

路边停车检测物联网系统网关部署算法

郭小红, 张足生, 李文杰, 卢曜杰, 柴浩博
(东莞理工学院 网络空间安全学院, 广东 东莞 523808)

摘要:路边停车检测物联网依靠网关实现传感器节点和远程服务器的双向连接,网关节点的合理部署是保证网络连通性的关键。路边停车检测物联网具有一些显著特征:传感器节点呈线状分布且地理位置已知;网关部署位置受限,通常部署在路边灯柱上。然而,现有算法大都没有考虑这些特征。为此,该文研究路边停车检测物联网系统的网关部署算法,将该网关部署问题建模为集合覆盖,选取含最少数量子集的网关覆盖集合,实现对传感器节点的全覆盖。该文提出了一种线状部署算法,将路网中的传感器节点和网关候选点转换成线状序列,采用按序迭代搜索策略寻求最小网关集合。与多个已有算法进行对比实验,结果表明该算法在不同规模传感器下能有效地降低网关部署成本及覆盖冗余,且算法时间复杂度低。

关键词:智能交通;物联网;停车检测;传感器节点;网关部署;覆盖

中图分类号:TP212.9;TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2023)11-0091-08

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2023.11.014

A Gateway Deployment Algorithm for Roadside Parking Detection IoTs System

GUO Xiao-hong, ZHANG Zu-sheng, LI Wen-jie, LU Yao-jie, CHAI Hao-bo
(School of Cyberspace Security, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: The IoTs (Internet of Things) for roadside parking detection relies on the gateway to realize the connection between the sensor node and the remote server. The reasonable deployment of the gateway node is the key to ensure the network connectivity. The roadside parking detection IoTs system has some notable characteristics: The sensor nodes are distributed linearly and their location is given; the gateway deployment location is limited and is usually deployed on the roadside lamppost. However, most of the existing algorithms do not take into account these features. Therefore, we propose a gateway deployment algorithm for roadside parking detection IoTs system. The gateway deployment problem is modeled as the set coverage problem, i. e., the gateway coverage set with the least number of subsets is selected to achieve full coverage of sensor nodes. A linear deployment algorithm is proposed, which converts the sensor nodes and gateway candidate points in the road network into linear sequences, and uses an ordered iterative search strategy to find the minimum gateway set. Compared with several existing algorithms, the proposed algorithm can effectively reduce the deployment cost of gateways and coverage redundancy with low time complexity under different scales of sensors.

Key words: intelligent transportation; IoTs; parking detection; sensor nodes; gateway deployment; coverage

0 引言

随着国内城市化进程的不断加快,机动车保有量急剧增加,停车难问题变得越来越严重。在高峰时段寻找一个可用的路边停车位通常需要花费较长时间,这会导致额外的交通拥堵和空气污染。基于物联网的智慧路边停车检测系统是缓解停车难问题的重要途径之一^[1-4]。

路边停车检测物联网系统是由传感器节点和网关

组成的两层网络结构,在每个停车位上安装传感器节点对停车状态进行实时采集,网关节点安装在路边基础设施(例如灯柱)上;传感器节点将检测结果发送给路侧的网关节点,再由网关节点转发给远程服务器。网关设备的成本较高,如何在确保网络连通性的前提下,合理选择网关的布置位置使系统成本最小化是该文关注的问题。

路边停车检测物联网系统网关部署具有如下显著

收稿日期:2023-01-18

修回日期:2023-05-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61872083);广东省自然科学基金(2019A1515011123)

作者简介:郭小红(1998-),女,硕士,CCF会员(18486G),研究方向为智能交通、物联网;通信作者:张足生(1980-),男,博士,教授,研究方向为智能交通、物联网、机器学习。

特征:其一,网关部署位置受限,为节约成本,网关通常部署在路边灯柱上,即把路边灯柱坐标作为候选点集合,从中选取一个子集用于网关部署,实现传感器节点的全覆盖;其二,网关覆盖对象是路边停车检测传感器节点,传感器节点沿道路呈线状分布且位置已知。已有算法大都没有考虑以上特征,不能较好地适用于路边停车场景。该文研究适于路边停车检测网关部署算法,主要贡献如下:

(1)对网关部署问题进行了数学定义,并将该问题抽象为集合覆盖问题;

(2)提出了线状部署算法,将路网中分布的传感器节点和网关候选点转换为线性序列,采用按序迭代搜索方法得到一个覆盖所有传感器节点的最小网关集合;

(3)开发了可实用的路边停车检测网关部署系统,并对提出的算法开展了仿真实验和真实数据集验证,结果表明该算法相比传统算法能以较小的时间复杂度获得更好的覆盖效果。

1 相关工作

无线传感器网络的网关部署问题已有较多研究成果,大多以优化部署位置、部署数量、能量消耗、流量负载等为目标,学者们针对不同的目标提出了多种解决办法。

文献[5]提出了一种近似算法,期望以最小化网关节点数量实现区域传感器节点的覆盖。文献[6]将网关部署问题转化为最小化网络全局能耗的混合整数线性规划问题,并提出了一种基于启发式的贪婪算法。文献[7]提出基于度和权重的两种启发式算法,通过将网络节点分组来进行网关选择,以实现最小化网关数目和最小化节点与网关的路径长度的目标。文献[8]为了平衡网络负载,提出基于流量模式和网络拓扑的启发式网关部署算法。文献[9]为了找到网络中所需网关的最小数量及其最佳位置以满足不同的业务需求,提出一种基于外部惩罚函数模拟退火的启发式算法。文献[10]为了降低网络生存成本并优化无线传感器网络的通信,提出了一种用于多网关部署的线性规划启发式方法。

