

文章编号: 2095-4980(2015)01-0094-07

## 车联网中基于分布式博弈的移动网关选取算法

张齐新, 杨涛, 冯辉, 胡波

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

**摘要:** 提出一种基于 VANET-CELLULAR 混合架构的车联网(VANET)。在这种架构下, 车辆可以根据一些原则动态成簇, 在这些簇中, 通过车辆间分布式博弈快速选取最少数量的车辆作为移动网关, 将本地 VANET 接入蜂窝网络, 并随着簇的网络拓扑变化动态更新网关, 以最大化车辆数据传输的性能。考虑到车辆节点的自私特点, 分布式博弈可以有效地提高移动网关节点的积极性, 使得算法的可行性增强。仿真结果表明该算法能高效选取车联网移动网关。

**关键词:** 车联网; VANET-CELLULAR 混合架构; 网关选取; 博弈论

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0094

## A distributed game theoretic approach for dynamic gateway selection in VANETs

ZHANG Qixin, YANG Tao, FENG Hui, HU Bo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** A VANET-CELLULAR integrated network architecture is proposed to ensure efficient data exchanging for various applications in Vehicular Ad-hoc NETWORK(VANETs). In this architecture, vehicles are dynamically clustered by related metrics, and those vehicles conformed to the context-aware requirement are selected as mobile gateway to link the 3GPP networks. A distributed game theoretic approach is adopted to stimulate vehicles to cooperate with their neighbors, and the overall performance of communication is improved by evolutionarily maximizing each vehicle's own utility. The simulation results show that this approach works efficiently in selection of the minimal mobile gateways in VANETs.

**Key words:** Vehicular Ad-hoc NETWORK; VANET-CELLULAR integrated; gateway selection; game theory

智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)的概念自上世纪 80 年代首次提出后就引起了研究人员的广泛关注。比较著名的研究项目有加利福尼亚的 PATH(Partners for Advanced Transit and Highways)项目, 日本的 ASV(Advanced Safety Vehicle)项目以及欧洲的 PROMOTE CHAUFFEUR 项目<sup>[1]</sup>。随着无线通信技术的发展和标准化, 车联网领域的相关技术也在不断完善。1999 年, 美国联邦通信委员会将 5.850 GHz~5.925 GHz(75 MHz)频段分配给运输服务领域的短程通信。之后在 2004 年, 电气和电子工程师协会修订了 802.11p 协议, 又称 WAVE (Wireless Access in the Vehicular Environment)<sup>[2]</sup>。这种近距离通信对于短程的数据交换传输速度快, 用于车车之间、车与路边单元间的短程高速率通信, 基于这类通信可以提供实时的碰撞警告、路面安全信息等服务。但是由于车辆节点的快速移动, 车联网网络拓扑动态变化, 因此保证远程车辆间可靠通信成为一项挑战<sup>[3-4]</sup>。另一方面, 近几年 3G/4G 蜂窝网络的发展很快, 比如通用移动通信系统, 其覆盖范围已非常广泛, 对于远程的终端间通信, 以及终端接入因特网能提供稳定可靠的服务, 但是一般对于交换的数据流量有限制。VANET-CELLULAR 混合架构的车联网将这 2 网络优势互补, 实现车辆不论在何时、何地都能得到可靠的移动数据访问服务。

目前已经有不少文献对这类混合架构的车联网进行了研究<sup>[5-8]</sup>。文献[6]最早提出了比较完善的通过分簇和网关选取接入 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System)网络的方法。该方法首先对车辆按照接收信号质量及 IEEE 802.11p 的传输范围等进行分簇, 然后在簇内选取簇头, 簇头用于提升簇内部数据传输性能, 同时也是移动网关的候选节点。在这些簇中, 移动网关通过计算中心控制分配, 并动态更新。这种方法需要有统一处理的

计算中心，并且对于移动网关的激励不足，很难保证每辆车都能主动遵从这样的协议。文献[7-8]考虑到上述问题，分别给出了基于合作博弈和基于价格控制的方法来提高协议的可行性，文献[7]中采用树形结构的车联网模型，数据转发效率提升但是动态适应性不够；文献[8]通过价格竞争自主选取移动网关，对网关车辆有一定激励作用，然而竞价过程在实际车辆中进行比较困难。本文提出了一种新的基于分布式博弈的算法来解决动态网关的选取问题：

