软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
*Journal of Software*,2018,29(Suppl.(1)):43−51
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

# 基于有用贡献量的路侧单元部署算法*

吴璟莉[1,2,3], 叶豫桐[1], 吴 湧[1]

[1](广西师范大学 计算机科学与信息工程学院,广西 桂林 541004)
[2](广西多源信息挖掘与安全重点实验室(广西师范大学),广西 桂林 541004)
[3](广西区域多源信息集成与智能处理协同创新中心,广西 桂林 541004)
通讯作者: 吴璟莉, E-mail: wjlhappy@mailbox.gxnu.edu.cn

**摘 要**: 车路通信是车载自组网的一种通信方式,路侧单元的合理部署是保证通信服务质量的关键.Delta 网络度量 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 是衡量车载网服务质量的一个重要指标,Sarubbi 等人在该服务质量标准下,提出基于相对行程时间的部署方法 Delta-r.然而,车辆在栅格上“虚高”的相对行程时间会负面影响决策.针对这个问题,提出基于有用贡献量的路侧单元部署方法 Delta-uc,该方法对车辆与路侧单元的相对行程时间进行修正,仅保留行程时间的有用贡献量,以避免“多余”行程时间对决策的影响.采用模拟数据和德国科隆市真实的车辆轨迹数据进行实验测试,实验结果表明,在许多服务质量度量下,Delta-uc 算法能够获得较 Delta-r 算法更少的路侧单元数,具有更强的实用价值.
**关键词**: 算法;车载自组网;车路通信;路侧单元;有用贡献量

中文引用格式: 吴璟莉,叶豫桐,吴湧.基于有用贡献量的路侧单元部署算法.软件学报,2018,29(Suppl.(1)):43−51. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18005.htm

英文引用格式: Wu JL, Ye YT, Wu Y. Roadside unit deployment algorithm based on useful contribution. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018,29(Suppl.(1)):43−51 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/18005.htm

## Roadside Unit Deployment Algorithm Based on Useful Contribution

WU Jing-Li[1,2], YE Yu-Tong[1], WU Yong[1]

[1](College of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)
[2](Guangxi Key Laboratory of Multi-Source Information Mining & Security (Guangxi Normal University), Guilin 541004, China)
[3](Guangxi Collaborative Center of Multisource Information Integration and Intelligent Processing, Guilin 541004, China)

**Abstract**: It is crucial to appropriately deploy Roadside Units (RSUs) to guarantee the quality of communication service. The Delta Network metric $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ is an important metric to evaluate the QoS of VANET. Based on this metric, Sarubbi, *et al*. proposed a deployment method Delta-r by using relative trip duration. However, the “false high” relative trip duration of vehicles at urban cells might play a negative effect on decision-making. In order to solve this problem, an improved algorithm Delta-uc, which is based on Useful Contribution, is presented. It avoids the negative effect of “extra” trip duration by retaining only the useful relative trip duration of a vehicle at an urban cell. The experimental data are coming from realistic mobility trace of Cologne, Germany. Experimental results indicate that in many cases of service requirement metrics, the Delta-uc algorithm can obtain fewer roadside units than the Delta-r algorithm, and is more practical in realistic applications.
**Key words**: algorithm; vehicular ad hoc network (VANET); vehicle-to-infrastructure (V2I); roadside units (RSUs); useful contribution

随着移动自组网技术的飞速发展,其应用辐射到车联网系统,车载自组网(vehicular ad hoc network,简称

* 基金项目: 国家自然科学基金(61762015); “八桂学者”工程专项; 广西科技基地和人才专项(AD16380008)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61762015); “Bagui Scholar” Project Special Funds; Guangxi Special Project of Science and Technology Base and Talents (AD16380008)
收稿时间: 2018-05-01; 采用时间: 2018-08-30

VANET)应运而生,并得到广泛关注[1−3],VANET 在交通及预警信息获取、路况导航、协作驾驶等方面发挥着重要的作用.车载自组网主要分为车车通信(vehicle-to-vehicle,简称 V2V)和车路通信(vehicle-to-infrastructure,简称 V2I)两种通信方式.车车通信虽然不需要增加额外的基础设施,但网络整体通信能力在车辆稀少的区域会受到严重的影响;而在车路通信的车载自组网中,车辆通过与路侧单元(roadside unit,简称 RSU)通信来完成信息交互,从而保障车载自组网整体通信效率的提高[4,5].但是,路侧单元的安装成本非常高昂,需要合理规划其安装数量及路网位置,路侧单元部署(roadside units deployment in VANET 或 roadside infrastructure allocation in VANET)问题受到研究者们的日益关注[4,5].

