

一种无线传感器网络的概率覆盖增强算法*

范兴刚, 杨静静, 王恒

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

通讯作者: 范兴刚, E-mail: xgf@zjut.edu.cn



摘要: 覆盖与连通问题是无线传感器网络的基本问题, 研究考虑连通性的概率覆盖增强算法, 构建覆盖空洞的修补半径, 提出了移动距离和修补半径的关系模型. 通过这个关系模型, 移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置; 根据这个移动距离和空洞面积, 移动节点进一步创建空洞的优先级, 选择优先级最高的空洞进行修补, 节能而高效地实现覆盖增强. 仿真结果表明, 所提出的算法既能得到较高的覆盖率, 又能保证整个网络的连通性.

关键词: 分布式的概率空洞修补算法; 覆盖空洞; 连通空洞; 联合感知概率; 修补半径; 移动距离; 优先级
中图法分类号: TP393

中文引用格式: 范兴刚, 杨静静, 王恒. 一种无线传感器网络的概率覆盖增强算法. 软件学报, 2016, 27(2): 418-431. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4837.htm>

英文引用格式: Fan XG, Yang JJ, Wang H. Algorithm for enhancing probabilistic coverage in wireless sensor network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(2): 418-431 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4837.htm>

Algorithm for Enhancing Probabilistic Coverage in Wireless Sensor Network

FAN Xing-Gang, YANG Jing-Jing, WANG Heng

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Coverage and connectivity are basic problems in WSN. This paper studies distributed coverage and connection hole repairing scheme (DHCRS) based on the probabilistic sensing model in hybrid WSN. This method detects probabilistic coverage holes and builds the model of their repairing radius. It also creates relationship model between the repairing radius and the repairing displacement of mobile sensor. This displacement not only determines the priority of the hole with its area, but also confirms the destination of mobile sensor in repairing circle of coverage hole. Once mobile node moved to this location, coverage hole simultaneously satisfy minimum detection probability and connectivity. Each mobile sensor repairs the hole of the highest priority. Simulation results show the proposed algorithm effectively obtains better probabilistic coverage rate and maintains the network connectivity at the same time.

Key words: DHCRS; coverage hole; connection hole; joint detection probability; repairing radius; displacement; priority

无线传感器网络里, 节点随机部署后, 存在覆盖空洞, 节点本身能量是有限的, 事件频发区域的节点能量会很快耗尽, 产生覆盖空洞, 减弱网络对事件的监控性能. 同时因外部攻击而损坏的节点也会产生新的空洞. 这些都会导致传感器网络的性能下降. 如何修补覆盖空洞, 增强覆盖是近年来的研究热点. 机器人技术的发展, 特别是刘永等人开发的飞行机器人可以飞到指定的位置, 执行相应的检测任务, 这使得具有移动能力的节点对网络重新部署成为修补空洞的重要方法之一^[1-5], 节点或者基于节点之间的虚拟力, 或者基于几何图形(Voronoi 图和 Delaunay 图)来移动, 或者基于空洞周围的边界节点辅助移动. 这些都是在理想的 0-1 感知模型下, 在概率感知模型下, 如何准确地发现覆盖空洞并及时修补仍然是一个需要进一步研究的问题. 现有概率模型下的研究也只是从连通集的角度提高目标覆盖, 提高事件感知率^[6,7], 没有结合覆盖空洞本身的特点研究空洞修补. 在前人研究

* 基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD10B01)

Foundation item: National Key Technology Research and Development Program of China (2012BAD10B01)

收稿时间: 2014-11-25; 修改时间: 2015-02-09; 采用时间: 2015-03-23

的基础上,本文研究考虑连通性的概率覆盖增强算法,提出分布式空洞修补算法(distributing coverage and connection holes repairing scheme,简称 DHCRS),构建覆盖空洞修补半径模型,提出移动距离和修补半径的关系模型,通过这个关系模型,移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置;根据这个移动距离和空洞面积,进一步创建空洞的优先级模型,节能、高效地实现覆盖增强.与已有文献相比,本文的主要贡献在于:

- (1) 根据空洞的初始覆盖率创建覆盖空洞的修补半径模型,构造空洞的修补圆;
- (2) 提出了移动距离和修补半径的关系模型,通过这个关系模型,移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置;
- (3) 根据这个移动距离和空洞面积,移动节点创建空洞的优先级模型,选择优先级最高的空洞节能够高效地实现覆盖增强.

