

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 ($i=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,m$); *update* 取 1 时, 仅当车辆 v_k 达到 ρ_1 指标, 将基础栅格对其的有用贡献量清零.

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

算法 1. Delta-uc.

输入: $U, V, TR, TT, \rho_1, \rho_2$;

输出: U_R .

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

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

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

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

5. $U_R = s_i$

6. **return** U_R

算法 2. sub-uc.

输入: $U, V, TR, TT, \rho_1, \rho_2, \text{update}$;

输出: U_R .

1. $t_k = \sum_{u_i \in T_k} t_k^i$ ($i=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,m$) // 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** $i=1,2,\dots,n$ **do**

3. **for** $k=1,2,\dots,m$ **do**

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

5. $uc_k^i = \rho_1$

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

7. **while** $|V_{\rho_1}| \geq \rho_2 \cdot |V|$ **do** // 未达到 ρ_2 指标, 进入循环

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

9. $U_R = U_R \cup u_i$ // 选中有用贡献量之和最高的栅格

10. $uc_k += uc_k^i$ ($k=1,2,\dots,m$) // 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** $u_i \in U - U_R$ ($i=1,2,\dots,n$) **do**

15. **for** $k=1,2,\dots,m$ **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 ρ_1 指标车辆的 uc_k^i 置 0

