

Relay Node Assignment Model and Distributed Assignment Algorithm Based on Auction Theory

Peipei Su^{1†}, Xiumei Fan¹

1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

[†]Email: 346352593@qq.com

Abstract

In the vehicle communication, some vehicles can not communicate with the communication infrastructure (such as the wireless access point AP) or other vehicles because of the distance or link. In this way, it is necessary to forward the information with other mobile vehicles to communicate with AP or other vehicles communicate with each other. The fact that the relay node participates in the communication will increase the transmission range, on the one hand, it may improve the transmission rate and system performance, on the other hand, it may interfere with the data transmission of other nodes and reduce the overall system performance. In order to balance the gain and interference caused by the relay node and allocate the relay resources reasonably, this paper proposes a relay node allocation model based on the auction theory. In this model, the source node and the relay node are modeled as the auction model of buyers and sellers, and the distributed relay node allocation algorithm based on this model is designed. Multiple rounds double auction(MRDA) algorithm. The simulation results show that the MRDA integrates the gain and interference of the relay node, and can effectively distribute the relay nodes and improve the overall performance of the system.

Keywords: Car Network; Auction Theory; Relay Selection; Interference

基于拍卖理论的中继节点分配模型和分布式分配算法

苏培培¹, 樊秀梅¹

1.西安理工大学, 陕西 西安 710048

摘要: 车载通信中, 因距离或链路的原因使得有些车辆不能与通信基础设施(如无线接入点 AP)或其它车辆直接通信, 这时就需要通过其它移动车辆转发信息来实现与 AP 或其它车辆的相互通信。中继节点参与通信的情况会扩大通信传输范围, 一方面可能提高了传输速率和系统性能, 另一方面, 可能会干扰其他节点的数据传输和降低整个系统性能。为了权衡中继节点带来的增益和干扰, 合理分配中继资源, 本文提出一种基于拍卖理论的中继节点分配模型。该模型中, 把源节点和中继节点建模为多买家和多卖家的拍卖模型, 设计了基于该模型的分布式中继节点分配算法——多轮单向拍卖(Multiple rounds double Auction, MRDA)算法。仿真结果证明 MRDA 综合考虑了中继节点带来的增益和干扰, 能够有效的分配中继节点, 改善了系统整体性能。

关键词: 车联网; 拍卖理论; 中继选择; 干扰

引言

近年来, 车载自组织网络(VANET)及车辆作为智能交通系统(ITS)的重要组成部分已成为当前的研究热点, 实现汽车间的无线通信可有效提高行车效率、安全性和舒适性^[1], 给我们的生活带来极大便利。车联网有车辆间通信(Vehicle to Vehicle communication, V2V)、车辆与路旁基础设施间通信(Vehicle to Infrastructure communication, V2I)和混合车辆通信(Hybrid-Vehicle Communications, HVC)三种典型的通信方式^[2]。在 V2I 和

HV 通信方式中，当接收数据的车辆不在发送信息车辆的视距范围内或受障碍物阻隔时都无法实现直接通信，这就需要借助一些中继车辆节点来转发数据，从而实现多跳通信。通过中继节点协助转发提高了接收节点的信噪比，相应也提升了信道容量。中继节点性能的好坏对消息传输的时效性和可靠性，甚至整个网络的性能都会产生影响。由于车联网的覆盖范围很广，直接的车车通信很难满足车辆之间的多种信息交互，所以中继节点的选择就成了在车载通信研究中的一个核心问题。

目前关于中继节点选择的研究有很多，主要是基于中断概率、吞吐量、时延、频谱效率、功耗等参数，已经取得了很多成果。文献^[3]中，作者以最大化网络总吞吐量的同时降低运算复杂程度为目标，提出了人工蚁群算法，来解决多用户中继选择问题。文献^[4]研究了自组织网络环境中的中继节点分配问题，提出了一种最优多项式时间算法，该算法基于最大化最小数据速率准则，应用了多项式时间的解法，将可用的中继节点分配给不同的源-目的对。该算法具有快速收敛的优点；但最大化最小数据速率准则只能保证部分用户的公平性，不能实现网络总数据率最大。文献^[5]以最大化网络效益为目标，提出了基于拍卖博弈的中继选择方法，但是采用的是集中式算法，需要控制器清楚了解每个节点的变化情况，增加了信令开销，而且运算复杂度也比较高。因此，为了促进节点之间的自主合作，适应快速变化的信道和网络拓扑结构，需要设计一种分布式的中继选择方案。