本文第 1 节介绍相关研究工作.第 2 节介绍覆盖空洞网络模型.第 3 节详细描述空洞修补算法.第 4 节通过仿真实验对所提出的算法进行性能评估.第 5 节总结全文并介绍下一步工作.

1 相关研究

覆盖问题是无线传感器网络的基本问题.传感器节点通常随机部署在感兴趣区域,这样的部署方式很容易带来覆盖空洞.覆盖空洞使得网络中遗留大量未被利用的资源,也导致了监测事件的丢失.同时,传感器网络需要保证整个网络是一个完全可连通的网络,即所有传感器的检测数据都能被有效传输到其他节点上.

在基于覆盖漏洞的修补问题上,Mustapha 等人基于 Voronoi 图检测覆盖空洞提出了分布式的本地 DHD 算法发现覆盖空洞,使传感器节点向着最远的顶点覆盖空洞移动,从而减小覆盖空洞^[1].赵小敏等人基于 Delaunay 三角形的覆盖增强方法,提出了边界补强机制及钝角三角形 TP 点优化策略,从而有效提高了覆盖范围^[3].Dinesh 研究任意线段的覆盖空洞,研究了最短的 k 覆盖线段和最长 k 未覆盖线段问题^[4].王力立等人采用直径大于某个阈值的覆盖空洞数量衡量网络覆盖质量^[5].苏瀚等人提出了不依赖位置信息的空洞修补算法 CHH,用于修补大面积的覆盖空洞^[8].王良民等人利用覆盖空洞边缘节点提供的辅助信息,指导移动节点移动到最佳位置,从而保证最低覆盖率大于 90%^[9].在概率覆盖问题上,Vibhav 等人采用概率感知模型研究数据采集,网络生命周期^[10].陆汉城等人对概率感知模型下的事件检测概率进行了分析研究^[11].Tan 等人指出,概率感知模型比 0-1 模型能够更有效地改善网络覆盖性能,0-1 模型仅适用于信噪比较高的情形,而概率感知模型借助于数据融合,能够适用于信噪比较低的情形^[12].

在研究节点覆盖问题时,还需要同时考虑网络的连通性.孟凡治等人采用联合感知模型研究了节点通信范围多级可调的无线传感器网络的覆盖质量和连通性^[13].温俊等人研究了异构无线传感器网络的最小转发连通覆盖问题^[14].He 等人分析了同步和异步睡眠模式下传感器网络的覆盖率和连通率^[6].Erdelj 等人研究了移动节点在覆盖兴趣点的过程中,如何保持和基站之间的连通性^[7].Zorbas 等人在概率感知模型下,通过构建网络的主连通集(CDS),选择目标的覆盖集的方法增加网络的生存期^[15].卢云宏等人对概率感知模型下的栅栏覆盖进行研究,利用相邻节点的数据融合技术,提出了一种可以监测移动目标小于临界速度的优化部署策略^[16].

针对概率覆盖空洞的研究,主要是从移动节点的角度考虑的,很少结合覆盖空洞面积,初始覆盖率研究空洞修补.另一方面,网络的连通性和距离覆盖空洞最近的节点的关系还很少有人研究.针对覆盖空洞,可以采用粒子群算法调度移动节点,进行空洞的修补,从而提高覆盖率^[17].但是这种算法需要知道整个网络的拓扑信息,通信量很大,是一种集中式算法,不适合于大型网络.在前面研究的基础上,针对粒子群算法的缺陷,我们利用空洞本身的特性,提出分布式覆盖和连通空洞修补算法 DHCRS,移动节点只需根据周围的空洞信息,而不需要整个网络信息就可以进行空洞的修补.

2 系统模型与假设

假设监控区域 A 中随机部署 N_s 个静态节点.各节点可以感知自身在网络中的位置.节点采用概率感知模型,要求监控区域内发生的事件最小感知率为 P_{\min} .同时存在 N_m 个具有移动能力的节点,传感器网络不会由于

这些填补节点的离开而造成新的覆盖空洞.静态节点之间是连通的,修补策略不需要考虑这些静态节点的连通问题.这是假设移动节点数目足够用于空洞修补.