19. **for** $k=1,2,\dots,m$ **do**

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

```

21.          for  $u_i \in U - U_R$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 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 $270m \times 260m$ 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_1 和节约率 R_1 作为算法的评价指标,令 N_r 和 N_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_1 和节约率 R_1 分别定义如下:

$$N_1 = N_r - N_u \tag{8}$$

$$R_1 = \frac{N_1}{N_r} \times 100\% \tag{9}$$

3.2 模拟数据结果

实验中,针对 ρ_1 和 ρ_2 设置了 81 组参数组合,即 $\rho_1, \rho_2 = 0.15, 0.25, \dots, 0.95$.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_1 和节约率 R_1 .

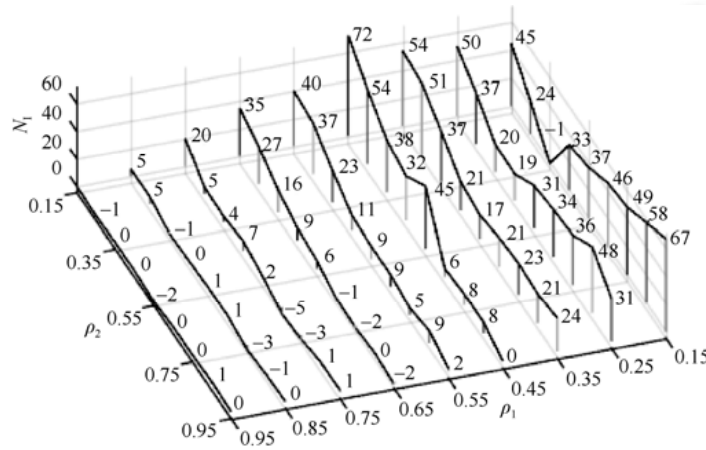


Fig.1 The N_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 50 000 vehicles)

图 1 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量度量下节约单元数量 N_1 (模拟数据,50 000 辆车)

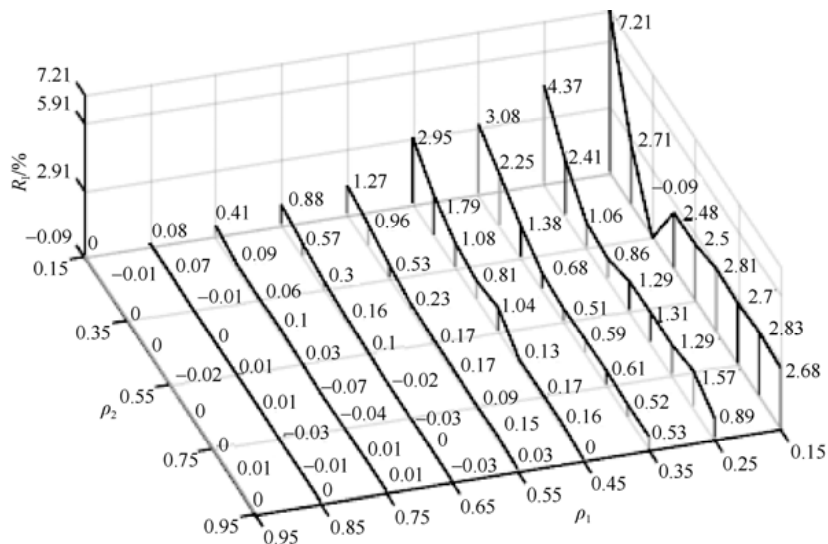


Fig.2 The R_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 50 000 vehicles)

图 2 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 R_1 (模拟数据,50 000 辆车)

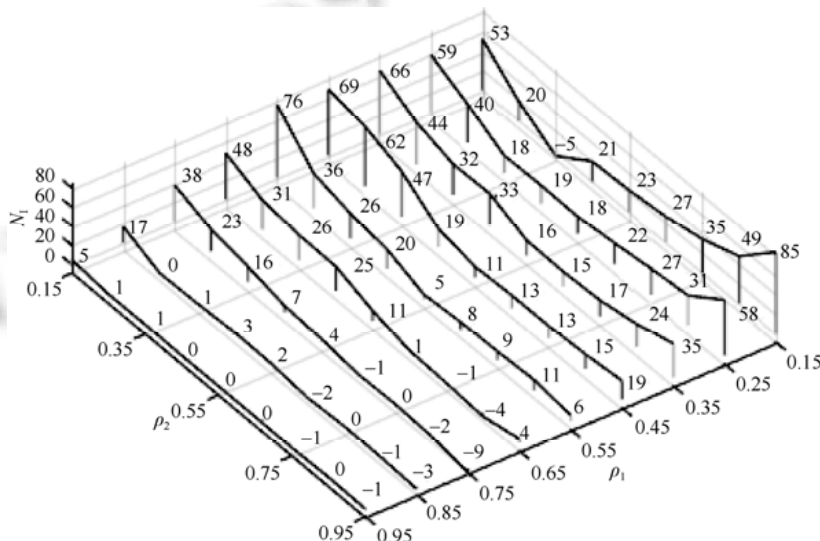


Fig.3 The N_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 100 000 vehicles)

图 3 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约单元数量 N_1 (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.

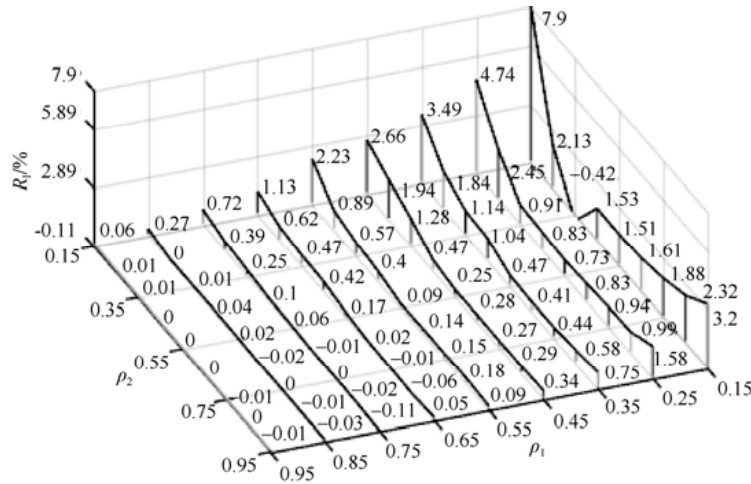


Fig.4 The R_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (simulated data, 100 000 vehicles)

图 4 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 R_1 (模拟数据,100 000 辆车)

3.3 真实数据结果

类似地,针对 ρ_1 和 ρ_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)

ρ_1	ρ_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)

ρ_1	ρ_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

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_1 和 R_1 的取值情况.从图中可以看出,当 ρ_2 取值较大时,即满足 ρ_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 ρ_1 变小时,其改进效果逐渐提升.例如,当 ρ_2 取值为 0.95 时,随着 ρ_1 从 0.95 减小至 0.15,节约单元数 N_1 从 0 提高到 15,节约率 R_1 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.

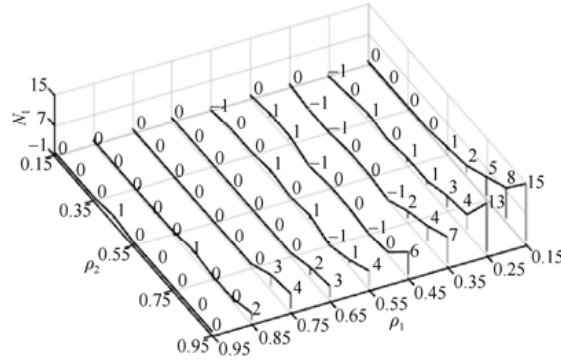


Fig.5 The N_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

图 5 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约单元数量 N_1 (真实数据)

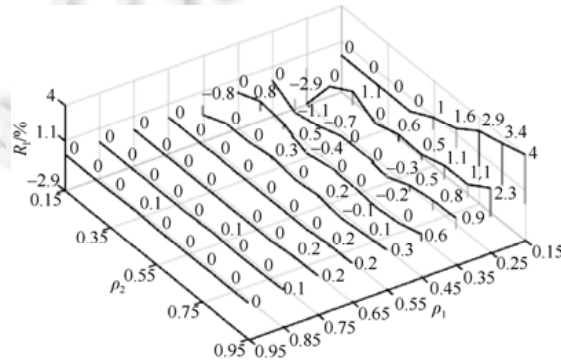
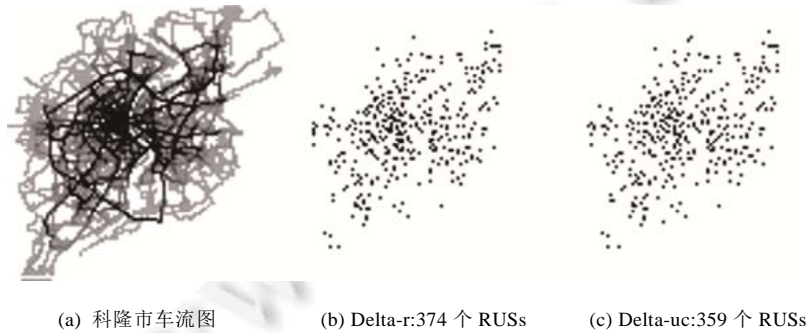


Fig.6 The R_1 under each $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ (real data)

图 6 各 $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ 服务质量下节约率 R_1 (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)

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 $\Delta_{\rho_2}^{\alpha}$ 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 $\Delta_{\rho_2}^{\alpha}$ 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.