虽然在中继节点选择问题上，研究者关注的多是如何通过中继节点帮助转发数据来获取增益，而忽略了选择中继节点协作后带来的额外干扰。在文献^[6]中，当存在干扰时，处在其中的多个中继节点同时被选择转发时，它们之间的相互干扰就会影响到整个系统的性能。所以在选择中继节点时，就要均衡中继节点协作带来的增益与干扰。文献^[7]针对存在中继干扰的情况下优化瞬时端到端容量，提出一种机会性的连续中继方案，并使用蒙特卡罗技术模拟提出的机会连续中继方案的性能。但是没有考虑干扰对其他节点的影响。

本文综合研究引入中继节点之后产生的增益和额外干扰，考虑到拍卖理论可以很好的研究多个节点之间的互相影响及其合作，我们根据拍卖理论对问题进行建模，将中继带来的增益定义为商品拍卖中的价值，中继干扰定义为商品的成本，提出一种基于拍卖理论的分布式中继选择方法，完成中继节点的选择以及合理地分配资源。

1 系统建模与问题分析

首先，基于 VANETs 网络描述无线通信网络模型。假设无线网络有 m 对发送和接收节点对， n 个可选为中继节点的空闲节点组成。用 $f_i = \{s_i, d_i\}$ 表示源——目的对， $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 表示闲置的中继节点，用 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示源节点目的节点的业务流。定义在 f_i 干扰范围内的业务流集合为 $F_i \subset F$ 。同样的，在 r_j 干扰范围内的业务流集合记为 R_j 。假设网络中信道噪声的均值为 0，高斯白噪声的功率为 σ^2 ，节点的传输功率为 $P_{s_i} = P_{r_j} = P$ 。

常见的转发模式有放大转发（AF）和译码转发（DF）。放大转发的基本思想是中继节点把接收到的信号直接放大，从而抵消信道衰落的影响，最后转发出去。放大转发方式复杂度低，并且在信噪比高的情况下能得到较高的分集增益。译码转发的策略是把接收到的信号进行解码解调获得源节点的发送信号，再编码调制后发送到目的节点。该方式本质上是一种数字信号处理方式，复杂度较高，当信噪比较低时中继节点可能做出错误判断，从而影响协作性能。

如前所述，中继节点的引入可以提高数据的传输效率，提升信道容量，但是同时也会产生额外开销，基于此理解，本文将对增益和开销作详细分析。由于本文的研究重点是中继节点的选择方法，并不侧重于协作方式对系统性能的影响，因此从复杂度考虑，本文只分析 AF 放大转发模式的协作方式。

1.1 协作增益

当业务流 f_i 采用直传方式时， f_i 的信道容量为

$$C_{f_i}^{DT} = W \log_2(1 + \Gamma_{s_i, d_i}), \quad (1)$$

其中 Γ_{s_i, d_i} 为到的信号 SINR,

$$\Gamma_{s_i, d_i} = \frac{PG_{s_i, d_i}}{\sigma^2 + \sum_{f_k \in F_i, k \neq i} PG_{s_k, d_i}},$$

其中 W 为信道带宽, G_{s_i, d_i} 为 s_i 到 d_i 之间的信道增益, G_{s_k, d_i} 为 s_k 到 d_i 之间的信道增益。信道增益与传输距离 d 和路径损耗指数 k 相关, 可根据公式 $G = d^{-k}$ 计算。 f_k 是 F_i 的业务流, 表示 f_k 和 f_i 之间存在干扰。

