Search and Repair Method of Perception Coverge Hole in Wireless Sensor Network*

YANG Mingxia[1], *FANG Kai*[1], *WANG Xiaodong*[2], *PENG feng*[3], *ZHOU Xiaolong*[1]*

(1.*College of Electrical and Information Engineering, QuZhou University, Quzhou* 324000, *China*; 2.*ZheJiang Jiuzhou Water-Control Technology Co., Ltd, Quzhou* 324000, *China*; 3.*QuZhou Wasu Radio and Television Network Company Limited, QuZhou* 324000, *China*)

Abstract: Wireless sensor network is deployed in the target area to sense and monitor relevant information. Due to the influence of unbalanced network energy consumption and environmental interference, it is easy to make some nodes fail early, thus forming a coverage hole in the network. The existence of holes will seriously affect the original function and performance of wireless sensor networks, so a method of searching and repairing the holes covered by wireless sensor networks is proposed to solve the above problems. Firstly, the chord of the intersecting nodes is used to construct and search the covered cavities, and the problem of cavity repair is transformed into the undirected graph to solve the problem of maximum clique, so as to realize the repair of the cavities with the least moving nodes and the lowest overlapping coverage. The experimental results show that the proposed method can effectively search for the covered cavity and complete the repair, and the time complexity and energy efficiency of the algorithm are higher than other methods.

Key words: wireless sensor networks; coverage hole; search and repair; energy consumption

EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.05.021

一种无线传感器网络感知覆盖空洞搜寻与修复方法*

杨明霞[1], 方 凯[1], 汪小东[2], 彭 丰[3], 周小龙[1]*

(1.衢州学院电气与信息工程学院, 衢州 324000; 2.浙江九州治水科技股份有限公司, 衢州 324000;
3.衢州华数广电网络有限公司, 衢州 324000)

摘 要: 无线传感器网络部署在目标区域中用于感知和监测相关信息, 由于网络能耗不均衡、环境干扰等影响, 容易使某些节点提早失效, 从而在网络中形成覆盖空洞。空洞的存在会严重影响无线传感器网络原本的功能和性能, 因此提出一种无线传感器网络覆盖空洞的搜寻与修复方法以解决上述问题。首先利用相交节点的弦来构建和搜寻覆盖空洞, 并将空洞修复问题转换为无向图求解最大团问题, 从而实现以最少移动节点和最低重叠覆盖完成对空洞的修复。实验结果表明提出的方法能够高效地搜寻到覆盖空洞并完成修复, 且算法的时间复杂度和能量效率都高于其他方法。

关键词: 无线传感器网络; 覆盖空洞; 搜寻和修复; 能耗

中图分类号: TN393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2020)05-0750-07

无线传感器网络由大量传感器节点组成, 节点之间通过自组织的方式构成一个传感网络。将传感网络部署在目标区域中能够有效的监测该区域中发生的事件。但由于网络内部能耗不均衡以及节点被物理破坏等因素的影响, 使得传感网中的节点很难保持一致的生存时间, 而某些节点提早死亡(能量耗尽或被破坏)会形成网络覆盖空洞, 这些空洞位置的信息和事件则无法进行监测, 某些覆盖空洞甚至会导致部署的无线传感器网络失去价值。因此研究网络空洞的发现和修复方法具有重要的意义。

现有的空洞修复研究主要利用可移动传感器节点或改变节点感知半径实现修复, 如 Khalifa B 通过计算空洞面积来获取修复空洞所需的移动节点数量, 并充分考虑覆盖冗余度、节点剩余能量和移动距离实现对空洞的修复[1]。Zhang Y 在随机部署的无线网络中利用节点剩余能量预测节点的寿命, 然后选取适当比例的短寿命节点, 最后通过计算覆盖率和相关评估标准来评估空洞的位置[2]。Khalifa B 为降低移动节点的使用数量, 首先通过调节节点的感知范围来修复空洞, 如果仍无法实现对空洞的完全覆盖, 则继续采用少量的

项目来源: 衢州市科技计划项目(2019K17); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF20F03003); 浙江省十三五教改项目(jg20180310)
收稿日期: 2020-03-20 **修改日期**: 2020-05-20