路侧单元部署问题通常以部署成本及车载自组网服务质量(quality of service,简称 QoS)等作为优化目标.Zheng 等人[6]基于时延受限的服务质量,提出 Alpha Coverage 方法,确保在满足每$\alpha$长度路径上至少部署一个路侧单元的条件下部署最少单元数;Zheng 等人[7]提出基于连接概率服务质量的部署方法,即保障车路通信的里程(时间)占总里程(时间)一定比例下部署最少单元数;Trullols 等人[8]将部署问题形式化为最大覆盖问题(maximum coverage problem)进行求解;Lee 等人[9]提出,在给定路侧单元数目的约束下,以提高连接时间和降低断连时间为目标的贪心部署算法;Wu 等人[10]基于网络最大吞吐量的服务质量,提出针对高速公路的部署模型和策略;Chi 等人[11]提出基于最大网络连通性的部署方法;Silva 等人[4]以 Delta 网络度量(delta network metric, $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$)来衡量车载自组网服务质量,其中,$\rho_1$表示车辆和 RSU 保持通信的时间占其总行驶时间的百分比,$\rho_2$表示与 RSU 保持通信的时间指标达到$\rho_1$的车辆数占总车辆数的百分比. $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$兼顾考虑了单个车辆和全部车辆的通信质量,且对路网拓扑没有限制,具有良好的实用价值.因此,本文主要对基于 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量的部署问题进行研究.Silva 等人[4]首先基于绝对行程时间,提出满足 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量的部署算法 Delta-g[4],随后,Sarubbi 等人提出基于相对行程时间选择 RSU 放置点的部署方法 Delta-r[5],获得较 Delta-g 部署方案更少的路侧单元数量,并基于 Delta-r 方法提出遗传算法 Delta-GA[12]及混合贪婪随机自适应和变邻域搜索算法 GRASP+VNS[13].然而,当车辆在栅格上存在“虚高”的相对行程时间时,Delta-r 的决策方法可能会受到负面影响.针对这个问题,本文首先提出基于有用贡献量的路侧单元部署方法 Delta-uc,该方法对车辆与路侧单元的相对行程时间进行修正,仅保留行程时间的有用贡献量,以避免“多余”行程时间对决策的影响.实验结果表明,在许多服务质量度量下,Delta-uc 算法能够获得较 Delta-r 算法更少的路侧单元数.

## 1 问题描述与建模

给定任意拓扑路网,首先对其进行栅格化处理[5,12],即以预设尺寸对目标地图区域进行切分,将其划分为多个大小相同的基础栅格.栅格尺寸可根据实际需求来确定,为不失一般性,假设一个逻辑路侧单元可覆盖一个基础栅格,则一个基础栅格中最多部署一个逻辑路侧单元[5].

令 $U=\{u_1,u_2,\ldots,u_n\}$表示栅格化得到的基础栅格集,$V=\{v_1,v_2,\ldots,v_n\}$表示在 $U$ 中行驶的所有车辆集合. $TR=\{T_k|T_k\subset U,k=1,2,...,m\}$ 记录全部车辆在栅格集 $U$ 上的运动轨迹集合,即 $T_k$ 表示车辆 $v_k$ 经过的所有基础栅格,其中,部署了路侧单元的栅格集记为 $\tilde{T}_k(\tilde{T}_k\subset T_k)$, 则部署路侧单元的栅格全集 $U_R=\bigcup_{k=1}^{m}\tilde{T}_k$. 假设车辆 $v_k$ 和部署在栅格 $u_i$ 上的 RSU 的通信时间与其在栅格 $u_i$ 上的行程时间 $t_k^i$ $(k=1,2,...,m,i=1,2,...,n\}$ 相等,则行程时间集 $TT=\{t_k^i\,|\,v_k\in V,u_i\in U\}$. 下面给出相关定义.

**定义 1(通信占比)**. 车辆 $v_k$ 和路侧单元的通信时间与其总行程时间的比值,即 $\sum_{u_i\in\tilde{T}_k}t_k^i\Big/\sum_{u_i\in T_k}t_k^i$, 称为车辆 $v_k$ 的通信占比.

**定义 2(Delta 网络度量 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$)**[5]. 给定参数$\rho_1$ 和$\rho_2$ $(0\leqslant\rho_1,\rho_2\leqslant 1)$, 令 $V_{\rho_1}$ $(V_{\rho_1}\subset V)$ 记录通信占比大于等于$\rho_1$的车辆,若 $\left|V_{\rho_1}\right|\geqslant\rho_2\cdot|V|$, 则称 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 成立,部署方案达到 Delta 网络度量 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 的服务质量.

