持续时间极短。Jia 等^[10]基于行驶车道路段分群, 并直接选择路段首车节点为群首, 分析了群的连通性, 但是该方法选择的群首稳定性差, 群动态性高。

在稳定的高速交通网络中, 独立车辆具有非常高的运动速度, 路段中车辆间呈稀疏状态分布, 而且交通事故消息也仅对跟随车辆有实际的预警作用, 因此, 基于该特征提出高速交通同向双车道被动群集 V2V 通信模型。鉴于独立车辆的高动态性, 该模型应用模糊逻辑推举群首, 并基于此建立高稳

定性的车节点群, 推导群持续时间与相对速度间关系式。随后, 从群连接时间和群覆盖空间上分析车联网群内链路连通性和群间路径连通性, 为高速交通中预警安全消息快速传播机制的应用提供理论基础。

2 高稳定被动群集模型

在高速交通中, 车辆的快速运动特性使车联网拓扑动态性强, 容易分裂即在群集而需重新群集车节点, 导致很强的群不稳定性^[11]。被动群集方法利用车辆移动模式的相似性建立群集, 不依赖于车载导航系统的定位功能, 几乎没有额外开销, 特别适合于高速移动与时间受限网络。当被动群集时, 每个节点开始处于初始状态, 通过分析邻居节点状态确定自己在群集中的角色, 包括群首、群网管和群成员。群网关同时属于 2 个邻居群集, 实现群间消息的中继传播。群首管理群内通信、媒体接入功能, 分配群内通信资源。因此, 群首选择极大地影响群集性能。群首推举需要综合考虑群连通性、群稳定性、群范围、节点信道质量、节点位置等要素^[12]。由于模糊逻辑能有效处理不确定变量引起的模糊性^[13], 其适合于动态的高速交通网络中推举群首^[14]。高速交通网络中, 若被动群集仅在同向行驶的车辆间建立群, 两车道时, 从右车道行驶车辆中选择群首, 三车道时, 从中间车道行驶车辆中选择群首^[6], 则典型两车道被动群集通信模型如图 1 所示。

设车道 2 中发生车辆碰撞事故, 相关车辆车载传感器检测到该事件后生成简短的交通事故预警消息, 包括事故位置、时间、事故类型, 如图 1 中深色碰撞消息, 该消息被周期性上传至所属群群首 V_1 , 群首在控制信道时隙内广播该消息, 对群内其他车辆进行安全告警。若此路段车流密集, 相邻群集间存在网关车节点, 如 V_2 , 则网关车节点收到群首 V_1 广播消息后, 在下一个时隙上传到相邻群集群首 V_3 , V_3 在其群集范围内广播预警消息, 网关车节点直接丢弃重复消息。若此路段车流稀疏, 相邻群集间没有网关车节点, 说明此时交通事故车辆群集后没有跟随车辆, 不会造成交通事故恶化, 因此, 事故群集群首 V_1 将携带该预警消息以备通过后续可能的网关节点进行中继转发。当群首检测到事故位置远离其 OBU 通信范围后丢弃携带的预警消息。