- 1) 本文的算法是分布式进行的演化博弈，速度较快，并且与网络规模无关；
- 2) 博弈的迭代更新算法采用了基于记忆的最优反应<sup>[9]</sup>，这种更新只需要附近邻居车辆的信息，并且在达到均衡后自动停止博弈；
- 3) 在多数情况下，本文的网关选取算法能在保证每辆车都能接入蜂窝数据的前提下选取最少的网关，有效防止了基站负担过重问题。

## 1 模型准备

### 1.1 模型的基本假设

对于车联网中的多数应用，能够获得移动数据的接入非常必要<sup>[10-11]</sup>。以导航应用为例，路线的规划往往需要实时的路况更新，保证移动数据的随时获取有利于正确高效地导航。目前，主要有 2 种移动数据的获取方式，其一是通过架设昂贵的路边单元(Road Side Unit, RSU)体系；另一种就是利用范围覆盖广泛的蜂窝数据连接，但是需要支付一定的流量费用。就目前的情况来看，后者的可行性要高于前者。本文将围绕 2 种通信技术：本地 WAVE 通信和 3G/4G 蜂窝数据通信，详细讨论车辆分簇合作获取移动数据的博弈模型。分簇合作获取移动数据有很多优点，一方面，车辆可以根据自身利益选择直接与基站 3G/4G 蜂窝数据通信或者依靠其他网关车辆转发移动数据(为了保证移动数据服务质量，本文只针对网关车辆的单跳转发方式建模)；另一方面，考虑到位置邻近的车辆需要的移动数据的相似性，比如在导航应用中，同一条道路上行驶的车辆有很大可能需要相同的路况信息，这些数据称为公共信息数据，公共信息数据的高度可复用特点有利于节省成本。分簇合作获取蜂窝数据的方式从整体上减少每辆车访问移动数据的成本，并防止基站负担过重。但在这过程中，作为移动网关的车辆从基站获取移动数据并转发给周围邻居车辆，需要付出额外的代价，所以有必要对移动网关的分享行为进行激励以保证协议的可行性。因此，对模型作如下基本假设：

- 1) 车辆自主分簇，所有车辆能进行 WAVE 通信，大部分车辆能进行蜂窝数据通信；
- 2) 能进行蜂窝数据通信的车辆可以自主决定是否成为移动网关，簇中的用户车辆(即接受网关服务的车辆)需要向移动网关支付一定的服务费用；
- 3) 在移动网关车辆间可以分享公共信息数据，并且相互免费。

### 1.2 符号说明

使用符号  $Q$  来表示每辆车需要访问的移动数据流量，博弈中的成本和支付的费用均与  $Q$  有关。移动网关访问蜂窝数据单位流量的成本系数为  $\zeta$ ，这样访问流量  $Q$  的移动数据需要成本为  $\zeta Q$ 。而单位流量价格系数  $\lambda$  是由移动网关自主决定的量，例如向用户车辆转发流量为  $Q$  的数据需要收取费用  $\lambda Q$ 。这些系统都经过归一化处理，所以一般  $\zeta$  和  $\lambda$  都小于 1。

符号  $\eta$  是公共信息数据在总流量中的比例，即： $\eta = \text{公共信息数据} / (\text{公共信息数据} + \text{私人信息数据})$ 。这是一个统计参数，在后面的仿真中，设定  $\eta = 0.5$ 。

## 2 博弈模型

在给出博弈模型之前，需要对几个问题进行说明：

1) 为什么使用博弈理论建模？分簇算法在传感器领域的应用很普遍<sup>[12-14]</sup>，但是直接将这些算法运用到车联网中会有很多问题<sup>[15]</sup>。首先是车辆由人驾驶，自主性很强，存在一些社交属性，比如私密性；其次是车联网拓扑结构变化快，动态性强，而博弈论对于解决以上问题非常适合。因此使用博弈理论来激励车辆合作并在动态变化中更新博弈。

