

C-V2X 下车载安全数据两阶段组播的中继选择与功耗分析

肖海林^{1,2}, 吴彬², 张中山³

(1. 湖北大学计算机与信息工程学院, 湖北武汉 430062; 2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西桂林 541004;
3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 车载通信业务的需求加剧了基站功率消耗, 降低了其数据传输的可靠性. 本文提出了一种蜂窝网络下基于两阶段组播的车载安全数据传输中继选择策略, 以节约系统总功耗为前提来确定中继选择范围, 计算出基站功耗最小的最优组播半径 x_0 , 并选择距最优组播半径 x_0 最近的车辆作为中继. 基于中继的社会属性建立基站群体和中继群体间的非对称演化博弈模型, 设计了不影响安全数据传输的中继娱乐数据发送功率动态再分配的奖惩机制. 仿真结果表明: 当车辆数目超过临界值 K_{min} 时, 本文提出的中继选择策略和奖惩机制, 可在保证安全数据两阶段组播可靠性的同时, 使基站功耗相比直接组播的功耗至少降低 25%.

关键词: 中继选择; 车载通信; 安全数据; 演化博弈

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)11-2248-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.11.002

Relay Selection and Power Analysis for Two-Stage Multicast Transmission of Vehicle Safety Data Under C-V2X

XIAO Hai-lin^{1,2}, WU Bin², ZHANG Zhong-shan³

(1. College of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;
2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;
3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The demand for in-vehicle communication services has increased the power consumption of base stations (BSs) and reduced the reliability of their data transmission. This paper presents a relay selection strategy for two-stage multicast transmission of vehicle security data (TSMT-VSD) under cellular networks. In this strategy, the selected relay range is first determined on the premise of saving total power consumption, and then the optimal multicast radius x_0 with the lowest BS power consumption is calculated, followed by choosing the vehicle closest to the optimal multicast radius x_0 as the relay. Furthermore, based on the social attributes of relays, an asymmetric evolutionary game model between BS groups and relay groups is established, and a reward and punishment mechanism for dynamic redistribution of relay entertainment data transmission power without affecting secure data transmission is designed. The simulation results show that the proposed relay selection strategy and the designed reward and punishment mechanism can not only ensure the reliability of TSMT-VSD, but also save at least 25% power consumption of BS compared with the conventional one-stage multicast transmission, provided that the number of vehicles is beyond the bound K_{min} .

Key words: relay selection; vehicular communication; security data; evolutionary game

1 引言

随着通信技术的快速发展, 利用蜂窝网络下车载

无线通信技术 C-V2X (Cellular-Vehicle to Everything) 辅助驾驶人员安全驾驶、满足驾乘人员娱乐需求等业务备受关注. 在传统的车载自组织网络 (VANET) 中, 无中

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-05-27; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61872406, No. 61472094); 浙江省重点研发计划项目 (No. 2018C01059); 广西研究生科研创新项目 (No. YCSW2018137)

心的 V2V (Vehicle-to-Vehicle) 通信通过多跳广播协议实现安全数据(车辆行驶状态、危险行为预警等)远距离传输^[1];此外还有通过建设专用的路侧单元(Road Side Unit, RSU),利用 V2I (Vehicle-to-Infrastructure) 降低数据冗余,提高数据的可靠性^[2],但是其提供的互联网接入能力有限,无法满足新兴业务对网络的需求. 相比而言,采用蜂窝网络中的基站作为 RSU,蜂窝网络下的组播技术可以为驾驶人员提供交通安全信息服务, V2N (Vehicle-to-Network) 提供娱乐服务,节约成本,且服务质量更好^[3,4],但是将对现有基站的业务负载和功耗提出了考验.

随着组播业务需求的增加,两阶段组播技术成为优化组播功耗的研究热点. 在传统移动用户组播(Traditional Mobile User Multicast, TMUM)业务中,针对第二阶段数据转发中继的选择进行研究,利用中继协作来降低基站功耗^[5,6],未考虑中继的自私性问题;在车载安全数据分发方面,文献[7]为了降低安全数据的分发延迟,提出了利用组播与 DSRC (Dedicated Short Range Communications) 实现的 V2V 技术结合对以簇为单位车辆群体进行两阶段组播,并未对系统的功率优化进行分析. 此外,在呈指数增长的数据量面前,C-V2X 中选择 D2D (Device-to-Device) 技术来实现 V2V 通信 (V-D2D)^[8-10],同时文献[11]指出 V2X 业务无法通过强制的方式实现协作,需要设计激励机制来激励中继协作的主动性.

