



## 车载自组织网络中基于连接时长的 RSU 部署方案

丁正超<sup>1</sup>, 魏振春<sup>1,2</sup>, 冯琳<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;  
2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对目前城市场景下车载自组织网络中的 RSU 部署问题, 提出了一种基于连接时长的 RSU 部署方案。该方案在 RSU 数量受限的情况下, 以保证通信连接时长为前提, 以最大化服务车辆数目为目的, 将部署问题建模成最大覆盖问题, 设计了二进制粒子群算法进行求解, 并结合真实的北京市路网地图和出租车 GPS 数据进行仿真实验。仿真结果表明, 该算法是收敛、稳定及可行的, 相比贪心算法, 该算法求得的部署方案能为更多的车辆提供持续性的网络服务。

**关键词:** 车载自组织网络; 路边基础设施部署; 连接时长; 二进制粒子群算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017080

## Deployment scheme of RSU based on connection time in VANET

DING Zhengchao<sup>1</sup>, WEI Zhenchun<sup>1,2</sup>, FENG Lin<sup>1</sup>

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China  
2. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure and Control Technology of  
Ministry of Education, Hefei 230009, China

**Abstract:** For the roadside unit (RSU) placement problem in vehicular Ad Hoc network (VANET), the deployment scheme of RSU based on connection time was proposed. The scheme find the optimal positions of RSU for maximizing the number of vehicles while ensuring a certain level of connection time under the limited number of RSU. The problem was modeled as a maximum coverage problem, and a binary particle swarm algorithm was designed to solve it. The simulation experiment was carried out with the real Beijing road network map and taxi GPS data. The simulation results show that the algorithm is convergent, stable and feasible. Compared with the greedy algorithm, the proposed scheme can provide continuous network service for more vehicles.

**Key words:** vehicular Ad Hoc network, roadside unit placement, connection time, BPSO algorithm

### 1 引言

车载自组织网络 (vehicular Ad Hoc network,

VANET) 是移动自主组织网络 (mobile Ad Hoc network, MANET) 的特殊形式, 是智能交通系统 (intelligent transportation system, ITS) 的重要

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61502142); 国家国际科技合作专项基金资助项目 (No.2014DFB10060)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61502142), International S&T Cooperation Program of China (No.2014DFB10060)



组成部分。VANET 由搭载无线通信设备( on-board unit , OBU )的车辆和路边基础设施( roadside unit , RSU ) 构成, 通过车间 ( vehicle to vehicle , V2V ) 通信以及车辆与路边设施间 ( vehicle to infrastructure , V2I ) 通信, 高效地实现了事故预警、辅助驾驶、道路交通信息查询以及 Internet 接入服务等多种应用<sup>[1]</sup>。由于车辆的快速移动会使得由车辆组成的网络拓扑频繁变化, 造成较高的网络时延和数据分组丢失率, 因此车辆与 RSU 间的通信对提升网络性能有更加重要的作用<sup>[2]</sup>。若某特定的道路区域要达到全覆盖, 则需要部署大量的 RSU, 然而部署、维护 RSU 需要高昂的成本, 并且可以部署的 RSU 的数量往往会受到一定的限制。在 RSU 数量受限的条件下, 如何选择最优的位置来部署 RSU、加强网络覆盖、提升网络服务质量, 成为一个重要的问题。

参考文献[3]提出了将 BEH( balloon expansion heuristic ) 方法用于最优化部署数量受限的 RSU, 目标最小化事故消息的播报时间。参考文献[4]将部署问题建模成整数线性规划问题, 在 RSU 数量受限的条件下, 最大化网络吞吐量。上述文献的研究主要考虑的是在高速公路上最优化部署 RSU, 并不适用于拓扑结构复杂的城市道路。参考文献[5]提出了基于真实车载移动数据的 RSU 部署算法, 综合考虑部署位置的均匀性和中心性以优化网络整体性能。参考文献[6]提出了基于车流量的路边单元 RSU 部署方案, 通过对路口的车流量进行统计分析, 在城市重要交通枢纽和交叉