移动节点[3]。Khedr A M 针对异构无线传感器网络提出一种分布式空洞监测和预测方法,并提出一种修复方案,有效利用节点移动性来优化平均覆盖率和平均移动距离[4]。El Khamlichi Y 针对网络随机部署导致的覆盖空洞问题,提出一种基于梯度算法和聚类技术的恢复方法,以检测整个 WSN 中的冗余传感器节点,并将其重新定位以修复已识别的网络空洞[5]。Kang H 提出一种 AOA 的无线传感器网络空洞修复方法,利用移动节点修复目标空洞,通过多次迭代完成对空洞的全面覆盖[6]。Feng X 通过分析传感器网络的最大简单子网拓扑结构确定空洞边界,然后计算空洞边界的多边形,最后激活空洞内待激活的静态节点实现对空洞的修复[7]。Tian Y 提出了一种基于合作概率覆盖模型的新型覆盖漏洞检测算法。利用该方法可以将监测区域的覆盖问题转化为距离关系问题。根据 Voronoi 划分方法可以将高密度和随机分散的传感器网络划分为多个 Voronoi 区域,然后通过分析节点之间的距离关系来判断监视区域的覆盖范围是否出现空洞。然后通过唤醒覆盖空洞内的一些睡眠节点完成修复[8]。Lu X 提出一种具有优先级机制的空洞修复算法,该算法根据异构混合网络的空洞大小确定优先级进行空洞修补,并提高了覆盖率,有利于海洋环境中无线传感器网络(WSN)的空洞修补[9]。Khalifa B 采用模糊推理机制来选择移动节点以修复空洞区域。所有相邻的传感器相互通信以估计覆盖空洞的大小和位置。每个传感器考虑其自身的剩余能量、与空洞的距离及其冗余度来评估其用于修复的可行性,然后选择最合格的传感器来修补网络空洞[10]。

目前在 WSN 覆盖空洞的查找和修复方面的研究已取得了较多优秀的成果,但仍然存在两方面的问题:①空洞查找准确性不足;②空洞修复的代价偏高(能耗、节点数量、修复时间)。因此本文提出一种新型的覆盖空洞搜寻与修复方法,试图以低代价、高修复率来完成对覆盖空洞的修复。

1　相关模型与假设

1.1　相关模型

本文以同构无线传感器网络为研究对象,在监测区域中部署 N 个传感器节点,其中包含若干可移动节点,每个节点能够获取其感知范围内发生的事件(感知范围为以节点为中心,半径为 r 的圆盘)。节点的通讯半径为 R,且 $R \geqslant 2r$[11-13]。网络在部署后已利用 GPS 或定位技术获得节点的位置坐标。如果两节点间的距离小于等于通讯半径 R,则这两个节点被称为互相邻居节点,我们以表示节点 V 的邻居节点集合。本文由感知范围相互重叠的一系列传感器节点实现对目标区域的覆盖。

1.2　相关定义

①空洞边界　由一系列相互连接的传感器节点构成的圈,且圈内区域未被传感器节点的感知范围完全覆盖,如图 1 所示,图中传感器节点 n_1-n_2-n_3-n_4-n_5-n_6 构成了一个圈,但该圈内的区域未被感知区域完全覆盖,所以 n_1-n_2-n_3-n_4-n_5-n_6 即为一个空洞边界。

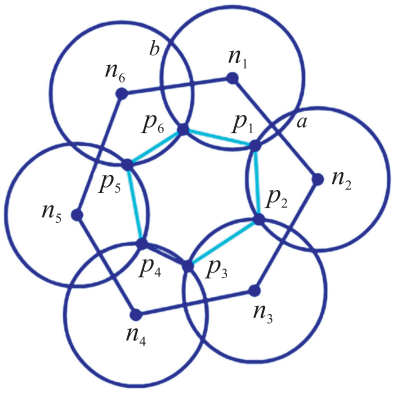


图 1　覆盖空洞示意图

②关键弦　如果传感器节点 v 与其邻居节点集合中的若干个节点存在感知范围重叠的情况,则节点 v 对应的感知范围边界上会存在交点,按顺时针方向搜索交点,然后将该感知范围边界上相邻的交点以直线方式进行连接得到若干条弦,同时如果弦的两个端点属于两个不同的传感器节点,则该段弦被定义为关键弦。如图 1 中节点 n_1 与邻居节点 n_2 和 n_6 之间共存在 4 个交点,那么该节点就存在 3 条弦,而只有弦的两个端点 p_1 和 p_6 分别属于两个不同的邻居节点 n_2 和 n_6,因此该弦被称为关键弦,而弦的端点 a 和 p_1 都由同一个节点 n_2 和 n_1 相交产生,因此该弦不是关键弦,同理弦也非关键弦。