2.1 节点感知模型

我们采用更符合实际的对数距离路径损耗模型作为传感信号衰减模型^[6].概率衰减模型的特点是,当传感器节点距离事件中心的距离越近时,感知概率越大,距离越远,传感器对这个事件感知概率越小.

定义 1(节点的概率感知模型). 在概率衰减模型中,距离传感器节点 d 处的事件感知概率(即感知概率)如公式(2)所示.

$$PL_d = P_{tx} - P_{rxd} = PL_0 + 10 \times \alpha \times \log(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

$$P_d = P_{s_j}^d = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2)$$

公式(1)为节点损耗模型,公式(2)为距离节点 d 的感知概率. P_{tx} 是发送节点的功率, P_{rxd} 是在距离 d 处的接收功率, PL_0 是在参考距离 d_0 处的路径损耗. α 是传输损耗指数, X_σ 是均值为 0 的高斯随机数, γ 是能够接收到的最小功率.

2.2 事件感知概率

多个传感器节点同时工作的情况下,事件被有效感知的概率是多个无线传感器节点协同工作的结果.即该事件的感知概率是这些节点的联合感知率.

定义 2(事件感知概率). 覆盖事件在多个节点的综合作用下,事件感知概率定义为公式(3),其中, E 表示事件, S_n 表示可以感知事件 E 的所有节点,而 $P_n(S_n, E)$ 则表示事件 E 的 n 个节点的联合检测率,即事件的感知概率.

$$P_n(S_n, E) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(S_i, E)) \quad (3)$$

$$C = \frac{S(P_n(S_n, E) \geq P_{\min})}{A} \quad (4)$$

定义 3(覆盖率). 整个网络的概率覆盖率如公式(4)所示, $S(P_n(S_n, E) \geq P_{\min})$ 表示这样一个区域,在这个区域内发生的事件联合感知率大于等于最小感知率. A 表示整个监控区域面积.在一定范围内,覆盖率越大越好.部署传感器网络的主要目的是对感兴趣区域发生的事件进行有效监控,这样的覆盖率定义能够有效反映网络的监控性能.

在考察连通性时,保持连通性需要的节点数量越多,网络的连通性就越差;保持连通性需要的节点数量越少,网络的连通性就越好.因此,本文采用连通性需要的节点数来表示网络的连通性.

在随机分布的网络里,如果某个区域发生的事件联合感知率小于最小感知概率,这个区域就是覆盖空洞.如何找到这些覆盖空洞,并用移动节点高效的分布式修补这些覆盖空洞,提高整个区域的覆盖率并保持整个网络的连通性,这是本论文研究的主要问题.

3 分布式概率空洞修补(DHCRS)

3.1 算法的基本思想

在概率感知模型下,小于最小感知率的区域都是覆盖空洞.DHCRS 算法首先采用网格法找到这些空洞,根据这些空洞初始感知率构建修补半径,紧接着重点研究可移动节点的移动距离,根据周围最近静态节点对空洞的影响,建立修补半径和移动距离的关系模型,通过这个关系模型,移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置;每个移动节点再根据自己的移动距离和空洞面积确定空洞的优先级,DHCRS 算法为每个移动节点选择最高的优先级空洞进行修补,节能、高效地实现覆盖增强.该算法的核心是如何构建修补半径和移动距离的关系模型.

3.2 算法的基本步骤

DHCRS 算法的基本步骤如下(相关参数见表 1):

Input: 监控区域面积 A , 静态节点集合 N_s , 动态节点集合 N_m , 最小感知率 P_{\min} , 网格化区域集合 a .

Output: 空洞数量 $H1$, 最大空洞面积 $holemax$, 总距离 T_{mv} , 平均距离 mda , 覆盖率 Cra .

Step 1: 计算覆盖率 Cra , 空洞数量 $H1$, 最大空洞面积 $holemax$

Step 2: While $holemax > 0.1A_{\min}$

Step 2.1: 针对每个空洞, 根据公式(5)计算空洞质心. 根据公式(3)计算空洞的初始感知概率 $P_i^{initial}$, 根据公式(6)~公式(10)计算空洞的修补半径 d_i .