根据上述定义,下面给出基于 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量的路侧单元部署问题的数学模型:

$$\min\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{1}$$

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$\text{s.t.}\quad \frac{\sum_{u_i\in\tilde{T}_k} t_k^i}{\sum_{u_i\in T_k} t_k^i} \geqslant \rho_1\cdot y_k,\ k=1,2,\ldots,m,i=1,2,\ldots,n \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{m} y_k \geqslant \rho_2\cdot|V| \tag{3}$$

$$x_i=\begin{cases}1, & 若 u_i\in\bigcup_{k=1}^{m}\tilde{T}_k\\ 0, & 否则\end{cases},\ i=1,2,\ldots,n \tag{4}$$

$$y_k=\begin{cases}1, & 若 v_k\in V_{\rho_1}\\ 0, & 否则\end{cases},\ k=1,2,\ldots,m \tag{5}$$

公式(1)为问题求解的目标函数,即最小化路侧单元的部署数目;约束条件(2)确保问题解中的车辆均有$\rho_1$比例的行程时间与路侧单元保持通信;约束条件(3)表示问题解中车辆的最少数目,即至少达到总车辆数的$\rho_2$比例;约束条件公式(4)和公式(5)为 $x_i$ 和 $y_k$ 的取值约束.

## 2 基于有用贡献量的部署方法 Delta-uc

### 2.1 有用贡献量

由上述数学模型可知,路侧单元部署问题即试图部署最少的路侧单元以满足 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量的问题.Sarubbi 等人[5]提出求解算法 Delta-r,基于车辆在栅格的相对行程时间(即车辆在栅格的绝对行程时间与车辆总行程时间的比值),迭代选取车辆行程时间和最长的基础栅格部署路侧单元.但是,当某些车辆在栅格的相对行程时间超过$\rho_1$时,“多余”的行程时间会使基础栅格上的车辆行程时间之和出现“虚高”现象,从而影响决策的选择.表 1 给出一个实例,其中,$U=\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5\}$,$V=\{v_1,v_2,v_3\}$,车辆在基础栅格上的绝对行程时间和相对行程时间如表所示.假设给定$\rho_1$=0.4,$\rho_2$=0.6,根据 Delta-r 算法,首先应选中基础栅格 $u_4$,这时车辆 $v_1$ 满足$\rho_1$指标,$\rho_2$未满足.然而根据表中数据可知,若在 $u_2$ 栅格部署 RSU,则可使车辆 $v_1$ 和 $v_2$ 均满足$\rho_1$指标,从而$\rho_2$得以满足,即选择 $u_2$ 比选择 $u_4$ 具有更好的优化效果.导致选择决策错误的原因在于相对指标值$\rho_1$,车辆 $v_1$ 在 $u_4$ 上存在 0.15 的“多余”时间量,从而使 $u_4$ 上的车辆行程时间之和(0.95)存在“虚高”问题.

**Table 1** An example of absolute contact time, relative contact time and useful contribution

**表 1** 绝对行程时间、相对行程时间、有用贡献量举例

| 车辆 | 绝对行程时间(s) | | | | | | 相对行程时间 | | | | | 有用贡献量 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ | $u_4$ | $u_5$ | 时间和 | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ | $\boldsymbol{u_4}$ | $u_5$ | $u_1$ | $\boldsymbol{u_2}$ | $u_3$ | $u_4$ | $u_5$ |
| $v_1$ | 5 | 40 | 0 | 55 | 0 | 100 | 0.05 | 0.4 | 0 | **0.55** | 0 | 0.05 | **0.4** | 0 | 0.4 | 0 |
| $v_2$ | 5 | 20 | 10 | 10 | 5 | 50 | 0.1 | 0.4 | 0.2 | **0.2** | 0.1 | 0.1 | **0.4** | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| $v_3$ | 40 | 20 | 20 | 40 | 80 | 200 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | **0.2** | 0.4 | 0.2 | **0.1** | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
| 求和 | 50 | 80 | 30 | 105 | 85 | – | 0.35 | 0.9 | 0.3 | **0.95** | 0.5 | 0.35 | **0.9** | 0.3 | 0.8 | 0.5 |

针对“多余”行程时间导致行程时间之和“虚高”的问题,本文提出“有用贡献量”的计算方法,如公式(6)所示,$uc_k^i$ 表示基础栅格 $u_i$ 对应于车辆 $v_k$($i$=1,2,…,$n$,$k$=1,2,…,$m$)的有用贡献量.

$$uc_k^i=\begin{cases}\rho_1, & 若 t_k^i\geqslant\sum_{u_i\in T_k} t_k^i\cdot\rho_1\\ \dfrac{t_k^i}{\sum_{u_i\in T_k} t_k^i}, & 否则\end{cases} \tag{6}$$

根据公式(6),对表 1 中的相对行程时间进行修正,得到$\rho_1$=0.4 时对应的有用贡献量,则应选取有用贡献量之和最大(0.9)的基础栅格 $u_2$ 部署路侧单元,于是 Delta 网络度量服务质量 $\Delta_{0.6}^{0.4}$ 得以满足.