③空洞弦　如果某个节点的关键弦的任何部位都不在其邻居节点的感知范围内,则该弦被称为空洞弦,如图 1 中表示一条空洞弦。

④空洞顶点　空洞弦对应的两个端点都称为空洞顶点,如图 1 中交点 n_1、n_2、n_3、n_4、n_5、n_6 都为该空洞的顶点。

⑤邻居空洞顶点　若一系列空洞顶点属于同一个空洞,且顶点之间的距离小于等于 $2\times r$,则这两个顶点就称为邻居空洞顶点,如图 1 中 p_6 与 p_1 为相互邻居节点,p_6 和 p_2 也为相互邻居顶点。

⑥空洞修复位置　该位置处于覆盖空洞内,如果将一个节点放置在该位置上,则能够完成部分空洞的修复。

2 空洞搜寻方法

本文根据 1.2 小节的相关定义来搜寻传感网络中存在的空洞,查找空洞分为两个步骤,如下所示:

步骤 1 搜索传感器网络 N 中所有的关键弦,假设为节点 v 的邻居节点集合,从中查找所有与节点 v 相交的节点 u∈,由于 R≥2r,因此节点 v 只可能和其邻居节点相交。按顺时针方向查找与节点 v 感知边界的交点,并查找到所有关键弦。然后从这些关键弦中查找出空洞弦,具体算法如表 1 所示。

表 1 空洞弦查找方法

空洞弦查找算法
Related symbols:
S_n: Node set in sensor network N;
E_{hc}: Set of hole chords;
S_v^{ngb}: Neighbor set of node v;
S_v^{cc}: Key chords of node v;
S_v^{its}: set of sensing disk intersection points of node v with its neighbor node u;
(j,k): The two intersections j and k that make up the chords;
Input:
S_n and S_v^{ngb}
Algorithm:
1: $E_{hc} \leftarrow \varnothing$
2: for v in S_n
3: for u in S_v^{ngb}
4: $S_v^{its} \leftarrow$ sensing disk intersection of node u and node v
5: endfor
6: S_v^{its} Sort clockwise
7: for j in S_v^{its}
8: $k \leftarrow$ next intersection point of j
9: if(intersection j and intersection k belong to different neighbor nodes)
10: $S_v^{cc} \leftarrow S_v^{cc} \cup \overline{jk}$
11: endif
12: endfor
13: for c_v in S_v^{cc}
14: for u in S_v^{ngb}
15: if(c_v is not within the sensing range of any neighbor nodes)
16: $E_{hc} \leftarrow E_{hc} \cup c_v$
17: endif
18: endfor
19: endfor
20: endfor

步骤 2 从步骤一中筛选得到的空洞弦,在这个步骤中我们利用空洞弦集合 E_{hc} 来确定真正需要修复的空洞。需要说明的是在空洞弦集合 E_{hc} 中并非所有的弦都是空洞的边界,也存在某些空洞弦是无效边界,如图 2 所示。