当采用 AF 协作方式时, 得到的信道容量为^[8]:

$$C_{f_i, r_j}^{CT} = \frac{w}{2} \log_2(1 + \Gamma_{s_i, d_i} + \frac{\Gamma_{s_i, r_j} \cdot \Gamma_{r_j, d_i}}{1 + \Gamma_{s_i, r_j} + \Gamma_{r_j, d_i}}), \quad (2)$$

$$\Gamma_{s_i, r_j} = \frac{PG_{s_i, r_j}}{\sigma^2 + \sum_{f_l \in R_j, l \neq i} PG_{s_l, r_j}}, \Gamma_{r_j, d_i} = \frac{PG_{r_j, d_i}}{\sigma^2 + \sum_{f_k \in F_i, k \neq i} PG_{s_k, d_i}}.$$

其中 G_{s_i, r_j} 、 G_{s_l, r_j} 、 G_{r_j, d_i} 、 G_{s_k, d_i} 分别为 s_i 到 r_j 、 s_l 到 r_j 、 r_j 到 d_i 以及 s_k 到 d_i 的信道增益。

根据式 (1) 和式 (2) 可得, 业务流 f_i 选择中继节点 r_j 传输后得到的增益为 $V = C_{f_i, r_j}^{CT} - C_{f_i}^{DT}$ 。

1.2 额外开销

当系统内所有的业务流采取直接传输时, 不存在中继节点的干扰, 位于 R_j 内的所有业务流的总的信道容量为:

$$C_{R_j} = \sum_{f_l \in R_j} C_{f_l}^{DT} = \sum_{f_l \in R_j} W \log_2(1 + \frac{P \cdot G_{s_l, d_l}}{\sigma^2 + \sum_{f_m \in F_l, m \neq l} P \cdot G_{s_m, d_l}}), \quad (3)$$

其中, C_{f_l} 表示 f_l 不选择 r_j 参与协作传输时的信道容量。 f_m 表示在 f_l 干扰范围内的业务流, f_l 表示在 r_j 干扰范围内的业务流。

当业务流 f_i 选择中继节点 r_j 传输时, 通过放大转发方式得到 R_j 内所有业务流信道容量为:

$$C'_{R_j} = \sum_{f_l \in R_j} C_{f_l, r_j}^{CT} = \sum_{f_l \in R_j} W \log_2(1 + \frac{P_{s_l} \cdot G_{s_l, d_l}}{\sigma^2 + \sum_{f_m \in F_l, m \neq l} P_s G_{s_m, d_l} + P_r G_{r_j, d_l}}), \quad (4)$$

其中, P_s 、 P_r 分别表示源节点和中继节点的发送功率。

根据式 (3) 和式 (4) 可得, 业务流 f_i 选择中继节点 r_j 带来的开销记为 $C = C_{R_j} - C'_{R_j}$ 。

2 基于拍卖理论的分布式中继选择机制

拍卖理论可以很好的解决多个节点之间的互相影响及其合作, 我们采用拍卖理论基础对车联网中的中继节点选择进行建模, 将采用中继节点通信带来的增益和干扰进行综合考虑, 提出拍卖模型和一种基于拍卖理论的分布式中继选择方法, 合理地分配资源和选择合适的中继节点。

2.1 拍卖模型

基于前面的分析, 采取中继节点协作后能同时带来协作增益和额外开销, 因此, 需要综合权衡两者从而决定是否要采取协作通信以及如何合理分配中继节点参与协作。为了解决这一问题, 引入拍卖模型。

首先, 对于中继节点而言, 需要耗费自身的功率才能转发数据, 理性自私的中继不会无偿提供协作服务, 为了激励中继提供服务, 业务流需要支付一定的报酬作为中继提供转发服务的回报。接下来, 将源节

点定义为买方，中继节点定义为卖方，协作增益定义为价值，额外开销定义为卖方的成本。最后，基于拍卖理论，设计了一种分布式的中继选择算法。

2.2 分布式拍卖算法

针对车联网分布式的网络环境，存在多个源——目的对，多个中继节点，因此主要采用的是多轮拍卖的形式。并且分布式网络没有中心节点，无法把买卖双方的要价信息汇聚到中心节点，不能通过中心节点作为拍卖方完成拍卖。为此，本文提出如下利用拍卖理论的分布式算法。

