

基于 5G 车联网城市二维覆盖的低功耗路边单元部署策略

杨新杰¹, 王帅¹, 马楠²

(1. 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 为解决城市车联网 (IoV) 系统中路边单元 (RSU) 提供二维 (2-D) 服务覆盖时存在大量功耗浪费的问题, 提出一种新型的城市 RSU 部署策略, 根据车辆空间分布动态调整 RSU 的工作模式及发射功率, 建立 RSU 功耗与车辆分布的自适应映射机制, 突破传统 RSU 固定覆盖范围导致的功耗瓶颈, 实现 RSU 总功耗的最小化。进一步地, 基于候选通信服务区域 (CCSA) 概念, 提出基于探索算法 (ERDA) 和增强遗传算法 (eGA) 实现 RSU 部署策略。仿真结果表明, 与传统方法相比, 所提 RSU 部署策略可以显著减少道路冗余覆盖, 从而有效降低 RSU 总功耗。当车辆稀疏时, 可使用复杂度低的 ERDA 达到最优解; 在车辆密集时, 可使用 eGA 实现复杂度与性能之间的良好平衡。因此, 针对现实城市交通系统中车辆密度的动态变化, 所提算法具有实际工程和应用价值。

关键词: 二维车联网; 路边单元; 候选通信服务区域; 遗传算法

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025070

Low-power-consumption road side unit deployment strategy for urban 2-D 5G Internet of vehicles

YANG Xinjie¹, WANG Shuai¹, MA Nan²

1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In urban Internet of vehicles (IoV) systems, the road side unit (RSU) was commonly deployed at road intersections to provide two-dimensional service coverage. However, due to vehicle dynamics, RSU might suffer from massive power waste. A novel RSU deployment strategy was proposed that dynamically adjusted the operating mode and transmission power of RSU, based on the spatial distribution of vehicles. An adaptive mapping mechanism between RSU power consumption and vehicle distribution patterns was established that overcame the power consumption bottleneck caused by traditional RSU's fixed coverage to minimize the total power consumption of RSU. Furthermore, the concept of candidate communication service area (CCSA) was introduced, utilized in combination with an exploratory RSU deployment algorithm (ERDA) and an enhanced genetic algorithm (eGA) to implement the RSU deployment strategy. Analysis and simulation results indicate that, compared with conventional methods, the proposed RSU deployment strategy significantly reduces redundant road coverage, leading to minimized RSU power consumption. In low vehicle density, the ERDA can achieve optimal solutions with low computational complexity. In high vehicle density, the eGA provides a reasonable balance between complexity and performance. Therefore, the proposed strategy provides practical engineering guidance for urban transportation systems.

Keywords: 2-D Internet of vehicles, road side unit, candidate communication service area, genetic algorithm

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-04-03

通信作者: 杨新杰, yangxinjie@nbu.edu.cn

基金项目: 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2019A610073)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Ningbo City (No.2019A610073)

0 引言

5G的高速发展催生了众多物联网 (IoT, Internet of things) 应用, 其中, 高可靠、低时延场景的典型应用车联网 (IoV, Internet of vehicles) 已日益成为科研界与产业界的关注焦点^[1-5]。在城市 IoV 系统中, 路边单元 (RSU, road side unit) 通常部署在十字路口, 用以覆盖多条道路^[6]并提供实时道路状况采集、交通状况广播^[7]及互联网接入等服务^[8-10]。RSU 与车辆之间通过无线链路通信, 需要保证链路质量。此外, RSU 的功率消耗是影响 IoV 网络部署规模的关键因素之一, 对其进行优化是一个亟待解决的实际问题。

车辆与基础设施之间 (V2I, vehicle-to-infrastructure) 的通信需求会极大影响 RSU 功耗, 然而, 由于城市道路上的车辆在空间和时间上分布极不均匀, 大量 RSU 处于业务低负载或空载状态, 但仍需要消耗能量维持正常运行, 导致 RSU 超过 50% 的总功耗无法得到有效利用^[11], 极大限制了 RSU 的大规模部署。另外, 传统的全覆盖 RSU 部署 (FCRD, full coverage RSU deployment) 旨在实现最大且无重叠的服务覆盖, 但由于信道变化不可避免地会形成无覆盖区域, 因而无法满足全部车辆的通信需求。

为解决 RSU 部署的能源浪费问题, 一些学者提出了优化 RSU 的允许部署位置。Fogue 等^[12]提出了一种基于遗传算法的 RSU 部署方法, 将 RSU 的位置编码作为基因, 通过基因迭代实现部署效益的最大化。Lucic 等^[13]提出了一种通用的 RSU 部署和调度的节能框架, 通过 RSU 放置成本、不同时间和空间的车流分布、收发机功率限制及可再生能源等因素来确定每个 RSU 的最佳部署位置和激活/停用安排, 旨在最大化 RSU 有效覆盖面积。有别于 RSU 的激活/停用工作模式, 文献^[14]考虑了稀疏车载自组织网络中离线 RSU 的开/关调度问题, 提出一种多级贪婪算法, 有效降低了 RSU 的总功耗。Rizk 等^[15]提出了基于重叠覆盖的贪婪算法, 通过调整覆盖范围和覆盖重叠率等因素来优化 RSU 的部署位置及功耗。参考社交网络中的中心性概念, 有些学者提出可以将 RSU 放置在车流量较高的区域以优化总体 RSU 功耗^[16]。文献^[17]提出了一种基于实时 V2I 流量来动态调度 RSU 开/关工作模式的功耗优化方案, 旨在满足

V2I 通信需求的同时最大限度地提高 RSU 的工作效率。此外, Adrian 等^[18]提出在 RSU 上配备一种基于雷达的车辆检测系统 (VDS, vehicle detection system), 用以检测进入 RSU 覆盖范围的车辆, RSU 依此动态地切换至工作 (active) 或睡眠 (sleep) 模式; 该方案在交通流稀疏时可以大幅度减少功率的消耗, 但是在交通流密集情况时几乎没有效果。为改善 RSU 在交通流密集时的功耗性能, Ni 等^[19]在二维 (2-D, two-dimensional) 城市场景中引入了 RSU 服务区域的新概念, 以数据传输为收益、RSU 部署花费为成本设计效用函数, 并提出了一种基于线性规划的聚类优化算法, 仿真结果表明, 该算法可以实现接近最优的网络性能及较低的 RSU 部署成本。

尽管之前的研究在降低 RSU 功耗方面取得了一些进展, 但少有研究分析 IoV 系统中 RSU 总功耗的优化, 且无研究根据车辆的空间分布对 RSU 的工作模式和发射功率进行联合控制。此外, 多数研究设定 RSU 部署在类似高速公路的一维 (1-D, one-dimensional) 场景^[14,17-18,20-22], 忽略了城市 IoV 系统中 2-D 街道场景的复杂性, 将 1-D 场景中的 RSU 部署策略应用于 2-D 场景将严重影响系统效能。

因此, 本文提出一种新型的 2-D 场景下低功耗 RSU 部署策略, 并为该策略提出有效的实现算法, 主要贡献如下。

1) RSU 部署策略。通过综合考虑 2-D 场景中车辆的空间分布、相邻 RSU 初始覆盖区域重叠情况及 V2I 链路质量, 引入候选通信服务区域 (CCSA, candidate communication service areas) 的新概念, 将 RSU 部署问题转化为 RSU 的 CCSA 组合问题, 并根据 CCSA 自适应地调整 RSU 工作模式及功率配置, 以降低系统内 RSU 的总功耗。

2) RSU 部署算法。提出了基于探索的 RSU 部署算法 (ERDA, exploratory RSU deployment algorithm) 和增强型遗传算法 (eGA, enhanced genetic algorithm), 来实现上述 RSU 部署策略。分析了 ERDA 与穷举搜索的算法复杂度, 以及 ERDA 与 eGA 的性能差异和适用场景。

3) 仿真结果表明, 对比其他部署策略与算法, 本文低功耗 RSU 部署策略可以显著减少系统内 RSU 的总功耗, 同时, 考虑到算法复杂度, 不同车

辆密度时可以灵活选择使用ERDA或eGA。

1 系统模型

本文考虑一个由多条水平和垂直街道组成的经典2-D曼哈顿街区模型,如图1所示。假设研究的IoV系统基于5G蜂窝车联网(C-V2X)技术^[23],V2I通信利用直连通信接口(PC5, proximity communication 5)链路实现高效的单播服务和/或广播/组播服务。为保证RSU可以将消息广播到尽可能多的车辆,假设每一个交叉路口都部署了RSU,定义 N 个交叉路口的RSU为集合 $R = \{RSU_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 。系统主要参数如表1所示。需要注意的是,本文算法考虑了算法复杂度,能及时地动态优化RSU功率,因此,可以合理地假设算法执行的周期足够短,期间车辆处于静止状态。

在IoV系统中,RSU的发射功率直接影响其覆盖范围,大多数RSU设置了足够高的发射功率来保证对车辆的充分覆盖,且相邻RSU之间可能存在重叠区域。类似地,本文在初始化RSU配置时,特意为RSU设定了较高的发射功率以确保相邻RSU之间存在重叠区域。定义此时的RSU覆盖区域为初始覆盖区域,由于V2I通信需求分布得不均匀,实际需要的覆盖区域往往要小,会产生部分冗余覆盖区域,RSU不同区域示意如图2所示。

表1 系统主要参数

参数	含义
R	RSU集合
N	RSU数量
RSU_i	RSU编号
V	车辆总数
s_1^i	RSU_i 的CCSA ₁ 集合
$v^{i,0}$	s_1^i 对应车辆编号
s_2^i	RSU_i 的CCSA ₂ 集合
s_2^{i,x_i}	RSU_i 的CCSA ₂ 中覆盖区域编号
v^{i,x_i}	s_2^{i,x_i} 对应车辆编号
RSU_i^{o,x_i}	覆盖 v^{i,x_i} 的另一RSU编号
S^i	RSU_i 中CCSA ₁ 和CCSA ₂ 的集合
s^{i,x_i}	S^i 中任意一个元素
s	CCSA组合
S	所有RSU的CCSA集合
X_i	RSU_i 重叠区域中的车辆数
O_i	RSU_i 的连接集合
O	O_i 的集合
Y	具备CCSA ₂ 的RSU
n_{ij}	第 i 个探索链路中 RSU_j 的CCSA数量
$N_i^!$	第 i 个探索链路中的RSU个数
N_a^{i,x_i}	s^{i,x_i} 与相邻RSU最大覆盖范围的重叠区域数
N_v^{i,x_i}	N_a^{i,x_i} 个重叠区域中的车辆数

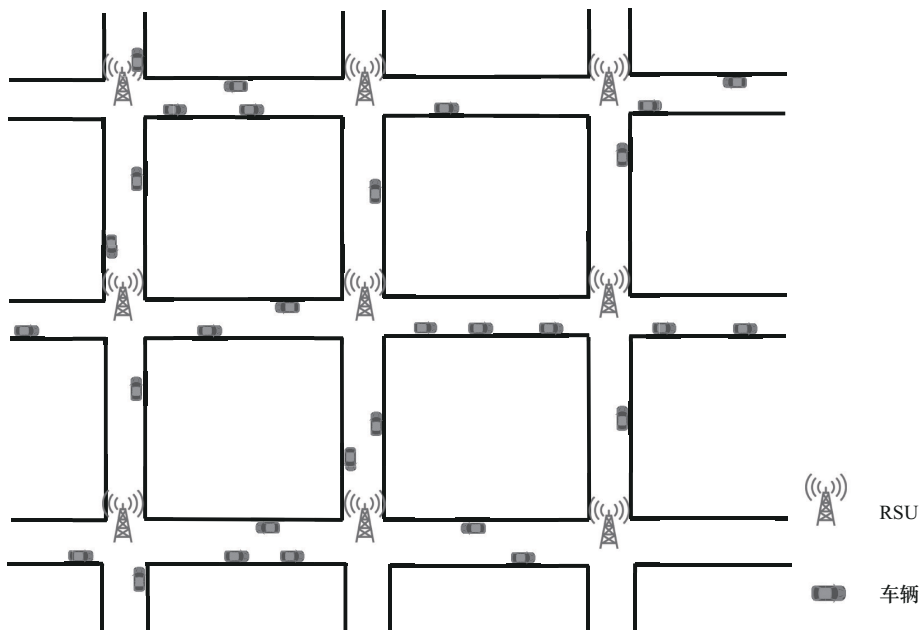


图1 2-D曼哈顿街区模型

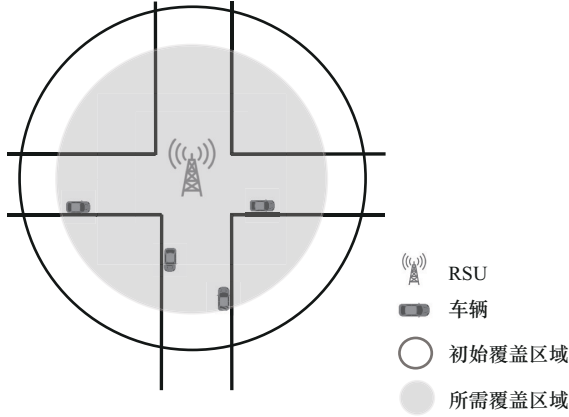


图2 RSU不同区域示意

为优化所需覆盖区域，依据RSU初始覆盖区域以及V2I通信的链路衰减，本文定义了两类CCSA，即CCSA₁和CCSA₂。RSU_i的CCSA₁定义为在其非重叠区域内通信链路衰减最大的车辆与RSU_i对应的圆形覆盖区域，记为 $s_1^i = \{RSU_i, v^{i,0}\}$ ，其中， $v^{i,0}$ 是车辆编号，且 $v^{i,0} \in \{0, 1, \dots, V\}$ ， V 是车辆总数，该数组表示RSU_i与车辆 $v^{i,0}$ 对应的CCSA₁，若 $v^{i,0} = 0$ ，则表示非重叠覆盖区域内没有车辆，此时CCSA₁代表的覆盖区域为0。通过定义CCSA₁，本文在设计算法时不需要考虑非重叠区域中的其他车辆。在RSU_i与其相邻RSU的重叠区域内可能存在若干车辆，且在本文模型中，重叠区域均由2个RSU的部分覆盖区域组成，所以位于重叠区域内的车辆一定被2个RSU同时覆盖。将RSU_i的CCSA₂定义为RSU_i与重叠区域中每辆车对应的圆形覆盖区域，其集合表示为 $s_2^i = \{s_2^{i,x} | x_i = 1, 2, \dots, X_i\}$ ，其中， X_i 为车辆在RSU_i与其他RSU重叠区域中的数量， $s_2^{i,x_i} = \{RSU_i, v^{i,x_i}, RSU_i^{o,x_i}\}$ 表示RSU_i的第 x_i 个CCSA₂， v^{i,x_i} 是车辆编号。该集合表示由RSU_i与车辆 v^{i,x_i} 对应的CCSA₂， RSU_i^{o,x_i} 为覆盖 v^{i,x_i} 的另一RSU，如果RSU_i的重叠区域中没有车辆，RSU_i的CCSA₂不存在。CCSA示意如图3所示。

定义RSU_i的CCSA集合 S^i 为CCSA₁和CCSA₂的整合。如果RSU_i的重叠区域内有车辆，无论非重叠区域内是否存在车辆，都存在 $S^i = \{s_1^i, s_2^{i,1}, s_2^{i,2}, \dots, s_2^{i,X_i}\}$ ；如果RSU_i重叠区域内无车辆，则无论非重叠区域内是否存在车辆，都有 $S^i = \{s_1^i\}$ 。进一步地，将 S^i 改写为 $S^i = \{s^{i,0}, s^{i,1}, s^{i,2}, \dots, s^{i,X_i}\}$ ，设

$s^{i,x_i} \in S^i$ ，表示 S^i 中的任意一个元素，其中， $x_i \in \{0, 1, \dots, X_i\}$ ，当 $x_i = 0$ 时， $s^{i,0}$ 表示RSU_i的CCSA₁， s^{i,x_i} 对应的车辆编号为 v^{i,x_i} 。此外，系统内所有RSU的CCSA集合表示为 $S = \bigcup_{i=1}^N S^i$ 。

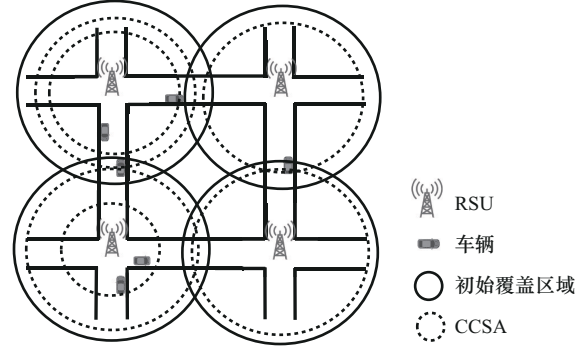


图3 CCSA示意

2 低功耗RSU部署问题

2.1 通信要求

在一般无线通信系统中，基站的覆盖范围主要由下行链路质量决定。此外，在5G C-V2X网络中，PC5通信链路使用正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）的子信道，因此，可以忽略PC5信道之间的干扰。为维持RSU_i和车辆 v^{i,x_i} 之间的通信链路质量，车辆接收信噪比（SNR, signal-to-noise ratio）需大于给定门限 r_{th} ，即

$$SNR_{i,x_i} = \frac{P_r^{i,x_i}}{N_0 B} \geq r_{th} \quad (1)$$

其中， P_r^{i,x_i} 表示车辆 v^{i,x_i} 的接收功率， N_0 为高斯白噪声功率谱密度， B 表示蜂窝下行信道带宽。由此， v^{i,x_i} 最小接收功率 P_r^{i,x_i} 为

$$P_r^{i,x_i} = N_0 B r_{th} \quad (2)$$

RSU_i到车辆 v^{i,x_i} 间的链路衰减为

$$h^{i,x_i} = PL^{i,x_i} \psi_0 g \quad (3)$$

其中， PL^{i,x_i} 表示因距离产生的路径损耗； ψ_0 表示阴影衰落，其对数遵循均值为0、标准差为 σ_s 的正态分布； g 表示小尺度快衰落功率分量。本文采用瑞利衰落的Jakes模型^[24]，即

$$PL^{i,x_i} = K \left(\frac{d_0}{d^{i,x_i}} \right)^\alpha \quad (4)$$

其中, d^{i,x_i} 表示RSU_{*i*}与车辆 v^{i,x_i} 之间的距离, d_0 是天线远场参考距离, α 表示路径损耗指数, K 与天线特性和平均信道损耗相关, 计算式为

$$K = \left(\frac{1}{4\pi d_0 f} \right)^2 \quad (5)$$

其中, f 为载波频率。

因此, 可以确定RSU_{*i*}与车辆 v^{i,x_i} 通信所需发射功率 P_t^{i,x_i} 为

$$P_t^{i,x_i} = \frac{P_r^{i,x_i}}{h^{i,x_i}} \quad (6)$$

2.2 功耗控制

RSU_{*i*}的功耗 P_i 与发射功率 P_t^{i,x_i} 及工作模式之间的关系为

$$P_i = \begin{cases} P_0 + P_t^{i,x_i}, & \text{RSU处于工作模式} \\ P_{\text{sleep}}, & \text{RSU处于睡眠模式} \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_0 为RSU发射公共控制信道所需的功率, P_{sleep} 为RSU在睡眠模式所需的功率, 用于维持基本功能并确保能快速恢复到工作模式, 且 $P_0 > P_{\text{sleep}}$ 。

2.3 问题描述

本文RSU部署策略为在保证RSU与车辆通信链路质量的前提下实现系统内RSU总功耗最小。因此, 优化问题可以描述为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^N P_i \\ \text{s.t.} & \text{C1: } 0 \leq P_t^{i,x_i} \leq P_{\text{max}} \\ & \text{C2: } 0 \leq d^{i,x_i} \leq d_{\text{max}} \\ & \text{C3: } \text{SNR}_{i,x_i} \geq r_{\text{th}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 约束C1保证RSU的发射功率不超过其最大发射功率, 约束C2保证RSU的CCSA不超过其最大覆盖范围, 约束C3保证车辆接收信号的信噪比不低于门限值。

3 低功耗RSU部署算法设计

由于问题式(8)是NP-hard问题, 无法使用传统的优化解决方案。独立节点RSU部署 (INRD, independent node RSU deployment) 方案对每个RSU的覆盖范围进行独立优化, 用于降低系统功耗。具体而言, 每个车辆选择最优通信质量的RSU进行通信, 因此RSU覆盖范围由最远的通信车辆决定。尽管INRD可以对独立RSU功耗进行

优化, 但忽略了2-D场景中RSU间的协同作用, 无法利用少量RSU提供较大的CCSA来促使其他RSU进入睡眠模式, 造成较大的冗余功耗。为实现优于INRD的结果, 有必要对系统内的所有RSU进行整体优化。

假设RSU_{*i*}存在 n_i 个CCSA, 可以使用穷举搜索法通过遍历所有RSU的CCSA以及CCSA的所有组合情况, 得到整体RSU部署最优解, 其算法复杂度为 $O(\sum_{i=1}^N n_i + \prod_{i=1}^N n_i)$ 。但当RSU数量 N 较大时, 复杂度急剧增大, 无法在实际系统中应用。

基于上述分析, 通过考虑2-D场景中RSU间的协同作用, 以及系统对算法低复杂度的要求, 本文提出一种基于探索的RSU部署算法 (ERDA) 和一种增强的遗传算法 (eGA), 旨在通过全局优化来实现低功耗的RSU部署策略。

3.1 ERDA设计

ERDA的目的是通过路径搜索寻找一个最优CCSA组合, 使系统内RSU总功耗最小, 定义为选定的CCSA (sCCSA, selected CCSA)。若所有RSU不存在CCSA₂, 则表明系统只存在一个由CCSA₁组成的组合, 即sCCSA。其他情况下, 定义具有CCSA₂的RSU_{*i*}的连接集合为 $O_i = \{ \text{RSU}_i^{o,x_i} | x_i = 1, 2, \dots, X_i \}$, 其中, 系统内 O_i 的集合为 $O = \{ O_i | i = Y \}$, Y 表示具备CCSA₂的RSU。

首先, 确定 O 中基数最大的连接集合, 有多个时选择第1个, 比如为 O_i , 将RSU_{*i*}作为探索链路的根节点, 将 O_i 的所有RSU作为第1层子节点。然后, 将第1层子节点连接集合中的RSU作为第2层子节点并忽略已出现的RSU。依次类推, 直到后续层中所有RSU都已出现, 定义以上所有节点的组合为ERDA的一条探索链路。将探索链路中的RSU从 O_i 中移除并形成一个新的 O 。如果新 O 不是空集, 则基于此再生成一条探索链路, 并重复以上步骤直至 O 为空集。可以看出, 这些探索链路的集合涵盖了所有具有CCSA₂的RSU。

对一条探索链路, 所有节点各拿出一个CCSA, 组成一个CCSA子组合, 如果该组合能确保这个探索链路涉及的每个车辆仅与一个且只有一个RSU进行通信, 则为一个有效的子组合。对所有的有效子组合计算RSU总功耗, 其中, 当节点的CCSA为CCSA₁且覆盖区域为0时, 应使用睡眠模

式计算该节点的功耗。选择总功耗最小组合作为最优CCSA子组合。

将所有探索链路的最优CCSA子组合以及只存在CCSA₁的RSU的CCSA共同形成一个集合，即sCCSA，具体流程如算法1所示。

算法1 ERDA

步骤I

初始化 车辆随机分布，RSU初始覆盖区域；

输入 RSU连接集合 O

输出 探索链路集合 P

- 1) 判断 $O \neq \emptyset$;
- 2) 选取集合 O 中，基数最大的 O_i ;
- 3) O_i 中 RSU_i 为根节点，其余节点为第一层子节点，将 O_i 从 O 中移除;
- 4) for RSU_j in O_i
- 5) $O_j \leftarrow RSU_j$;
- 6) if $O_j - RSU_j \neq \emptyset$
- 7) $O_j - RSU_j$ 中节点为 RSU_j 子节点;
- 8) 将 O_j 从 O 中移除;
- 9) for RSU_k in O_j
- 10) $O_k \leftarrow RSU_k$;
- 11) if $(O_k - RSU_j) \neq \emptyset, O_k \in O$
- 12) $O_k - RSU_j$ 中节点作为 RSU_k 的子节点;
- 13) 将 O_k 从 O 中移除;
- 14) $j \leftarrow k$;
- 15) end for
- 16) 形成一个探索链路 p_i ，回到步骤I，判断新的 O 是否为空集，如不是空集，则基于上述步骤再生成一个探索链路，直至新的 O 为空集，输出探索链路集合 P 。

17) 转至步骤II。

步骤II

输入 探索链路集合 P ，CCSA集合 S

输出 sCCSA

- 1) for p_i in P
- 2) 节点所对应CCSA $\leftarrow p_i$ 节点;
- 3) 所有节点各拿出一个CCSA，组成一个CCSA子组合;
- 4) CCSA子组合中可以使 p_i 涉及的每个车辆仅与一个且只有一个RSU进行通信的为一个有效的子组合;
- 5) 对所有的有效子组合，依据式(7)计算

RSU功耗和;

- 6) 选取RSU功耗和最小的有效子组合为该 p_i 中最优CCSA子组合;
- 7) end for
- 8) P 中各个探索链路的最优CCSA子组合以及只存在CCSA₁的RSU的CCSA共同形成一个集合，即sCCSA。

步骤I将对应车辆将系统内存在CCSA₂的RSU组合起来，形成一条或多条探索链路；步骤II建立每个探索链路中的CCSA有效子组合，算法示意如图4所示。

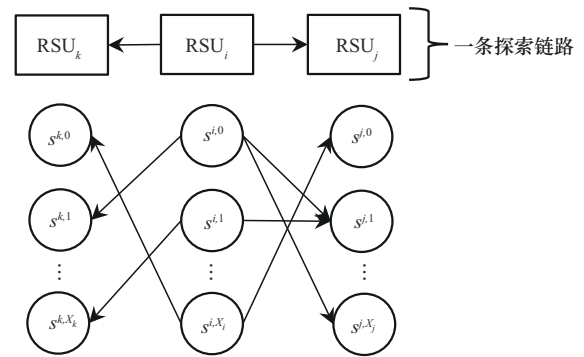


图4 算法示意

所提算法可以有效筛选出需要考虑的CCSA组合，复杂度为 $O\left(\max\left(\sum_{j=1}^{N'_i} n_{i,j} + \prod_{j=1}^{N'_i} n_{i,j}\right)\right)$ ，其中， $n_{i,j}$ 表示第 i 个探索链路中的 RSU_j 的CCSA数量， N'_i 表示第 i 个探索链路中的RSU数量。与穷举搜索法相比，ERDA同样可以找到整个系统的最优解，因其复杂度主要取决于某一个探索链路，所以复杂度显著降低，能有效替代穷举搜索法。分析和仿真结果显示，本文使用ERDA获得了性能的最优值。

3.2 eGA设计

当车辆不断增多时，存在CCSA₂的RSU也会相应增加，这使ERDA的复杂度将逐渐逼近穷举搜索法，影响了算法的实用性。为实现算法性能与复杂度的均衡，本文提出一种增强的遗传算法(eGA)，用以实现车辆高密度场景下的RSU低功耗部署策略。在eGA中，定义基因型个体为一种潜在的RSU部署情况，即 $s = \{s^{i,x_i} | i = 1, 2, \dots, N, x_i \in \{1, 2, \dots, X_i\}\}$ ，由系统内每一个RSU的任意一个CCSA组合而成，其中， s^{i,x_i} 为基因型个体的单个基因。eGA方案中基因型个体如图5所示。

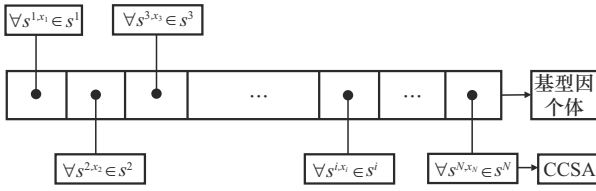


图5 eGA方案中基因型个体

定义合适的适应度函数是遗传算法的关键，适应度的数值反映了算法生成解的优化程度。本文适应度函数用于衡量基于eGA生成的CCSA组合的优劣程度。假设一个 s^{i,x_i} 是 $CCSA_2$ ，考虑其与相邻RSU的最大覆盖范围之间的重叠区域，定义 N_a^{i,x_i} 为其中有车辆的重叠区域数量， N_v^{i,x_i} 为 N_a^{i,x_i} 个重叠区域中的车辆数量。若 s^{i,x_i} 是 $CCSA_1$ ，则 N_a^{i,x_i} 与 N_v^{i,x_i} 均为0。基因型个体单个基因 s^{i,x_i} 的适应度函数可以定义为

$$F^{i,x_i} = aN_a^{i,x_i} + bN_v^{i,x_i} - ch^{i,x_i} \quad (9)$$

其中，变量 h^{i,x_i} 为RSU i 与车辆 v^{i,x_i} 间的链路衰减， a 、 b 和 c 为权重系数。

基因型个体 s 的适应度函数可以表示为

$$F = \sum_{i=1}^N F^{i,x_i} = \sum_{i=1}^N (aN_a^{i,x_i} + bN_v^{i,x_i} - ch^{i,x_i}) \quad (10)$$

式(10)表明，选择较大区域的CCSA虽然可以覆盖更多车辆，但同时链路衰减也会增加，导致RSU功耗上升。因此，为实现CCSA大小与链路衰减之间的平衡，本文的优化目标是最大化个体适应度函数，即

$$\begin{aligned} \max F \\ \text{s.t. } \text{SNR}_{i,x_i} \geq r_{th} \end{aligned} \quad (11)$$

eGA的关键步骤如下。

1) 生成初始种群

将所有RSU的发射功率设为初始功率，由此确定每个RSU的 X_i 。依照前文所定义的CCSA组合 $s = \{s^{i,x_i} | i = 1, 2, \dots, N, x_i \in \{0, 1, \dots, X_i\}\}$ ，对每个 i ，在 $\{0, 1, \dots, X_i\}$ 范围内随机选择一个 x_i 形成 s^{i,x_i} ，从而得到 s ，作为初始种群的一个个体。重复以上过程生成 M 个个体，形成初始种群。对初始种群完成步骤2)~步骤5)作为一次迭代，并重复迭代直至算法终止。

2) 确定父代个体

根据式(10)，计算种群中每个个体的适应度，选择2个适应度值最大的个体作为父代个体，表示为 s_{p_1} 和 s_{p_2} 。

3) 交叉

在大多数优化问题中，交叉概率的取值通常较高，以实现父代个体优良基因的充分利用，并加速搜索过程。当 $P_c < P_{\text{Cross}}$ 时，进行交叉操作，其中， P_c 是0到1之间的随机数， P_{Cross} 为交叉概率。具体交叉操作为，在一个父代个体上随机选择2个交叉位点 cr_a 和 cr_b ，将交叉点之间的基因与另一个父代个体上相同区间的基因进行交叉，从而生成具有父代基因的新子代个体 s_{c_1} 和 s_{c_2} ，即

$$\begin{cases} s_{c_1} = \{s_{p_1}^a, s_{p_2}^b, s_{p_1}^c | a = \{1, cr_a\}, \\ b = \{cr_a, cr_b\}, c = \{cr_b, N\}\} \\ s_{c_2} = \{s_{p_2}^x, s_{p_1}^y, s_{p_2}^z | x = \{1, cr_a\}, \\ y = \{cr_a, cr_b\}, z = \{cr_b, N\}\} \end{cases} \quad (12)$$

交叉操作如图6所示，根据这种交叉方法， cr_a 和 cr_b 区间的基因可以在父代个体之间交换^[25]，在有效维持种群多样性的同时，较大限度地保留父代的优良特征。

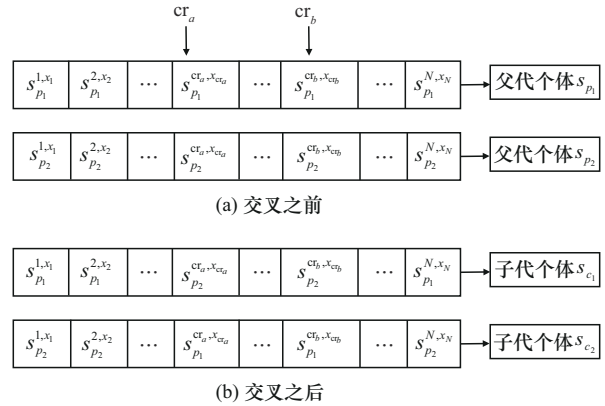


图6 交叉操作

4) 变异

变异操作有助于保持种群的多样性，以避免陷入局部最优。在优化问题中，变异概率通常设置为较小值，在增强全局搜索能力的同时可以避免过度破坏种群中的优良基因。在当前迭代中，如果父代发生了交叉，则对新生成的子代个体做变异，否则对父代个体做变异。变异作用于个体的每个基

因 s^{i,x_i} , 即

$$\begin{cases} s^{i,x_i} = s^{i,\hat{x}_i}, P_m < P_{\text{Mut}} \\ s^{i,x_i} = s^{i,x_i}, \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, s^{i,\hat{x}_i} 表示在 S^i 中任意一个值, P_m 是从 0 到 1 的随机数, P_{Mut} 为变异概率。对于 s^{i,x_i} , 当 $P_m < P_{\text{Mut}}$ 时, 将其替换为 S^i 中任意一个值。

5) 选择

如果此迭代中有新个体生成, 依照式(10)计算新个体的适应度函数值。将适应度函数值大于父代 s_{p_1} 、 s_{p_2} 的新个体加入种群中, 如果不存在适应度函数值大于父代的新个体, 则父代继续执行交叉与变异操作。

6) 算法终止

算法在迭代次数达到规定次数 T 时终止。在最后生成的种群中, 得到适应度函数值最高的个体作为目标 CCSA 组合, 进而计算 RSU 功耗。当 CCSA 组合中 RSU 的 CCSA 为 CCSA_1 且覆盖区域为 0 时, 使用睡眠模式计算该 RSU 的功耗。

eGA 每次迭代的复杂度包括适应度函数评估、交叉、变异, 其中个体的适应度函数需要考虑 CCSA_2 与重叠区域内的车辆数量, 其复杂度为 $O(\sum_{i=1}^N X_i^2)$; 交叉与每个 RSU 有关, 其复杂度为 $O(N)$; 变异则与每个 CCSA 有关, 复杂度为 $O(\sum_{i=1}^N n_i)$ 。考虑到每次迭代最多会产生 2 个新的个体, 至算法终止时, 种群个体数最多为 $K + 2T$, 所以 eGA 的复杂度可表示为, $O(T(N + \sum_{i=1}^N n_i) + (K + 2T) \sum_{i=1}^N X_i^2)$ 。可以看出, 与 ERDA 相比, eGA 复杂度主要受种群规模和迭代次数影响, 随着车辆密度增加, 复杂度不会显著提升。

对比 ERDA 和 eGA 的复杂度可知, 在低车辆密度时可使用 ERDA 获得最优解, 在高车辆密度时切换到 eGA。由于当 $N'_i = N$ 时, 即 ERDA 在探索链路上的 RSU 数量等于系统 RSU 总数时, 其复杂度与穷举搜索法相同, 因此, 可将 $N'_i = N$ 出现的概率作为算法切换依据。值得注意的是, $N'_i = N$ 的概率主要受车辆密度影响, 但也与其他系统参数设置有关, 反映了系统的实际状况, 可表示

为 $P(N'_i = N|\rho, \text{其他参数})$, 当超过概率阈值 P_{th} 时进行算法切换以减少计算开销, 算法切换计算式为

算法选择 =

$$\begin{cases} \text{ERDA}, 0 < P(N'_i = N|\rho, \text{其他参数}) < P_{\text{th}} \\ \text{eGA}, P(N'_i = N|\rho, \text{其他参数}) \geq P_{\text{th}} \end{cases} \quad (14)$$

4 性能评估

本文通过大量蒙特卡罗仿真来验证所提算法的有效性。仿真的城市环境采用 3GPP 标准的曼哈顿网络模型, 由 3 条横向街道和 3 条纵向街道交错组成, 其他关键仿真参数及设置如表 2 所示。为全面评估所提低功耗 RSU 部署策略及算法的性能, 本文选择了 FCRD、INRD 及 Greedy 算法^[26]作为对比, 且为公平起见, 对于对比算法, 当 RSU 没有服务车辆时, RSU 进入睡眠模式。

表 2 仿真参数及设置

参数	数值
蜂窝下行信道带宽 B / MHz	10
路径损耗指数 α	2.7
高斯白噪声功率谱密度 N_0 /(dBm·Hz ⁻¹)	-174
信噪比阈值 r_{th} / dB	0
天线远场参考距离 d_0 / m	10
信号传输载波频率 f / GHz	5.9
RSU 最大发射功率 P_{max} / W	50
RSU 最小非零发射功率 P_0 / W	10
RSU 睡眠模式功率 P_{sleep} / W	5
RSU 最大覆盖半径 d_{max} / m	120
道路长度 l / m	200
阴影衰落标准差 σ_s / dB	5

eGA 仿真参数配置及收敛性能如表 3 所示。从表 3 可以看出, 收敛的迭代次数受初始种群个数、变异概率、交叉概率影响, 考虑到 eGA 的算法复杂度, 本文选择初始种群个数 $K = 100$, 变异概率 $P_{\text{Mut}} = 0.05$, 交叉概率 $P_{\text{Cross}} = 0.9$, 在保证算法收敛性能 (第 549 次迭代收敛) 的同时, 降低算法复杂度。

表3 eGA仿真参数配置及收敛性能

初始种群个数	变异概率	交叉概率	收敛迭代次数
50	0.10	0.6	990
		0.9	982
	0.05	0.6	842
		0.9	828
100	0.10	0.6	975
		0.9	904
	0.05	0.6	591
		0.9	549
200	0.10	0.6	956
		0.9	868
	0.05	0.6	545
		0.9	537

不同部署策略及算法的总功耗如图7所示。随着车辆密度增大, ERDA的算法复杂度显著增加, 当车辆密度达到30辆/km时, 其计算成本已不适用于实际应用。因此, 本文在仿真时采用逻辑回归拟合方法, 对高车辆密度时ERDA最优值进行数值估计, 仅用于与eGA及其他算法的性能对比。由图7可以看出, INRD随着车辆密度增多, 性能迅速下降, 这一现象是由信道随机性引起的冗余覆盖增多所致。在不同的车辆密度时, 对比其他算法, eGA的功耗最接近最优性能。当车辆密度为25辆/km时, eGA的功耗仅比最优值高9%, 而对比算法中效果最优的Greedy比最优值高11%。此外, 当车辆密度达到35辆/km时, eGA与Greedy、FCRD及最优值之间的性能差距变小, 这是因为车辆的空间分布在高密度时趋于平均, eGA的优势相应降低。由于车辆密度在一定程度上可以反映出车流在时、空的动态变化, 以上分析表明eGA在城市环境不同车流情况下具有适用性。

RSU的功耗与其覆盖区域大小密切相关, 道路覆盖率如图8所示。从图8可以看出, FCRD对道路的覆盖率远高于其他算法, 这是因为FCRD为区域提供最大且无重叠覆盖, 无法根据车辆的具体位置, 灵活设置RSU的覆盖范围; INRD会产生重叠覆盖区域, 从而导致INRD的功耗高于FCRD(如图7所示), 但其道路覆盖率低于FCRD。相比之下, 本文部署策略在街道覆盖率方面明显低于

FCRD和INRD, 同时eGA相较于Greedy更加接近最优值。当车辆密度为10辆/km时, ERDA(最优值)可以达到54%的道路覆盖率, eGA为65%, 而Greedy为74%, INRD为68%, FCRD为95%, 直观地表明本文部署策略及算法可以通过合理减少对道路的覆盖, 实现低功耗的RSU部署。

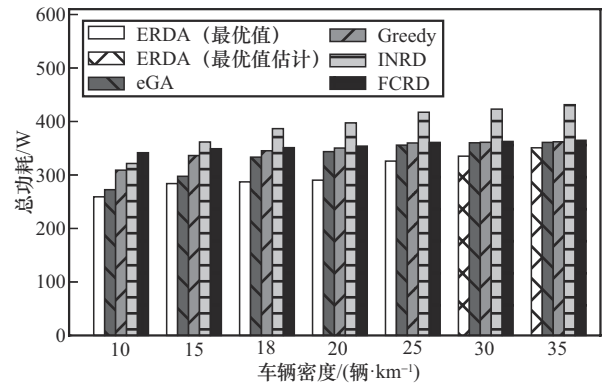


图7 不同部署策略及算法的总功耗

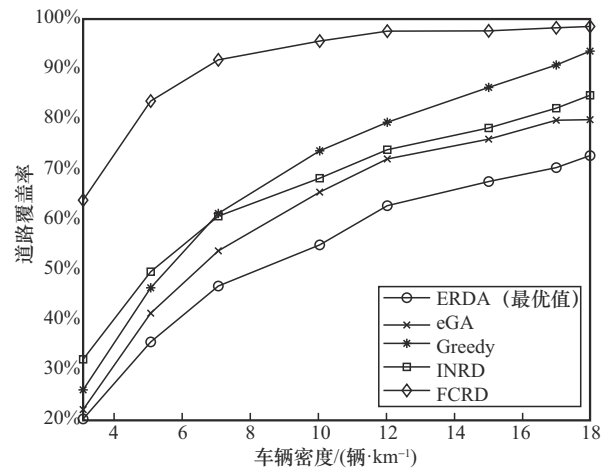


图8 道路覆盖率

不同策略及算法下RSU部署示例如图9所示。从图9可以看出, eGA最接近最优值, Greedy、INRD和FCRD的结果则明显偏大, 这与图7和图8中总功耗和道路覆盖率对比的情况相符。

为了全面评估eGA的性能优势, 图10展示了当车辆密度为10辆/km时, 其与ERDA(最优值)、INRD、Greedy和FCRD所生成总功耗的累积分布函数对比。从图10可以看出, eGA与最优值的偏差最小, 优于其他部署策略和算法。尽管Greedy所得结果与eGA较为接近, 但道路重叠覆盖率的对比(如图10的小图)表明, eGA在不同车辆密度时始终优于Greedy。

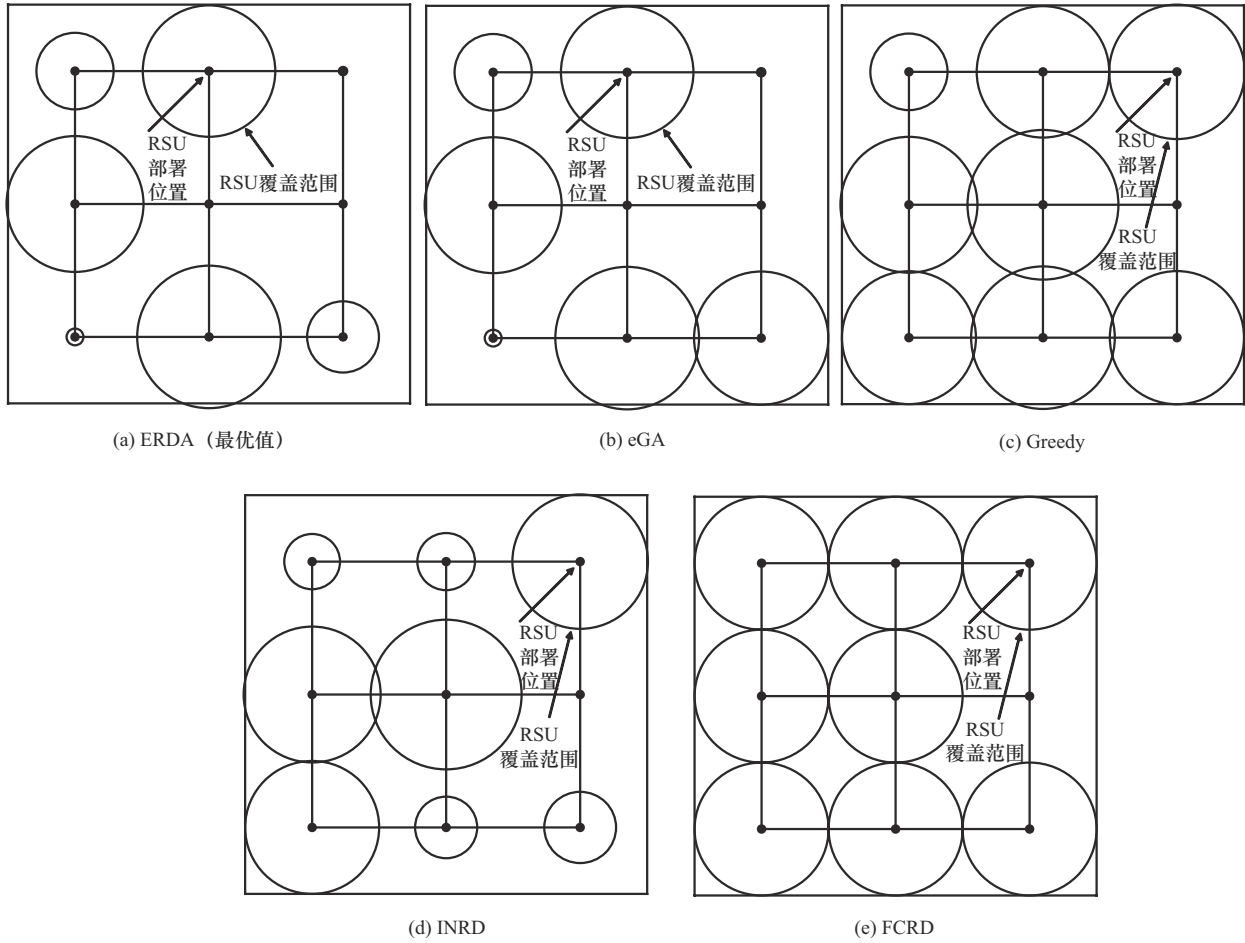


图9 不同策略及算法下RSU部署示例

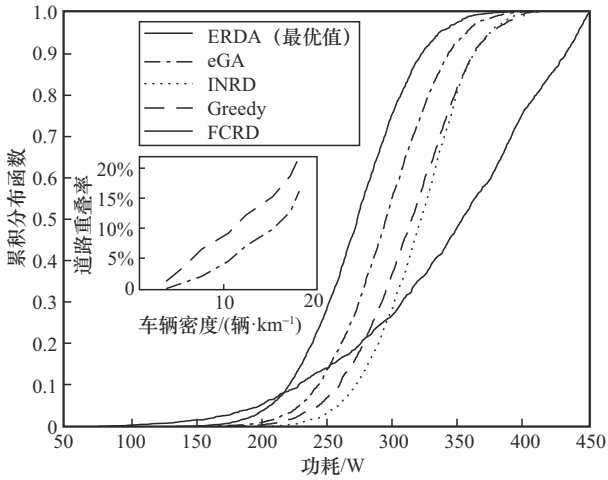


图10 RSU总功耗的累积分布函数对比

概率阈值 P_{th} 的设置受系统参数动态变化的影响,在实际应用中,可以通过感知系统参数变化进行动态调整。不同车辆密度对 $P(N'_i = N_i\rho, \text{其他参数})$ 的影响如图11所示。从图11可以看出,曲线出现了明显拐点,说明此后 ρ 对 ERDA 复杂度

的影响降低,其复杂度已经逼近穷举搜索法,因此,此时的概率可以作为算法切换的阈值。

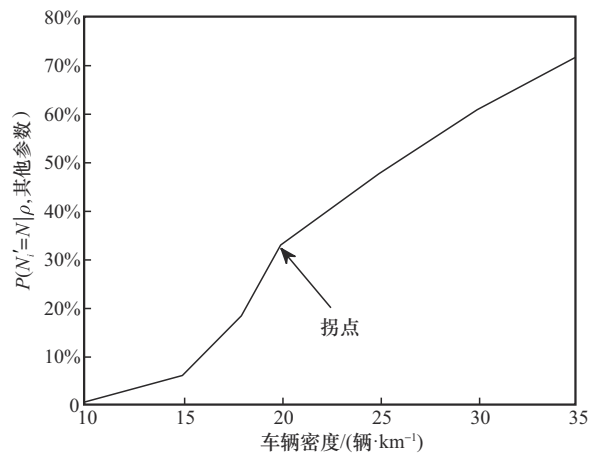


图11 不同车辆密度对 $P(N'_i = N_i\rho, \text{其他参数})$ 的影响

综合以上仿真结果可以看出,本文部署策略有效降低了系统RSU的总功耗,同时, eGA 在算法复杂度和RSU功耗性能之间实现了良好平衡。

5 结束语

本文研究2-D街道场景下IoV系统的RSU部署优化问题,旨在减少功耗并维持通信链路稳定。为此,提出了一种低功耗RSU部署策略,并设计了一种新型的ERDA实现最优结果。在高车辆密度时,ERDA算法复杂度上升,实用性受损。因此,进一步提出了eGA,在降低算法复杂度的同时,实现对RSU的整体性功耗优化。仿真结果显示,当车辆密度较大时,eGA能够在保证较低算法复杂度的同时,实现良好的功耗性能。2种算法在多变的城市环境具有高度鲁棒性,适用范围广泛。

参考文献:

- [1] LI S C, LI D X, ZHAO S S. 5G Internet of things: a survey[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2018, 10: 1-9.
- [2] KARAGIANNIS G, ALTINTAS O, EKICI E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(4): 584-616.
- [3] SHAFIQUE K, KHAWAJA B A, SABIR F, et al. Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: a review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 23022-23040.
- [4] CONTRERAS-CASTILLO J, ZEADALLY S, GUERRERO-IBANÉZ J A. Internet of vehicles: architecture, protocols, and security[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3701-3709.
- [5] DUAN W, GU J Y, WEN M W, et al. Emerging technologies for 5G-IoV networks: applications, trends and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(5): 283-289.
- [6] LEHSAINI M, GAOUAR N, NEBBOU T. Efficient deployment of roadside units in vehicular networks using optimization methods[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2022, 35(14): e5265.
- [7] AL-SHAREEDA M A, ALAZZAWI M A, ANBAR M, et al. A comprehensive survey on vehicular ad hoc networks (VANETs)[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Advanced Computer Applications (ACA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 156-160.
- [8] HUANG C F, JHANG J H. Efficient RSU selection approaches for load balancing in vehicular ad hoc networks[J]. *Advances in Technology Innovation*, 2019, 5(1): 56-63.
- [9] BELMEKKI S, GRUYER D, TATKEU C. Chain branch leaf-gateway, a strategy for dynamic clustering and optimal coverage of communication for automated mobility[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [10] MARCHANG J, SANDERS B, JOY D. Adaptive V2V routing with RSUs and gateway support to enhance network performance in VANET[C]//Wired/Wireless Internet Communications. Berlin: Springer, 2018: 298-310.
- [11] HÖYHTYÄ M, APILO O, LASANEN M. Review of latest advances in 3GPP standardization: D2D communication in 5G systems and its energy consumption models[J]. *Future Internet*, 2018, 10(1): 3.
- [12] FOGUE M, SANGUESA J, MARTINEZ F, et al. Improving roadside unit deployment in vehicular networks by exploiting genetic algorithms[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(1): 86.
- [13] LUCIC M C, GHAZZAI H, MASSOUD Y. A generalized and dynamic framework for solar-powered roadside transmitter unit planning[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Systems Conference (Sys-Con). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [14] ZHANG L, WANG Y. An offline roadside unit ON-OFF scheduling algorithm for energy efficiency of ad hoc networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 59742-59751.
- [15] RIZK R, DAHER R, MAKKAWI A. RSUs placement using overlap based greedy method for urban and rural roads[C]//Proceedings of the 2014 7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2014: 12-18.
- [16] WANG Z Y, ZHENG J, WU Y Y, et al. A centrality-based RSU deployment approach for vehicular ad hoc networks[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [17] ZHOU R, HE H Y, SHU H F, et al. Exploration of adaptive energy optimization for 5G roadside unit[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 761-766.
- [18] ADRIAN R, SULISTYO S, MUSTIKA I W, et al. Roadside unit power saving using vehicle detection system in vehicular ad-hoc network[C]//Proceedings of the 2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI). Piscataway: IEEE Press, 2020: 198-202.
- [19] NI Y Z, HE J P, CAI L, et al. Joint roadside unit deployment and service task assignment for Internet of vehicles (IoV)[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 3271-3283.
- [20] ZHANG L Y, LU Y F, CHEN N, et al. Optimization of roadside unit deployment on highways under the evolution of intelligent connected-vehicle permeability[J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11112.
- [21] DEGRANDE T, VAN DEN EYNDE S, VANNIEUWENBORG F, et al. C-ITS road-side unit deployment on highways with ITS road-side systems: a techno-economic approach[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(7): 863-874.
- [22] GAO Z G, CHEN D J, CAI S B, et al. Optimal and greedy algorithms for the one-dimensional RSU deployment problem with new model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7643-7657.
- [23] WANG Y, NING W, ZHANG S Y, et al. Architecture and key terminal technologies of 5G-based Internet of vehicles[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2021, 95: 107430.
- [24] SANG J, ZHOU T, XU T H, et al. Deep learning based predictive power allocation for V2X communication[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 72881-72893.
- [25] GUERNA A, BITAM S. GICA: an evolutionary strategy for roadside

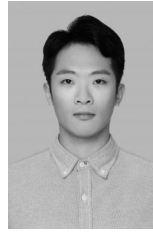
units deployment in vehicular networks[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

- [26] YANG H H, JIA Z P, XIE G J. Delay-bounded and cost-limited RSU deployment in urban vehicular ad hoc networks[J]. Sensors, 2018, 18 (9): 2764.

[作者简介]



杨新杰 (1971-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 宁波大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为下一代移动通信系统架构、移动物联网接入技术、协作中继网络性能等。



王帅 (1999-), 男, 山东济南人, 宁波大学硕士生, 主要研究方向为车联网、通信资源优化等。



马楠 (1978-), 男, 陕西旬阳人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信理论与测试技术, 包括 5G/6G 关键技术、无线信道建模与空口测试理论、语义通信等。