### 2.2 Delta-uc 算法

本节提出基于有用贡献量的部署算法 Delta-uc.算法输入为栅格集 $U$、车辆集 $V$、车辆轨迹集合 $TR$、车辆行程时间集 $TT$、Delta 网络度量参数$\rho_1$和$\rho_2$;算法输出为选中部署 RSU 的栅格集 $U_R$.Delta-uc 算法分别以参数

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

*update* 取值为 0、1 和 2 这 3 次调用贪婪算法 sub-uc,并返回最优方案.在被调算法 sub-uc 中,首先初始化基础栅格对车辆的有用贡献量.每次循环中,以有用贡献量作为决策指标值,选取有用贡献量之和最大的栅格部署 RSU.当参数 *update* 取 0 时,每次循环动态更新基础栅格 $u_i$ 对车辆 $v_k$ 的有用贡献量,如公式(7)所示,$uc_k$ 表示车辆 $v_k$ 累计已经历的通信服务量($i$=1,2,…,$n$,$k$=1,2,…,$m$);*update* 取 1 时,仅当车辆 $v_k$ 达到 $\rho_1$ 指标,将基础栅格对其的有用贡献量清零.

$$uc_k^i=\begin{cases}\rho_1-uc_k, & 若 uc_k+uc_k^i>\rho_1\\ uc_k^i, & 否则\end{cases} \tag{7}$$

**算法 1**. Delta-uc.

输入:$U,V,TR,TT,\rho_1,\rho_2$;

输出:$U_R$.

1.$s_1$=sub-uc($U,V,TR,TT,\rho_1,\rho_2$,0)

2.$s_2$=sub-uc($U,V,TR,TT,\rho_1,\rho_2$,1)

3.$s_3$=sub-uc($U,V,TR,TT,\rho_1,\rho_2$,2)

4. $i=\arg\min|s_i|$

5.$U_R$=$s_i$

6. **return** $U_R$

**算法 2**. sub-uc.

输入:$U,V,TR,TT,\rho_1,\rho_2,update$;

输出:$U_R$.

1. $t_k=\sum_{u_i\in T_k}t_k^i\ (i=1,2,...,n,k=1,2,...,m)$ //$t_k$ 为车辆 $v_k$ 总行程时间

//步骤 2~步骤 6 初始化基础栅格 $u_i$ 对车辆 $v_k$ 的有用贡献量

2. **for** $i$=1,2,…,$n$ **do**

3. **for** $k$=1,2,…,$m$ **do**

4. **if** $t_k^i\geqslant t_k\cdot\rho_1$ **then**

5. $uc_k^i=\rho_1$

6. **else** $uc_k^i=\dfrac{t_k^i}{t_k}$

7. **while** $|V_{\rho_1}|\geqslant\rho_2\cdot|V|$ **do** //未达到 $\rho_2$ 指标,进入循环

8. $i=\arg\max\sum_{k=1}^m uc_k^i\ (i=1,2,...,n,\ u_i\notin U_R)$

9. $U_R=U_R\cup u_i$ //选中有用贡献量之和最高的栅格

10. $uc_k+=uc_k^i$ ($k$=1,2,…,$m$)//更新车辆 $v_k$ 已获得的服务量

11. **if** ($uc_k>\rho_1$) **then**

12. $V_{\rho_1}=V_{\rho_1}\cup v_k$

13. **if** *update*=0 **then** //更新栅格 $u_i$ 对车辆 $v_k$ 的有用贡献量

14. **for** $u_i\in U-U_R\ (i=1,2,...,n)$ **do**

15. **for** $k$=1,2,…,$m$ **do**

16. **if** $uc_k+uc_k^i>\rho_1$ **then**

17. $uc_k^i=\rho_1-uc_k$

18. **else if** *update*=1 **then** //将达到 $\rho_1$ 指标车辆的 $uc_k^i$ 置 0

19. **for** $k$=1,2,…,$m$ **do**

20. **if** $uc_k>\rho_1$ **then**

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

21. **for** $u_i \in U - U_R\ (i = 1,2,...,n)$ **do**

22. $uc_k^i = 0$

23. **return** $U_R$

下面对算法 Delta-uc 的时间复杂性进行分析.初始化有用贡献量(步骤 1~步骤 6)的时间复杂度为 $O(mn)$,其中,$m$ 表示车辆数,$n$ 表示栅格数;在决策环节,步骤 7 在最坏情况下循环 $n$ 次,步骤 8 的时间复杂度为 $O(mn)$,步骤 14~步骤 17 的时间复杂度为 $O(mn)$,步骤 19~步骤 22 的时间复杂度为 $O(mn)$,所以决策环节(步骤 7~步骤 22)的时间复杂度为 $O(mn^2)$.因此,算法总的时间复杂度为 $O(mn^2)$,与算法 Delta-r[5]的时间复杂度相同.