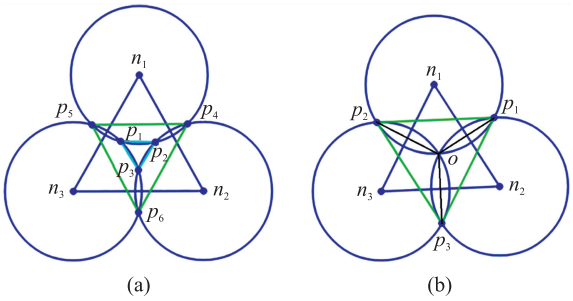


图 2 空洞弦与覆盖空洞查找

图 2(a)中存在一个真实的覆盖空洞,该空洞的边界由弦组成,这种空洞是真实存在的,是需要修复的。图 2(b)三个节点之间不存在空洞,但根据步骤 1,仍然能够搜索到三条空洞弦,分别是、和,但很明显这三条弦无法组合成一个空洞。因此需要根据空洞弦确定网络中真实存在的空洞。图 2(a)和图 2(b)分别代表真实存在的空洞和无空洞两种情况,但我们如果将空洞弦所有的顶点进行连接会发现差异。如图 2(a)中将所有弦的顶点两两连接得两个三角形 $\Delta p_1p_2p_3$ 和 $\Delta p_4p_5p_6$,三角形 $\Delta p_1p_2p_3$ 位于节点 n_1,n_2 和 n_3 组成的区域 $\Delta n_1n_2n_3$ 内部,那么 $\Delta p_1p_2p_3$ 即为一个真实的覆盖空洞。三角形 $\Delta p_4p_5p_6$ 不包含在 $\Delta n_1n_2n_3$ 中,因此 $\Delta p_4p_5p_6$ 不是一个真实的覆盖空洞。图 2(b)中将空洞弦的端点两两相连,得到三角形 $\Delta p_1p_2p_3$,同样将三个节点 n_1,n_2 和 n_3 连接得到的三角形 $\Delta n_1n_2n_3$,而 $\Delta p_1p_2p_3$ 并不在三角形 $\Delta n_1n_2n_3$ 内,两个图形是相交的情况,因此 $\Delta p_1p_2p_3$ 不是真实的覆盖空洞。综上所述,可以根据弦顶点构成的图形是否在相应节点构成的图形内部来确定覆盖空洞是否存在。覆盖空洞确定的具体方法如表 2 所示,在该步骤弦顶点之间的连接需要知道弦顶点的实际坐标,而弦的顶点实际是由两个相邻节点感知边界相交得到,因此可根据节点的坐标计算弦顶点的坐标。假设两个相邻节点的坐标分别为 (x_i,y_i) 和 (x_j,y_j),那么对应弦顶点的坐标 (x_1,y_1) 和 (x_2,y_3) 如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{x_j+x_i}{2} + \dfrac{y_j-y_i}{2d} \times \sqrt{4r^2-d^2} \\ y_1 = \dfrac{y_j+y_i}{2} + \dfrac{x_j-x_i}{2d} \times \sqrt{4r^2-d^2} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} x_2 = \dfrac{x_j+x_i}{2} + \dfrac{y_j-y_i}{2d} \times \sqrt{4r^2-d^2} \\ y_2 = \dfrac{y_j+y_i}{2} + \dfrac{x_j-x_i}{2d} \times \sqrt{4r^2-d^2} \end{cases} \tag{2}$$

表 2　覆盖空洞搜索方法

覆盖空洞所搜算法
Related symbols:
S_g:Set of graphs obtained by chords vertex connection;
E_{hc}:Set of hole chords;
S_{hole}:Set of Network coverage hole;
Input:
E_{hc}
Algorithm:
1:$S_{hole}\leftarrow\varnothing$
2:$S_g\leftarrow\varnothing$
3:for c in S_g
4:　$b\leftarrow$Node graph corresponding to graph c
5:　if(graphic b contains graphic c)
6:　　$S_{hole}\leftarrow S_{hole}\cup b$
7:　endif
8:endfor

基于上述空洞搜寻方法,搜寻到了网络中的覆盖空洞,并确定了空洞的边界,如图 3 所示,图中存在两个封闭的多边形 a 和 b,其中图形 a 包含在 b 内,且不相交,可以确定图形 a 为网络真实空洞,而图形 b 不是网络空洞。组成空洞的传感器节点为 4、2、5、7、6,空洞的边界由点集$\{h_5,h_4,h_3,h_2,h_1\}$构成。