路口部署 RSU, 从而提高网络通信的效率。参考文献[7]提出了基于路口权重的 RSU 部署方案, 由车辆密度、车辆速度、路口危险程度等因素计算路口的权重值, 并根据路口权重值最优化部署 RSU。参考文献[8]结合迪杰斯特拉算法和遗传算法用于最优化部署 RSU 以降低网络时延。上述文献的研究基本都以吞吐量或时延作为 RSU 部署方案优劣的指标, 并未考虑网络连接时长带来的影响, VANET 多数应用要求通信连接具有一定的连续性, 连接时间长短会降低网络服务的质量, 甚至可能导致车辆与 RSU 无法建立通信连接。此外, 它们只考虑在路口部署 RSU, 然而对于长路段、危险区域、点区域并未考虑。基于上述研究的不足, 本文提出了基于连接时长的 RSU 部署方案, 该方案考虑在城市区域内的路口和路段上部署数量受限的 RSU, 在保证连接时长的前提下, 期望为更多的车辆提供网络服务。

## 2 RSU 部署模型

城市道路网络可以被表示为一张由顶点集  $I$  和边集  $E$  构成的无向图  $G, G=(I,E)$ 。每个顶点  $I_i(I_i \in I)$  代表一个路口( 这里的路口指的是一个连接点, 它可以是一个十字路口、一个道路枢纽, 还可以是一个环岛)。每条边  $E_i(E_i \in E)$  代表一个物理路段。假定 RSU 的通信半径为  $r$ , 对物理路段  $E_i$  以  $2r$  为长度进行划分, 形成若干个逻辑路段  $E_{ij}$ , 其中  $E_{ij} \in E_i$ , 此时  $E_i = \{E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{iu}\}$ , 路段划分示意如图 1 所示。其中  $u$  表示物理路段  $E_i$  能划分的

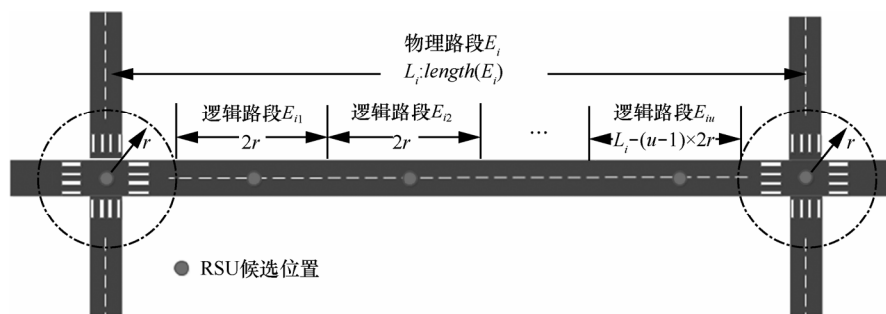


图 1 路段划分示意

2017080-2

逻辑路段数量, 可通过式 (1) 计算而得:

$$u = \left\lceil \frac{\text{length}(E_i) - 2r}{2r} \right\rceil \quad (1)$$

由所有路口和逻辑路段的中心构成部署 RSU 的候选位置集  $P$ ,  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 每个候选位置最多部署一个 RSU。定义 0-1 变量  $y_i (1 \leq i \leq n)$ , 如果在候选位置  $p_i$  部署 RSU 则  $y_i = 1$ , 否则  $y_i = 0$ 。

定义车辆集合  $V$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 定义变量  $d_j (1 \leq j \leq m)$ ,  $d_j > 0$  表示车辆  $v_j$  的行程持续时长, 定义变量  $t_{ij} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$ ,  $t_{ij} > 0$  表示车辆  $v_j$  与部署在候选位置  $p_i$  上的 RSU 之间的连接时长 (车辆  $v_j$  进入该 RSU 通信范围的时刻起直至离开该范围的时间间隔), 引入变量  $s_{ij} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$  表示车辆  $v_j$  经过候选位置  $p_i$  的平均车速, 那么  $t_{ij}$  就可以通过式 (2) 求得:

$$t_{ij} = \frac{2r}{s_{ij}} \quad (2)$$

考虑不同车辆的行程持续时长不同, 为了统一衡量车辆与 RSU 之间的连接时长, 引入连接时长比  $c_j (1 \leq j \leq m)$  表示车辆  $v_j$  与 RSU 间的连接时长占其行程持续时长的比例, 计算式为:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ij} y_i}{d_j} \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3), 进一步转化为:

$$c_j = \frac{2r}{d_j} \times \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{s_{ij}} \quad (4)$$