2) 建立模型要达到的目标是什么？高效的网关选取意味着：首先，博弈要能在有限更新步内较快完成；其次，选择的移动网关数量尽量少；最后，每辆车的博弈交互应是分布式的，只利用各自邻近车辆的信息。

2.1 车辆的动态分簇

车辆的分簇过程如下：

- 1) 每辆车通过 802.11p 射频模块发现周围传输范围内的邻居车辆；
- 2) 根据车辆的行驶速度、行驶方向及信号质量来自主决定是否加入同一簇中；
- 3) 每辆车通过广播获得自身邻居车辆的信息，为博弈做准备。

图 1 给出了一个车辆分簇的简单示例，节点代表车辆，连线代表车辆之间可以 WAVE 通信，图中共 3 个分簇。

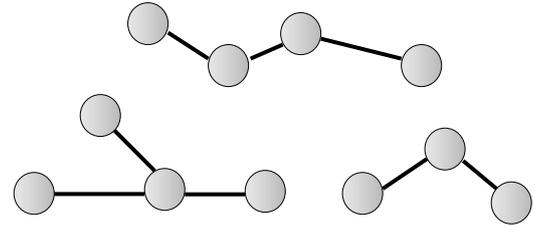


Fig.1 A simple example of clustering process  
图 1 分簇过程的简单示例

2.2 移动网关选取的分布式博弈算法

在本文的博弈模型中，当有车辆需要接入移动数据而没有合适的移动网关时，博弈开始。车辆会根据自身的邻居信息决定扮演用户车辆还是网关车辆。由于车辆获得的信息是局部的，而每一辆车又仅仅与邻居作博弈，因而博弈模型是分布式进行的。

参与人：在本文的模型中，参与人集合  $P = \{P_i | i \in \{1, 2, \dots, N\}\}$  包含了同一簇中的全部  $N$  个成员，需要注意的是，每一个簇都是一个独立的博弈。

策略集：策略集代表了每个参与人所能采取的全部行动，包括：a) 网关(Gateway)，简称为 G，表示车辆做移动网关为邻居车辆提供移动数据连接；b) 用户(User)，简称为 U，即作为用户从移动网关获取数据连接服务。参与者  $P_i$  的策略定义为  $s_i \in \{G, U\}$ 。显然，对于不能接入蜂窝数据的车辆的策略只能是 U。

收益：参与人  $P_i$  的收益不仅与自己的策略有关，而且与其邻居车辆的策略有关。本文的博弈模型是对称的，因此只需讨论以下 4 种情况的收益。

1)  $G-G(U_{gg})$ ：移动网关之间的收益包括 2 个部分：一部分是自身获得的移动数据流量  $Q$ ；另一部分是获取流量  $Q$  所支付的代价，考虑到数据中有部分数据为公共信息数据，这些数据可以通过网关之间免费分享，假设公共数据的占比为  $\eta$ ，单位流量的成本为  $\zeta$ ，那么  $U_{gg} = Q - \zeta(1-\eta)Q$ ；

2)  $G-U(U_{gu})$ ：移动网关对用户车辆的收益也可以分成 2 部分：一部分是自身获得的移动数据流量  $Q$  加上向用户车辆的收费，即  $(1+\lambda)Q$ ；另一部分则是获取移动数据的代价，为  $\zeta(2-\eta)Q$ 。因此  $U_{gu} = (1+\lambda)Q - \zeta(2-\eta)Q$ 。

3)  $U-G(U_{ug})$ ：用户车辆对移动网关的收益为自身获得的流量  $Q$  减去支付给移动网关的服务费用，即  $U_{ug} = (1-\lambda)Q$ 。由于  $\lambda$  总是小于 1，因此用户车辆能自觉维持分簇合作的稳定。