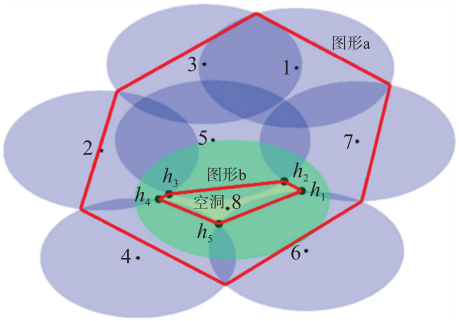


图 3　空洞搜寻结果示意图

3　空洞修复方法

根据论文 1~2 章节,可以确定传感器网络中的覆盖空洞,在本章节中计划利用空洞附近的可移动节点实现对网络空洞的修复。如果使用少量的可移动节点即可完成空洞修复,那么对提高覆盖率和降低修复代价是非常有利的。本文通过将空洞修复问题转换为求解无向图最大团问题,从而以低代价完成网络空洞的修复。在介绍空洞修复方法前,我们先给出一个基础的理论知识。假设存在两个点分别为 p 和 q。根据这两个点,可以确定两个半径为 r 的圆,使得这两个点也位于圆上,如图 3(a)中存在两个点 p_1 和 p_2,根据这两个点,可以确定两个以 n_1 和 n_a 为圆心、半径为 r 的圆,点 p_1 和 p_2 都位于这两个圆上。那么圆 n_1 和 n_a 的坐标可通过式(3)、式(4)计算得到。

$$\begin{cases} x_1=x_m+\dfrac{\sqrt{r^2-(d/2)^2}\times(y_p-y_q)}{d} \\ y_1=y_m+\dfrac{\sqrt{r^2-(d/2)^2}\times(x_p-x_q)}{d} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_a=x_m-\dfrac{\sqrt{r^2-(d/2)^2}\times(y_p-y_q)}{d} \\ y_a=y_m-\dfrac{\sqrt{r^2-(d/2)^2}\times(x_p-x_q)}{d} \end{cases} \tag{4}$$

式(3)、式(4)中(x_p,y_p)表示点 p 的坐标,(x_q,y_q)表示点 q 的坐标,这两个坐标值可根据式(1)、式(2)计算得到;$x_m=(x_p+x_q)/2$,$y_m=(y_p+y_q)/2$。

我们根据第 2 章节获得了覆盖空洞集合 S_{hole},即已经确定了空洞和相应的空洞弦。我们根据邻居空洞顶点的定义(见 1.2 小节)构建无向图 $G(V,E)$,其中 V 表示空洞顶点,如图 4(a)中 p_1-p_7;E 表示空洞顶点之间的边,如果两空洞顶点之间的距离小于等于 2 倍感知半径 r,则这两个顶点之间连接一条边,否则这两个顶点之间不存在边。构建了覆盖空洞顶点的无向图 G 后,利用文献[14]提出的方法求得无向图中所有的子团。每个子团即代表空洞中的一个修复位置(其定义见 1.2 小节)。为使用最少可移动节点完成对空洞的修复,本文每次仅选择最大子团对应的位置修复,如图 4(a)中网络空洞构建的无向图 G 的最大子团仅包含两个点,分别是 p_1 和 p_2,那么基于式(3)、式(4)和点 p_1 和 p_2 确定待修复位置,这个修复然后将可移动节点 n_a 移动到该修复位置上。图 4(b)中网络空洞构建的无向图 G 的最大子团包含 4 个顶点,分别是 p_8、p_7、p_6、p_3,那么根据这四个点确定一个修复位置,并将可移动节点 n_a 移动到修复位置上,完成对空洞的部分修复。到此就完成了空洞修复的一次迭代,然后接着迭代修复方法,直到网络覆盖面积不再增加为止,空洞修复算法结束。

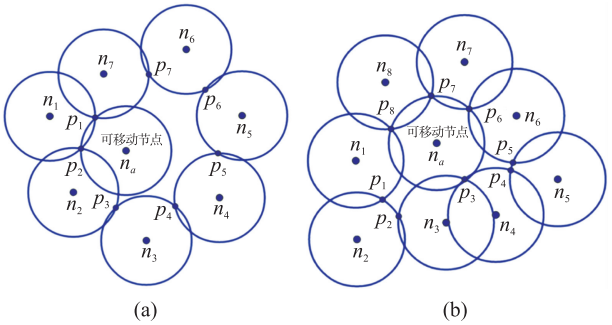
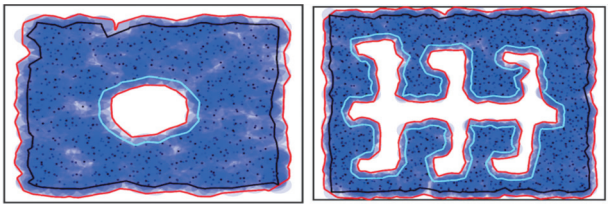