定义时长比阈值  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon \in (0, 1)$  表示车辆与 RSU 间的连接时长与其行程时长应满足的最小比例。定义 0-1 变量  $x_j (1 \leq j \leq m)$ , 对于任意车辆  $v_j$ , 如果它与 RSU 间的连接时长和其行程时长的比值大于  $\varepsilon$ , 则  $x_j = 1$ , 否则  $x_j = 0$ , 如式 (5) 所示:

$$x_j = \begin{cases} 1, & c_j > \varepsilon \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

令  $U = \{v_j | x_j = 1, v_j \in V\}$  表示满足连接时长比要求的车辆集合。本文问题是在 RSU 部署数量受限的条件下, 如何选择最优的位置来为尽可能多的车辆提供一定连接时长的网络服务, 即给定 RSU 部署数量  $k$  如何从候选位置集  $P$  中选择  $k$  个位置来部署 RSU 使得  $|U|$  最大, 进一步表述为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j=1}^m x_j \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n y_i = k, y_i \in \{0, 1\}, \forall i \in P \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 求解算法设计

本文所建模型为 NP 难问题, 使用二进制粒子群 (binary particle swarm, BPSO) 算法进行求解, 根据本文模型设计了编码规则、适应度函数, 并在惯性权重中引入自适应扰动机制以克服传统粒子群算法易早熟的缺点。

#### 3.1 粒子编码

二进制粒子群算法中粒子维数对应 RSU 候选位置的个数, 粒子每一维位置的取值 1 或者 0 代表各候选位置是否被选中来部署 RSU, 例如有 4 个候选位置, 则编码  $\{1, 0, 0, 1\}$  表示候选位置 1 和 4 被选中来部署 RSU。

#### 3.2 初始化

(1) 初始化粒子群参数, 包括种群规模  $M$ 、最大迭代次数  $t_{\max}$ 、学习因子  $c_1$  和  $c_2$ 、最大惯性权重  $\omega_{\max}$ 、最小惯性权重  $\omega_{\min}$ 、最大扰动因子  $g_{\max}$ 。

(2) 初始化粒子的位置和速度, 粒子的初始位置为随机的二进制向量, 判断向量中 1 的个数是否小于或等于  $k$  (最多部署  $k$  个 RSU), 若满足则将该粒子保留, 否则将其抛弃并随机产生一个新粒子, 直至粒子数目达到  $M$ 。

#### 3.3 适应度函数

本文适应度函数设计为:

$$f = \sum_{j=1}^m x_j - M \times \max(\sum_{i=1}^n y_i - k, 0) \quad (7)$$



其中,  $m$  是车辆数目,  $n$  是候选位置数目,  $k$  是待部署 RSU 数目,  $M$  是惩罚因子,  $\sum_{j=1}^m x_j$  为本文目标函数,  $M \times \max(\sum_{i=1}^n y_i - k, 0)$  为惩罚函数。

### 3.4 粒子的位置和速度更新

二进制粒子群中粒子  $i$  的各维速度更新计算式为:

$$V_{ij}(t+1) = \omega \times V_{ij}(t) + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{ij}(t) - X_{ij}(t)) + c_2 \times \text{rand}() \times (P_{gj}(t) - X_{ij}(t)) \quad (8)$$

其中,  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,  $\text{rand}()$  为随机函数, 产生  $[0,1]$  之间的随机数,  $t$  为当前代数,  $P_{ij}(t)$  表示第  $t$  代时搜索到的历史最优解,  $P_{gj}(t)$  表示第  $t$  代时搜索到的全局最优解。在惯性权重  $\omega$  中引入自适应扰动机制<sup>[9]</sup>, 增强粒子群跳出局部最优的能力。惯性权重  $\omega$  的表达式为:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \times t \times (1 - \frac{g}{2g_{\max}})^g \quad (9)$$

其中,  $\omega_{\max}$  为最大惯性权重,  $\omega_{\min}$  为最小惯性权重,  $t$  为当前的迭代次数,  $g_{\max}$  为最大扰动因子, 扰动因子  $g$  的取值可表示为:

$$g = \begin{cases} 0, \text{最优解在进化} \\ g+1, \text{最优解已} N \text{次未进化, 且 } g+1 < g_{\max} \\ g_{\max}, \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

二进制粒子群中粒子  $i$  的各维位置更新计算式为:

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} 1, \text{rand}() < \text{Sig}(V_{ij}(t)) \\ 0, \text{rand}() \geq \text{Sig}(V_{ij}(t)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Sig}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (12)$$