第 1 步：每一轮对一个空闲节点进行拍卖，买方分别对某一个空闲节点进行报价，（在每一轮的拍卖中都采用英国式单向拍卖，即报价最高的买方获取中继资源），最高报价为采取协作传输带来的增益，但不能低于中继节点协作传输带来的的开销成本。由于分布式网络没有中心节点，在拍卖的时候无法保证买卖双方可以诚实报价，因此如何提交报价至关重要。如果业务流报价过高，虽然与中继节点配对的概率增加了，但是业务流的收益就会降低，如果报价过低，匹配到中继节点的几率又会大大降低并且获取不到增益。因此为了权衡配对几率与收益，应该设计一种优化的报价策略。

第 2 步：假设经过 k 轮拍卖，前 k 轮都有一对买方和卖方成功匹配。接下来，在第 $k+1$ 轮拍卖中，还有 $(n-k)$ 个买方和 $(m-k)$ 个卖方。假设每个买方的投标价 b 服从均匀分布，因此得到投标价的概率密度函数为：

$$f(b) = \frac{1}{v_{\max} - c} \quad (5)$$

其中， v_{\max} 表示买方得到的最大收益， c 表示卖方的成本。在第 $k+1$ 轮拍卖中，卖方成本 $c = c_{k+1}$ 。将买方 i 对第 $k+1$ 个中继节点的投标价记为 $b_{i(k+1)}$ ，其他买方的投标价记为 $b_{j(k+1)} (j \neq i)$ 。如果买方 i 赢得了这轮拍卖，那么其他买方的投标价满足 $b_{j(k+1)} < b_{i(k+1)}$ 的概率为：

$$P(b_{j(k+1)} < b_{i(k+1)} | j \neq i) = \int_{c_{k+1}}^{b_{i(k+1)}} f(b) db \quad (6)$$

把 (5) 代入 (6) 得：

$$P(b_{j(k+1)} < b_{i(k+1)} | j \neq i) = \frac{b_{i(k+1)} - c_{k+1}}{v_{\max} - c_{k+1}} \quad (7)$$

从而得到买方 i 在 $(k+1)$ 轮拍卖中获胜的概率为：

$$P(b_{j(k+1)} < b_{i(k+1)} | j \neq i) = \left(\frac{b_{i(k+1)} - c_{k+1}}{v_{\max} - c_{k+1}} \right)^{(n-k-1)} \quad (8)$$

E_i 对 b_i 求一阶导数得：

$$\frac{\partial E_i}{\partial b_{i(k+1)}} = \frac{(v_{i(k+1)} - b_{i(k+1)})(n-k-1)(b_{i(k+1)} - c_{k+1})^{n-k-2}}{(v_{\max} - c_{k+1})^{n-k-1}} \frac{(b_{i(k+1)} - c_{k+1})^{n-k-1}}{(v_{\max} - c_{k+1})^{n-k-1}} \quad (9)$$

令上式为零，得到买方 i 在第 $k+1$ 轮拍卖中的优化报价为：

$$b_{i(k+1)}^* = \frac{(n-k-1)v_{i(k+1)} + c_{k+1}}{(n-k)} \quad (10)$$

第 3 步：每一轮拍卖双方成交的条件是其增益大于开销。若开销大于增益，则说明当前节点不适合参与协作转发。每一轮成功竞拍的买卖双方退出接下来所有的拍卖，直到将所有的中继节点拍卖完为止。