4)  $U-U(U_{uu})$ ：用户车辆与用户车辆间无数据交换，因此  $U_{uu} = 0$ 。

表 1 总结了上述收益。显然，本文的博弈模型是一个多人博弈，因此，移动网关的收益是与其邻居车辆各自收益之和，即

$$U_g = \sum U_{gg} + \sum U_{gu} \tag{1}$$

同理，用户车辆的收益可以表示为

$$U_u = \sum U_{ug} + \sum U_{uu} \tag{2}$$

在博弈过程中，每辆车都想最大化自身收益，引入下面的定义<sup>[16]</sup>：

**定义 1(最优反应)**：参与人  $P_i$  的最优反应，是给定其他参与人的策略  $S_{-i}$ ，所采取的最大化自身收益的策略，即

$$s_i^*(S_{-i}) = \arg \max U_i(s_i, S_{-i}) \tag{3}$$

每当车辆的邻居改变策略，都会影响到自身的策略，而自身策略的改变又会影响到邻居车辆的策略，如此反复迭代，这一过程通常称之为演化博弈的更新过程，并且对于更新算法也有很多讨论<sup>[16]</sup>。对于本文使用的更新算法会在 2.3 节详细介绍。当博弈演化到这样一个特殊状态，在这个状态下每个参与人都不能通过仅改变自身策略来获得更大收益，称博弈达到均衡状态。

**定义 2(纳什均衡)**：如果对于策略集  $S^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*\}$ ，其中每个参与人  $P_i$  的策略  $s_i^*$  都是他的最优反应，即

$$s_i^* \in \arg \max U_i(s_i^*, S_{-i}^*) \tag{4}$$

那么博弈达到纳什均衡。

表 1 收益矩阵

Table1 Payoff matrix		
strategy&payoff	Gateway(G)	User(U)
Gateway(G)	$Q - \zeta(1-\eta)Q$	$(1+\lambda)Q - \zeta(2-\eta)Q$
User(U)	$(1-\lambda)Q$	0

在均衡状态下，每辆车都不再改变策略，用户车辆通过网关转发数据来节省访问移动数据的成本，网关车辆通过向用户收取费用来获取利润。但是这样的分簇合作能否有效进行还需要进一步分析。

### 2.3 模型分析

需要分析的第一个问题是移动网关的覆盖问题。本文博弈的任务是快速给簇中成员选取一个或多个移动网关，保证每辆车的移动数据访问。那么如何保证每次博弈达到均衡后，所有用户车辆都能获取移动数据？也就是说，博弈模型需要确保，最后每一个用户车辆的邻居车辆至少有一辆是网关。

**定理 1:** 如果定价  $\lambda$  满足

$$\xi(1-\eta) - \frac{1-\xi}{K_{\max}} < \lambda < \xi(1-\eta) \quad (5)$$

式中  $K_{\max}$  表示簇中的节点的最大度值。当博弈收敛至均衡状态后，每一辆车都会有至少一个移动网关为其服务。

**证明:** 假设  $P_i$  的邻居中有  $m(m \geq 0)$  个移动网关和  $n(n \geq 0)$  个用户车辆，下面根据  $m$  和  $n$  的取值分类讨论。

情况 1:  $n=0, m>0$ ，表明参与人  $P_i$  周围没有用户车辆，此时  $P_i$  采取  $G$  策略收益为

$$U_i(G, s_{-i}) = m[Q - \xi(1-\eta)Q] \quad (6)$$

采取  $U$  策略的收益为：

$$U_i(U, s_{-i}) = m(1-\lambda)Q \quad (7)$$

由于  $U_i(G, s_{-i}) - U_i(U, s_{-i}) = m[\lambda\xi(1-\eta)]Q < 0$ ，因此  $P_i$  的最优策略是  $U$ ，符合定理 1。

情况 2:  $n>0, m \geq 0$ ，表明参与人  $P_i$  周围至少有一个用户车辆，此时  $P_i$  采取  $G$  策略收益为：

$$U_i(G, s_{-i}) = m[Q - \xi(1-\eta)Q] + n[(1+\lambda)Q - \xi(2-\eta)Q] \quad (8)$$

采取  $U$  策略的收益为：

$$U_i(U, s_{-i}) = m(1-\lambda)Q \quad (9)$$

此时

$$U_i(G, s_{-i}) - U_i(U, s_{-i}) = m[\lambda - \xi(1-\eta)]Q + n[(1+\lambda)Q - \xi(2-\eta)Q] = Q[\lambda - \xi(1-\eta)] \left[ m+1 - \frac{n(1-\xi)}{\xi(1-\eta) - \lambda} \right] \quad (10)$$