### 3.5 终止条件

设置最大迭代次数  $t_{\max}$ , 每次迭代通过适应度函数时对粒子位置进行优劣评定, 更新粒子当前的个体最优位置和全局最优位置, 循环更新粒子的速度和位置, 达到最大迭代次数  $t_{\max}$  后终止。

## 4 仿真实验与分析

### 4.1 仿真参数

选取北京市某区域内 (东经  $116.27^\circ$  至  $116.35^\circ$ 、北纬  $39.87^\circ$  至  $39.94^\circ$ ) 的主干街道作为 RSU 的部署区域。RSU 采用 IEEE 802.11p 协议, 通信半径  $r=300 \text{ m}$ <sup>[10]</sup>。将长度大于  $2r$  (即  $600 \text{ m}$ ) 的路段进一步划分成若干短路段, 由所有路口和路段中心构成部署 RSU 的 162 个候选位置, 如图 2 中圆点所示。并选取集中一周内出现在该区域的 200 辆北京市出租车的轨迹数据来进行仿真。鉴于通过 GPS 获得的位置数据在记录频率上并不统一, 因此需要对数据进行预处理。首先在北京市地图上绘制车辆轨迹, 通过线性回归的方法进行地理位置插值, 保证记录频率在  $15 \text{ s}$  左右。

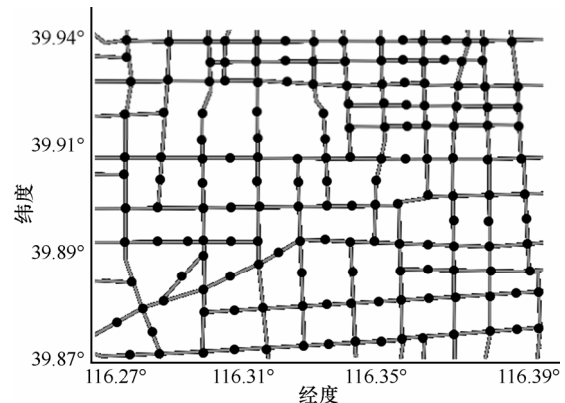


图 2 RSU 候选位置

采用 MATLAB 对二进制粒子群算法进行仿真, 设置种群大小  $M=50$ , 学习因子  $c_1=c_2=2.0$ , 最大惯性权重  $\omega_{\max}=0.9$ , 最小惯性权重  $\omega_{\min}=0.5$ , 最大扰动因子  $g_{\max}=10$ , 最大迭代次数  $t_{\max}=200$ 。

### 4.2 结果与分析

#### (1) 算法的收敛性分析

将二进制粒子群算法程序运行 20 次, 取 20 次的平均值作为实验结果。设置  $\varepsilon=0.3$ ,  $k=40$ , 二进制粒子群算法迭代如图 3 所示。

由图 3 可知, 二进制粒子群具有较好的收敛性, 前 20 代快速收敛, 在第 20 代到第 80 代过程

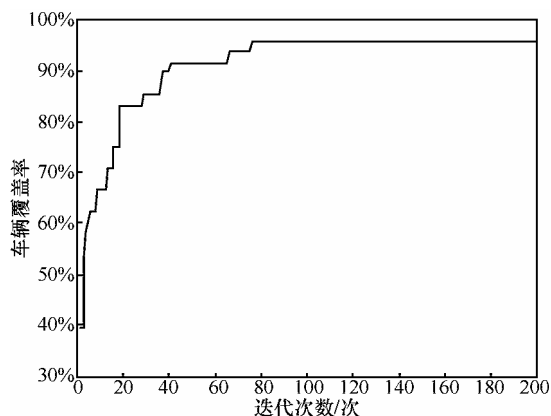
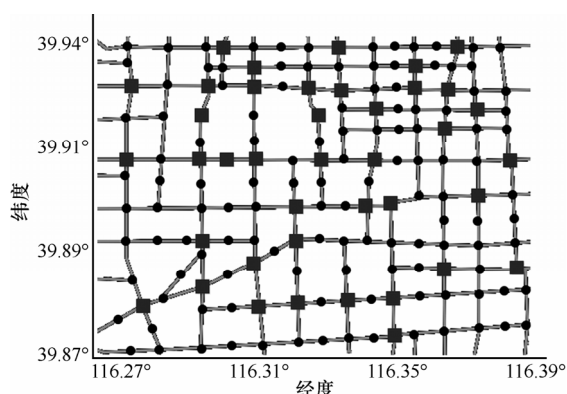