Step 2.2: 计算空洞与最近静态节点的距离 d_{\min}^i

Step 2.3: If $r_c < d_{\min}^i - d_i$

Step 2.3.1: 计算其周围连通空洞 $H2_i$

Step 2.3.2: $H2=H2+H2_i$

Step 2.4: end

Step 2.5: For $s=1:N_m$

Step 2.5.1: 据公式(13)计算修补空洞的移动距离 d_{si}^s

Step 2.5.2: 计算修补连通空洞的移动距离 d_{sij}^c

Step 2.6: end

Step 2.7: 移动节点选择优先级最高的空洞进行修补.

Step 2.8: 选择的移动节点集合为 mv , 原来的静态节点与移动后的节点作为新的静态节点 $N=N+mv$.

Step 2.9: 总移动距离 $T_{mv}=T_{mv}+f_{val}$

Step 2.10: 剩余的动态节点为 $N_m=N_m-mv$

Step 2.11: 已经移动的节点集合 $M_m=M_m+mv$

Step 2.12: 进一步采用前面的网格法计算空洞情况. 回到 Step 2

Step 3: end

Step 4: 平均移动距离为 $mda=T_{mv}/M_m$

Step 5: 输出空洞数量 $holenum$, 最大空洞面积 $holemax$, 平均距离 mda , 覆盖率 Cra

Step 6: 算法结束

Table 1 Parameter representation

表 1 参数表示

参数	参数意义	参数	参数意义
P_i^d	第 i 个空洞需要移动修补节点提供的覆盖率	A_{\min}	一个区域, $P_i(S_i, E) \geq P_{\min}$, 即单个节点的概率覆盖面积
$H1$	概率覆盖空洞	$H2$	连通空洞
P_{\min}	最小感知概率	r_s	$P_{\min} = 0.95$ 时 A_{\min} 的半径
$P_i^{initial}$	第 i 个空洞的初始覆盖率	d_{\min}^i	第 i 个空洞与静态节点的最近距离
N_s	静态节点集合	A_i	覆盖空洞 i 的面积
N_m	可移动节点集合	λ_{si}^s	第 s 个移动节点对第 i 个空洞的优先级
d_{si}^e	第 s 个移动节点对第 i 个空洞的欧式距离	λ_{sij}^c	第 s 个移动节点对第 i 个空洞周围的连通空洞优先级
d_i	第 i 个覆盖空洞修补半径	d_{si}^s	第 s 个移动节点对第 i 个空洞修补时的移动距离
$holemax$	最大空洞面积	d_{sij}^c	第 s 个移动节点对第 i 个空洞周围的连通空洞的移动距离
mda	平均距离	T_{mv}	总距离
Cra	覆盖率	-	-

DHCRS 算法主要包括概率空洞的计算、修补半径的构造、单纯的覆盖空洞修补、考虑连通性的空洞修

补这几个子问题.下面对 DHCRS 算法进行详细分析.

3.3 概率感知计算

在 0-1 感知模型下,无论发生的事件距离远近,只要在一定的范围内,就一定以概率 1 被感知.而实际的感知信号是随着传播距离逐渐衰减的.与 0-1 模型不同,在概率模型下,距离节点越远,感知概率越小,事件不是被一个节点单独的覆盖,而是被多个节点联合覆盖,事件的覆盖率是多个节点联合感知的结果.如图 3 所示,假设距离节点为 r_s 的区域得到探测概率 P_{\min} .在 0-1 感知模型下,大于 r_s 的区域得到的感知概率肯定小于 P_{\min} ,即使有邻居节点的作用,感知概率也不会增加.而在概率感知模型下,由于感知区域内邻居节点的影响,情况就不是这么简单了.如图 3 所示,针对 4 个节点 A, B, C, D .半径为 r_s 的实线圆区域内,探测概率大于 P_{\min} ,进一步假设 $P_{\min} = 0.9$,虚线圆内为事件检测率大于 0.7 的区域.按照 0-1 模型,在 $MNJH$ 圆弧构成的封闭区域内,实线圆不能覆盖,事件探测率小于 90%就是覆盖空洞.在概率感知模型下,由于邻居节点的作用,大于 r_s 的区域得到的探测概率可能大于 90%.在节点 A 的半径为 r_s 的圆弧 MF 外的区域,要么被 A, C 两个虚线圆覆盖,要么被 A, D 两个虚线圆覆盖,而在 $MNJH$ 的中间,或者被 ABC 的 3 个虚线圆或 ABD 的 3 个虚线圆覆盖.在节点 B 的半径为 r_s 的圆弧 HN 外的区域,要么被 B, C 两个虚线圆覆盖,要么被 B, D 两个虚线圆覆盖.对于两个以上虚线圆的重叠覆盖区,则由公式(3)得到联合感知率为 0.91,是完全覆盖区.3 个以上的虚线圆重叠覆盖区,联合感知率则为 0.97,也为完全覆盖区.