近年来,针对协作通信的中继自私性问题也进行了一些新研究^[12-15]. 文献[12]提出了基于契约理论的分流补偿机制,激励用户协助基站进行数据分流,降低基站的负载. 文献[13]利用拍卖机制,建立协作群体和被协作群体之间的支付博弈. 文献[14]提出了在 MAC 层利用动态博弈解决协作通信中的自私性问题,分析得出一次一阶段动态博弈的唯一纳什均衡是(自私,自利)而将该问题拓展成两阶段的重复动态博弈,则可以实现协作的目的. 文献[15]指出在物理层利用演化博弈处理协作通信中的自私性问题时效果优于其它博弈模型. 但是上述中继协助基站的自私性问题多被转化为同等地位的博弈来进行处理,基站与中继的非对等关系未被设计到奖惩机制中去.

本文围绕 C-V2X 技术,以降低基站功耗为目的,研究分析在保证车载通信安全数据可靠传输的情况下,采用基于 V-D2D 的两阶段组播实现车载安全数据两阶段组播(Two-Stage Multicast Transmission of Vehicle Security Data, TSMT-VSD),主要内容包括:(1)提出一种蜂窝网络下 TSMT-VSD 中继选择策略;(2)基于非对称演化博弈模型设计不影响安全数据传输的中继娱乐数据发送功率动态再分配机制.

2 蜂窝网络下的车载通信模型

本文根据数据应用领域与需求对象将车载通信中的数据分为集体需求的安全数据和个体需求的娱乐数据,并假设每个车辆的安全数据和娱乐数据请求同时发生,分别采用 TSMT-VSD 和基于 QoS 的单播技术传输.

2.1 蜂窝网络下的车载通信 TSMT-VSD 模型

如图 1 所示,有 K 辆具有蜂窝和 V-D2D 通信能力的车辆向基站发出安全数据请求,记为 $V = \{V_k, k = 1, 2, \dots, K(K = u + v)\}$. 下面结合文献[5]给出 TSMT-VSD 的信道模型与数据接收成功率定义.

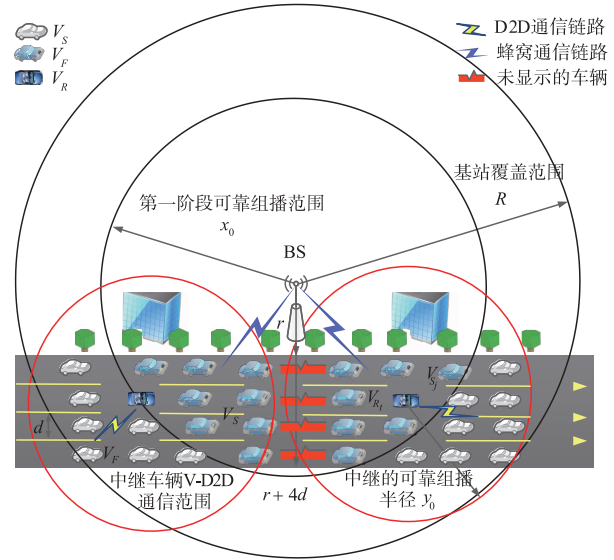


图1 安全数据两阶段组播模型

2.1.1 TSMT-VSD 信道模型

蜂窝网络下的 TSMT-VSD 信道模型,假设第一阶段基站进行安全数据组播的发射功率为 $P_{BS,two}(x_0)$ (x_0 为基站的可靠组播半径),车辆 V_k 处的接收信号和信噪比分别为:

$$S_{1,V_i}(x_k) = \sqrt{P_{BS,two}(x_0)} H_{1,V_i}(x_k) d \quad (1)$$

$$SNR_{1,V_i}(x_k) = \frac{P_{BS,two}(x_0) |H_{1,V_i}(x_k)|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

假设 SNR_{two} 为车辆接收信噪比门限, SNR_{1,V_i} 大于等于 SNR_{two} 代表第一阶段车辆成功接收到数据,记为 $V_S = \{V_s, i = 1, 2, \dots, u(K \geq u > 0)\}$; SNR_{1,V_i} 小于 SNR_{two} 代表第一阶段车辆未成功接收到数据,记为 $V_F = \{V_f, j = 1, 2, \dots, v(K > v \geq 0)\}$. 第二阶段根据中继选择策略选出协作中继 $V_R = \{V_r, t = 1, 2, \dots, T(K > t \geq 0)\}$,通过 V-D2D 技术以 $P_{VR,two}(y_0)$ 为 V_F 提供数据中继 (y_0 表示中继的可靠组播半径),则最大比合并后 V_f 端的接收信号和信噪比分别为:

$$\begin{aligned}
S_{2,V_i}(y_{ij}, x_{F_j}) &= \sqrt{P_{BS,two}(x_0)} H_{1,V_i}^*(x_{F_j}) Y_1(x_{F_j}) \\
&\quad + \sqrt{P_{VR,two}(y_0)} H_{2,V_i}^*(y_{ij}) Y_2(y_{ij}) \\
&= (P_{BS,two}(x_0) |H_{1,V_i}(x_{F_j})|^2 \\
&\quad + P_{VR,two}(y_0) |H_{2,V_i}(y_{ij})|^2) d \\
&\quad + (\sqrt{P_{BS,two}(x_0)} H_{1,V_i}^*(x_{F_j}) \eta_1 \\
&\quad + \sqrt{P_{VR,two}(y_0)} H_{2,V_i}^*(y_{ij}) \eta_2) \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&SNR_{2,V_i}(y_{ij}, x_{F_j}) \\
&= \frac{(P_{BS,two}(x_0) |H_{1,V_i}(x_{F_j})|^2 + P_{VR,two}(y_0) |H_{2,V_i}(y_{ij})|^2)}{\sigma^2} \quad (4)
\end{aligned}$$

其中, $H_{1,V_i}(x_k) = \sqrt{A_1 x_k^{-\gamma}} H_{BS,V_i}(x_k)$ 和 $H_{2,V_i}(y_{ij}) = \sqrt{A_2 x_0^{-\gamma}} H_{2,V_i}(y_{ij})$ 分别为基于正交频分复用的下行链路、复用蜂窝下行链路的 V-D2D 链路的功率损耗系数, 服从复高斯分布; x_k 和 x_{F_j} 分别为 V_k 、 V_{F_j} 到基站的距离; d 为单位字符数传输能耗; γ 为路径衰落系数; 高斯白噪声功率为 $\sigma^2 = N_0 B$; y_{ij} 为 V_{S_i} 到 V_{F_j} 的距离; A_1 和 A_2 为两个恒参。

2.1.2 TSMT-VSD 数据接收成功率分析

TSMT-VSD 两个阶段的接收成功率模型分别为:

$$\begin{aligned}
S_{CM,1}(x_k) &= P(SNR_{1,V_i}(x_k) \geq SNR_{two}) \\
&= \exp\left(-\frac{SNR_{two} \cdot \sigma^2}{P_{BS,two}(x_0) \cdot A_1 x_k^{-\gamma}}\right) \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{CM,V_j} &= S_{CM,2}(y_{ij}, x_{F_j}) = P(SNR_{2,V_i}(y_{ij}, x_{F_j}) \geq SNR_{two}) \\
&= \begin{cases} \frac{\lambda_2 y_{ij}^\gamma \exp(-\lambda_1 x_{F_j}^\gamma) - \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \exp(-\lambda_2 y_{ij}^\gamma)}{\lambda_2 y_{ij}^\gamma - \lambda_1 x_{F_j}^\gamma}, & \lambda_2 y_{ij}^\gamma \neq \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \\ 1 - (1 + \lambda_1 x_{F_j}^\gamma) \exp(-\lambda_1 x_{F_j}^\gamma), & \lambda_2 y_{ij}^\gamma = \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \end{cases} \quad (6)
\end{aligned}$$

其中, $\lambda_1 = SNR_{two} \sigma^2 / P_{BS,two}(x_0) A_1$, $\lambda_2 = (SNR_{two} \sigma^2) / P_{VR,two}(y_0) A_2$, 且式(6)大于等于零(文献[8]已经证明)。因此, 根据(6)定义 TSMT-VSD 的数据接收成功率 S_{CM} 为 V_{F_j} 中数据接收成功率最低车辆的数据接收成功率, 具体为:

$$S_{CM} = \{S_{CM,V_1}, S_{CM,V_2}, \dots, S_{CM,V_F}\}_{\min} \quad (7)$$

2.2 蜂窝网络下的车载通信 TSMT-VSD 模型

假设安全数据和娱乐数据的请求和传输同步, 因此, 娱乐数据传输信道可采用 TSMT-VSD 第一阶段基站到中继的信道模型, 则中继的安全数据和娱乐数据的接收信噪比和信道容量分别为:

$$\begin{aligned}
SNR_{VR}(x_{R_i}) &= SNR_{VR}(x_{R_i}) = SNR_{VR'}(x_{R_i}) \\
&= \frac{P_{BS,VR'}(x_{R_i}) |H_{1,VR'}(x_{R_i})|^2}{\sigma^2} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$C_{VR'} = C_{VR} = B \log_2(1 + SNR_{VR'}(x_{R_i})) \quad (9)$$