## 3 实验结果

本文对算法 Delta-r[5]和 Delta-uc 进行比较分析.实验在一台安装了 Windows 8.1 操作系统的戴尔笔记本(2.60GHz CPU,16GB 内存)上进行,程序编译器为 Microsoft Visual C++ 2013.

### 3.1 实验数据和评价指标

利用模拟数据和真实的车辆轨迹数据进行实验测试.模拟数据生成方式如下:给定一组基础栅格,随机生成 $m$ 辆车的 $m$ 条行车轨迹及车辆在栅格上的对应的行程时间.实验中,模拟栅格数量为 100×100 个,车辆在栅格上的行驶时间为 1~20 个单位时间,车辆数 $m$ 分别取值为 50 000 和 100 000.真实的车辆轨迹数据与文献[5]一致,使用德国科隆市的车辆运动轨迹和地图数据(http://kolntrace.project.citi-lab.fr/),其中包括 75 515 辆车的 10 000 多条运行轨迹.经过数据处理后[5],得到 100×100 个 270m×260m 的基础栅格以及车辆在对应栅格上的行程时间.

利用节约单元数量 $N_{\mathrm{I}}$ 和节约率 $R_{\mathrm{I}}$ 作为算法的评价指标,令 $N_{\mathrm{r}}$ 和 $N_{\mathrm{u}}$ 分别表示在 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下算法 delta-r 和 delta-uc 部署的路侧单元数目,则算法 delta-uc 较 delta-r 的节约单元数量 $N_{\mathrm{I}}$ 和节约率 $R_{\mathrm{I}}$ 分别定义如下:

$$N_{\mathrm{I}}=N_{\mathrm{r}}-N_u \tag{8}$$

$$R_{\mathrm{I}} = \frac{N_{\mathrm{I}}}{N_{\mathrm{r}}} \times 100\% \tag{9}$$

### 3.2 模拟数据结果

实验中,针对 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 设置了 81 组参数组合,即 $\rho_1,\rho_2$=0.15,0.25,…,0.95.图 1~图 4 分别给出在各种 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下,Delta-uc 算法相对 Delta-r 算法的节约单元数量 $N_{\mathrm{I}}$ 和节约率 $R_{\mathrm{I}}$.

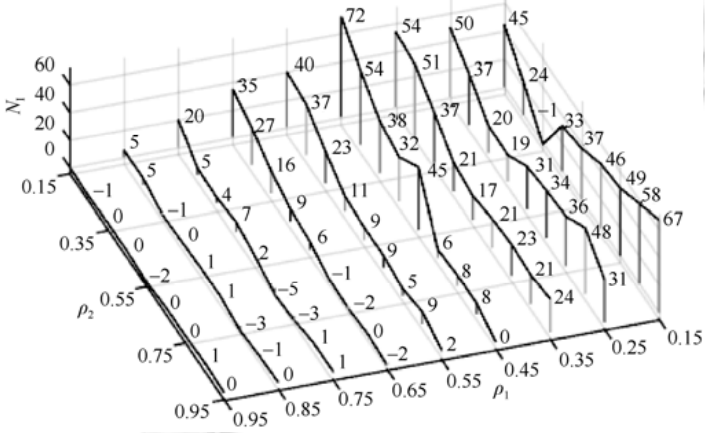


Fig.1 The $N_{\mathrm{I}}$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 50 000 vehicles)

图 1 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约单元数量 $N_{\mathrm{I}}$(模拟数据,50 000 辆车)

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

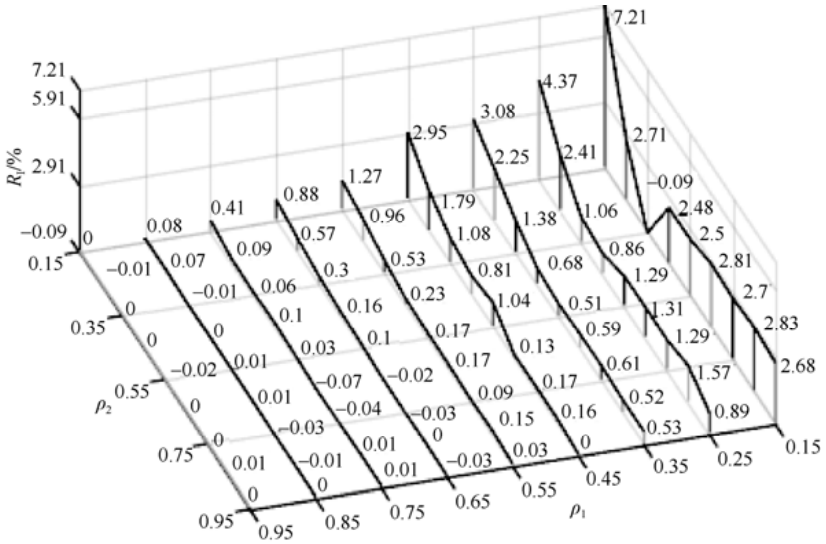


Fig.2 The $R_I$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 50 000 vehicles)