图 4　空洞覆盖图

4 实验分析

实验采用 MATLAB R2018b 平台进行仿真,传感器节点的最大感知半径为 20 m,最大通讯半径为 40 m,部署区域为一个 500 m×400 m 的矩形区域。为验证本文提出的空洞搜寻与修复方法的性能,实验构建了两种形状的网络空洞,如图 5 所示,实验中部署不同数量的静态节点和可移动节点。实验验证本文提出的方法和文献[15-17]提出的空洞发现与修复方法进行对比分析。



(a) (b)

图 5 网络空洞形状

4.1 网络空洞搜寻时间分析

在监测区域中部署两种形状的传感器网络(如图 5 所示),验证不同节点密度情况下空洞搜寻方法的相关性能,实验结果分别如图 6 和图 7 所示,图 6 为在部署不同数量的传感器节点情况下,搜寻网络空洞所消耗的时间,横坐标表示部署节点的数量,纵坐标表示空洞平均搜寻时间。

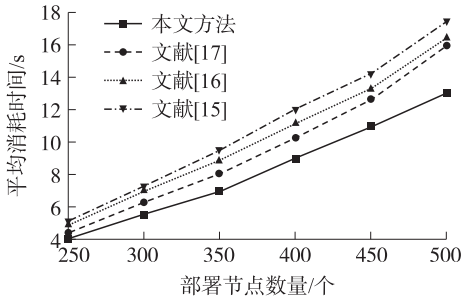


图 6 空洞搜寻平均时间

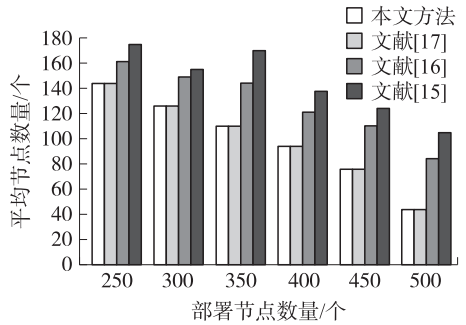


图 7 组成空洞的节点数量

实验结果表明随着网络中部署节点数量的增加,本文提出的方法和其他三种方法的空洞搜寻时间都会近似呈线性增加。这种现象主要是由于网络节点数量增加,网络拓扑结构变得更加复杂,而四种空洞搜寻方法都需为针对网络中每个节点进行计算,因此导致空洞搜寻时间会增加。同时本文方法搜寻空洞的时间低于其他三种方法,因为本文提出的方法是利用节点覆盖范围的重叠交点的弦和简单的集合方法判断定位空洞,在空洞的构建和确定上计算复杂度较低,因此其搜寻空洞的时间最短。文献[16]采用分布式的空洞定位方法,该过程需要节点间密切且大量的信号交互,该过程需要消耗大量的时间。文献[17]采用网络拓扑最大子团和聚类策略来确定网络空洞,而最大子团的计算和聚类策略相对耗时,因此消耗的时间高于本文提出的方法。

实验结果表明随着网络中部署节点数量的增加,4 种方法构成网络空洞的平均节点数量会降低,因为监测区域确定的情况下,部署的节点数量越多,空洞也会逐渐变小,则空洞边缘的节点数量降低。本文提出的方法低于文献[15-16]所提出的方法且与文献[17]的空洞搜寻方法确定的空洞边缘节点数量基本相同。表明本文提出的方法和文献[17]提出的方法能够更准确地确定覆盖空洞边界。

4.2 空洞修复性能分析

本文算法包括空洞定位和空洞修复两个部分,通过派遣可移动节点到覆盖空洞的某些位置来实现对空洞的感知覆盖。实验中通过部署一定数量的传感器节点,形成网络覆盖,但仍然存在一些空洞,其中可移动节点的比例占 40%,实验结果如图 8 所示。

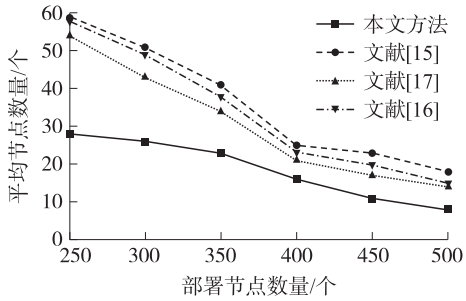


图 8 修复空洞所需要移动节点数量

图 8 结果表明随着部署区域中传感器节点的增加,四种修复方法修复网络空洞所需要的可移动节点数量逐渐降低,这是因为节点数量增加,空洞的规模会降低,需要更少的可移动节点即可完成空洞的修复。同时本文提出的方法需要的可移动节点数量远低于文献[15-17]所提出的方法,因为本文方法通过空洞定点邻居集合构建无向图 G,并根据该无向图 G 的最大子团来确定修复位置,使得每个可移动节点能够在有限覆盖范围的情况下合理安排修复位置且本文提出的方法能够精准地确定空洞边界

(见图 7),因此它需要的可移动节点数量最少。文献[17]在修复覆盖空洞时,虽然一定程度考虑了空洞修复所需的节点数量,但仅从空洞面积和每个节点覆盖范围上考虑,未充分考虑可移动节点的修复位置是否最合理。文献[15-16]的空洞边界确定准确率精度不高,导致修复空洞需要的可移动节点数量多于本文方法和文献[17]提出的空洞修复方法。

利用不同的空洞边界搜寻和修复方法得到的修复效果是不同的,本次实验验证四种方法在修复网络覆盖空洞时的性能,实验结果如图 9 所示。表示派遣可移动节点到覆盖空洞后,对网络的修复率。

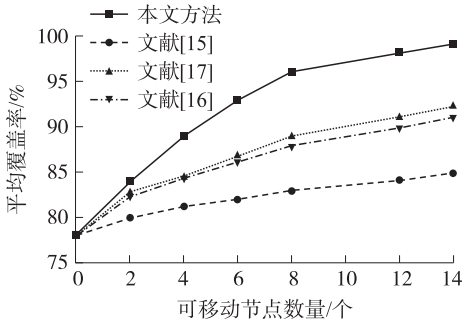


图 9　可移动节点空洞覆盖率

实验结果表明在空洞规模确定的情况下,随着派遣的可移动节点数量增加,四种方法对空洞的修复率都会提升,其中本文提出的修复方法在派遣相同数量的可移动节点时,空洞覆盖率最高,其次是文献[17]提出的空洞修复方法。当派遣的可移动节点数量为 14 个时,本文提出的修复方法使得空洞的覆盖率接近 100%。

四种方法的网络空洞平均修复时间如图 10 所示,其中修复时间最长的是文献[15]提出的方法,因为该方法能准确地确定空洞边界,导致空洞的规模比其他方法更大,需要派遣的可移动节点数量更多,因此其运算量最大,导致平均修复时间最长。本文提出的方法平均修复时间最短,因为利用空洞的邻居顶点无向图能够快速求取修复位置,这段时间远低于文献[16-17]提出的修复位置确定方法,因此修复空洞消耗的时间最短。

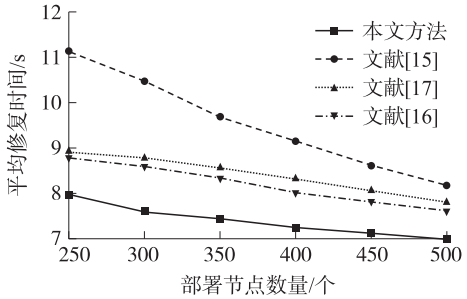


图 10　空洞平均修复时间

5　总结

本文针对目前无线传感器网络覆盖空洞存在空洞边界搜寻不准确,空洞修复代价偏高问题,提出一种低复杂度和高覆盖率的空洞搜寻与修复方案,该方案通过节点感知范围相交确定关键弦,然后从关键弦中确定空洞弦,接着根据节点连接得到的图形和覆盖区域之间的关系确定空洞是否真实存在,最后将空洞弦邻居顶点转换为无向图的最大团求解问题,计算最佳修复位置,并派遣可移动节点完成对网络空洞的覆盖。实验验证了本文方法具有较好的性能。后续工作希望进一步考虑可移动节点的能耗问题,将移动能耗纳入到空洞修复问题中。

参考文献:

[1] Khalifa B,Al Aghbari Z,Khedr A M,et al. Coverage Hole Repair in WSNs Using Cascaded Neighbor Intervention[J]. IEEE Sensors Journal,2017,17(21):7209-7216.

[2] Zhang Y,Zhang X,Fu W,et al. HDRE:Coverage Hole Detection with Residual Energy in Wireless Sensor Networks[J]. journal of Communications and Networks,2014,16(5):493-501.

[3] Khalifa B,Khedr A M,Al Aghbari Z. A Coverage Maintenance Algorithm for Mobile WSNs with Adjustable Sensing Range[J]. IEEE Sensors Journal,2019,10(11):1582-1591.

[4] Khedr A M,Osamy W,Salim A. Distributed Coverage Hole Detection and Recovery Scheme for Heterogeneous Wireless Sensor Networks[J]. Computer Communications,2018,124(22):61-75.

[5] El Khamlichi Y,Mesmoudi Y,Tahiri A,et al. A Recovery Algorithm to Detect and Repair Coverage Holes in Wireless Sensor Network Systems[J]. Journal of Communications,2018,13(2):258-264.

[6] Kang H,Dong Y,Yan F,et al. A Homology and AOA Based Hole Healing Strategy in Wireless Sensor Networks[C]//2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE,2017:336-341.

[7] Feng X,Zhang X,Zhang J,et al. A Coverage Hole Detection and Repair Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Cluster Computing,2019,22(5):12473-12480.

[8] Tian Y,Chang X,Ou Y,et al. Coverage Hole Detection Algorithm Based on Cooperative Probability Coverage in Wireless Sensor Networks[C]//2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems(CCIS). IEEE,2018:835-840.

[9] Lu X,Wu Q. Coverage Hole Patching of Hybrid Wireless Sensor Network in Marine Environment[J]. Journal of Coastal Research,2019,94(sp1):296-300.

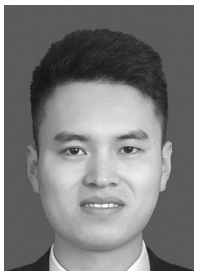
[10] Khalifa B,Khedr A,Al Aghbari Z,et al. Fuzzy Logic Approach to Repair Coverage Holes in Internet of Things Monitoring Applications[J]. IET Wireless Sensor Systems,2019,9(4):227-235.

[11] 陶建林,苗春雨,戴国勇. 一种低能耗的无线传感器网络强栅

栏重建方法研究[J]. 传感技术学报,2019,32(2):141-147.
[12] 戴光麟,杨志凯,周贤年,等. WSN 中一种流水式栅栏调度算法的研究[J]. 传感技术学报,2019,32(4):122-126.
[13] 赵小敏,方丁,毛科技. 一种 WSN 栅栏间隙修复优化方法[J]. 传感技术学报,2018,31(10):110-116.
[14] Tomita E,Tanaka A,Takahashi H. The Worst-Case Time Complexity for Generating All Maximal Cliques and Computational Experiments [J]. Theoretical computer science,2006,363(1):28-42.
[15] An W,Qu N,Shao F M,et al. Coverage Hole Problem under Sensing Topology in Flat Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing,2016,16(5):578-589.
[16] So-In C,Nguyen T G,Nguyen N G. An Efficient Coverage Hole-Healing Algorithm for Area-Coverage Improvements in Mobile Sensor Networks[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications,2019,12(3):541-552.
[17] Feng X,Zhang X,Zhang J,et al. A Coverage Hole Detection and Repair Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Cluster Computing,2019,22(5):12473-12480.

杨明霞(1979—),女,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、深度学习等;

周小龙(1986—),男,副教授、硕士生导师,主要研究方向为计算机视觉、无线传感网络、模式识别。



方　凯(1992—),男,硕士、助教,主要研究方向为无线传感器网络、深度学习等;