其中, $P_{BS,VR'}(x_{R_i})$ 为娱乐数据发射功率, 而 x_{R_i} 为中

继 V_{R_i} 到基站的距离。

3 TSMT-VSD 中继选择策略和基站奖惩机制分析

首先, 考虑到车辆快速移动时, 基站进行 TSMT-VSD 需要频繁更换中继, 借鉴文献[6]中的最优位置下的中继选择策略, 根据车辆的分布特点提出了唯一最优位置中继选择策略。其次, 将基站对中继的威慑力(威慑力表现为基站可以拒绝娱乐数据请求, 或降低娱乐数据传输质量)应用到奖惩机制的设计中; 同时, 利用文献[16~18]中的演化博弈理论将特定位置基站和 V_{R_i} 间的随机博弈, 拓展到整个蜂窝网络, 使博弈可以重复进行, 设计了不影响安全数据传输的基于非对称演化博弈模型的娱乐数据发送功率动态再分配机制。

3.1 TSMT-VSD 中继选择策略

3.1.1 理论分析

针对蜂窝网络下 TSMT-VSD 中继选择策略, 根据文献[6]和文献[18]中车辆安全数据接收成功率要求 $S_{CM} = 99.999\%$ 建立唯一最优中继位置分析模型, 结合式(5)~(7)可得 TSMT-VSD 理论总功耗表达式为:

$$P_{tot}(x_0, y_0) = P_{BS,two}(x_0) + 2 \times P_{VR,two}(y_0) \quad (10)$$

其中, 基站组播功率 $P_{BS,two}(x_0)$ 由式(5)推导得到, 表达式为:

$$P_{BS,two}(x_0) = \left(-\frac{SNR_{two} \cdot \sigma^2}{A_1 x_0^{-\gamma} \ln(S_{CM,1})}\right) \quad (11)$$

由式(6)和式(7)联合推导出关于 S_{CM} 和 $P_{VR,two}(y_0)$ 的非线性方程为:

$$S_{CM} = \begin{cases} \frac{\lambda_2 y_{ij}^\gamma \exp(-\lambda_1 x_{F_j}^\gamma) - \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \exp(-\lambda_2 y_{ij}^\gamma)}{\lambda_2 y_{ij}^\gamma - \lambda_1 x_{F_j}^\gamma}, & \lambda_2 y_{ij}^\gamma \neq \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \\ 1 - (1 + \lambda_1 x_{F_j}^\gamma) \exp(-\lambda_1 x_{F_j}^\gamma), & \lambda_2 y_{ij}^\gamma = \lambda_1 x_{F_j}^\gamma \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\lambda_1 = SNR_{two} \sigma^2 / P_{BS,two}(x_0) A_1$, $\lambda_2 = (SNR_{two} \sigma^2) / P_{VR,two}(y_0) A_2$ 。将式(11)计算出的 $P_{BS,two}(x_0)$ 带入式(12)后, 在 S_{CM} 的约束下求解中继转发功率 $P_{VR,two}(y_0)$ 。以 TSMT-VSD 节约总功耗为前提, 结合式(10)~(12)定义如下非线性多约束的唯一最优中继位置分析模型:

$$\min P_{BS,two}(x_0) \quad (13)$$

$$\text{s. t. } P_{tot}(x_0, y_0) \leq P_{BS,one}(R) \quad (14)$$

$$x_0 + y_0 \geq R \quad (15)$$

$$0 \leq y_0 \leq Y \quad (16)$$

$$R - Y \leq x_0 \leq R \quad (17)$$

其中, 式(13)为目标函数; 式(14)表示 TSMT-VSD 模型的功耗不会超过基站直接组播; 式(15)确保 TSMT-VSD 的可靠覆盖; 式(16)确保 V-D2D 通信的有

$$C_{R,C} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{VR,two}(x_R(K)) |H_{1,VR}(x_R(K))|^2}{\delta^2} \right) \quad (29)$$

$$C_{B,A} = B \log_2 \left(1 + \frac{\rho \cdot P_{BS,VR}(x_R(K)) |H_{1,VR}(x_R(K))|^2}{\delta^2} \right) - C_{B,E} \quad (30)$$

$$C_{B,D} = B \log_2 \left(1 + \frac{\theta \cdot P_{BS,VR}(x_R(K)) |H_{1,VR}(x_R(K))|^2}{\delta^2} \right)^{-1} + C_{B,E} \quad (31)$$