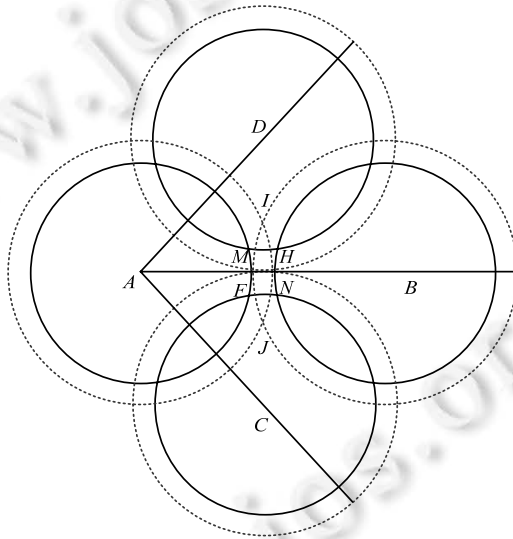


Fig.1 Analysis of joint detection probability

图 1 联合感知概率分析

可见, $MNJH$ 为充分覆盖,不是覆盖空洞.也就是说,在概率感知模型下,计算整个区域内覆盖空洞要复杂得多.

概率感知空洞的计算方法如图 2 所示,其中参数的意义见表 1,网格坐标为其中中心点的坐标.先根据公式(1)、公式(2)计算每个节点对每个网格的感知概率 P_{dsj} ,再计算每个节点对每个网格的未感知概率 P_{adsj} ,最后根据公式(3)计算网格的联合感知概率 P 等于 1 减去未覆盖的概率.对于概率感知模型,当网格联合感知概率小于要求的最小感知概率 P_{\min} 时,此网格为空洞网格,标记为 0,否则为 1(如图 3 所示).对于相邻的空洞网格,综合起来为一个空洞.计算空洞的面积.对未被覆盖的相邻网格进行合并,从横坐标最小的网格开始,采用宽度搜索和深度搜索相结合的方法.从(1,1)开始,考察每一行,如果网格(1,j)为 0,则标记为空洞 1;如果网格(1,j+1)为 0,也把这个网格标记为空洞 1;依此类推.如果空洞 1 的网格上面的网格,(2,j)也为 0,则此网格也标记为空洞 1.这样依次考察每一行,所有未被覆盖的网格都标记出来.每个网格的面积为 4,网格数量和网格面积的乘积就是空洞面积.计算出空洞

的面积后,空洞的数量也就能够统计出来.

```
function [H1,holemax,cra]=prob(N_s,a,P_min)
Output: H1; holemax,Cra
Input: N_s,a,P_min
N=length(N_s);
[rows,cols]=size(a);
b1= repmat(a(:,1),1,N); %网络的X坐标
b2= repmat(a(:,2),1,N); %网络的Y坐标
XR1= repmat(S(i).xd,rows,1); %静态节点的X坐标
YR2= repmat(S(i).yd,rows,1); %静态节点的Y坐标
c=sqrt((b1-XR2).^2+(b2-YR2).^2);
Pdsj=Probability(c); %网络的覆盖情况
Pdsj=1-Pdsj;%网络的未覆盖情况
P=1- prod(Pdsj,2); %联合感知概率
P(find(P>=P_min))=1;
P(find(P<P_min))=0;
Cra=sum(P)/size(P);
hole=hole(P); %计算空洞
H1=size(hole);
Holemax=max(hole);
```