图 2 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 $R_I$(模拟数据,50 000 辆车)

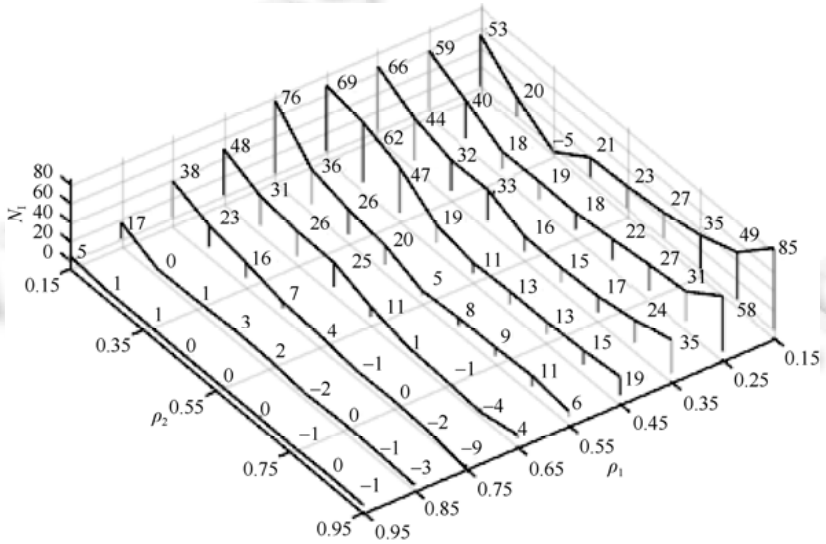


Fig.3 The $N_I$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 100 000 vehicles)

图 3 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约单元数量 $N_I$(模拟数据,100 000 辆车)

从图 1 和图 2 中可以看出,车辆数目为 50 000 辆时,Delta-r 算法只有 11 种情况下较优,且最高节约数目不超过 5 个,最高节约率不超过 0.09%,而 Delta-uc 算法有 60 种情况下较优,最高节约数目达到 72 个,最高节约率可达 7.21%.图 3 和图 4 给出车辆数目为 100 000 辆时的实验结果,Delta-r 算法同样仅有 11 种情况下较优,且最高节约数目不超过 9 个,最高节约率仅 0.42%,而 Delta-uc 算法有 63 种情况下较优,最高节约数目达到 85 个,最高节约率可达 7.9%.图 1~图 4 的实验结果表明,Delta-uc 算法在许多 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下获得较 Delta-r 算法更少的路侧单元数.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

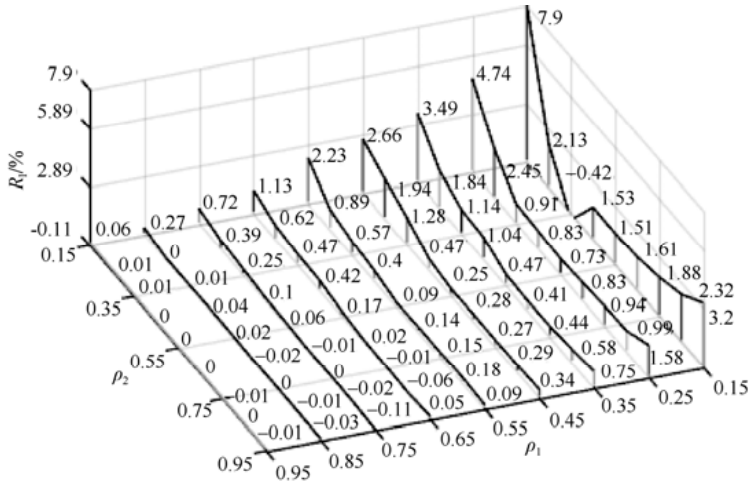


Fig.4 The $R_l$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 100 000 vehicles)

图 4 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 $R_l$(模拟数据,100 000 辆车)

### 3.3 真实数据结果

类似地,针对$\rho_1$ 和$\rho_2$ 设置 81 组参数组合,表 2 和表 3 分别给出使用真实数据时,在各种 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下,delta-r 算法和 delta-uc 算法得到的路侧单元部署数量,在表中用黑体标出某 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 设置下较少的部署量.如表 2 和表 3 所示,在 81 种参数组合中,delta-r 算法在 9 种服务质量度量下获得更少的部署量,但每次仅少 1 个单元数,优势并不明显;delta-uc 算法在 28 种服务质量度量下获得更少的部署量,最多情况下减少 15 个部署量;其余 44 种服务质量度量下两种算法的部署数量相同.