如图 3-2-1 所示为 MRDA 拍卖算法的流程图：

输入：业务流，中继节点；

输出：中继节点分配结果；

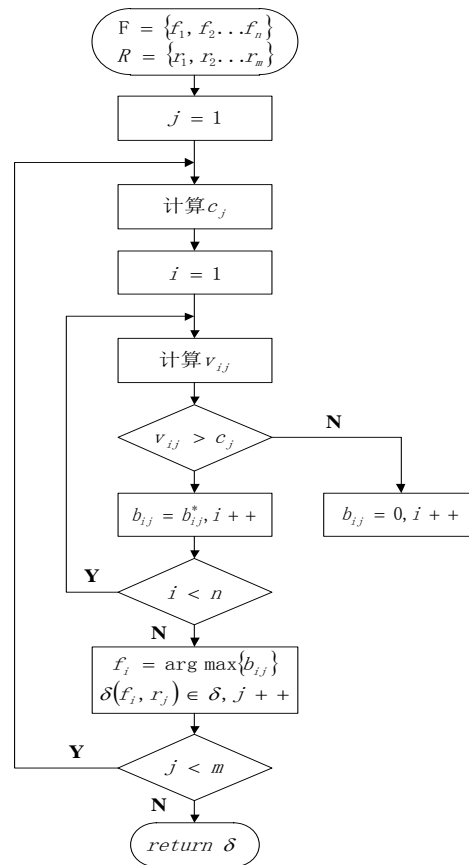


图 3-2-1 MRDA 中继选择算法流程图

该算法中，首先将拍卖分为 m 轮进行，并计算中继节点 r_j 的成本 c_j ，接着计算采取协作转发业务流 f_i 获取的收益 v_{ij} 。如果增益大于开销，即 $v_{ij} > c_j$ ，业务流 f_i 就参与竞拍并且按照优化的报价策略进行报价以及计算相应的 b_{ij} 。中继节点采取报价最高的业务流成交，并为业务流提供协作服务，该阶段完成。最后进行下一轮拍卖，直到拍卖结束。

3 仿真结果与分析

为了验证 MRDA 算法的性能，本研究采用 Matlab 搭建的仿真平台进行仿真实验。仿真中设置信道带宽 $W=22\text{MHz}$ ，节点发送功率 $P=1\text{W}$ ，高斯白噪声功率 $\sigma^2=10^{-10}\text{W}$ 。所有节点随机分布在 $1000\text{m}\times 1000\text{m}$ 的范围内，中继节点的干扰范围为 400m 。

仿真实验中，我们把 MRDA 拍卖算法和文献[9]的分布式中继选择方法——基于随机控制算法，进行了比较。该方法以提高频谱效率以及最大化网络寿命为目标，制定了基于随机控制算法的中继选择方案，但同时也忽略了中继节点带来的额外开销。本文评估了采取不同中继节点分配方法时提升的系统吞吐量 $(B_s, B_s = \sum_{all} B_{f_i, r_j})$ ，能效 (EE, EE= (协作的信道容量—直传的信道容量)/总的能耗) 和分配的中继节点的数目。

假设业务流数目 m 和中继节点数目 n 相等，数目从 10 到 100 变化，设置信道衰落系数 $k=4$ ，图 1 为采取两种不同的中继节点选取方法时系统提升的吞吐量。可以看到，随着网络规模的增加，系统的吞吐量也随之提高，并且本文提出的方法比文献[9]的方法能获得更高的性能提升，这是因为文献[9]在中继选择时没有考虑协作干扰，而干扰会对系统性能产生不利影响，从而导致选择的中继节点不适合协作转发。