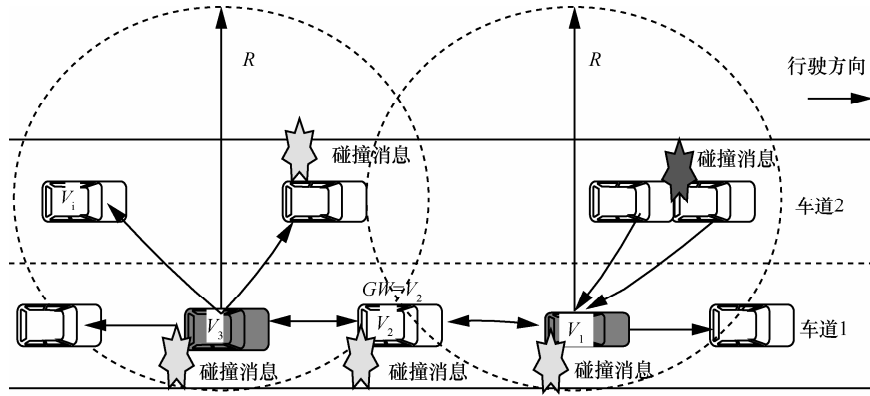


图 1 两车道被动群集通信模型

虽然高速交通的每个车节点均具有高移动性，但受限于交通安全规则和车道行驶速度规定，车节点间保持一定的安全距离和较低的相对行驶速度，因此，基于相对速度群集车节点能够延长群生存时间、减小重新群集的额外开销、提高安全消息传输效率。设车载单元（OBU, on-board unit）的无线通信距离为 R ，则当车节点 i 和 j 间距离 $D_{i,j}$ 小于 R 时，称这 2 个车节点互为邻居，记节点 i 邻居为节点 j 。

$$N_i = \{j \mid D_{i,j} < R\} \quad (1)$$

设通信距离为 R 的范围内存在 M 个车节点，车节点 i 的邻居列表中邻居节点数为 L_{N_i} ，它反映了车节点 i 与群内任意其他车节点 j 间的关联强度，则在控制信道间隔（CCI, control channel interval）周期内有

$$L_{N_i} = |N_i| = \text{count} \{j \mid D_{i,j} < R\} \quad (2)$$

设 R 内车节点 i 与邻居节点 j 的平均相对速度为 V_{AR_i} ，它反映了车节点 i 在群内运动的相对稳定性。若车节点 i 和节点 j 行驶速度分别为 v_i 、 v_j ，则在 CCI 周期内有

$$V_{AR_i} = \frac{1}{L_{N_i}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{L_{N_i}} |v_i - v_j| \quad (3)$$

在实际高速交通中，车节点行驶速度规范为 60~120 km/h，则车间相对速度 V_R 为 [0,60] km/h。设规定车间安全距离不小于 100 m，控制信道 OBU 有效通信范围 R 限定为 250 m，忽略群首 OBU 天线在邻居车道边界弧形相交带来的通信距离缩短，则在 OBU 天线全向通信距离 $2R$ 内，当且仅当群首位于所在车道通信范围的圆心时，群内有最大车节点数，此时群首所在车道最大能容纳 5 个车节点，

而无群首车道，此时最大能容纳 6 个车节点，因此，两车道同向行驶车节点群集范围内最多节点数为 11 个，即最大邻居节点数 $L_{N_{max}}=10$ 。在每个 CCI 周期，车节点的邻居列表和平均相对运动速度都会动态更新，若完全基于更新的参数集推举群首并更新群集，必然导致过强的群动态性，因此，应用模糊理论分别将相对速度和邻居节点数参数集实现为模糊化隶属函数 $T(V_R)$ 、 $T(L_N)$ 。

$$\begin{cases} T(V_R) = \{\text{低}, \text{中}, \text{高}\} = \{L, M, H\} \\ T(L_N) = \{\text{小}, \text{中}, \text{大}\} = \{S, M, B\} \end{cases} \quad (4)$$

相对速度和邻居节点数变量的模糊隶属函数分别为 μ_{V_R} 、 μ_{L_N} ，如图 2 和图 3 所示。

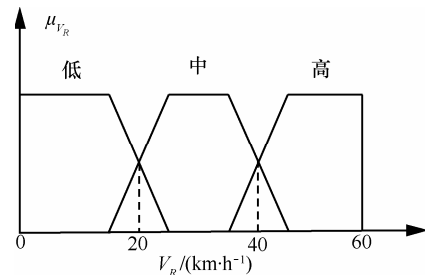


图 2 平均相对速度隶属函数

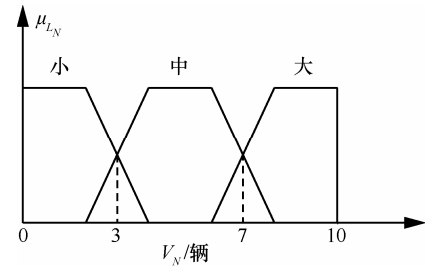


图 3 邻居节点数隶属函数

在高速 V2V 通信中，由交通事件触发的安全告警消息具有极大的传播冗余性，而该类消息的快

速、可靠传播却最能避免交通事故的恶化，因此，有效推举群首并建立高稳定性的群集通信模型有助于提高交通安全。在车节点群集过程中，设群首推举输入变量为节点平均相对速度和邻居节点数，则由模糊隶属函数建立的群首推举模糊规则库如表 1 所示，选择群内具有最大稳定性和最大关联度的车节点为群首，由此构建通信范围内运动车节点的群集通信模型。