**Table 2** The $N_r$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

**表 2** 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下算法 delta-r 部署数量 $N_r$(真实数据)

| $\rho_1$ | $\rho_2$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 | 0.65 | 0.75 | 0.85 | 0.95 |
| 0.15 | 17 | 32 | **55** | 76 | 99 | 129 | 171 | 232 | 374 |
| 0.25 | **34** | 57 | 94 | 137 | 176 | 221 | 278 | 363 | 555 |
| 0.35 | 54 | **90** | **139** | 206 | 271 | **330** | 412 | 527 | 763 |
| 0.45 | 80 | 133 | 202 | **276** | 364 | 457 | **561** | 704 | 994 |
| 0.55 | **118** | 192 | 275 | 363 | 475 | 595 | **746** | 917 | 1 249 |
| 0.65 | 175 | 271 | 369 | 488 | 606 | 759 | 950 | 1 163 | 1 521 |
| 0.75 | 250 | 377 | 505 | 634 | 782 | 960 | 1 178 | 1 445 | 1 819 |
| 0.85 | 381 | 552 | 691 | 861 | 1 056 | 1 265 | 1 495 | 1 775 | 2 194 |
| 0.95 | 629 | 850 | 1 078 | 1 312 | 1 534 | 1 772 | 1 972 | 2 231 | 2 630 |

**Table 3** The $N_u$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

表 **3** 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下算法 delta-uc 部署数量 $N_u$(真实数据)

| $\rho_1$ | $\rho_2$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 | 0.65 | 0.75 | 0.85 | 0.95 |
| 0.15 | 17 | 32 | 56 | 76 | **98** | **127** | **166** | **224** | **359** |
| 0.25 | 35 | 57 | **93** | 137 | **175** | **220** | **275** | **359** | **542** |
| 0.35 | 54 | 91 | 140 | 206 | 271 | 331 | **410** | **523** | **756** |
| 0.45 | 80 | **132** | **201** | 277 | 364 | 457 | 562 | 704 | **988** |
| 0.55 | 119 | 192 | 275 | **362** | 475 | **594** | 747 | **916** | **1 245** |
| 0.65 | 175 | 271 | 369 | 488 | 606 | 759 | 950 | **1 161** | **1 518** |
| 0.75 | 250 | 377 | 505 | 634 | 782 | 960 | 1 178 | **1 442** | **1 815** |
| 0.85 | 381 | 552 | 691 | 861 | 1 056 | **1 264** | 1 495 | 1 775 | **2 192** |
| 0.95 | 629 | 850 | 1 078 | **1 311** | 1 534 | 1 772 | 1 972 | 2 231 | 2 630 |

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

图 5 和图 6 进一步给出各种 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下 $N_{\mathrm{I}}$ 和 $R_{\mathrm{I}}$ 的取值情况.从图中可以看出,当$\rho_2$ 取值较大时,即满足$\rho_1$ 服务质量的车辆比例较大时,算法 delta-uc 具有较好的优化效果,特别是当$\rho_1$ 变小时,其改进效果逐渐提升.例如,当$\rho_2$ 取值为 0.95 时,随着$\rho_1$ 从 0.95 减小至 0.15,节约单元数 $N_{\mathrm{I}}$ 从 0 提高到 15,节约率 $R_{\mathrm{I}}$ 从 0%提高到 4.0%.

下面给出 $\Delta_{0.95}^{0.15}$ 服务质量度量下的部署实例,其中,delta-r 算法需要部署 374 个路侧单元,算法 delta-uc 需要部署 359 个路侧单元.如图 3 所示,图 3(a)给出德国科隆市的车流情况图,图 3(b)为算法 delta-r 的 374 个路侧单元部署位置,图 3(c)为算法 delta-uc 的 359 个路侧单元部署位置.算法 delta-uc 较 delta-r 节约大约 4%的路侧单元.

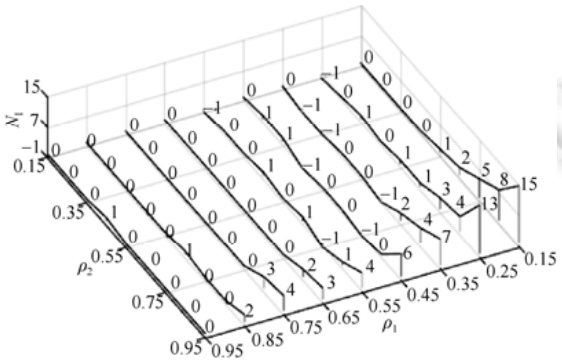


Fig.5 The $N_{\mathrm{I}}$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

图 5 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约单元数量 $N_{\mathrm{I}}$(真实数据)