由式(28)~(31)可以看出, \mathbf{R} 和 \mathbf{B} 不对等, 且不对称演化博弈模型中 RG 和 BSG 间进行静态博弈, RG 和 BSG 内部个体通过模仿者动态方程调整策略, 因此, 在未达到演化稳定或者不存演化稳定时在 RG 内自私个体比例 p 和 BSG 内惩罚个体比例 q 是不断变化的, 最优的 α 取值难以计算. 为此, 结合非对称演化博弈的特点对再分配机制进行优化得到动态调节方程为:

$$q(1-\theta)P_{BS,VR}(x_R(K)) = (1-q)(\rho-1)P_{BS,VR}(x_R(K)) \quad (32)$$

式(32)经过化简后得到由 q (不考虑 $q=0$ 的极端条件) 和 θ 构成的二元动态再分配方程为:

$$\rho(q, \theta) = \theta + \frac{1-\theta}{1-q} \quad (33)$$

当 RG 和 BSG 间博弈达到演化稳定时, q 为定值, 式(33)可简化为 $\rho(\theta)$. 因此, 利用文献[17]在标准的基站和中继期望收益函数的基础上得到 RG 和 BSG 两个对称的子演化博弈的期望收益函数分别为:

$$U'_R = (1-p)(C_{B,A} - C_{R,C}) - C_{B,D} \quad (34)$$

$$U'_B = C_{B,E}(1-2q) - C_{B,A}(1-q) + C_{B,D}q \quad (35)$$

由式(26)、(27)和(34)、(35)可以得到非对称演化博弈演化稳定时的模仿者动态方程分别为:

$$\frac{dp_i}{dt} = p_i \left[\left(\mathbf{R} \begin{bmatrix} 1-p \\ p \end{bmatrix} \right)_i - U'_R \right] = 0 \quad (36)$$

$$\frac{dq_j}{dt} = q_j \left[\left([1-q \quad q] \mathbf{B} \right)_j - U'_B \right] = 0 \quad (37)$$

由式(36)可以看出, RG 存在 $p=0$ 的演化稳定状态, 但难以采用文献[16]中的证明步骤进行证明, 故在 4.2 节借助 Matlab 仿真分析.

4 仿真分析

本文根据文献[5,6]设置空旷地区车载通信仿真参数如表 2 所示, 验证本文提出的中继选择策略和奖惩机制在降低基站功耗和保证可靠性时的优越性.

4.1 中继选择策略对比分析

仿真得到了本文与文献[6]中提出的 TSMT-VSD 中继选择策略下理论功耗对比图, 如图 3 所示. 以 $P_{BS,one}(R)$ 为参考, 得到 TSMT-VSD 实现节约系统总功耗时的

x_0 , 并对两种方案的理论数值进行分析.

表 2 参数设置

参数	数值
载波频率	5.9GHz
频率带宽 B	20MHz
蜂窝网络到车辆的路径损耗 A_1	$2.36e-2$
协作传输路径损耗 A_2	$1.67e-4$
路径损耗参数 γ	2.61
噪声功率谱 N_0	-174dbm
接收信噪比门限 SNR_{two}	3db
小区覆盖半径 R	1500m
基站距道路距离 r	300m
车道数目 n	4

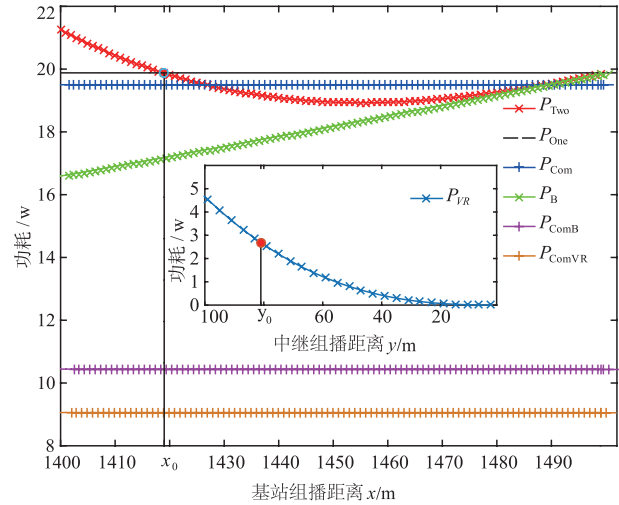


图3 基站组播半径对总功耗和基站功耗的影响

仅从图 3 中理论数值结果来评价, 文献[6]的策略性能更优. 但是考虑到车载场景的特殊性, $x_{R,max}(K)$ 和 $y_{max}(K)$ 会随着车辆数目 K 而变化, 通过 Monte Carlo 方法对文献[9]中车辆分布进行统计性分析得到了 $x_{R,max}(K)$ 和 $y_{max}(K)$ 与理论数值间的关系, 如图 4 所示.