文献[11]提出了改进的粒子群优化算法,以网络的负载均衡为目标来优化网关的部署。文献[12]为了降低部署成本和系统干扰,采用多目标粒子群算法来优化信道分配和部署网关。文献[13-14]也采用类似的粒子群算法解决无线传感器网络的节点部署问题。文献[15]提出了一种网关选择算法,在保证网络全覆盖的情况下,利用遗传算法最小化网关节点数量,该算法可以有效减少网关部署数量。文献[16]以最

小化数据包延迟为目标,提出了一种遗传算法来解决无线自组织网络中的网关分配和调度问题。文献[17]基于网络流量选出候选网关,然后提出一种聚类算法从候选网关中选出最优的网关。文献[18]将边缘网关部署问题转化为二进制整数规划问题,并设计了一种基于Q-learning强化学习的改进蜘蛛猴算法求解。

还有许多其他方法解决网关部署问题。文献[19]提出了一种多项式时间近似最优算法,通过不断迭代求解最小支配集,并利用最小支配集求解得到最小化的网关数目。文献[20]利用网关选择算法求解网关的部署位置,构建以网关为根的转发树,然后通过转发树间的节点迁移实现网关的负载均衡。文献[21]提出了一种基于高斯混合模型的边缘计算网关设备部署方法,该方法可以在保证每个网关设备负载均衡的同时优化部署网关设备的数量。文献[22]提出了一种基于Stackelberg博弈的网关选择与关联问题的解析模型,在不同干扰下优化传感器网络的性能。

目前基于无线传感器网络的部署问题的研究,大部分是针对传感器随机分布、网关位置不受限制的情况下,如何部署网关对传感器节点进行覆盖,不符合路边停车检测的应用场景。因此,该文研究路边停车检测物联网系统网关部署优化算法,确保每一个传感器节点至少被一个网关节点覆盖的情况下,最小化网关节点的部署数量以降低网关的部署成本。

2 问题描述与建模

路边停车检测物联网是一种两层结构网络,如图1所示。第一层为部署在每个停车位上的传感器节点,实现停车位状态的实时检测。第二层为网关节点与其通信范围内的所有传感器节点及远程服务器之间的上行和下行通信。为了节约部署成本,网关节点通常安装在路边已有的基础设施上(如路灯),如图1所示,道路两侧的灯柱都是部署网关的候选点。

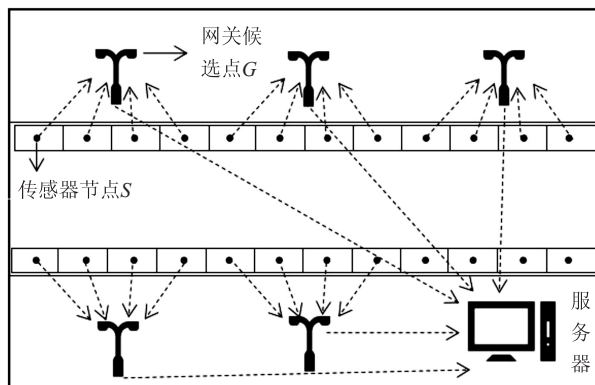


图1 网络结构

给定 $W = (S, G)$, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为路边停车

检测传感器节点集合, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 为网关候选节点集合。传感器节点 s_i 由电池供电, 为了节省能量简化通信模型, s_i 只能与附近的网关节点 g_j 通信, 传感器节点之间不通信。

网关部署时选择路侧已有的基础设施(如路灯)作为候选位置。该文的目标是在 m 个候选位置中部署最少的网关, 使这些网关能覆盖所有的传感器节点, 即保证每一个传感器节点至少能与一个网关通信。网关部署问题相关的定义如下:

定义 1(传感器节点坐标集): 令 (s_{ix}, s_{iy}) 表示传感器节点 $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在路边停车位上的坐标, $s = \{(s_{1x}, s_{1y}), (s_{2x}, s_{2y}), \dots, (s_{nx}, s_{ny})\}$ 为传感器节点坐标集。

定义 2(网关候选节点坐标集): 令 (g_{jx}, g_{jy}) 表示网关候选点 $g_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 在路侧基础设施上的坐标, $g = \{(g_{1x}, g_{1y}), (g_{2x}, g_{2y}), \dots, (g_{mx}, g_{my})\}$ 为网关候选点坐标集。

定义 3(节点覆盖): 网关节点的覆盖范围是以节点坐标 $(g_{jx}, g_{jy}) (j = 1, 2, \dots, m)$ 为圆心, 通信半径为

R 的圆。当满足式(1)时, 传感器节点 s_i 被网关候选节点 g_j 覆盖。

$$\sqrt{(g_{jx} - s_{ix})^2 + (g_{jy} - s_{iy})^2} \leq R \quad (1)$$

在城市路边停车场景中, 无线通信被街道之间的建筑物阻挡, 网关只能与同一条道路上的传感器节点通信, 不能与其他道路上的节点通信。但处于交叉路口附近的网关可以在其通信半径内与其他道路上的传感器节点通信。如图 2 所示, g_{10} 只能覆盖 Road2 上的传感器, 处于交叉路口的网关 g_7 能覆盖 Road1 上的传感器节点 $\{s_{11}, s_{12}\}$ 和 Road2 上的传感器节点 $\{s_{13}, s_{14}, s_{15}\}$ 。

定义 4(网关覆盖集合): 网关覆盖集合为一个网关 g_j 所能覆盖的传感器节点组成的集合, 标记为 G_j 。如图 2 中 g_7 覆盖的传感器节点为 $\{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{15}\}$, 即 $G_7 = \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{15}\}$, 用 $\text{sizeof}(G_j)$ 表示 G_j 中传感器的数量, $\text{sizeof}(G_7) = 5$ 。

定义 5: 路边停车系统网关覆盖问题定义为 $T = \text{Gateway_Deployment}(S, G, R)$

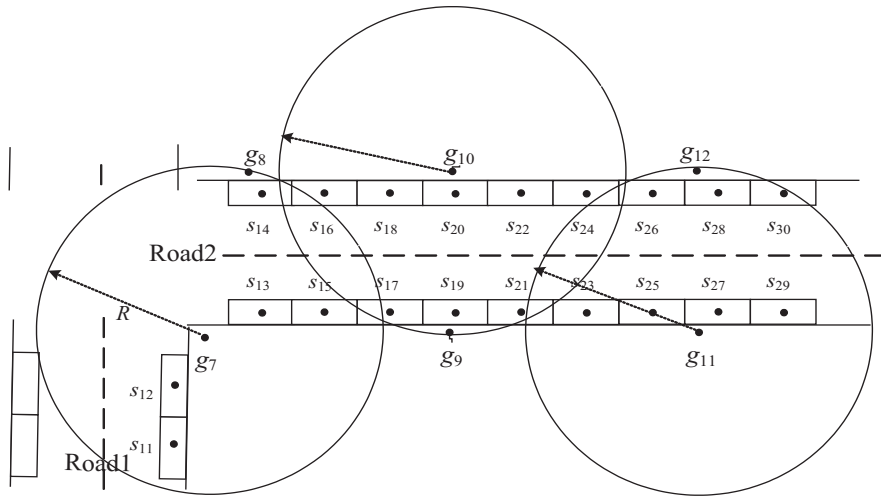


图 2 交叉路口网关的覆盖

输入: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为路边停车检测传感器节点集合, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 为网关候选点集合, R 为网关与传感器之间的通信半径。

任务: 计算 G 中每个网关候选点的覆盖集合得到 $G_{\text{cover}} = \{G_1, \dots, G_j, \dots, G_m\}$, G_j 为 S 的子集, 若 $K \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$, 且 $\bigcup_{k \in K} G_k = S$, 则称 $T = \{G_k\}_{k \in K}$ 为 S 的一个集合覆盖, 意指 S 中每一个元素 s_i 至少被包含于某一集合中, 即每一个传感器节点都至少包含于某一网关覆盖的集合中。如图 2 所示, 道路上的网关候选节点为 $\{g_7, g_8, \dots, g_{12}\}$, 其中 $\{g_7, g_{10}, g_{11}\}$ 能把道路上的所有传感器覆盖到, 即 $T = \{G_7, G_{10}, G_{11}\}$ 是集合 S 的一个集合覆盖。函数 $\text{Gateway_Deployment}$ 的目标是要找到覆盖 S 中所有元素的最小成本子集 T , 如式

(2) 所示, 约束条件如式(3)所示。

$$\text{minimize: } \text{sizeof}(T) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \bigcup_{k \in K} G_k = S \quad (3)$$

输出: $T = \{G_k\}_{k \in K}$ 是 S 的一个集合覆盖。

3 线状部署算法

线状部署算法 (Linear Deployment, LD) 是根据路边停车检测传感器节点呈线状分布且地理位置已知的特点而设计的网关部署方法。首先将路网中的传感器节点和网关候选点转化成线性序列, 然后采用按序迭代搜索策略得到网关覆盖集合。

3.1 线性排序

道路上传感器节点部署在每个停车位的中间位

置,网关候选点为路边基础设施(例如路灯),所以传感器节点和网关候选点都具有沿道路线性分布特征。用节点的编号顺序来反映节点之间的地理位置的有序性。初始时,传感器节点和网关候选点是无序的,如图3(a)所示。为了方便计算,将路网中的传感器节点和网关候选点分别转换为线性序列。给每条道路都标记一个起点和一个终点坐标,如图3所示,Road1的起点和终点坐标分别为 C_1 和 C_2 ,Road2的起点和终点坐标分别为 C_3 和 C_4 。

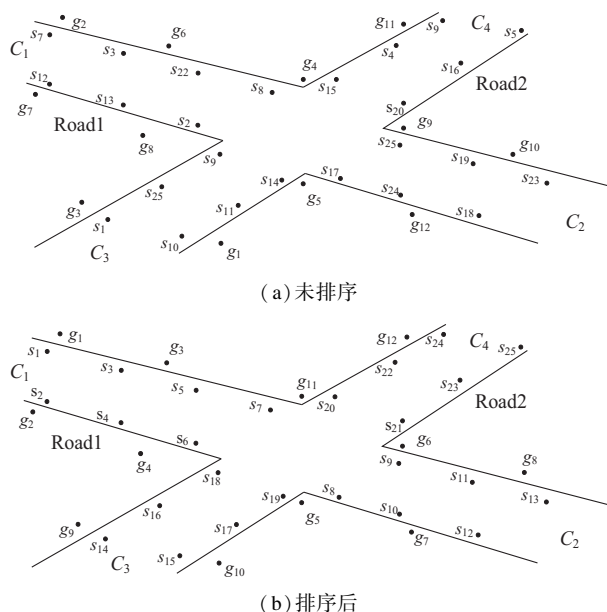


图3 对传感器节点和网关候选点进行排序
采取如下步骤对节点和网关候选点进行排序:

步骤一:对 Road1 中的传感器节点按照 $C_1 \rightarrow C_2$ 的方向进行排序,每个传感器节点计算与 C_1 点的欧氏距离,然后对 Road1 中的传感器节点按距离从小到大重新编号,这样编号的相邻性就反映了节点地理位置的相邻性。同理,可以对 Road1 上的网关候选点按照 $C_1 \rightarrow C_2$ 的方向排序。

步骤二:对 Road2 中的传感器节点和网关候选点分别按照 $C_3 \rightarrow C_4$ 的方向进行排序。

步骤三:合并 Road1 和 Road2 的排序结果,将它们序号前后相接,例如 Road1 中传感器节点排序后的编号为 s_1, s_2, \dots, s_i ,则 Road2 中的第一个传感器从 s_{i+1} 开始编号。这样可以将路网中的传感器节点和网关候选点转换为两个简单的线性序列,用编号反映节点之间地理位置之间的关系,排序后的结果如图3(b)所示。对于更复杂的路网也可以按照同样的方法实现传感器节点和网关候选点的排序。

3.2 按序迭代搜索

为了使排好序的相邻的传感器节点尽可能地被同一个网关覆盖,采用按序迭代搜索策略,给定 T 为选择的网关集合, S 为传感器节点集合,初始时 $T = \emptyset$,

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $G_{\text{cover}} = \{G_1, \dots, G_j, \dots, G_m\}$ 。搜索策略如下:

步骤一:取 S 中序号排在最前面的两个传感器节点,标识为 $s_{\text{first}}, s_{\text{second}}$;

步骤二:搜索能同时覆盖 $\{s_{\text{first}}, s_{\text{second}}\}$ 的网关集合,计算网关的权值,如式(4)所示,如果存在多个权值大于0的网关,则选择权重最大的网关节点 g_k 加入 T ,转到步骤四;

步骤三:若不存在能同时覆盖 $\{s_{\text{first}}, s_{\text{second}}\}$ 的网关,则搜索能覆盖 s_{first} 的网关,选择权重最大的网关节点 g_k 加入 T ;

步骤四:将 g_k 所覆盖的传感器节点从集合 S 中删除;

步骤五:如果 S 不为空继续执行步骤一,否则退出迭代。

网关候选点 g_j 的权重 $W(g_j)$ 计算如式(4):

$$W(g_j) = w_j * \text{sizeof}(G_j \cap S) \quad (4)$$

其中, w_j 为网关 g_j 的权重系数, $G_j \cap S$ 表示网关 g_j 所覆盖集合与 S 集合的交集, $\text{sizeof}(G_j \cap S)$ 表示该交集中节点的数量,因为 S 集合随着每轮迭代而改变,所以该数量也是动态改变的。

$$w_j = \begin{cases} 2, & \text{if } s_{\text{first}} \in G_j \text{ and } s_{\text{second}} \in G_j \\ 1, & \text{if } s_{\text{first}} \in G_j \text{ and } s_{\text{second}} \notin G_j \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $s_{\text{first}} \in G_j \text{ and } s_{\text{second}} \in G_j$ 表示 g_j 能同时覆盖 $\{s_{\text{first}}, s_{\text{second}}\}$,取系数为2; $s_{\text{first}} \in G_j \text{ and } s_{\text{second}} \notin G_j$ 表示 g_j 只能覆盖 s_{first} ,不能覆盖 s_{second} ,取系数为1;否则不是合适的网关候选点,所以取系数为0。

以图4为例,LD每轮迭代的参数值如表1所示,按序迭代搜索如下:

步骤一:集合 S 中序号最靠前的两个传感器节点为 $s_{\text{first}} = s_1, s_{\text{second}} = s_2$;

步骤二:搜索能同时覆盖 s_1 和 s_2 的网关,有 $\{g_1, g_2, g_3, g_4\}$,因此这4个网关的权值系数都为2, g_5 和 g_6 不能覆盖 s_1 或 s_2 所以权值系数都为0。因为 g_4 处于交叉入口,既可以覆盖 Road1 上的传感器节点也能覆盖 Road2 上的传感器节点。由表1可得 $W(g_4)$ 最大。将 g_4 加入 T 中;转到步骤三;

步骤三:将 g_4 所覆盖的传感器节点从集合 S 中删除;

步骤四:因 S 不为空,则进行第二轮迭代。

此时集合 S 的序号最靠前两个传感器节点为 $s_{\text{first}} = s_{21}, s_{\text{second}} = s_{22}$,第二轮迭代中 g_8 和 g_9 权值最大且相等,因为 g_8 排在 g_9 的前面,所以选择了 g_8 加入 T 中;同理,第三轮迭代选择了 g_{12} 加入 T 中,将 g_{12} 所覆盖的传感器节点从集合 S 中删除后发现 S 为空,全部传感

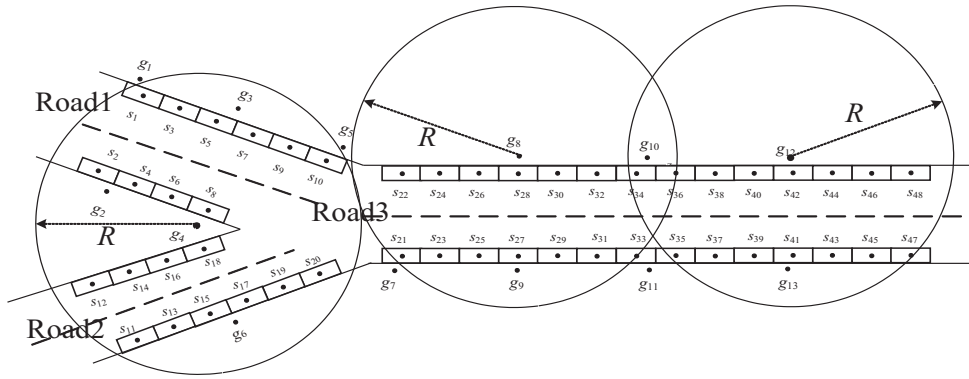


图 4 LD 得到的覆盖情况

表 1 迭代参数

迭代	$s_{\text{first}}, s_{\text{second}}$	网关候选点权重 $W(g_j)$	选择的网关集合 T
第一轮	s_1, s_2	$W(g_1) = 16, W(g_2) = 28, W(g_3) = 20, W(g_4) = 40, W(g_5) = 0, W(g_6) = 0$	g_4
第二轮	s_{21}, s_{22}	$W(g_7) = 18, W(g_8) = 30, W(g_9) = 30, W(g_{10}) = 0, W(g_{11}) = 0$	g_4, g_8
第三轮	s_{35}, s_{37}	$W(g_9) = 15, W(g_{10}) = 28, W(g_{11}) = 12, W(g_{12}) = 30, W(g_{13}) = 30$	g_4, g_8, g_{12}

器节点被覆盖,退出迭代,得到最终选择的网关集合 $T = \{g_4, g_8, g_{12}\}$ 。LD 的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 $T = \text{Linear_Deployment}(S, G, R)$

输入: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为传感器节点集合

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 为网关候选点集合

R 为网关与传感器节点间的通信半径

输出: 选择的网关集合 T

1. 对传感器节点和网关候选点进行排序; // 按 3.1 节描述的步骤排序
2. 计算每个网关候选点对传感器节点的覆盖, 得到 $G_{\text{cover}} = \{G_1, \dots, G_j, \dots, G_m\}$;
3. $T = \emptyset$;
4. while $S \neq \emptyset$
5. 取集合 S 中最前面两个节点分别赋值给 s_{first} 和 s_{second} ;
6. 计算能覆盖 s_{first} 的网关集合 $C(s_{\text{first}})$;
7. 计算能覆盖 s_{second} 的网关集合 $C(s_{\text{second}})$;
8. $V = C(\text{first}) \cap C(\text{second})$ // V 表示同时覆盖 s_{first} 和 s_{second} 的网关集合
9. if $V \neq \emptyset$
10. $g_k = \{g_k \mid g_k \in V, W(g_k) = \max\{W(g_j)\}, g_j \in V\}$;
11. else
12. $g_k = \{g_k \mid g_k \in C(\text{first}), W(g_k) = \max\{W(g_j)\}, g_j \in C(\text{first})\}$;
13. end if
14. 将 g_k 加入 T 中 // g_k 表示选中的网关;
15. 从 S 中删除被 g_k 覆盖的传感器;
16. end while
17. return T

4 实验

为了充分验证算法的性能,设计两类验证方法:一

是开展了 Matlab 仿真实验;二是设计开发了可实用的网关部署系统,该系统利用采集的路边停车检测传感器节点坐标和网关候选点坐标作为数据集,对算法的有效性进行了验证。

将网关节点部署数量、覆盖冗余度、时间复杂度作为算法性能的评价指标。令 N_s 表示传感器节点的数量、 $N_c(i)$ 表示能覆盖第 i 个传感器节点的网关数量,则覆盖冗余度 C 定义如下:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n N_c(i)}{N_s} \quad (6)$$

4.1 仿真实验

4.1.1 路网和数据集

仿真实验中用 $(i+j) \times N$ 表示路网, $(i+j)$ 表示路网上有 i 行 j 列路, 1 列路可以把 i 行路分为 $i+1$ 个路段, 1 行路可以把 j 列路分为 $j+1$ 个路段, 因此, i 行 j 列路可分为 $\text{num_segment} = ((i+1) * j + (j+1) * i)$ 个路段。 N 为每个路段一侧的传感器节点数量, 每条路段的两侧都布置有传感器节点, 因此, 路网上的传感器节点数量为 $(2N * \text{num_segment})$ 。

仿真中用到的路网分为不含交叉路口的单道路路网和含交叉路口的多道路路网。其中 $(1+0) \times N$ 表示单道路路网, $(1+2) \times N$ 、 $(1+3) \times N$ 、 $(2+2) \times N$ 为 3 种多道路路网。在 $(1+0) \times N$ 单道路路网上设置 $N = [200, 300, \dots, 1000]$, 生成的传感器节点数量为 $\{200, 300, \dots, 1000\}$, 在 3 种多道路路网上设置 $N = [50, 100, 150]$, $(1+2) \times N$ 路网上生成的传感器节点数量为 $\{700, 1400, 2100\}$, $(1+3) \times N$ 路网上生成的传感器节点数量为 $\{1000, 2000, 3000\}$, $(2+2) \times N$ 路网上生

成的传感器节点数量为 $\{1\ 200, 2\ 400, 3\ 600\}$ 。

4.1.2 仿真结果分析

仿真实验实现了该文提出的线状部署算法(LD)、朴素贪心算法^[23](Naive Greedy, NG)以及分支定界法^[24-25](Branch and Bound, BB)和遗传算法^[26-27](Genetic Algorithm, GA),并对这些算法的性能进行对比。

设传感器节点与网关候选点的初始通信半径 $R = 60\text{ m}$,图5是单道路路网的仿真结果,其中图5(a)、图5(b)和5(c)分别是网关节点数量、覆盖冗余度、算法运行时间在上述4种算法下的对比结果。由图5(a)可知,LD所需部署的网关节点个数明显少于其他3种算法。具体为比GA、BB和NG分别减少8.4%、25.1%和44.1%。由图5(b)可知,LD的覆盖冗余度低于其他3种算法,具体为比GA、BB和NG分别降低

3.8%、18.9%和44.4%。由图5(c)可知,LD比其他3种算法时间复杂度更低。

图6是多道路路网上的仿真结果,其中图6(a)、图6(b)、图6(c)分别是网关节点数量、覆盖冗余度、运行时间在4种算法下的对比结果。由图6(a)可知,随着传感器规模的增大,所需部署的网关数量也在增加。LD的网关节点个数比GA、BB和NG分别减少5.7%、9.3%和39.9%。由图6(b)可知,LD覆盖冗余度低于其他3种算法,具体为比GA、BB、NG分别降低4.1%、8.4%和30.7%。由图6(c)可以看出,传感器节点的规模增加时,算法运行时间也随着增加,并且LD比其他3种算法花费时间更少。

由图5和图6分析可得,在不同路网和传感器规模下,LD在网关节点数量、覆盖冗余度和算法运行时间上均占有一定优势。

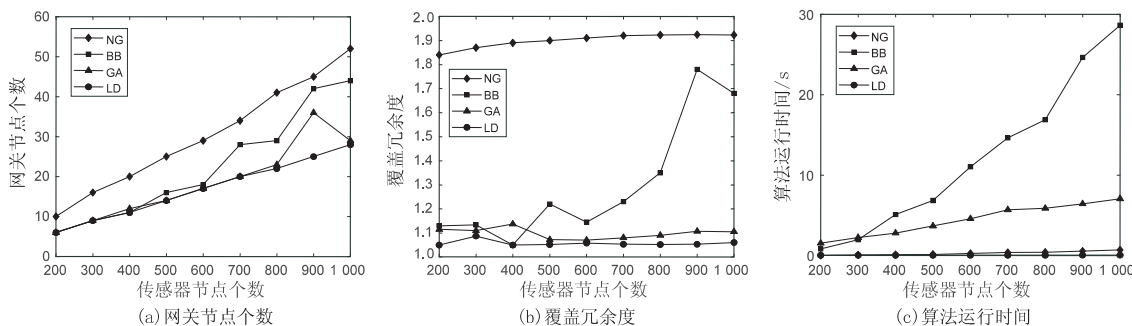


图5 单道路路网上的仿真结果

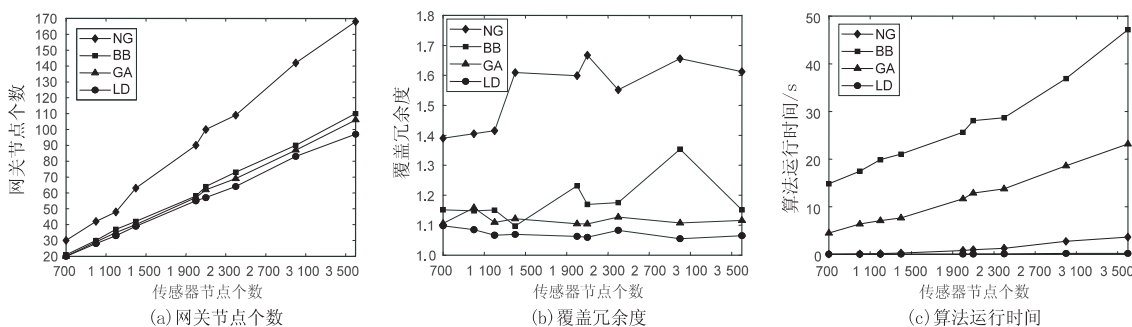


图6 多道路路网上的仿真结果

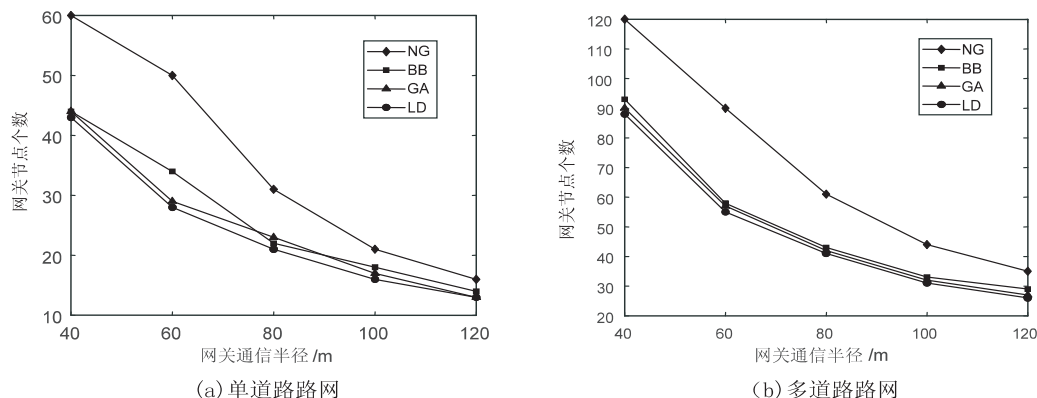


图7 不同半径下四种算法所需部署的网关数量

设置通信半径 R 分别为40 m、60 m、80 m、100 m、120 m进行仿真,结果如图7所示。图7(a)为 $(1+0) \times N$

单道路路网,传感器节点数量为1 000时的计算结果;图7(b)为 $(1+3) \times N$ 多道路路网,传感器节点数量为

2 000 时的计算结果。由图 7 可知扩大网关的通信半径能有效地减少网关的部署数量,降低部署成本。而且在不同通信半径下 LD 所需部署的网关数量都是最少的。

图 8 为 4 种算法在 $(1+2) \times N$ 路网上传感器节点

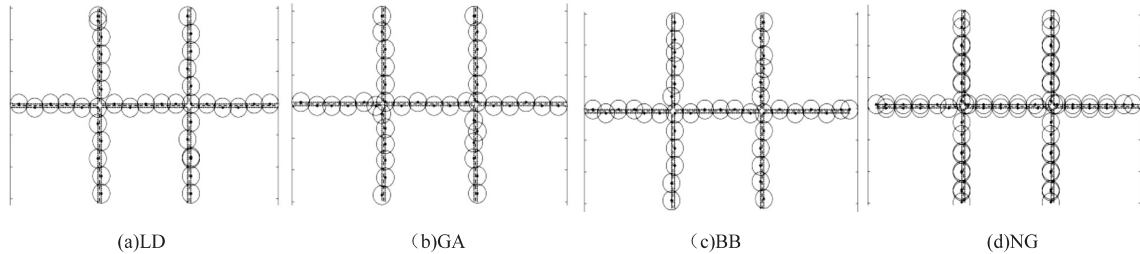


图 8 多道路路网上数据集为 1 000 时 4 种算法的覆盖结果

4.2 真实数据集实验

基于百度地图设计了路边停车网关部署软件系统。已采集了佛山市容桂区路边停车位及附近路灯的坐标数据,将停车位坐标和网关候选点坐标(路灯坐标)上传到系统中,该系统经算法计算得到最终的网关节点部署数量和对应的候选点坐标。当网关通信半径 $R=60\text{ m}$ 时,LD 在不同规模传感器节点的覆盖效果如图 9 所示。图 9 中圆点标记的是停车位,圆圈标记的是网关的覆盖结果。图 9(a)为两条道路,228 个传感器节点的覆盖,需要部署 6 个网关;图 9(b)为 4

数量为 1 400 时的覆盖结果。从图中可以得出 LD 需要部署 39 个网关,GA 需要部署 40 个网关,BB 需要部署 42 个网关,NG 需要部署 63 个网关。观察发现 LD 得出的覆盖图中存在较少的重叠区域,LD 比其他 3 种算法的覆盖冗余度更低。

条道路,354 个节点的覆盖,需要部署 9 个网关;图 9(c)为 6 条道路,484 个传感器节点的覆盖,需要部署 12 个网关。

网关部署软件系统实现了提出的 LD 及 NG 对比验证。随着传感器规模的增加,所需部署的网关数量也在增加,LD 比 NG 在网关部署数量上减少 46.0%,覆盖冗余度上减少 53.4%。

由网关部署软件系统验证的结果可得,LD 在网关部署数量和覆盖冗余度上均占有一定优势,具有较好的覆盖效果,具有更好的实用性。

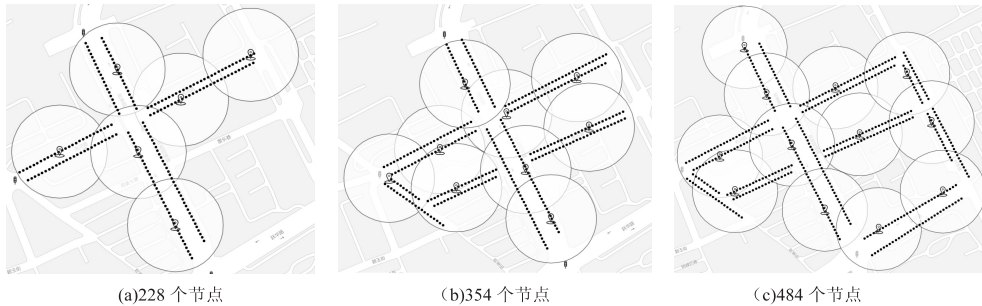


图 9 LD 对不同规模传感器节点的覆盖效果

5 结束语

该文研究了路边停车检测物联网系统网关部署问题,将该问题转化为集合覆盖问题求解。针对停车检测物联网系统中传感器节点线状分布且地理位置已知的特点,提出了线状部署算法,通过最小化网关节点部署数量降低部署成本。将传感器节点和网关候选点转化为线性序列,按序迭代搜索最小网关集合。实验结果表明,该算法能以较小的时间复杂度获得较好的覆盖效果,具有更好的实用性。

参考文献:

[1] VERMA S, ZEADALLY S, KAUR S, et al. Intelligent and secure clustering in wireless sensor network (WSN)-based intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on

Intelligent Transportation Systems, 2021, 23 (8): 13473 - 13481.
 [2] ZHANG Z, MAO X, ZHOU K, et al. Collaborative sensing-based parking tracking system with wireless magnetic sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (9): 4859 - 4867.
 [3] ZHANG Z, HE X, HUANG J, et al. Parking detection using combined magnetic sensor and pulsed coherent radar[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9 (18): 17210 - 17219.
 [4] 史伟, 张青云, 李帅. 基于 LBS 的停车位共享平台设计[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29 (11): 149-153.
 [5] LIU C, HUANG H, DU H, et al. Optimal gateway placement for hybrid BANETs-sensor networks in urban areas[J]. International Journal of Sensor Networks, 2018, 26 (4): 243 - 251.

- [6] ASHRAF U. Energy-aware gateway placement in green wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 21(1):156-159.
- [7] HE B, XIE B, AGRAWAL D P. Optimizing deployment of internet gateway in wireless mesh networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(7):1259-1275.
- [8] 黄启嵩, 曹雷懋. 基于流量模式和网络拓扑的网关部署算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(9):2777-2781.
- [9] ZHU X, XIAO F, WANG Y, et al. Optimal edge gateway deployment in internet of things based on simulated annealing with adaptive external penalty[J]. IET Communications, 2021, 15(16):2111-2124.
- [10] HUSSAIN M, KIM K H, AKBAR A H, et al. A gateway deployment heuristic for enhancing the availability of sensor grids[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(8):7595038.
- [11] GUO J, RINCON D, SALIENT S, et al. Gateway placement optimization in LEO satellite networks based on traffic estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4):3860-3876.
- [12] 赵传信, 陈付龙, 王汝传, 等. 融合信道分配的无线 Mesh 网络多目标网关部署[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(8):1831-1841.
- [13] 温勇, 王美. 基于粒子群算法的无线传感网络部署的研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4):202-205.
- [14] 张满, 贾云璐, 林杰. 基于粒子群的传感器空间覆盖优化方法[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(8):204-208.
- [15] LIU W, XU C, TIAN Z, et al. Research on gateway deployment for throughput optimization in wireless mesh networks[C]//2019 international conference on computer, information and telecommunication systems (CITS). Beijing:IEEE, 2019:1-5.
- [16] HOFFMANN F, MEDINA D, WOLISZ A. Optimization of routing and gateway allocation in aeronautical ad hoc networks using genetic algorithms[C]//2011 7th international wireless communications and mobile computing conference. Istanbul:IEEE, 2011:1391-1396.
- [17] BOZORGCHENANI A, JAHANSHAHI M, TARCHI D. Gateway selection and clustering in multi-interface wireless mesh networks considering network reliability and traffic[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2018, 29(3):e3215.
- [18] 吕振辉, 张敬伟, 崔强, 等. 基于 Q-learning 改进蜘蛛猴算法的电工装备边缘网关部署研究[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(1):51-60.
- [19] AOUN B, BOUTABA R, IRAQI Y, et al. Gateway placement optimization in wireless mesh networks with QoS constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(11):2127-2136.
- [20] 吴文甲, 杨明, 罗军舟, 等. 干扰约束和负载均衡的无线 Mesh 网络网关部署策略[J]. 计算机学报, 2012, 35(5):883-897.
- [21] ZHANG H, LIU Z, ZHANG Y, et al. Research on deployment method of edge computing gateway based on microservice architecture[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2021, 675(1):012164.
- [22] HEIDARPOUR M R, MANSHAEI M H, ARDAKANI M. Optimal association strategy of multi-gateway wireless sensor networks against smart jammers[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 12(2):317-321.
- [23] 朱钧宇, 黄传河, 范茜莹, 等. 城市环境车联网中基于近似算法的 RSU 部署方案[J]. 通信学报, 2018, 39(1):78-89.
- [24] SAGHAND P G, CHARKHGARD H, KWON C. A branch-and-bound algorithm for a class of mixed integer linear maximum multiplicative programs: a bi-objective optimization approach[J]. Computers & Operations Research, 2019, 101:263-274.
- [25] JIAO H W, WANG F H, CHEN Y Q. An effective branch and bound algorithm for minimax linear fractional programming[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 2014:160262.
- [26] 蒋建林, 程坤, 王璨璨, 等. 基于改进遗传算法的集合覆盖问题[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(5):120-126.
- [27] KAUR S, UPPAL R S. Dynamic deployment of homogeneous sensor nodes using genetic algorithm with maximum coverage[C]//2015 2nd international conference on computing for sustainable global development (INDIACom). New Delhi:IEEE, 2015:470-475.