Fig.2 Pseudo-Code of coverage hole calculation

图 2 覆盖空洞计算伪代码

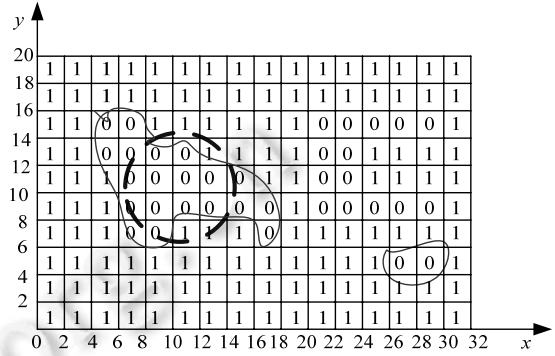


Fig.3 Cover matrix of network grid

图 3 网络覆盖矩阵

在空洞上,不同的位置初始感知率是不一样的.由于空洞的边缘部分受邻近节点的影响较大,初始感知率较高,而空洞的质心距离整个空洞的邻近节点较远,初始感知率最低.空洞修补以后,如果空洞的质心达到最小感知率要求,整个空洞就可以达到感知率要求.因此,这里把周围节点对空洞质心点的联合感知概率作为整个空洞的初始感知概率.设空洞 c 包含 n 个网格,第 i 个网格的坐标为 (x_i, y_i) , 质量为 m_i , 则空洞 c 的质心坐标可以根据公式(5)来求出,再参考公式(1)~公式(3),求出空洞质心的感知概率(即整个空洞的感知概率).

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \tag{5}$$

3.4 覆盖空洞的修补半径

我们要对概率覆盖空洞进行修补,首先需要构建空洞的修补半径.

定义 4(修补半径). 以空洞质心为圆心,以某个距离为半径画一个圆,只要一个节点移动到这个圆上,覆盖空洞的联合感知率就能达到最小感知率要求,则这个距离称为空洞的修补半径.第 i 个覆盖空洞修补半径用 d_i 表示,根据空洞的初始感知概率和公式(6)~公式(10)求得修补半径 d_i .

$$P_{\min} = 1 - (1 - P_i^d) \times P_i^{\text{initial}} \tag{6}$$

$$P_i^d = 1 - \frac{1 - P_{\min}}{P_i^{\text{initial}}} \tag{7}$$

$$z = \text{indf}(P_i^d) \tag{8}$$

$$dn = \frac{z \times \sigma - \gamma + P_{ix} - PL_0 - X_\sigma}{10 \times \alpha} \tag{9}$$

$$d_i = d_0 \times 10^{dn} \tag{10}$$

$$d_{si}^s = d_{si}^e - d_i \tag{11}$$

$$\lambda_{si}^s = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{H1} A_i} + \frac{1}{d_{si}^s} \tag{12}$$

各个参数见表 1.在概率感知模型下,如果一个移动节点再对空洞贡献感知概率 P_d ,空洞联合感知概率就等于最小感知概率,如公式(6)所示.根据公式(1)、公式(2)得到公式(8)~公式(10),算出移动节点的目标位置与第 i 个空洞的距离 d_i .只要在距离空洞为 d_i 的任意一个位置安置一个节点,空洞的联合覆盖率就达到了最小感知率的要求.如图 4 所示, A 是第 i 个覆盖空洞,以空洞质心为圆心,以长度 d_i 为半径画一个圆,只要一个节点移动到该圆上,第 i 个覆盖空洞的联合感知概率就满足最小感知概率.

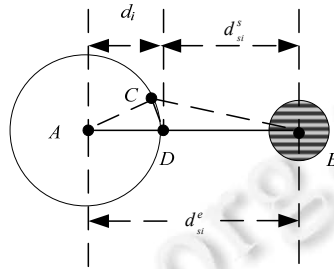


Fig.4 Three distances

图 4 3 个距离

定理. 如果移动节点与空洞确定的直线与修补圆的交点为修补空洞的目标位置,移动节点就能以最小的代价修补空洞.