从图 4 中可以看出 K 较小时 $ComX_r$ 和 x_r (x_r 为 $x_{R,max}(K)$ 的简写) 远小于理论值, 随着 K 的增大逐渐接近理论值, 但是对比策略的最外层中继实际转发半径 $ComR_2$ 和 y_r (y_r 为 $y_{max}(K)$ 的简写) 却始终大于理论值. 为了确定 $ComR_2$ 和 y_r 对整体功耗的影响, 在图 4 的基础上进一步仿真分析了实际功耗与理论功耗, 如图 5 所示.

图 5 中 P_B 明显小于理论值, 而 P_{ComB} 只是略小于理论值, P_{VR} 和 P_{ComVR} 则均大于理论值, 与文献[6]相比本文所提出策略的节约总能耗的门限 K_{min} 更小, 应用更广泛.

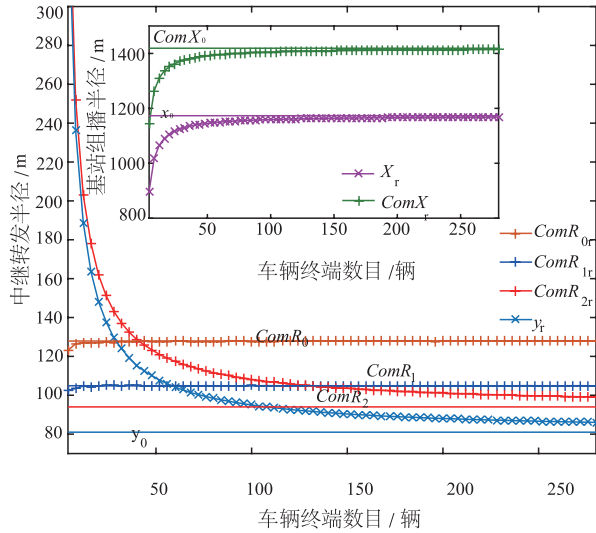


图4 Monte Carlo模拟理论值的偏移

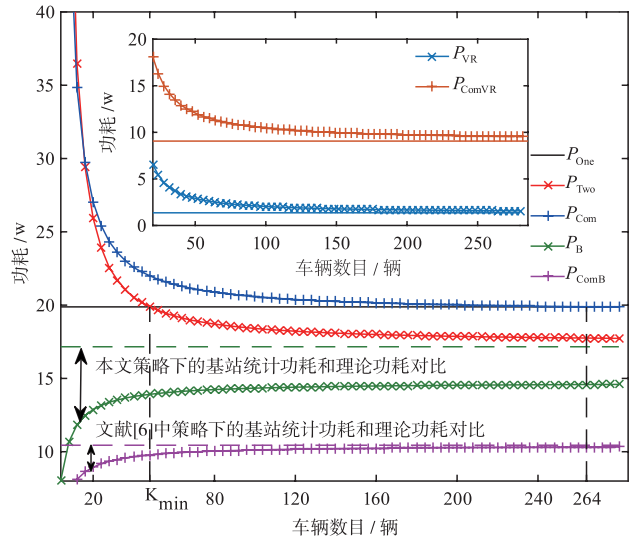


图5 Monte Carlo模拟实际功耗和理论对比

4.2 非对称演化博弈模型下中继和基站群体演化分析

本节在 4.1 节仿真的基础上,分析提出的中继娱乐

数据发送功率动态再分配机制对 RG 内自私者抑制效果. 当 θ 取 0.8、0.3 和 0 时, 利用式 (39) 仿真得到 RG 内自私者演化动态图, 如图 6 所示.