图3 二进制粒子群算法迭代

中，多次遇到局部最优解，由于在惯性权重中引入自适应扰动机制，算法很快就跳出局部最优解，当迭代到第80代左右时，目标函数收敛于96%。

当 $\varepsilon=0.3$ 、 $k=40$ 时，运用二进制粒子群算法求得最优部署位置，如图4所示，其中圆点为候选位置，方格为最终的RSU部署位置。

图4 RSU部署位置 ( $\varepsilon=0.3$ 、 $k=40$ )

## (2) 算法的性能分析

为了评价求解算法的性能，引入贪心（Greedy）算法进行对比。贪心算法求解问题时，最为关键的是贪心策略的选择，为此引入变量 $w_i$ 表示候选位置 $p_i$ 为车辆提供的累积连接时长，计算式为：

$$w_i = \sum_{j=1}^m t_{ij} \quad (13)$$

在每次迭代中选择 $w_i$ 最大的位置作为部署位置，直到所有车辆都满足连接时长要求或者部署数量达到 $k$ 。

本文的优化目标为最大化服务车辆数目，因而使用车辆覆盖率（满足连接时长要求的车辆数目/车辆总数目）作为算法性能优劣的评判依据。首先研究不同RSU数量下，两种算法求得的车辆覆盖率，将连接时长比阈值 $\varepsilon$ 设置为0.3，并将RSU部署数量 $k$ 分别设置为{10,15,20,25,30,35,40}，仿真结果如图5所示。

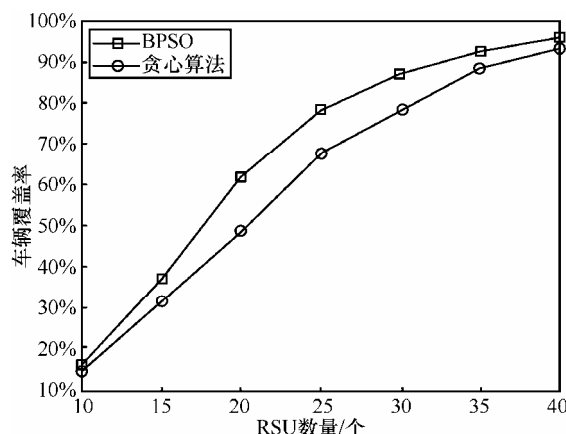


图5 不同RSU数量下BPSO和贪心算法求得的车辆覆盖率

由图5可知，当 $k=10$ 时，两种算法求得的车覆盖率都比较低，这是由于在RSU部署数量较少的情况下，对于多数车辆很难与RSU相遇，也就难以满足连接时长的要求。随着RSU数量的增加，两种算法求得的覆盖率也随之增加，但二进制粒子群算法的增幅要高于贪心算法。当 $k=20$ 时，二进制粒子群算法求得的覆盖率甚至比贪心高出21%左右，这是由于贪心算法在部署过程中只考虑单个候选位置的累积连接时长，具有一定局限性，车辆虽然与某个RSU的连接时长很大，但如果它在行驶过程中遇到的RSU数量很少，它依旧很难达到连接时长比要求。当 $k=40$ 时，两种算法求得的车覆盖率相近而且增幅变得平缓，说明此时RSU的部署数量（ $k=40$ ）相对连接时长比要求（ $\varepsilon=0.3$ ）已接近饱和。总体而言，二进制粒子群算法求得的车覆盖率要高于贪心算法。

接着研究在不同连接时长要求下，两种算法求得的车覆盖率。将 $k$ 设置为40，并将 $\varepsilon$ 分



别设置为 $\{0.3, 0.35, \dots, 0.85, 0.9\}$ , 仿真结果如图6所示。

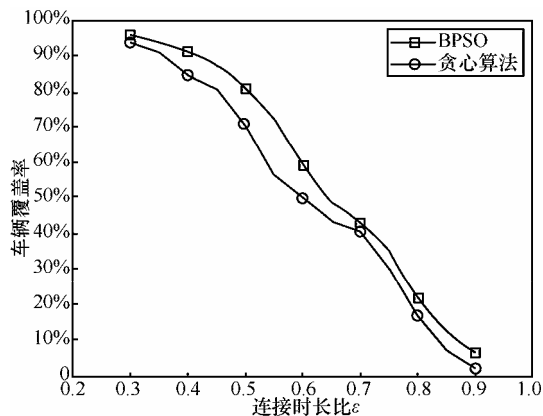


图6 不同连接时长比  $\varepsilon$  要求下 BPSO 和贪心算法求得的车辆覆盖率

由图6可知,随着 $\varepsilon$ 的增加,两种算法求得的车辆覆盖率随之降低,但是二进制粒子群算法求得的覆盖率始终高于贪心算法,并且覆盖率的下降趋势也比贪心算法平缓,这是由于二进制粒子群算法是从全局RSU能服务的车辆数目角度进行部署位置的选择,而不是局限考虑单个位置为车辆提供的连接时长,因而相比贪心算法,二进制粒子群算法求得的车辆覆盖率受连接时长要求变化的影响相对较小。