由于  $m+1 \leq m+n \leq K_{\max}$ ，有

$$m+1 - \frac{n(1-\xi)}{\xi(1-\eta) - \lambda} \leq K_{\max} - m+1 - \frac{n(1-\xi)}{\xi(1-\eta) - \lambda} < 0 \quad (11)$$

并且  $\lambda - \xi(1-\eta) < 0$ ，因此  $U_i(G, s_{-i}) > U_i(U, s_{-i})$ ， $P_i$  的最优策略是  $G$ ，也符合定理 1。

证毕。这个定理保证了博弈均衡后不存在无法访问移动数据的车辆。

### 2.4 基于记忆的最优反应更新

下面讨论博弈模型的更新策略，即如何使得博弈能经过有限次迭代后收敛至均衡状态。最优反应是每一次车辆都做出在当前状态下收益最大的策略，而基于记忆的最优反应策略是在其基础上假定车辆能有限地记住之前  $r$  步的最优反应，以便下次可以从中选择。

基于记忆的更新步骤如下：

- 1) 在每一个时间片，车辆向邻居广播自身策略，首次策略随机产生；
- 2) 每一个参与人计算各自的收益并得到最佳反应策略；
- 3) 记录最新的最优反应策略至记忆存储中并丢弃最旧的策略；
- 4) 每一个参与人随机从自己记忆存储中选取一个策略作为下一次的策略；
- 5) 返回至步骤 1)，当所有参与人记忆存储中只有一种策略时，达到均衡。

在以上更新策略下，能否保证每次博弈都能在有限步内收敛至均衡状态呢？

**定理 2:** 如果定价  $\lambda$  满足定理 1，而且记忆步长  $r \geq 2$ ，那么博弈将以概率 1 收敛至均衡状态。

**证明:** 在给出正式证明之前，需要先引入几个定义。

首先定义  $S^t = \{s_1^t, s_2^t, \dots, s_n^t\}$  为在时间片  $t$  时刻的网络状态，则初始时刻的状态可表示为  $S^0 = \{s_1^0, s_2^0, \dots, s_n^0\}$ 。把从  $t$  时刻开始所有存储在记忆中的状态定义为  $h^t = \{S^t, S^{t+1}, \dots, S^{t+r-1}\}$ 。当博弈收敛到均衡状态，记  $h^* = \{S^*, S^*, \dots, S^*\}$ 。这样整个基于记忆的最优反应博弈过程可看成是一个状态为  $h^t$  的离散时间马尔可夫过程。显然， $h^*$  是一个吸收态。

定义  $h^i$  的所有状态空间为  $H^i$ ,  $h^*$  的状态空间为  $H^*$ 。如果在  $h^i$  中存在至少一个  $S^*$ , 记  $h^e = \{S_i | \exists S_i = S^*, i=1,2,\dots,r\}$ , 反之, 则记为  $h^{ne} = \{S_i | \forall S_i \neq S^*, i=1,2,\dots,r\}$ 。需要证明所有  $h^e$  状态(记为  $H^e$ )和  $h^{ne}$  状态(记为  $H^{ne}$ )最终都会转化为  $h^*$ 。即总存在一个正的概率使得  $h^i \in H^e \cup H^{ne}$  转化为  $h^*$ 。图 2 表明了以上状态关系。

下面分情况进行分析。

情况 1: 对于  $h^i = h^e \in H^e$ , 根据上述定义,  $h^i$  必定包含一些  $S^*$ 。由于  $S^*$  的最优反应依然是  $S^*$ , 所以  $S^*$  将再次存储至记忆中。因此, 总存在一个正的概率  $p_i$  使得  $S^*$  再次被选中作为下一时间片的策略。这种情况重复  $r$  次, 依然存在正的概率  $p = \prod p_i \dots p_{i+r-1}$ 。所以总存在一个正的概率  $p$  使得  $h^i$  转化为  $h^*$ 。

情况 2: 对于  $h^i = h^{ne} \in H^{ne}$ , 此时  $h^{ne}$  中不包含  $S^*$ 。以下将证明总是存在一个正的概率, 使得  $S^i \neq S^*$  转化成  $S^*$ , 前提是定价  $\lambda$  满足定理 1, 而且记忆步长  $r \geq 2$ 。