表 1 群首推举规则库

规则序号	V_R	L_N	群首机会
1	低	小	相对低
2	低	中	高
3	低	大	非常高
4	中	小	非常低
5	中	中	低
6	中	大	相对高
7	高	小	非常低
8	高	中	非常低
9	高	大	非常低

群首负责管理群内通信，群成员仅上传本地消息给群首，并接收群首广播消息。群网关直接连接 2 个相邻群集的群首，实现群首间的消息中继。网关节点选择主要考虑与 2 个相邻群首间的相对运动速度（稳定性）和网关节点信道质量（接收信噪比）参数，亦可基于模糊逻辑推理实现。

在车联网中，群集的稳定性定义为群持续生存的时间^[4]，设以车节点 i 为群首建立群集 i ，节点 i 行驶速度为 v_i ，道路位置坐标为 (x_i, y_i) ，群内任意成员节点 j ，行驶速度为 v_j ，道路位置坐标为 (x_j, y_j) 。OBU 有效通信距离为 R ，两车间欧几里德距离为 D ，则当 $D \leq R$ 时 2 个节点连通，群集连通模型如图 4 所示。

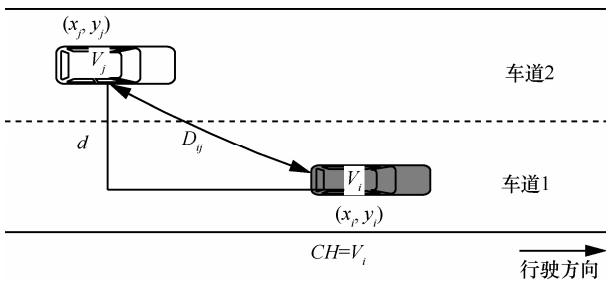


图 4 群集连通模型

设群首车节点 i 与任意成员节点 j 的相邻车道

间距为 $d=|y_i-y_j|$ ，相对速度差为 $v_{ij}=|v_i-v_j|$ ，相互连通持续时间为 T_{ij} ，由 $D_{ij} = \sqrt{(v_{ij}T_{ij})^2 + d^2} \leq R$ 可得

$$T_{ij} \leq \frac{\sqrt{R^2 - d^2}}{v_{ij}}$$

若令 $c = \sqrt{R^2 - d^2}$ 为常数，则群首车节点 i 与群内 L_{N_i} 个邻居节点间的链路相互连通持续时间为

$$T_D = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{L_{N_i}} T_{ij} \leq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{L_{N_i}} \frac{c}{v_{ij}}$$

$$= c \frac{L_{N_i}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{L_{N_i}} v_{ij}} = \frac{c}{V_{AR_i}} \quad (5)$$

由群首推举方法可知，群首一般具有最低平均相对速度 V_{AR} ，因此，该节点群将具有最大连通持续时间 T_D ，即群集具有最大稳定性。

3 车联网被动群集连通性分析

在交通事件发生时，生成的安全预警消息后向传播完全依赖于车联网中车节点间的连通状态。根据消息传播模式，车联网连通性可分为群内成员节点与群首间的广播链路连通性和相邻群集间的中继路径连通性。

3.1 群内连通性分析

若群集车节点 OBU 有效通信距离为 R ，车道宽度为 $B=5$ m，车间安全距离为 $D_s \geq 100$ m $\geq B$ ，此时可忽略相邻车道宽度对信号传播影响，则群成员节点 j 与群首 i 间距离为 $D_j = |v_i - v_j| T_{ij}$ ， T_{ij} 为成员节点 j 与群首 i 间的持续连通时间，如图 5 所示。