上述的仿真结果说明,二进制粒子群算法具有较好的收敛性,与贪心算法相比,能得到更优的RSU部署方案。将此算法应用于RSU部署规划的实际工作中,可以取得较好的效果。

## 5 结束语

针对城市场景下VANET中路边基础设施的部署问题进行了研究,提出了一种基于连接时长的RSU部署方案,设计了二进制粒子群算法进行求解,并结合北京市路网地图和出租车移动轨迹进行仿真实验。仿真结果表明,相比贪心算法,二进制粒子群算法在部署相同数量的RSU前提下能为更多的车辆提供持续性的网络服务。目前只考虑在各候选位置部署最多一个

RSU,且RSU通信半径固定。考虑在各候选位置部署多个RSU及RSU半径可变的部署方案有待进一步研究。

## 参考文献:

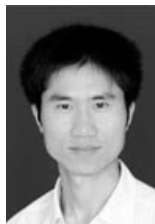
- [1] CUNHA F D D, BOUKERCHE A, VILLAS L, et al. Data communication in VANETs: a survey, challenges and applications[J]. Journal of Biological Chemistry, 2014, 274(39): 27605-27609.
- [2] BEN B M, DRIRA W, FILALI F. Roadside units placement within city-scaled area in vehicular ad-hoc networks[C]//International Conference on Connected Vehicles and Expo, November 3-7, Vienna, Austria. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1010-1016.
- [3] ASLAM B, ZOU C C. Optimal roadside units placement along highways[C]//Consumer Communications and Networking Conference, January 8-11, Las Vegas, NV, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 814-815.
- [4] WU T J, LIAO W, CHANG C J. A cost-effective strategy for road-side unit placement in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8): 2295-2303.
- [5] 奎晓燕, 杜华坤, 肖雪峰, 等. 基于真实车载移动数据的RSU部署算法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(1): 114-118.  
KUI X Y, DU H K, XIAO X F, et al. Realistic vehicular mobility trace driven RSU deployment scheme[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(1): 114-118.
- [6] 奎晓燕, 杜华坤, 肖雪峰, 等. 基于流量的车载网络路边单元RSU部署方案[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1573-1579.  
KUI X Y, DU H K, XIAO X F, et al. Traffic amount based road side unit deployment scheme for vehicular network[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(5): 1573-1579.
- [7] CHI J, JO Y, PARK H, et al. Intersection-priority based optimal RSU allocation for VANET[C]//Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, July 2-5, Da Nang, Vietnam. New Jersey: IEEE Press, 2013: 350-355.
- [8] MEHAR S, SENOUCI S M, KIES A, et al. An optimized road-side units (RSU) placement for delay-sensitive applications in vehicular networks[C]//Consumer Communications and Networking Conference, January 9-12, Las Vegas, NV, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 121-127.
- [9] 张国富, 蒋建国, 夏娜, 等. 基于离散粒子群算法求解复杂联盟生成问题[J]. 电子学报, 2007, 35(2): 323-327.  
ZHANG G F, JIANG J G, XIA N, et al. Solutions of complicated coalition generation based on discrete particle swarm optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2): 323-327.

- [10] 陈娟, 蔡孙增, 朱正航, 等. 基于 IEEE 802.11p 的车载无线通信原型系统的实现[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 72-79.  
CHEN J, CAI S Z, ZHU Z H, et al. Realization of WAVE system based on IEEE 802.11p[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 72-79.

[作者简介]



丁正超 (1992-), 男, 合肥工业大学计算机与信息学院硕士生, 主要研究方向为物联网、车联网。



魏振春 (1978-), 男, 合肥工业大学计算机与信息学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、嵌入式系统、分布式控制和离散事件系统。



冯琳 (1979-), 女, 合肥工业大学计算机与信息学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机网络、无线通信。