正如前面所分析的, 在定价  $\lambda$  满足定理 1 的条件下, 博弈过程中只有 2 种非均衡的状态形式: a) 用户车辆与用户车辆相连接; b) 一个移动网关节点周围全部为移动网关。

如果  $S^i$  是形式 a), ①假设这 2 个用户车辆的记忆里混合了策略  $G$  和  $U$ , 那么  $S^i$  必能以正概率转化为  $S^*$ ; ②假设这 2 用户车辆的记忆中都为策略  $U$ , 由于当前他们的最优反应都是  $G$ , 所以策略  $G$  将存入记忆, 又  $r \geq 2$ , 那么下一状态的博弈时刻他们的记忆里混合了策略  $G$  和  $U$ ; ③假设这 2 个用户车辆的记忆中都为策略  $G$ , 那么下一状态他们将转化为  $G-G$  连接, 此时他们要么已经是均衡状态, 要么将转为非均衡形式 b)-②。

如果  $S^i$  是形式 b), 采用类似的方式证明。①假设这些移动网关车辆的记忆里混合了策略  $G$  和  $U$ , 那么  $S^i$  必能以正概率转化为  $S^*$ ; ②假设这些移动网关车辆的记忆里都为策略  $G$ , 由于当前他们至少有一个参与人的最优反应是  $U$ , 所以策略  $U$  将存入记忆, 又  $r \geq 2$ , 那么下一状态的博弈时刻他们的记忆里混合了策略  $G$  和  $U$ ; ③假设这些移动网关车辆的记忆里都为策略  $U$ , 那么下次博弈将转为非均衡形式 a)-②。

综上, 情况 2 中总是存在一个正的概率使得  $h^{ne}$  转化为  $h^e$ , 又情况 1 中总存在一个正的概率使得  $h^e$  转化为  $h^*$ , 证毕。

### 2.5 动态性分析

由于车辆的快速移动, 分簇的拓扑结构动态变化, 如何适应这样的动态性是车联网数据传输问题中的难点, 本文的博弈模型通过以下方法提升动态性:

1) 针对边缘节点的优化。分簇过程考虑了车辆的行驶方向和相对速度, 在一定程度上保证了簇结构稳定, 网络拓扑发生改变概率最大的地方通常是簇的边缘节点。博弈过程可以在拓扑主体车辆策略不变的情况下, 边缘节点调整策略以快速恢复均衡状态;

2) 博弈过程异步进行。车辆在邻居策略发生改变后及时做出反应, 不必在同一时间片改变策略, 这样可以进一步提升博弈收敛速度。

### 2.6 网关选取协议的激励分析

表 2 列出了车辆加入或者不加入网关选取协议的收益对比。可以证明, 当博弈参数满足定理 1 时, 加入协议的收益都要大于不加入协议的收益, 因此本文的算法能够激励车辆遵行。

表 2 加入或者不加入协议收益对比  
Table2 Payoff inside/outside the protocol

strategy&payoff	as gateway		as user
payoff inside protocol	$(G-G):Q-\zeta(1-\eta)Q$	$(G-U):(1+\lambda)Q-\zeta(2-\eta)Q$	$(1-\lambda)Q$
payoff outside protocol	$(1-\zeta)Q$		

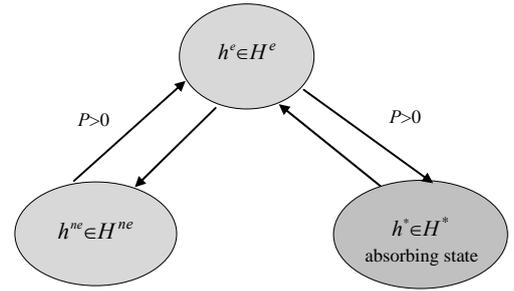


Fig.2 Relationship among game model states  
图 2 博弈模型的状态关系

### 3 性能评估

这部分将给出博弈模型的算法仿真。模型仿真的部分参数设置如下： $\zeta=0.8, \lambda=0.38, \eta=0.5$ 。

#### 3.1 博弈的收敛速度

图 3 给出了博弈收敛需要的迭代次数与簇内节点数的关系，给出的 4 条曲线对应于 4 个不同的记忆步长  $r$ ，每一个迭代次数都为 1 000 次重复后取的平均次数。从仿真结果看到，记忆步长  $r$  的增加将导致迭代次数增加，图 4 给出的 10 个节点簇的迭代次数与记忆步长关系进一步验证了这个关系。但若保持  $r$  不变，随着节点数目的增加，迭代次数甚至有下降的情况。这是因为博弈过程是分布式进行的，其收敛速度与网络的规模无直接关系。然而对于曲线部分存在的迭代次数上升现象，是由网络的拓扑结构对迭代次数造成的影响，仿真表明，近似星形的拓扑结构有利于减少收敛需要的迭代次数，如何利用这个特性将在后面的工作中研究。

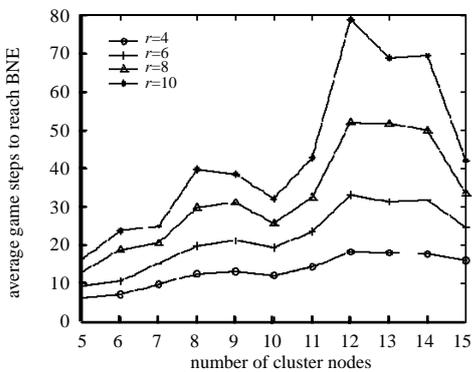


Fig.3 Relationship between number of cluster nodes and the game steps to reach a BNE  
图 3 博弈迭代次数与簇节点数的关系

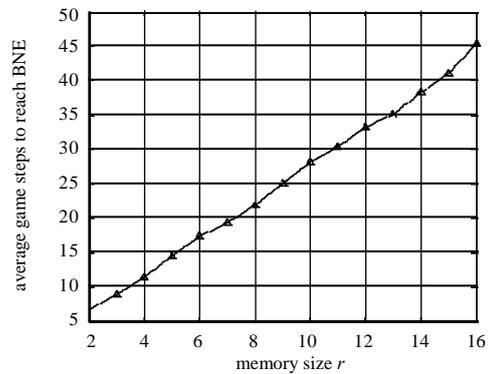


Fig.4 Relationship between memory size and the game steps to reach a BNE  
图 4 博弈迭代次数与记忆步长的关系

#### 3.2 网关选取性能

图 5 是对车辆节点数  $N=10$  的随机簇经过博弈收敛后网关选取性能分析，纵轴的选取网关数目是通过 1 000 次重复仿真后的平均值。表 3 列出了具体的网关选取数值。从中看出，最优的选取结果应为选出其中 3 辆车作为移动网关，而增加记忆步长  $r$  对网关选取的性能确实有所提升，但随着  $r$  值进一步增加，性能提升效果越来越不明显，基本上在  $r=6$  后已达到比较好的性能。而盲目增加记忆步长  $r$  的值会导致博弈收敛速度降低，在实践中取  $r \in [4,8]$  比较兼顾迭代次数与选取结果。

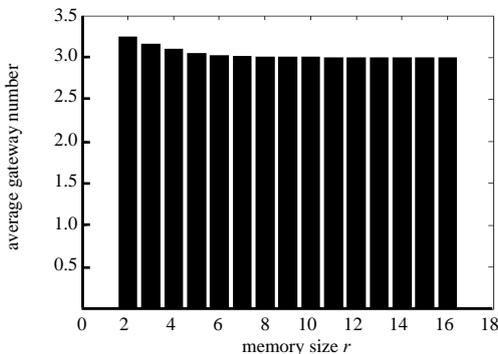


Fig.5 Relationship between average gateway number and memory size  
图 5 博弈均衡后平均网关数与记忆步长的关系

表 3 网关选择性能分析  
Table3 Evaluation of gateway selection performance

	gateway selection results of 1 000 repeated simulations( $N=10$ )							
	$r=2$	$r=4$	$r=6$	$r=8$	$r=10$	$r=12$	$r=14$	$r=16$
gateways =3	770	937	972	990	998	999	1 000	1 000
gateways =4	187	55	27	10	2	1	0	0
gateways >4	43	8	1	0	0	0	0	0
ratio	77%	93.7%	97.2%	99%	99.8%	99.9%	100%	100%

### 4 结论

在 VANET-CELLULAR 混合架构的车联网中，分簇合作与数据分享是一种充分利用基于 802.11p 的 WAVE

通信和覆盖广泛的蜂窝数据通信的有效方式。本文提出的基于分布式博弈的移动网关选取方案旨在激励车辆间的合作,达到整体收益提升。文中分析了博弈模型参数需要满足的条件以及如何保证博弈在有限步内收敛至均衡状态。仿真结果表明,博弈模型可以快速高效地选取网关,并对车辆合作分簇起激励作用。本文的方法仍有不足之处,比如博弈收敛所需迭代次数与生成簇的网络拓扑关系密切,如何在此基础上尽可能减少迭代次数将在未来工作中研究。

#### 参考文献:

- [1] Hartenstein H, Laberteaux K P. VANET: vehicular applications and inter-networking technologies[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [2] Hafeez K A, ZHAO Lian, MA B, et al. Performance analysis and enhancement of the DSRC for VANET's safety applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):3069–3083.
- [3] Mehta K, Malik L G, Bajaj P. VANET: challenges, issues and solutions[C]// 2013 6th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET). Nagpur: IEEE, 2013: 16–18.
- [4] Hartenstein H, Laberteaux K P. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6):164–171.
- [5] Setiawan F P, Bouk S H, Sasase I. An optimum multiple metrics gateway selection mechanism in MANET and infrastructure networks integration[C]// IEEE WCNC. Las Vegas: [s.n.], 2008: 2229–2234.
- [6] Benslimane A, Taleb T, Sivaraj R. Dynamic clustering-based adaptive mobile gateway management in integrated VANET – 3G heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(3):559–570.
- [7] LI Yuyi, YING Kai, CHENG Peng, et al. Cooperative data dissemination in cellular-VANET heterogeneous wireless networks[C]// High Speed Intelligent Communication Forum (HSIC). Nanjing, China: [s.n.], 2012: 1–4.
- [8] WU Chengyang, WANG Shangxing, BEN Ding, et al. Dynamic cluster based price control and gateway management for VANETs[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, ON: [s.n.], 2012: 3959–3963.
- [9] WANG W X, REN J, CHEN G R, et al. Memory-based snowdrift game on networks[J]. Phys. Rev. E, 2006, 74(5):056113.
- [10] ZHAO Qingwen, ZHU Yanmin, CHEN Chao, et al. When 3G meets VANET: 3G-assisted data delivery in VANETs[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10):3575–3584.
- [11] Andrea B, Francesca C. Infotainment services based on push-mode dissemination in an integrated VANET and 3G architecture[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3):1398–1405.
- [12] 唐显锭, 冯辉, 杨涛, 等. 无线传感器网络中用于目标跟踪的节点规划算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3):355–361. (TANG Xianding, FENG Hui, YANG Tao, et al. Sensor scheduling for target tracking in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3):355–361.)
- [13] DENG Xi, YANG Yuanyuan. Communication synchronization in cluster-based sensor networks for cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2013, 1(1):98–110.
- [14] Duc Chinh Hoang, Yadav P, Kumar R, et al. Real-time implementation of a Harmony search algorithm-based clustering protocol for energy-efficient wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1):774–783.
- [15] CHAI Rong, YANG Bin, LI Lifan, et al. Clustering-based data transmission algorithms for VANET[C]// Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Hangzhou, China: [s.n.], 2013: 1–6.
- [16] Barron E N. Game Theory: An Introduction[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

#### 作者简介:



张齐新(1988–), 男, 江苏省南通市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为车联网数据传输与博弈论。email: qixinzhang12@fudan.edu.cn.

杨涛(1970–), 男, 陕西省汉中市人, 副教授, 主要研究方向为认知无线电、网络信息感知及融合、智能信号处理。

冯辉(1979–), 男, 江苏省常州市人, 讲师, 主要研究方向为分布式信号处理理论及应用。

胡波(1968–), 男, 江苏省常州市人, 教授, 主要研究方向为数字信号处理。