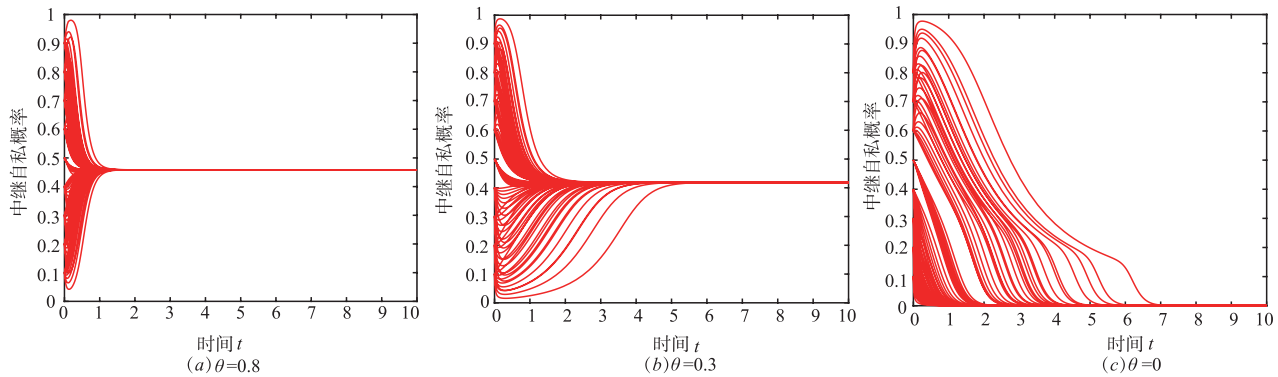


图6 惩戒因子 θ 对 RG 内自私者的比例 p 演化的影响分析

从图 6 可以看出, 随着 θ 的减小, p 值的减小并不明显, 但是 θ 取零时, p 值稳定时为 0, 中继的自私性被完全抑制, 式 (33) 可改写为:

$$\rho(q) = \frac{1}{1-q} \quad (38)$$

在此基础上, 以式 (38) 中的动态再分配机制仿真得到 BSG 和 RG 的非对称演化博弈的相位图, 如图 7 所示.

从图 7 可以看出, BSG 和 RG 间的唯一演化稳定策略为 $(p, q) = (0, 1/3)$, BSG 个体被认为以 1/3 的拒绝为中继提供娱乐数据来威慑 RG, 使其服从调度, 同时被奖励中继的 $P_{BS,VR}(x_R(K))$ 增加一半.

4.3 功耗分析

通过 4.2 节的分析, 说明当 $\theta = 0$ 时本文提出的奖惩机制可保证 TSMT-VSD 的可靠性. 进一步, 仿真分析

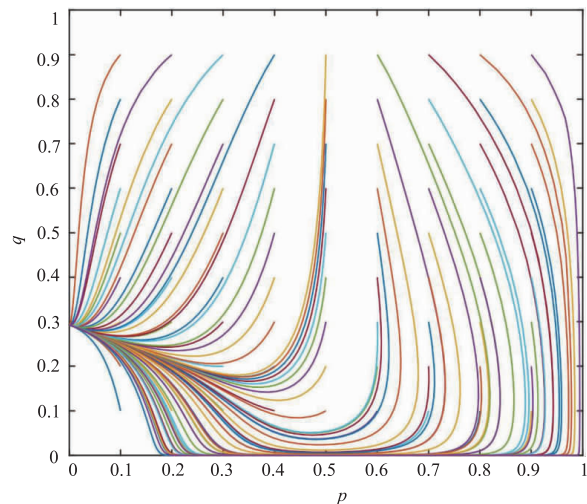


图7 中继群体自私比例 p 和基站群体惩罚比例 q 演化相位图

了本文和文献[6]中中继选择策略下的 TSMT-VSD 的能效比,如图 8 所示.

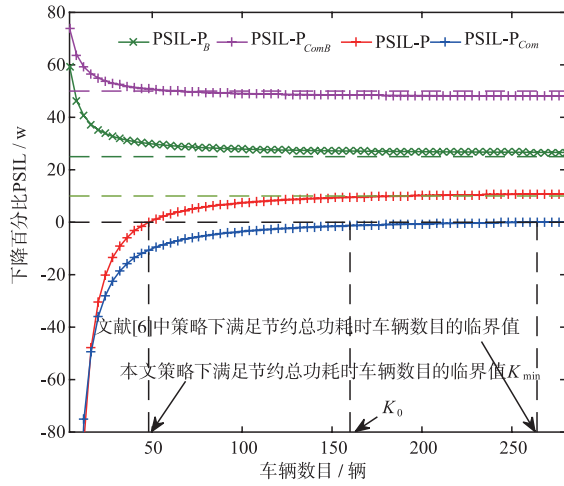


图8 节能效果对比

从图 8 可以看出,当 K 大于 K_{\min} 本文所提中继选择方案开始节约总功耗,且基站功耗降低 25% 以上,而且当 K 增加到 K_0 以后,系统总功耗降低 10% 左右. 相比而言,文献[6]中的策略下基站功耗的减少 50% 左右,但是在节约总功耗方面的性能低下.