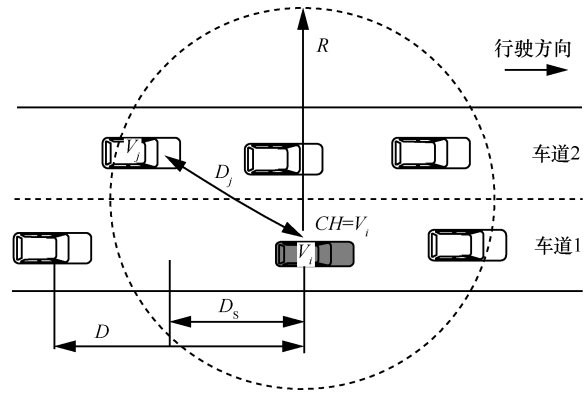


图 5 群内连通性分析模型

若群首 i 邻居节点数为 L_{N_i} ，该群内所有车节点数为 $L_{N_i}+1$ ，群内每车道通信范围为 $2R$ ，两车道通信范围为 $4R$ ，设所有车节点均匀分布（节点密度

最小)于群路段车道,则群内节点密度为 $\rho = \frac{L_{N-i}+1}{4R}$ 。在大范围高速公路上,行车道中车间距 D 为指数分布^[8],其分布函数为 $F(D) = 1 - e^{-rD}$, $D \geq 0$ 。当群内成员节点 j 与群首 i 间距离 D_{ij} 不大于有效通信距离时,称该节点与群首间链路是连通的(忽略物理层信道影响),则群内连通概率为

$$P_c = \prod_{j=1}^{L_{N-i}} P\{0 \leq D_{ij} \leq 2R\} = \prod_{j=1}^{L_{N-i}} (1 - e^{-r2R}) = \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{N-i}+1}{2}\right)\right)^{L_{N-i}} \quad (6)$$

因此,群内链路连通概率是群首邻居节点数的非线性函数,即仅与群内车节点密度有关,而与群平均相对速度无关,此时仅考虑了群内消息的扩散程度,没有考虑扩散方向。

3.2 群间连通概率分析

群网关节点是实现群间连通的关键,它同时属于 2 个相邻群集,若存在群网关节点,则必有相邻群首间距 $L \in (R, 2R)$ 。若某路段上车节点均匀分布,则 L 内节点密度为 $\rho = \frac{L_{N-i}+1}{4R}$,所以,只有相邻群集间至少存在一个网关节点时,群间实现连通。实际高速交通中,相对于 OBU 通信距离,车道宽度 $B \ll R$,因此,群间网关节点分布模型可简化为图 6。

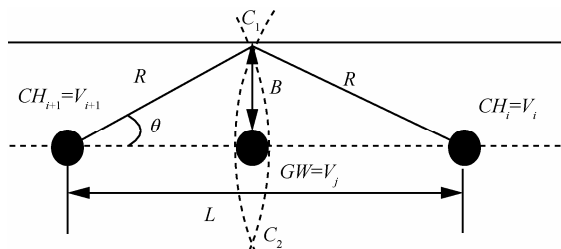


图 6 群间网关节点分布模型

设相邻群集通信范围同时相交于群间车道边的同一点上,如图 6 中 C_1 、 C_2 点,有效通信距离和路宽分别为 $R=250$ m, $B=5$ m,则相邻群交集水平距离 $\Delta L = 2(R - R \cos \theta) = 2(R - \sqrt{R^2 - B^2}) \approx 0.1$ m,此时该区间不足以存在一个网关车节点,因此,网关节点只能存在于图 7 模型中相邻群集 4 个相交点间的区域 $A\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 中。

由图 7 可知,相邻群集群首间的路段有效通信区域为 $A\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = 2BL$,则连通相邻群集的群

网关车节点必存在于相邻群集交叉道路区域 $A\{C_1, C_2, C_3, C_4\} = 4A\{D_1, D_2, D_3, C_3\} + 4A\{C_3, D_3, D_4\}$,其中, $A\{D_1, D_2, D_3, C_3\} = B(R \cos \theta - 0.5L)$, $A\{C_3, D_3, D_4\} = \frac{\pi R^2 \theta}{360} - 0.25BR \cos \theta$ 。