证明:假设如图 4 所示, A 是覆盖空洞, B 是任意移动节点, D 是移动节点与空洞确定的直线与修补圆的交点.在修补圆上任取一点 C 与点 B 的线段 \overline{CB} ,以及线段 \overline{BA} , \overline{CA} 组成三角形 $\triangle BCA$,在一个三角形中,任意两个边之和大于第 3 条边,即 $\overline{AB} < \overline{AC} + \overline{BC}$,因为 $\overline{AB} = \overline{AD} + \overline{DB}$, $\overline{AC} = \overline{AD}$,代入得到 $\overline{AD} + \overline{DB} < \overline{AC} + \overline{BC}$,则 $\overline{DB} < \overline{BC}$. \square

3.5 覆盖空洞的修补

移动节点收到空洞信息以后,先计算与空洞的欧式距离 d_{si}^e ,根据上面的定理确定修补空洞的目标位置. d_{si}^e 与修补半径 d_i 两者之差就是移动节点修补该空洞需要的移动距离 d_{si}^s ,如公式(11)所示.3 个距离的详细表述如图 4 所示,其中, $d_i = AD$, $d_{si}^e = AB$, $d_{si}^s = BD$.如果移动节点只选择面积最大的空洞,则能耗可能会很大.如果只选择最近的空洞,大面积的空洞会得不到及时修补.综合起来,移动节点根据覆盖空洞的面积 A_i 和移动距离 d_{si}^s ,由公式(12)确定这个空洞的优先级.面积越大,距离越近,优先级越大.每个移动节点针对每个空洞都会产生优先级 λ_{si}^s .DHCRS 算法为每个移动节点选择优先级最高的空洞修补.

要使感兴趣区域达到 100%的覆盖,则要耗费大量的计算和通信开销,只要整个网络覆盖度到达 90%,就基本上满足了可用性.因此,只要单个空洞的最大面积小于 $0.1A_{\min}$ 约等于 10m^2 ,我们就认为成功实现空洞修补.

3.6 考虑连通性的空洞修补

整个网络能否保持连通,对整个网络的性能有着非常重要的影响,移动节点选择修补空洞的目标位置时,不能只考虑覆盖性能,还要覆盖和连通综合考虑.这里假设通信半径 $r_c = 2r_s$.

覆盖空洞修补以后,仍然可能存在连通空洞.如图 5 所示, A 为空洞, B, F 为移动节点, E 为距离 A 最近的静态节点.直线 EA 及其延长线把移动节点分成两部分,左侧和右侧,先考虑右侧,左侧与右侧类似.实线圆是覆盖空洞 A 为圆心,以 d_i 为半径的圆,移动节点只要移动到圆上任意一个位置,空洞的联合感知概率就等于最小感知率.空洞 A 与最近静态节点 E 之间的欧式距离为 d_{\min}^i .如果不考虑连通性,根据公式(11)得到移动节点 B 修补空洞 A 的目标位置为 H .此时尽管覆盖空洞得到了修补,但是连通性就不一定能够保证.

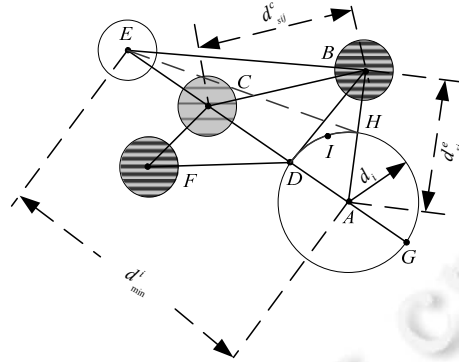


Fig.5 Hole repairment considering connectivity

图 5 考虑连通时的空洞修补

在图 5 中,线段 \overline{EB} , 线段 \overline{BA} 以及 \overline{EA} 组成三角形 $\triangle BCE, B, A, E$ 的坐标是已知的,这 3 个线段的距离 $d_{EB}, d_{si}^e, d_{min}^i$ 可以求出. 根据三角形的性质有 $\cos A = \frac{\overline{EA}^2 + \overline{BA}^2 - \overline{EB}^2}{2\overline{EA} \times \overline{BA}}$, 在三角形 $\triangle HAE$ 中, 同样有 $\cos A = \frac{\overline{EA}^2 + \overline{HA}^2 - \overline{EH}^2}{2\overline{EA} \times \overline{HA}}$, 其中, $\overline{HA} = d_i, \overline{EA} = d_{min}^i, \overline{BA} = d_{si}^e, \overline{BH} = \overline{BA} - \overline{HA} = d_{si}^e - d_i$ 已知, 只有 \overline{EH} 未知, 则得,

$$\overline{EH} = \sqrt{\frac{(d_{si}^e - d_i)(d_{min}^i)^2 + d_{si}^e \times d_i}{d_{si}^e} + d_i \times d_{EB}^2}, \text{ 设 } d_{mc}^i = \overline{EH}.$$