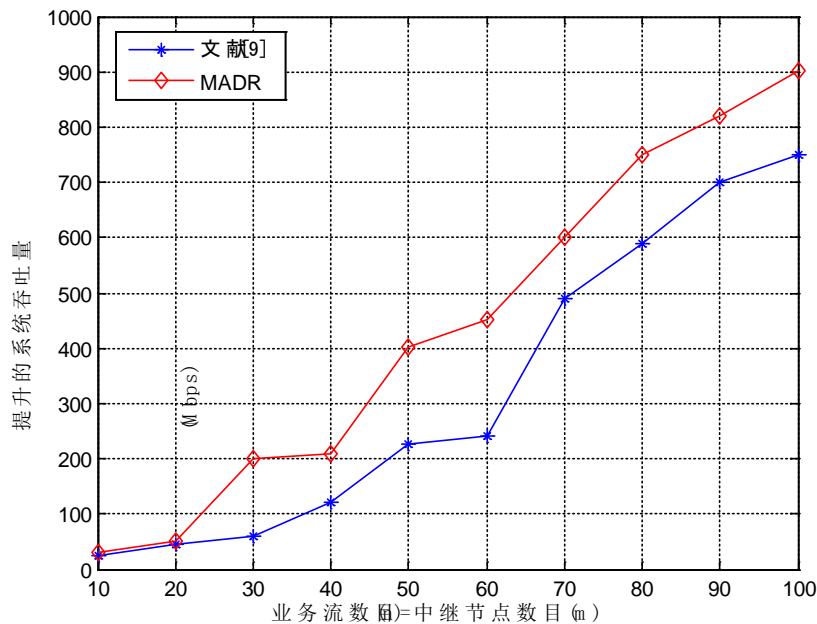


图 1 系统提升的吞吐量

接下来，图 2 比较了两个方法的系统能效，可以看到 MRDA 拍卖算法的能效相比较更高。随着网络规模的增加系统能效随之降低，这是因为网络越密集，业务流越多，干扰越大，从而降低了能量效率。因此，通过能效的变化也可以看到文献【9】中忽略协作干扰时对系统性能有着明显的影响。

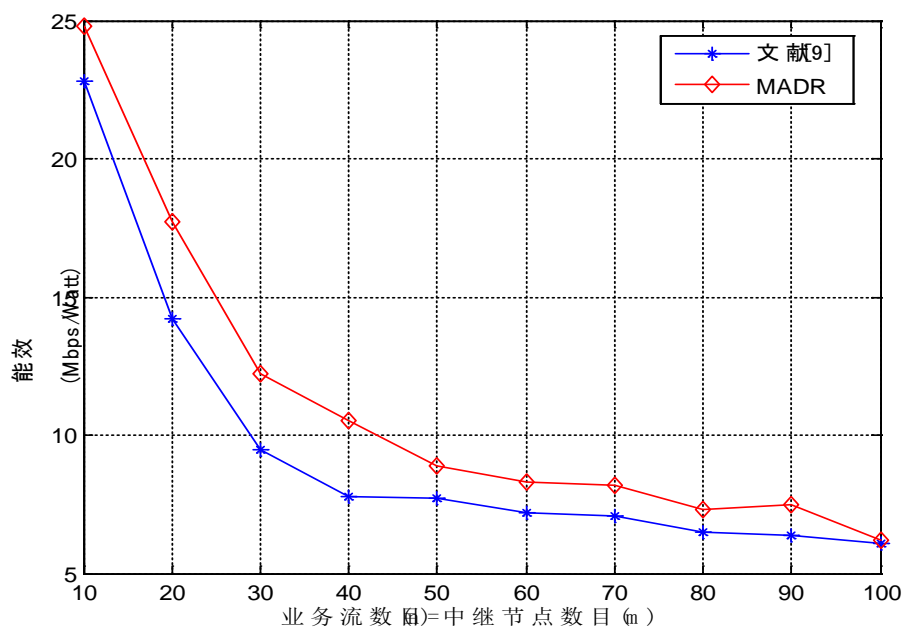


图 2 系统能效提升

图 3 给出了两个方法分配的中继节点数目。很明显，文献【9】的方法分配的中继节点数目多于 MRDA，这是因为文献【9】的方法仅仅考虑的是协作增益而忽略了协作干扰，导致匹配到中继节点的成功几率大大增加。而 MRDA 方法在干扰严重时会理性的放弃选择中继节点的机会，转而选择直接传输来避免协作干扰带来的影响，所以分配到的中继节点数目会比较少。