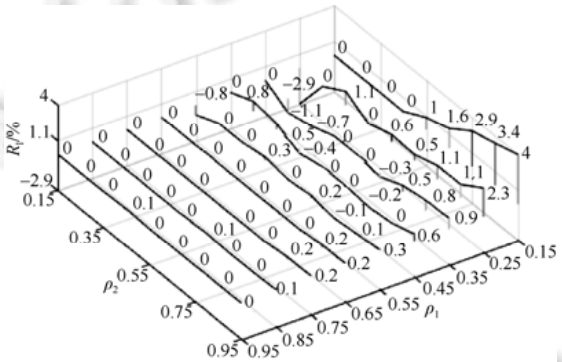


Fig.6 The $R_{\mathrm{I}}$ under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

图 6 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 $R_{\mathrm{I}}$(真实数据)

(a) 科隆市车流图 (b) Delta-r:374 个 RUSs (c) Delta-uc:359 个 RUSs

Fig.7 Deployment example under the QoS of $\Delta_{0.95}^{0.15}$ (real data)

图 7 $\Delta_{0.95}^{0.15}$ 服务质量度量下的部署实例(真实数据)

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

## 4 结 论

路侧单元部署问题是车载自组网应用中的关键问题,合理的部署能够有效提高通信服务质量并节约部署成本.本文针对 Delta-r 算法在求解 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量部署问题时,车辆在栅格上相对行程时间“虚高”的现象,提出基于有用贡献量的路侧单元部署方法 Delta-uc.Delta-uc 方法通过修正车辆与路侧单元的相对行程时间,仅保留其有用贡献量,避免“多余”行程时间对决策的影响.实验结果表明,算法 Delta-uc 具有较 Delta-r 算法更好的优化性能,在相同的 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下,算法 Delta-uc 在大多数情况下部署的路侧单元数量小于等于算法 Delta-r.此外,基于算法 Delta-uc 可以构造出有效的重组算子,作为遗传算法等元启发式方法的求解算子,下一步工作将对相关问题进行研究.

**References**:


[1] Hartenstein H, Laberteaux KP. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2008,6(6):164−171.

[2] Li F, Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007,2(2):12−22.

[3] Yousefi S, Mousavi M, Fathy M. Vehicular ad hoc networks (VANETs): Challenges and perspectives. In: Proc. of the 6th Int’l Conf. on ITS Telecommunications. 2006. 761−766.

[4] Silva CM, Meira W. Evaluating the performance of heterogeneous vehicular networks. In: Proc. of the 82nd Vehicular Technology Conf. (VTC). 2015. 1−5.

[5] Sarubbi JFM, Silva CM. Delta-r: A novel and more economic strategy for allocating the roadside infrastructure in vehicular networks with guaranteed levels of performance. In: Proc. of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symp. (NOMS). 2016. 665−671.

[6] Zheng Z, Sinha P, Kumar S. Alpha coverage: Bounding the interconnection gap for vehicular internet access. In: Proc. of the 28th INFOCOM. 2009. 2831−2835.

[7] Zheng Z, Lu Z, Sinha P, Kumar S. Maximizing the contact opportunity for vehicular Internet access. In: Proc. of the 29th INFOCOM. San Diego, 2010. 1−9.

[8] Chi J, Jo Y, Park H, Hwang T, Park S. An effective RSU allocation strategy for maximizing vehicular network connectivity. Int’l Journal of Control and Automation, 2013,6(2):297−302.

[9] Trullols O, Fiore M, Casetti C, Chiasserini CF, Barcelo OJM. Planning roadside infrastructure for information dissemination in intelligent transportation systems. Computer Communications, 2010,33(4):432−442.

[10] Lee J, Kim C. A roadside unit placement scheme for vehicular telematics networks. In: Proc. of the Advances in Computer Science and Information Technology, AST/UCMA/ISA/ACN 2010 Confs. 2010. 196−202.

[11] Wu TJ, Liao WJ, Chang CJ. A cost-effective strategy for road-side unit placement in vehicular networks. IEEE Trans. on Communications, 2012,60(8):2295−2303.

[12] Sarubbi JFM, Martins FVC, Silva CM. A genetic algorithm for deploying roadside units in VANETs. In: Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2016). 2016. 2090−2097.

[13] Sarubbi JFM, Silva TR, Martins FVC, Wanner EF, Silva CM. An efficient algorithm to deploy roadside units in vehicular networks. In: Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2017). 2017.

**吴璟莉**(1978－),女,广西博白人,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为智能优化算法,算法设计与分析,生物信息学.

**吴湧**(1990－),男,硕士,主要研究领域为智能优化算法,算法设计与分析.

**叶豫桐**(1997－),男,本科生,主要研究领域为算法设计与分析.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn