

面向客运车站环境监测的 WSN 覆盖策略

邓 胜 江

(中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 客运车站环境的监测对于保障车站安全运营和为旅客提供舒适出行具有重大意义. 基于无线传感器网络(WSN)的客运车站环境监测全覆盖策略, 依据被监测区域中已部署的传感器节点对区域进行 Voronoi 划分, 计算 Voronoi 图中三角形的覆盖比, 提出基于 Voronoi 三角形覆盖比的全覆盖算法, 该算法通过逐个添加新的传感器节点修复覆盖空洞. 仿真结果表明: 所提算法在实现监测区域全覆盖的同时能够有效减小由于大量部署传感器节点所造成的覆盖冗余.

关键词: 无线传感器网络; 环境监测; Voronoi; 覆盖

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Coverage strategy of WSN for environmental monitoring of passenger station

DENG Shengjiang

(Institute of Computing Technology, China Academy of Railways Sciences
Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: It is of great significance for environmental monitoring of passenger station to ensure the safe operation and provide comfortable travel for passengers. This paper mainly studies, based on Wireless Sensor Network (WSN), coverage strategy for environmental monitoring of the passenger station. According to the deployed sensor nodes, the monitored area is divided by Voronoi diagram and the coverage status of all triangles in it is calculated. Then an algorithm named Voronoi Triangle Coverage Ratio (VTR) is presented, which can repair the coverage holes by adding corresponding new nodes. The simulation results show that the proposed algorithm not only achieves the full coverage, but also effectively reduces the redundant coverage due to mass deployed sensor nodes.

Keywords: wireless sensor network; environmental monitoring; Voronoi; coverage

客运车站是旅客乘坐火车出行过程中进行候车、登乘、中转换乘的主要场所,而客运站内的环境状况也直接影响着旅客出行的舒适体验度.通常情况下,客运站内的环境主要由温度、湿度、亮度和噪声等 4 个关键要素形成,考虑到无线传感器网络所

具有的免布线、低功耗、部署灵活、易维护等特点,通过在客运车站内部署温度、湿度、亮度、噪声等传感器监测客运站环境参数,并依据旅客舒适度指标自动调整车站空调、风机、照明、LED 显示屏、扬声器等设备,从而为旅客的温馨出行提供保障.

收稿日期:2017-07-25

基金项目:国家自然科学基金(U1334210)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1334210)

第一作者:邓胜江(1979—),北京人,副研究员.研究方向为铁路旅客运输. email: 13811345060@139.com.

引用格式:邓胜江.面向客运车站环境监测的 WSN 覆盖策略[J].北京交通大学学报,2018,42(2):91—97.

DENG Shengjiang. Coverage strategy of WSN for environmental monitoring of passenger station [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(2): 91—97. (in Chinese)

针对无线传感器网络,网络的覆盖情况反映了其对被监测区域的监控完整程度,是衡量无线传感器网络服务质量的一项基本指标^[1].因而,如何针对车站内各环境因素的特点合理部署传感器节点从而达到对客运车站无盲区全覆盖的监测是基于 WSN 的客运站环境监测研究中首要解决的问题.

为了实现对被监测区域的充分覆盖,实际工程中往往通过大规模、高密度地部署传感器节点来提高网络的覆盖率.然而,在这样的部署策略下,虽然可以显著提高网络覆盖率,但同时也会造成网络中节点的覆盖区域严重重叠,由此引起信息的冗余采集和传输,以及信道冲突和干扰.

现有针对网络覆盖控制的相关研究主要可以分为两类:一类是基于冗余节点的休眠调度策略,如文献[2]中采用对满足冗余的节点进行休眠调度方法保证网络的覆盖率和连通性,同时减少网络总能耗.文献[3]提出了基于冗余节点休眠和分阶段唤醒的传感器网络三维覆盖控制算法.不同于基于休眠调度策略通常需要部署大量的冗余节点;另一类覆盖控制方法是以 Voronoi 图为基础研究无线网络的空洞侦测和修复策略.文献[4]将全覆盖问题转化为 Voronoi 构建和圆覆盖的几何问题.文献[5]研究了基于 Voronoi 图和移动节点的动态空洞修复.文献[6-8]研究了不同应用领域中将 Voronoi 图用于基于能耗的传感器部署.文献[9]提出基于 Voronoi 覆盖机制的 MRTc 算法,通过准确控制节点工作状态,实现活动节点对目标区域的完全覆盖.然而,现有的基于 Voronoi 网络覆盖的文献中大都采用静态修复的方式,容易造成网络中存在大面积感知区域重叠,且在空洞修复过程中缺乏对传感器节点感知区域和 Voronoi 多边形几何位置的量化描述.

本文作者结合客运车站环境监测需求,通过初始部署的传感器节点将车站中被监测区域进行 Voronoi 划分,并利用局部 Voronoi 图寻找覆盖率最小的区域,提出了三角覆盖比的概念,对 Voronoi 多边形与传感器节点感知范围的位置关系进行量化描述,同时从空洞的占比大小角度寻找具有最小覆盖比的区域作为优先修复区,并指定节点部署具体位置来迭代添加新的传感器节点.所提方法完全采用分布式的计算方式,针对密集部署的传感器网络本文所提算法的复杂度也不会出现指数增加.

本文的主要工作:1)通过已部署节点将整个被监测区域进行 Voronoi 划分,提出针对 Voronoi 图中每个三角形区域的空洞面积覆盖比概念;2)提出基于 Voronoi 三角形覆盖比的网络全覆盖算法

(VTR),通过指定每次新节点的部署位置,迭代更新 Voronoi 划分,在保证网络完全覆盖的同时减小覆盖冗余.

1 全覆盖模型构建

1.1 感知模型

假设客运车站中部署的传感器节点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 其中节点 s_i 的感知半径为 R_{s_i} , 所有节点的传输半径相同记为 R , 客运站中需被监测的目标点集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$, 传感器节点 s_i 与被监测目标点 x_j 之间的距离用欧式距离 $d(s_i, x_j)$ 表示, 目标点 x_j 被传感器节点 s_i 感知的概率 p_{ij} 由节点的感知模型决定.

现有文献中关于传感器节点感知模型的研究大致可以分为二元感知模型, 概率感知模型和分段感知模型^[10]3类.由于概率感知模型和分段感知模型在满足一定感知概率的条件下可以简化为二元感知模型, 且目前关于 WSN 覆盖问题的研究工作中大部分采用二元感知模型^[11], 本文为了计算和分析的方便, 同样采用如下所述的二元感知模型.

具体地, 在二元感知模型中, 位于传感器节点 s_i 感知范围内的一点 x_j 的被感知的概率 p_{ij} 为 1, 超出感知范围的感知概率则为 0,

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(s_i, x_j) \leq R_{s_i} \\ 0, & d(s_i, x_j) > R_{s_i} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 连通覆盖模型

针对客运车站的环境监测, 通常需要部署不同类型的传感器节点如温、湿度传感器、亮度传感器和噪声传感器节点等.而不同类型的传感器所具有的感知半径不完全相同, 假设温度、湿度、亮度和噪声传感器的感知半径分别为 R_t, R_h, R_l 和 R_n , 由于传感器节点的传输半径通常至少为其感知半径的 2 倍^[12-13], 即 $R \geq 2 \max \{R_t, R_h, R_l, R_n\}$, 令 $r_{\max} = \max \{R_t, R_h, R_l, R_n\}$, 则有 $R \geq 2 r_{\max}$.

针对传感器节点传输半径和感知半径的不同, 本文给出如下的 WSN 的连通覆盖和感知覆盖的定义, 并进一步给出两者之间相关性的定理.

定义 1(连通覆盖) 对于空间 V 中传感器节点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 若对于 $\forall s_i \in S, \exists s_j \in S$ 且 $i \neq j$, 使得 $d(s_i, s_j) \leq R$, 则称传感器节点集 S 对空间 V 是连通覆盖的.

定义 2(感知覆盖) 对于空间 V 中的传感器节点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 若空间 V 中任意一点 p , $\exists s_i \in S$ 使得 $d(s_i, p) \leq R_{s_i}$, 则称传感器节点集 S 对空间 V 是感知覆盖的.

定理 1 若传感器节点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 满足对空间 V 的感知覆盖, 则对于 $\forall s_i \in S, \exists s_j \in S$ 且 $i \neq j$, 使得 $d(s_i, s_j) \leq R_{s_i} + r_{\max}$.

证明: 采用反证法, 假设对于给定的节点 s_i , 节点集 S 中任意一个节点 $s_j (i \neq j)$ 都有 $d(s_i, s_j) > R_{s_i} + r_{\max}$, 则节点 s_i 和节点 s_j 的连线上至少存在一点 p 使得 $d(s_i, p) > R_{s_i}, d(s_j, p) > R_{s_j}$.

那么, 对于除 s_i 外的所有节点来说, 在满足上述不等式约束的点 p 的集合中总能找到一个公共点 p' , 使得 $d(s_j, p') > R_{s_j}$ 对所有的节点同时成立. 这显然与感知覆盖的定义是相违背, 因而假设不成立, 证明得证.

由定理 1 可知满足感知覆盖的节点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 中任意两个节点 s_i 和 s_j 均有 $d(s_i, s_j) \leq R_{s_i} + r_{\max}$, 又由于 $r_{\max} = \max \{R_t, R_h, R_l, R_n\}$, 且 $R \geq 2r_{\max}$, 所以有 $d(s_i, s_j) \leq 2r_{\max} \leq R$. 也即满足感知覆盖的节点集一定满足连通覆盖, 因而下面主要考虑客运车站中节点部署的感知覆盖问题.

1.3 Voronoi 分割与覆盖模型

基于客运车站待监测区域中已部署传感器节点的位置, 首先构建每个传感器节点的 Voronoi 多边形. 具体地, 如图 1 所示, 节点 s_1 周围存在 $s_2 \sim s_6$ 共 5 个节点, 连接 s_1 和其余几个节点并作连线的垂直平分线, 则垂直平分线所分割空间中靠近节点 s_1 一侧的区域所构成的交集即为节点 s_1 的 Voronoi 多边形, 记为 V_{s_1} . 显然, 对于区域内任意一点 $p \in V_{s_1}$, 有 $d(p, s_1) \leq d(p, s_i), i \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$.

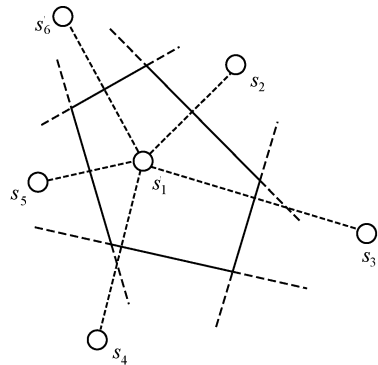


图 1 节点 s_1 的 Voronoi 多边形

Fig.1 Voronoi polygon of node s_1

定义 3 (Voronoi 三角形覆盖比) 将 Voronoi 多边形内的节点与 Voronoi 多边形的各顶点相连, 构成多个三角形, 以节点为圆心, 以传感器感知距离为半径作圆, 则每个三角形与圆的交集大小与三角形自身面积大小的比值为 Voronoi 三角形覆盖比.

由于传感器节点 s_i 通过自身与至少 3 个邻居节点的位置信息可以获得多边形 V_{s_i} 的各边长度, 以及由节点 s_i 和 V_{s_i} 中相邻两个顶点所构成的三角形的各边长度^[14]. 如图 2 所示, 设节点 s_i 与顶点 A, B 所构成三角形的三边长度为 $s_iA = l_1, s_iB = l_2, AB = l_3$, 由此可以得到三角形 3 个内角的大小为 $\gamma = \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 l_1 l_2}, \alpha = \arccos \frac{l_1^2 + l_3^2 - l_2^2}{2 l_1 l_3}, \beta = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - l_1^2}{2 l_2 l_3}$.

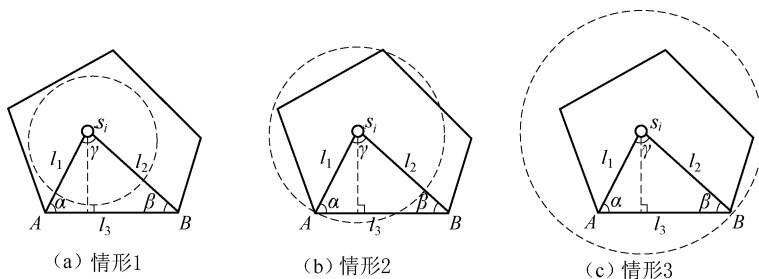


图 2 节点感知范围与 Voronoi 覆盖关系

Fig.2 Relationship between the sensing range of node and Voronoi coverage

根据节点感知半径大小的不同, 节点的感知覆盖范围通常与节点的 Voronoi 多边形呈现如图 2 所示的 3 种不同的关系. 具体地, 假设与传感器节点 s_i 共有 Voronoi 边 AB 的传感节点为 s_j , 那么针对图 2 中所示节点 s_i 的感知范围与 Voronoi 三角形 s_iAB 的覆盖关系有以下结论:

1) 图 2(a) 中, 节点 s_i 感知范围与 Voronoi 的三角形 s_iAB 覆盖比为 $\frac{2\gamma R_{s_i}^2}{l_3 d(s_i, s_j)}$;

2) 图 2(b) 中, 节点 s_i 感知范围与 Voronoi 的三角形 s_iAB 覆盖比为

$$1 - \frac{(l_2 - R) l_3}{2 l_2} \left[\frac{d(s_i, s_j)}{\tan \beta} - \sqrt{4R_{s_i}^2 - d(s_i, s_j)^2} \right] \in \left[\frac{\gamma d(s_i, s_j)}{2 l_3}, 1 \right] \quad (2)$$

3) 图 2(c) 中, 节点 s_i 感知范围与 Voronoi 的三角形 s_iAB 覆盖比为 1.

针对 Voronoi 多边形与内部传感器节点所构成

的多个三角形,通过上述 Voronoi 三角形覆盖比的分类计算可获得每个三角形的 Voronoi 三角形覆盖比情况.

引理 1^[14] 假设 Voronoi 内存在一定数量的空洞,且 s_i 作为 Voronoi 内的节点,若要部署新的节点来对区域空洞进行最大范围的修复,那么新节点必位于 s_i 和 Voronoi 边集构成夹角的角平分线上.

依据引理 1 可知针对存在空洞的 Voronoi 多边形中添加新的传感器节点的最优方位为夹角的平分线上,又由于对两个相邻的 Voronoi 多边形具有公共 Voronoi 边的两个三角形是对称的,如图 3 所示,节点 s_i 和 s_j 为相邻的两个传感器节点,且它们具有公共的 Voronoi 边 AB ,三角形 s_iAB 和三角形 s_jAB 是关于边 AB 对称的,本文选择节点 s_i 和 Voronoi 边集所构成夹角的角平分线与对应 Voronoi 公共边 AB 的交点作为新的传感器节点候选部署位置.

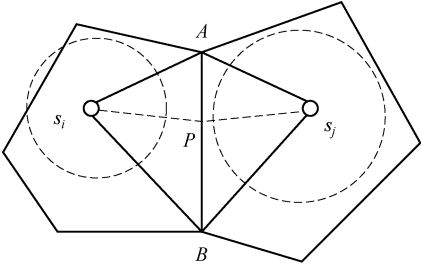


图 3 邻接 Voronoi 多边形
Fig.3 Adjacent Voronoi polygons

对于同构的无线传感器网络来说,节点具有相同的感知范围,因而图 3 所示的以 AB 为公共边的邻接三角形 s_iAB 和 s_jAB 具有相同的 Voronoi 三角形覆盖比,对于含有覆盖空洞的四边形区域 $s_i A s_j B$ 来说,其感知覆盖比与三角形 s_iAB 和 s_jAB 的 Voronoi 三角形覆盖比相同.而对于客运车站环境中具有不同类型传感器节点的异构网络,节点感知范围的不同会导致对称三角形 s_iAB 和 s_jAB 的 Voronoi 三角形覆盖比并不相同,这里采用邻接三角形 s_iAB 和 s_jAB 的 Voronoi 三角形覆盖比的乘积作为四边形区域 $s_i A s_j B$ 的感知覆盖比.对于位于监测区域边界的三角形来说,它们不存在上述邻接三角形,因而这些区域的感知覆盖比即为自身 Voronoi 三角形覆盖比.针对客运车站中整个 WSN 覆盖网络,覆盖比最小的区域具有最高的优先级来部署新的传感器节点.

1.4 算法设计

针对客运车站中存在感知覆盖空洞的 WSN,1.3 节中指出在空洞修复过程中新的传感器节点的

添加区域和部署位置通过算法 1(VTR 算法)详细说明如何通过逐个添加节点来迭代地修复覆盖空洞.

算法 1.VTR 算法

输入:已知部署位置的初始传感器节点集 S 和客运站被监测区域大小
输出:全覆盖的客运站环境监测网络

- 1:for $\forall s_i \in S$
- 2:构建 Voronoi 多边形 V_{s_i} 及对应顶点集 $V(s_i)$ 和边集 $E(s_i)$
- 3:连接 s_i 与多边形 V_{s_i} 中每个顶点,与 $E(s_i)$ 构成三角形集合 $T(s_i)$
- 4:计算 $T(s_i)$ 中每个三角形与以 s_i 为圆心感知半径为 R_{s_i} 的感知范围的三角形覆盖比 $VT(s_i)$
- 5:end for
- 6: $VT(S) = \bigcup_{s_i \in S} VT(s_i)$
- 7:合并 $VT(S)$ 中的邻接三角形区域,并计算每个区域的感知覆盖比,记为 $VT'(S)$
- 8:计算集合 $VT'(S)$ 取得最小值的区域 $Area$ 和与其关联的一个传感器节点 s_a , $[s_a, Area] = \operatorname{argmin}\{VT'(S)\}$
- 9:获得以 s_a 为顶点的夹角平分线与 $Area$ 内 Voronoi 边的交点 p
- 10:在 p 点部署新的传感器节点 s' ,且 $S = S \cup s'$
- 11:重复 1~10 直到 $\min\{VT'(S)\} = 1$

上述算法中 1~5 步依据被监测区域中当前所部署传感器节点集合 S 将被监测区域进行 Voronoi 划分,并针对每个传感器节点计算其对应 Voronoi 图中每个三角形区域的覆盖比.步骤 6 获得整个被监测区域中所有三角形区域覆盖比集合 $VT(S)$,步骤 7 合并 $VT(S)$ 中具有公共 Voronoi 边的区域,并重新计算每个区域的覆盖比 $VT'(S)$,步骤 8 中找到集合 $VT'(S)$ 中取值最小元素所对应的区域和传感器节点.步骤 9 和 10 中,以第 8 步获得的传感器节点为顶点作角平分线,角平分线与 $Area$ 区域内的 Voronoi 边的交点作为新部署传感器节点的位置,然后更新传感器节点集 S .第 11 步重复上述过程,直到被监测区域达到全覆盖,也即区域内所有 Voronoi 三角形覆盖比为 1, $\min\{VT'(S)\} = 1$.

2 实验仿真与结果分析

仿真实验基于 Matlab R2014a 平台进行,首先模拟一个 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 大小的客运站区域,在其中随机部署一定数量的某一类型传感器节点,且传感器节点可以通过定位技术获得自身位置和邻居节点的位置信息.

被监测区域中初始部署 20 个传感器节点,图 4 和图 5 分别给出了感知半径 R_s 为 20 m 和 30 m 时的被监测区域的 Voronoi 划分和网络覆盖情况.显

然,同样的部署情况下,节点的感知范围大小直接影响着网络的覆盖情况, R_s 为 20 m 时区域内的网络覆盖率仅为 39.2%,而 R_s 为 30 m 时网络覆盖率为 78.3%,也即图 4 的网络空洞要明显大于图 5。

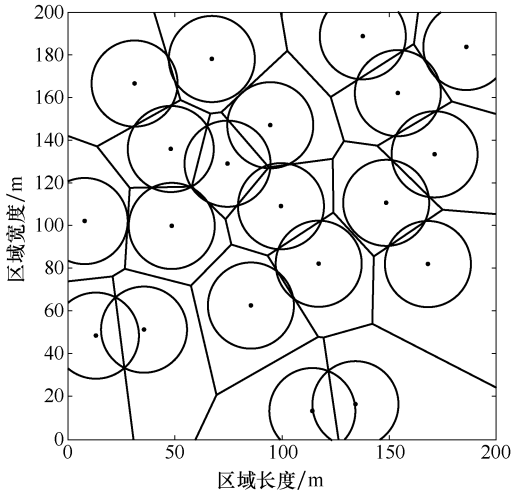


图 4 $R_s = 20$ m 时初始覆盖及 Voronoi 划分
Fig.4 Initial coverage and Voronoi division when $R_s = 20$ m

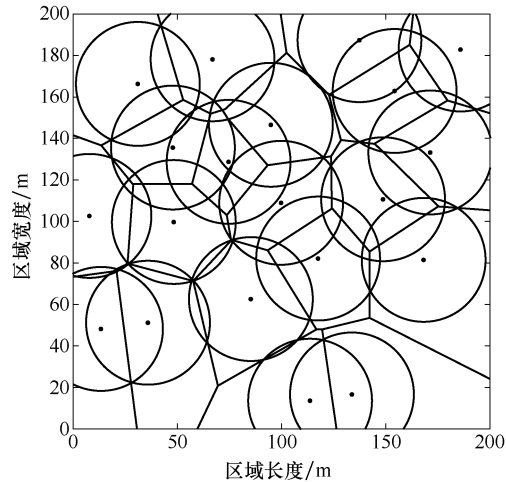


图 5 $R_s = 30$ m 时初始覆盖及 Voronoi 划分
Fig.5 Initial coverage and Voronoi division when $R_s = 30$ m

通过本文所提的 VTR 算法对上述覆盖空洞进行修复,为了说明本文算法的有效性,将仿真结果与文献[4]中所提出的空洞修复策略(PAL 算法)进行比较.图 6 和图 7 分别为 VTR 算法和 PAL 算法在 $R_s = 20$ m 时的覆盖空洞修复情况,VTR 算法需要新添加 50 个节点完成全覆盖,而 PAL 算法则需要添加 57 个,且从图 7 中可以发现 PAL 算法所实现的网络覆盖仍然存在少量空洞区域,这主要是由于 PAL 算法对覆盖区域的空洞面积估算不够准确^[14],使得无法对空洞面积进行有效修复。

图 8 和图 9 分别为 VTR 算法和 PAL 算法在

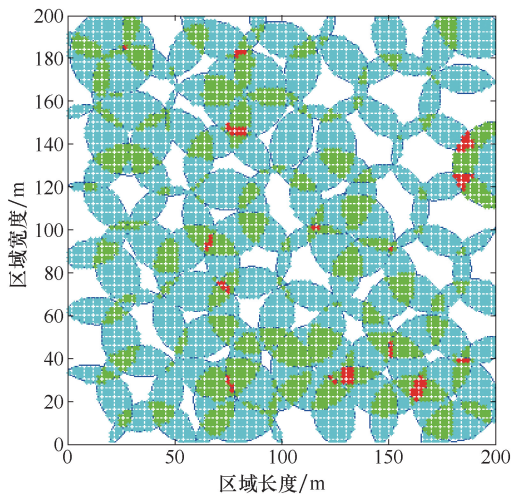


图 6 $R_s = 20$ m 时 VTR 全覆盖和冗余情况
Fig.6 Full coverage and redundancy of VTR when $R_s = 20$ m

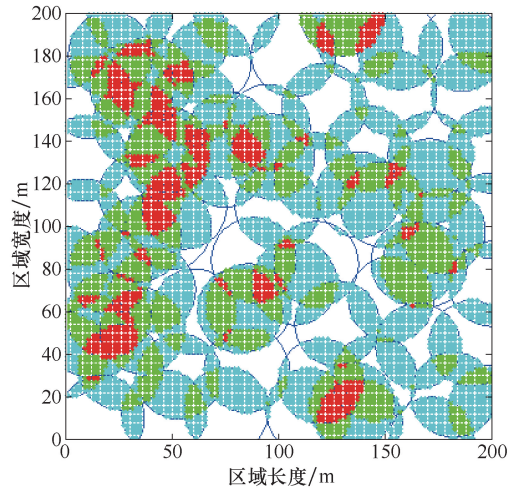


图 7 $R_s = 20$ m 时 PAL 全覆盖和冗余情况
Fig.7 Full coverage and redundancy of PAL when $R_s = 20$ m

$R_s = 30$ m 时的覆盖空洞修复情况.此时,VTR 算法需要新添加 13 个节点即可完成对被监测区域的全覆盖,而 PAL 算法则需要添加 20 个节点,且两者均能达到对被监测区域的完全覆盖。

此外,图 6 和图 9 还对 VTR 和 PAL 算法的覆盖冗余情况进行比较,其中浅蓝色区域表示同时被两个节点覆盖的区域,绿色区域为同时被 3 个节点覆盖区域,红色则为同时被 4 个及以上节点覆盖的区域.表 1 中给出了 VTR 和 PAL 算法覆盖冗余的数值比较,其中 R_s 表示节点的感知半径, N 表示感知区域被覆盖节点的个数, $N > 0$ 表示至少被一个节点感知覆盖, $N > 1$ 表示被多于 1 个节点同时感知的区域,也即冗余覆盖情况.比较 $N > 1$ 的情况,可以发现 VTR 中总的冗余覆盖面积比要略小于 PAL,且 VTR 的冗余覆盖多集中于 $N = 2$ 时,也即

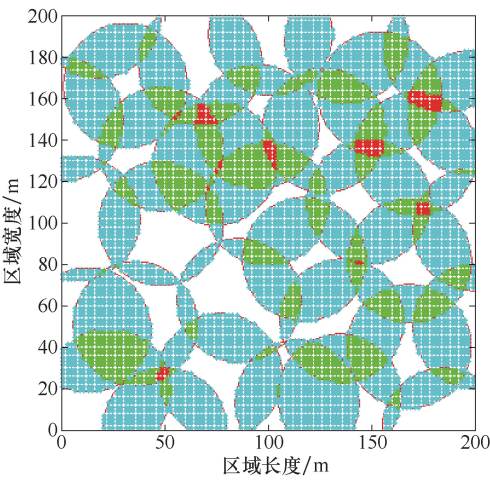


图 8 $R_s=30\text{ m}$ 时 VTR 全覆盖和冗余情况
Fig.8 Full coverage and redundancy
of VTR when $R_s=30\text{ m}$

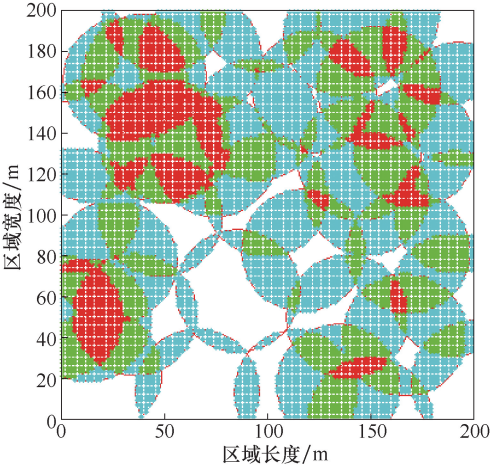


图 9 $R_s=30\text{ m}$ 时 PAL 全覆盖和冗余情况
Fig.9 Full coverage and redundancy
of PAL when $R_s=30\text{ m}$

同时被两个节点感知,而 PAL 中 $N \geq 3$ 时的冗余覆盖较为严重,而过大的覆盖冗余将会导致信息的重复采集和传输,从而加剧网络的能量消耗.这里冗余覆盖比的计算是通过将被多个节点重叠感知的区域面积与整个被监测区域面积进行比较获得.

进一步通过改变网络中初始部署的节点个数,即改变初始节点浓度来观察 VTR 和 PAL 算法在所需添加新节点个数及至少被 3 个节点 ($N \geq 3$) 覆盖的区域大小的变化.由于初始部署节点的随机性,取 20 次实验的平均值作为仿真结果.图 10 描述了 VTR 和 PAL 算法在不同初始部署节点个数下冗余覆盖的变化情况,随着初始部署节点个数的增加,覆盖冗余都呈上升趋势,但 PAL 算法的增加幅度要大于 VTR 算法.图 11 给出了在增加初始部署节点的个数时两种算法所需添加新的传感器节点的个数的变化,两者均呈线性下降的趋势.而结合图 10

和图 11 的仿真结果,可以得到随着初始部署节点个数的增加,本文提出的 VTR 算法在控制覆盖冗余方面可以获得比 PAL 算法更优的性能.

表 1 VTR 与 PAL 覆盖冗余比情况比较 %

Tab.1 Compare of redundant coverage ratio between VTR and PAL

冗余覆盖节点 个数	$R_s=30\text{ m}$		$R_s=20\text{ m}$	
	VTR	PAL	VTR	PAL
$N>0$	100.0	100.0	100.0	98.0
$N>1$	72.7	78.9	71.6	71.9
$N=2$	53.9	37.7	50.8	39.0
$N=3$	17.7	29.0	19.9	25.0
$N>3$	1.1	12.2	0.9	7.9

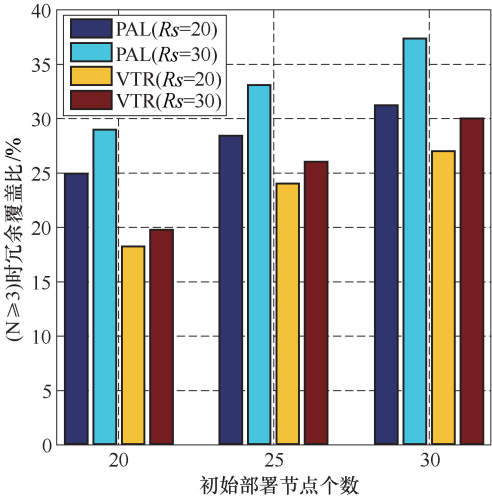


图 10 冗余覆盖与初始节点个数
Fig.10 Redundant coverage ratio
vs number of initial nodes

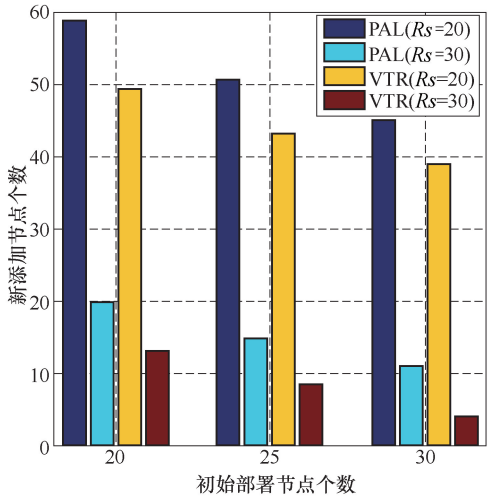


图 11 新添加节点个数与初始节点个数
Fig.11 Number of newly added nodes vs initial nodes

3 结论

针对基于 WSN 的车站环境监测的全覆盖问题,本文作者提出了基于 Voronoi 三角形覆盖比的全覆盖算法,VTR 算法具有以下优点:

1)将传感器节点感知范围与 Voronoi 多边形的覆盖比进行量化描述,并指定了新添加节点的具体部署位置;2)通过动态添加节点的方式进行覆盖漏洞的修复,有效地降低了传感器节点感知区域的重叠。

此外,本文的研究对于客运站监测区域中实际部署传感器节点实现网络的全覆盖具有良好的借鉴意义。在以后的工作中可以进一步研究算法的精度及模型的应用规模。

参考文献(References):

- [1] 何中胜,朱宇光,庄燕滨. 无线传感器网络中覆盖控制技术综述[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(7):1737—1739.
HE Zhongsheng, ZHU Yuguang, ZHUANG Yanbin. Survey on wireless sensor network coverage control technology [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(7): 1737—1739. (in Chinese)
- [2] 孟凡治,王换招,何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议[J]. 电子学报, 2011, 39(4):1—6.
MENG Fanzhi, WANG Huanzhao, HE Hui. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 1—6. (in Chinese)
- [3] 蒋鹏,陈峰.基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络三维覆盖控制方法[J]. 电子与信息学报, 2009,31(12):2807—2812.
JIANG Peng, CHEN Feng. 3D coverage scheme based on hibernation of redundant nodes and based waking-up strategy for wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2807—2812. (in Chinese)
- [4] LIN J W, CHEN Y T. Improving the coverage of randomized scheduling in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(1):4807—4812.
- [5] 张生凤,徐志良,吴晓蓓,等. 无线传感器网络覆盖空洞动态完全修复[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(6): 819—825.
ZHANG Shengfeng, XU Zhiliang, WU Xiaobei, et al. Dynamic full repairing of coverage holes in wireless sensor networks [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(6): 819—825. (in Chinese)
- [6] LI J S, KAO H C, KE J D. Voronoi-based relay placement scheme for wireless sensor networks [J]. IET Communications, 2009, 3(4):530—538.
- [7] CHEN J, KIM C, SONG F. A distributed clustering al-

- gorithm for Voronoi cell-based large scale wireless sensor network [C]//International Conference on Communications & Mobile Computing, 2010:209—213.
- [8] INGLE M R, BAWANE N. An energy efficient deployment of nodes in wireless sensor network using Voronoi diagram [C]//International Conference on Electronics Computer Technology, 2011:307—311.
- [9] 薛亮,陈晰,赵继军,等. 无线传感器网络中基于 Voronoi 覆盖及 Delaunay 三角剖分图的最小刚性拓扑控制算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(10):1570—1584.
XUE Liang, CHEN Xi, ZHAO Jijun, et al. A minimal rigid topology control algorithm based on Voronoi coverage and delaunay triangulation in wireless sensor networks [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1570—1584. (in Chinese)
- [10] 汪小龙,张红艳,方潜生,等. 无线传感网络覆盖中概率 Voronoi 模型及算法研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(5):702—706.
WANG Xiaolong, ZHANG Hongyan, FANG Qiansheng, et al. Research on probabilistic Voronoi model and algorithm for coverage in WSN [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(5): 702—706. (in Chinese)
- [11] 韩志杰,吴志斌,王汝传,等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. 通信学报, 2011, 32(10):174—184.
HAN Zhijie, WU Zhibin, WANG Ruchuan, et al. Novel coverage control algorithm for wireless sensor network [J]. Journal on Communications, 2011, 32(10):174—184. (in Chinese)
- [12] 宋志强,周献中,陈春林. 面向区域覆盖的异构传感器节点部署[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4):119—122.
SONG Zhiqiang, ZHOU Xianzhong, CHEN Chunlin. Deployment of heterogeneous sensor nodes for regional coverage [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(4): 119—122. (in Chinese)
- [13] 徐鹏飞,陈志刚,邓晓衡. 无线传感器网络中的分布式 Voronoi 覆盖控制算法[J]. 通信学报, 2010, 31(8):16—25.
XU Pengfei, CHEN Zhigang, DENG Xiaoheng. Distributed Voronoi coverage algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2010, 31(8): 16—25. (in Chinese)
- [14] 赵春江,吴华瑞,刘强,等. 基于 Voronoi 的无线传感器网络覆盖控制优化策略[J]. 通信学报, 2013, 34(9):115—122.
ZHAO Chunjiang, WU Huarui, LIU Qiang, et al. Optimization strategy on coverage control in wireless sensor network based on Voronoi [J]. Journal on Communication, 2013, 34(9): 115—122. (in Chinese)