5 结束语

在未来,以蜂窝网络为基础的 C-V2X 技术势必会加剧现有蜂窝网络基站的功率消耗. 为此,本文提出了基于唯一最优位置中继选择策略的 TSMT-VSD 方案,设计了中继娱乐数据发送功率的再分配机制抑制来自中继自私性,进而建立了蜂窝网络下 BSG 和 RG 的非对称演化博弈模型. 仿真分析结果表明:本文提出的奖惩机制可以保证 TSMT-VSD 的可靠性,同时在车辆数目 K 大于 K_{\min} 的情况下,可以保证节约 TSMT-VSD 总功耗的前提下,使基站提供安全数据服务的功耗降低 25% 以上.

参考文献

- [1] Tonguz O K, Wisitpongphan N, Bai F. DV-CAST: a distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks [J]. *Wireless Communications IEEE*, 2010, 17 (2): 47–57.
- [2] Sou S I, Tonguz O K. Enhancing VANET connectivity through roadside units on highways [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3586–3602.
- [3] Safiulin I, et al. Latency and resource utilization analysis for V2X communication over LTE MBSFN transmission [A]. 20th International ITG Workshop on Smart Antennas [C]. Munich: WSA, 2016. 1–6.
- [4] Peng H, et al. Resource allocation for D2D-enabled inter-vehicle communications in multiplatoons [A]. *IEEE International Conference on Communications [C]*. Paris: IEEE, 2017. 1–6.
- [5] Zhou Y, Liu H, Pan Z, et al. Energy-efficient two-stage cooperative multicast: effect of user density [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65 (9): 7297–7307.
- [6] Zhou Y, Liu H, Pan Z, et al. Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 274–284.
- [7] Calabuig D, Martín-Sacristán D, Monserrat J F, et al. Distribution of road hazard warning messages to distant vehicles in intelligent transport systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, (99): 1–14.
- [8] Bazzi A, Masini B M, Zanella A. Performance analysis of V2V beaconing using LTE in direct mode with full duplex radios [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4 (6): 685–688.
- [9] Sun W, Ström E G, Brännström F, et al. Radio resource management for D2D-based V2V communication [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6636–6650.
- [10] Cheng N, Zhou H, Lei L, et al. Performance analysis of vehicular device-to-device underlay communication [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66 (6): 5409–5421.
- [11] Chen T, Zhu L, Wu F, et al. Stimulating cooperation in vehicular Ad hoc networks: A coalitional game theoretic approach [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(2): 566–579.
- [12] 冯文江,姜文浩,肖骞. 基于 D2D 通信的蜂窝数据分流补偿机制设计 [J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(9): 2119–2124.
FENG Wen-jiang, JIANG Wen-hao, XIAO Qian. Design of cellular data offloading compensation mechanism by D2D communication [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(9): 2119–2124. (in Chinese)
- [13] Hu B, Zhao H V, Jiang H. Wireless multicast using relays: incentive mechanism and analysis [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62 (5): 2204–2219.
- [14] Ju P J, Wei S. Repeated game analysis for cooperative MAC with incentive design for wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65: 5045–5059.
- [15] 黄开枝,洪颖,罗文字,等. 基于演化博弈机制的物理层安全协作方法 [J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 193–199.

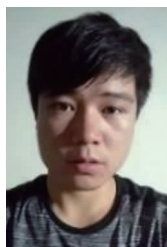
- Huang Kaizhi, Hong Ying, Luo Wenyu, et al. A method for physical layer security cooperation based on evolutionary game[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(1):193 – 199. (in Chinese)
- [16] Khan A, Abolhasan M, Wei N. An evolutionary game theoretic approach for stable and optimized clustering in VANETs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(5):4501 – 4513.
- [17] Tuyls K, Pérolat J, Lanctot M, et al. Symmetric decomposition of asymmetric games[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):1015.
- [18] Molina-Masegosa R, Gozalvez J. LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12(4):30 – 39.

作者简介



肖海林 男, 1976 年 11 月出生, 湖北麻城人. 教授、博士生导师、中国电子学会高级会员、IEEE 高级会员. 1998 年、2004 年和 2007 年分别在武汉大学、广西师范大学和电子科技大学获理学学士、理学硕士和工学博士学位. 现为湖北大学计算机与信息工程学院教授, 主要从事车载无线通信、MIMO 无线通信、协作通信等方面的研究工作.

E-mail: xhl_xiaohailin@163.com



吴彬 男, 1994 年 9 月出生, 陕西西安人. 现为桂林电子科技大学信息与通信学院硕士研究生, 研究方向蜂窝网络下的车载通信.

E-mail: wubin1021917@163.com