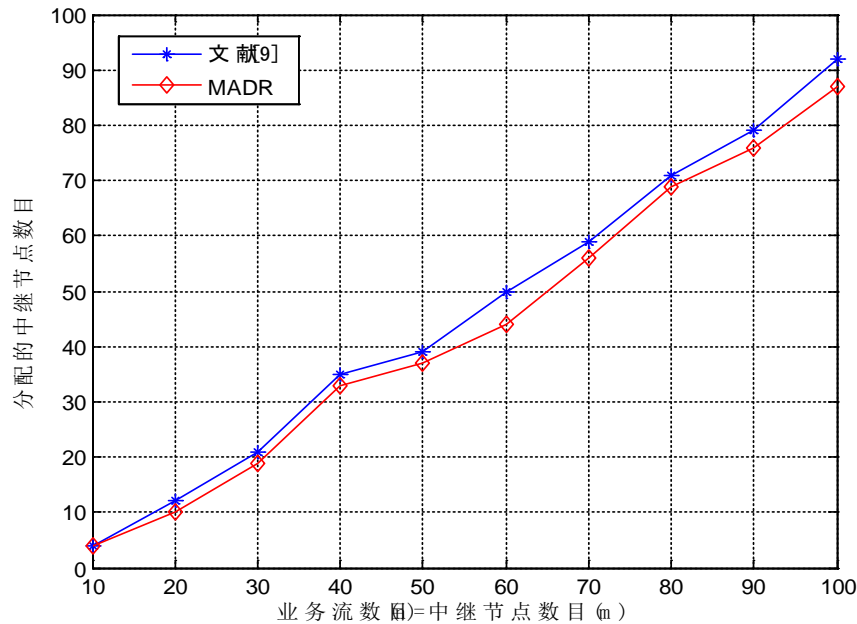


图 3 分配的中继节点数目

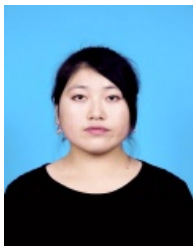
4 结束语

本文针对车联网环境下消息不在车辆间的传输范围的问题, 利用拍卖模型, 综合考虑了中继协作带来的增益与干扰, 提出一种分布式的中继节点分配 MRDA 算法, 最后通过实验仿真和比较, 证实了 MRDA 算法的正确性, 相比于现有的忽略协作干扰的中继节点分配方法, MRDA 能有效提升网络性能。

REFERENCES

- [1] ZhaoJunhui, ChenYan, Huang Dechang, et al. Key technology of vehicle self-organizing network based on "end-tube-cloud" system [J]. Technology, 2016, 32 (8): 2-9.
- [2] Ma Ning, Zhang Yibing, Shu Yongan. Research on Data Transmission Performance of Vehicle Network Based on Network Coding [J]. Computer Technology and Development, 2016, 26 (5): 36-39.
- [3] Jiang Xueting. Research on relay selection scheme of wireless relay cooperative network [D]. Xinjiang University, 2016.
- [4] Sharma S, Shi Y, Hou Y T, et al. An Optimal Algorithm for Relay Node Assignment in Cooperative Ad Hoc Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(3):879-892.
- [5] Yang, Dejun, Fang, et al. Truthful auction for cooperative communications[J]. 2011, 11(18):4888-4892
- [6] Zhu Y, Zheng H. Understanding the Impact of Interference on Collaborative Relays[M]. IEEE Educational Activities Department, 2008.
- [7] Qian Y L, Leow C Y. Opportunistic relays selection for successive relaying with inter-relay interference[C]// IEEE, Malaysia International Conference on Communications. IEEE, 2016:282-287.
- [8] Chen Jun, Fang Yong. Functional layer network coding channel capacity analysis based on AF relay [J]. Computer & Modernization, 2017 (2): 109-112.
- [9] Wei Y, Yu F R, Song M. Distributed Optimal Relay Selection in Wireless Cooperative Networks With Finite-State Markov Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5):2149-2158.

【作者简介】



¹ 苏培培（1992-），女，汉族，在读硕士，在车联网环境下的数据交换与技术研究方面的应用。

Email:346352593@qq.com.

² 樊秀梅（1967-），女，汉族，教授，移动互联网、物联网/车联网的通信控制理论与路由协议算法研究。

Email: xmfan@xaut.edu.cn