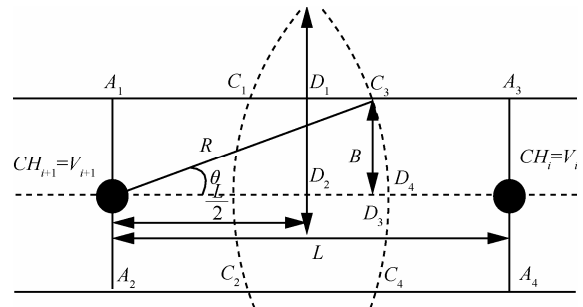


图 7 群间连通性分析模型

设车节点均匀分布于路段,此时相邻群集群首间具有最小可能连通概率,则群成员担当网关节点的概率为

$$P_{GW} = \frac{A\{C_1, C_2, C_3, C_4\}}{A\{A_1, A_2, A_3, A_4\}} = \frac{4B(R \cos \theta - \frac{L}{2}) + 4(\frac{\pi R^2 \theta}{360} - \frac{1}{2}BR \cos \theta)}{2BL} \quad (7)$$

其中, $R = 250$, $B = 5 \times \frac{500 - L}{L}$ 。

群内成员与群首连接概率为 $P_c = 1 - e^{-rD}$,则同时连接相邻 2 个群首的网关节点连通概率至少为 $P_{GWc} \geq (1 - e^{-R\rho_i})(1 - e^{-R\rho_{i+1}})$,因此,群成员节点作为网关节点并实现相邻群连通的概率 P_{Chc} 为

$$P_{Chc} = P_{GW} P_{GWc} \geq (1 - e^{-\frac{L_{N-i}+1}{2}})(1 - e^{-\frac{L_{N-i+1}+1}{2}})(\frac{500}{L} - 1) \quad (8)$$

式(8)显示群间连通概率不仅与群首邻居节点数(道路节点密度)有关,还与邻居群首间距有关。当车节点均匀分布且 $L_{N-i} = L_{N-i+1}$ 时, P_{Chc} 取极小值。

若在相邻群集通信区间无交集时,选择群集边界车节点担当群网关,此时网关节点不能同时连接相邻群集群首,因此,网关节点需要基于泛洪广播模式进行安全消息中继传播。但是,群内前后增加 2 个具备广播功能的群网关节点,将使群内成员节点与群首通信时的接入碰撞概率增大,导致群内连通概率降低,而以提高远距离连通概率降低近距离连通概率的通信模式并不适合于高速紧急消息的

快速可靠传播，反而增加了近距离交通事件的发生概率，因此，当相邻群集间无同时连接邻居群首的网关节点时，由群首采用存储—携带—转发方式进行机会中继传播。

4 仿真分析

针对提出的高稳定被动群集消息传播模型的车联网连通性进行了计算仿真，仿真假定同向两车道行驶路段长度为 1 km（即至少存在 2 个群集），如图 1 所示，车载 OBU 通信距离 $R=250$ m，车道宽 $B=5$ m，考虑高速公路车间安全间距至少为 100 m，则仿真路段两车道上总共的车节点数最多为 21 个。设右车道车辆速度随机取值范围为 $v_r \in [60,100]$ km/h，左车道车辆速度随机取值范围为 $v_l \in [80,120]$ km/h，所有群首均位于右车道，则群首邻居节点最多为 $L_{N_max}=10$ 个（为了方便仿真计算，设邻居节点至少为 1 个），邻居列表交换和相对速度计算周期为 50 ms。在满足交通安全行驶条件下，车节点随机分布的车辆密度小于均匀分布的车辆密度，因此，仿真中设置车节点在道路上均匀分布，此时最容易导致连环交通事故，也最需要传播交通预警消息。当两节点处于彼此通信范围时即认为两节点是连通的（忽略信道特征和接入竞争对连通性的影响）。

定义群内连通概率为群成员节点与群首在群周期内保持连通的节点数与邻居节点总数之比。设群首邻居节点数从 1 逐步增大到 10，车节点间距为 $D \in [100,250]$ m，车间相对行驶速度取正半轴值，即 $V_R \in [0,60]$ km/h，仿真取初始速度差为 0.001 km/h。根据文献[5]，链路生存时间 T_L 相当于群内 2 个车节点间连通时间，且有 $T_{Lij} = \frac{-V_R D + |V_R| R}{(V_R)^2} = \frac{R - D}{V_R}$ ，选择具有最大连通时间 T_{Lmax} 的 2 个车节点中前面行驶的车节点为群首并建立群集通信模型，则所提群集方法与文献[5]群集方法的群内连通概率如图 8 所示。

从图 8 可以看出，随着群成员增加（受节点均匀分布限制），群首通信范围内邻居节点数增多，提高了群内连通概率。在车节点低密度状态下，相对于理论分析，仿真结果连通概率更低，因为均匀分布状态下车节点有 0.5 的概率处于道路的另一半距离范围内，使其与本群首不能连通。但是，在节点高密度状态下，仿真结果接近于理论分析结果。若选择车节点间链路生存时间最大的 2 个车节点中

前面行驶的车辆为群首并建立被动群集模型，则当邻居车节点数小时，其连通概率较优，但随着邻居节点数的增加和车节点相对行驶速度的动态变化，导致不同车节点间的链路生存时间动态变化，并变更群首，重建新的节点群集，反而引起通信链路中断，降低了群内连通概率。

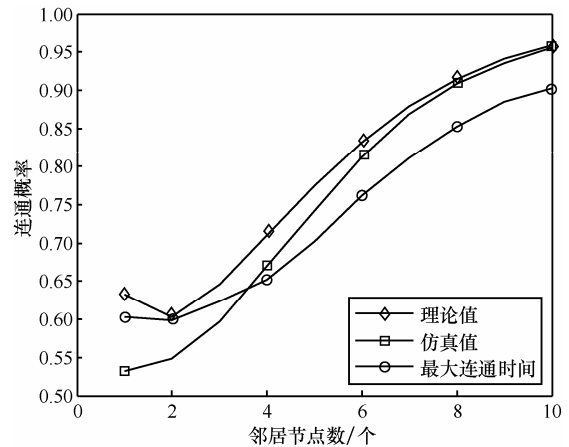


图 8 群内连通概率曲线

定义群间连通概率为群持续周期内与相邻群首同时连通的网关节点数与网关节点总数之比。仿真中网关节点选择同时连接相邻群首且邻居节点数最大的节点，通过设置群首邻居列表变化实现路段邻居节点均匀分布。设相邻群首间距为 $L \in (250, 500)$ m，群首邻居节点数分别为 $L_{N_i}=5$ 或 10 个，则群间连通概率与群首间距关系曲线如图 9 所示。

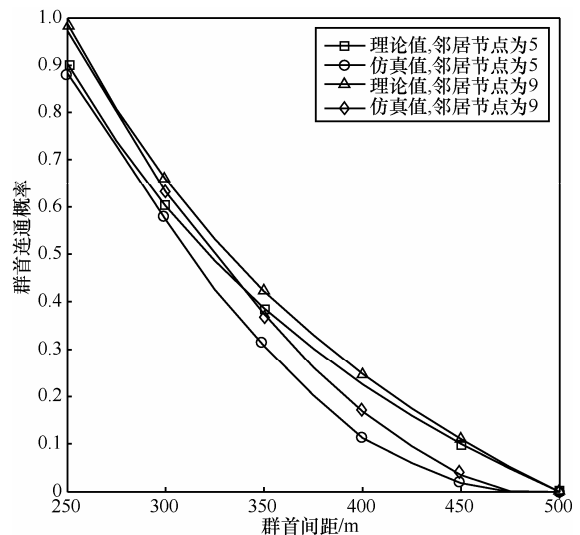


图 9 群间连通概率曲线

从图 9 可以看出，在车辆密度固定的情况下，群间连通概率随着群间间距增大而减小，当距离超

过 350 m 时, 连接概率不足 50%, 此时安全消息群间传播性能得不到保障。从图 9 中还可看出车辆密度仅在群首间距较小时, 对群间连接概率有较大影响, 而群间距离较大时, 邻居群集间交叉区域较小, 位于此处承担网关的节点概率小, 因此, 两者连通概率接近且很小。

5 结束语

车联网是移动无线网络在交通运输网络中的扩展应用, 是交通业务消息承载和传输的载体, 而车联网的有效连通是交通安全消息及时可靠传输的保障。针对交通事故消息广播冗余性和高速公路交通中的高动态性特征, 提出了基于车间相对行驶速度的被动群集通信模型, 理论证明了该群集方法具有最大的群稳定性, 有助于交通安全消息的可靠传播。随后基于被动群集的时间连续性, 分析了群内链路的连通概率, 得到群内连通概率与车辆分布密度间的关系式。基于被动群集的空间覆盖范围, 分析了群间中继链路的连通概率, 得到该连通概率与群首间距间的关系式, 为车联网中交通安全消息的传播实现奠定了理论基础。为减小复杂度, 分析过程中忽略了帧接入碰撞、物理信道衰落和干扰、车节点随机分布等影响, 因此, 综合考虑不同因素对被动群集通信模型的连通性影响需要进一步研究。

参考文献:

- [1] WU X Z, SUBRA S, GUHA R, et al. Vehicular communications using DSRC: challenges, enhancements, and evolution[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications/Supplement, 2013, 31(9): 399-498.
- [2] CHITRAL M, SATHYA S S. Efficient broadcasting mechanisms for data dissemination in vehicular ad hoc networks[J]. International Journal of Mobile Network Communication & Telematics (IJMNCT), 2013, 3(3): 47-63.
- [3] SAIF A S, MOATH M A D, ALI H A B, et al. A comprehensive survey on vehicular ad hoc networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 37(1): 380-392.
- [4] RASMEET S B, NEERAJ K, JOEL J P C R. Clustering in vehicular ad hoc networks: taxonomy, challenges and solutions[J]. Vehicular Communications, 2014, 1(3): 134-152.
- [5] WANG S S, LIN Y S. PassCAR: a passive clustering aided routing protocol for vehicular ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2013, 36(2): 170-179.
- [6] MOHAMED A, ABDELFTTAH B, BADIA B. Cluster connectivity assurance metrics in vehicular ad hoc networks[C]// The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2015). 2015, 52: 294-301.
- [7] 刘业, 吴国新. 基于 802.11p/WAVE 的车联网连通性模型及其应用研究[J]. 通信学报, 2013, 34(6): 85-91.
- LIU Y, WU G X. Study on the connectivity model of VANET based on 802.11p/WAVE and its application[J]. Journal on Communications, 2013, 34(6): 85-91.
- [8] SOOKSAN P, WASAN P A. Connectivity requirements for self-organizing traffic information systems[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3333-3340.
- [9] 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[J]. 软件学报, 2010, 21(11): 2906-2919.
- XIONG W, LI Q Q. Prerequisite to 1-connected vehicular ad hoc networks in highway scenarios[J]. Journal of Software, 2010, 21(11): 2906-2919.
- [10] JIA D Y, LU K J, WANG J P. On the network connectivity of platoon-based vehicular cyber-physical systems[J]. Transportation Research: Part C, 2014, 40: 215-230.
- [11] TAO Y, LI N, ZANG W X. Research on region-based vehicular ad hoc network clustering algorithm[C]// International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AM-CCE2015). 2015: 2264-2269.
- [12] SUJATA B, LAKSHIMI N, LALITA T. Review on cluster-head election mechanisms for clustering based routing in mobile ad hoc network[J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2014, 7(4): 1-3.
- [13] HAFEEZ K A, ZHAO L, LIAO Z Y, et al. A fuzzy logic based cluster head selection algorithm in VANET[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). 2012:203-207.
- [14] BEN A S, EZZATI A, MOHSEN A. Gateway and cluster head election using fuzzy logic in heterogeneous wireless sensor networks[C]// International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS 2012). 2012: 761-766.

作者简介:



邱恭安 (1973-), 男, 湖北浠水人, 博士, 南通大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为交通通信、认知无线网络。



包志华 (1955-), 男, 江苏南通人, 南通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络与安全、交通安全监管系统。

章国安 (1965-), 男, 江苏南通人, 博士, 南通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知车载无线通信网络。

张士兵 (1962-), 男, 江苏南通人, 博士, 南通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络、车载紧急通信。