如果 $r_c < d_{mc}^i$, 可移动节点移动到目标位置 H , 就只是修补覆盖空洞, 而不能保持与最近静态节点的连通, 也就不能保持整个网络的连通. 如果 $d_{min}^i - d_i < r_c < d_{mc}^i$, 则一定可以在圆弧 BH 上找到一点 I , 使线段 $\overline{EI} = r_c$, 此时修补空洞的移动距离就是 \overline{BI} , 且 $d_{BI} < d_{BD}$. 当 $r_c < d_{min}^i - d_i$ 时, 考虑连通性, 空洞 A 与最近静态节点 E 之间的连线 \overline{EA} 与修补圆的交点 D 就变为移动节点 B 修补空洞 A 的目标位置, 修补距离为 $d_{si}^s = d_{BD}$. 这样, 移动节点修补空洞的移动距离修改为公式(13). 移动距离得到以后, 根据公式(12)计算覆盖空洞优先级. 通过公式(13)计算的移动距离, DHCRS 算法既修复了覆盖空洞, 也保持了网络的连通.

$$d_{si}^s = \begin{cases} d_{si}^e - d_i, & \text{if } d_{mc}^i \leq r_c \\ d_{BD}, & \text{if } r_c \leq d_{min}^i - d_i \\ d_{BI}, & \text{if } d_{min}^i - d_i < r_c < d_{mc}^i \end{cases} \quad (13)$$

现在进一步考虑 $r_c < d_{min}^i - d_i$ 时的情况, 考虑连通性, 位置 D 就变为移动节点 B 修补空洞 A 的目标位置, 修补距离为 $d_{si}^s = d_{BD}$. 此时如果空洞仍然是不连通的, 需要添加节点来保持网络的连通性. 在 \overline{EA} 距离位置 D 的 $\frac{1}{2}(d_{min}^i - d_i)$ 处, 位置 C 处添加节点修复连通, C 就是连通空洞. 移动节点 B 修补空洞的移动距离 $d_{si}^s = BD$, 修补连通空洞的移动距离 $d_{sj}^c = BC$, 针对直线 EA 另一侧的移动节点 F , $d_{si}^s = FD, d_{sj}^c = FC$. 与覆盖空洞优先级同样的道理, 移动节点针对每个连通空洞计算优先级, 连通空洞的优先级计算公式如式(14)所示. 其中, $\lambda_{sj}^c (1 \leq i \leq H1, 1 \leq j \leq H2)$ 表示覆盖空洞 i 周围的连通空洞 j 的优先级, d_{sj}^c 表示第 s 个移动节点修补覆盖空洞 i 周围的连通空洞 j 移动距离. 其他参数同公式(12).

$$\lambda_{sj}^c = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{H1} A_i} + \frac{1}{d_{sj}^c} \quad (14)$$

当覆盖空洞和连通空洞的优先级得到以后,移动节点选择优先级最大的空洞(覆盖空洞和连通空洞的总和)进行修补.这样,通过空洞的优先级 DHCRS 算法同时考虑空洞面积和移动距离.在减少移动距离的同时,既修补了覆盖空洞,也保持了网络的连通.

3.7 算法性能分析

在用网格法计算空洞时,空洞的不同区域的初始感知率是不同的.DHCRS 算法选择初始感知率较低的空洞质心来代表空洞的感知率.如果空洞质心的感知率达到了要求,空洞边缘的感知率也会达到要求,从而整个空洞的感知率达到要求.这就是选择空洞质心感知概率作为整个空洞感知概率的原因.

针对 DHCRS,有以下命题:

条件:移动节点采用公式(13)计算修补空洞的移动距离;根据公式(12)计算覆盖空洞优先级;根据公式(14)计算连通空洞优先级;然后选择优先级最高的空洞进行修补.

结论:DHCRS 算法可以修补覆盖空洞,同时也能保持连通性.

命题:如果条件成立,则结论为真.

证明:显然,公式(13)得到的目标位置都在修补圆上,可以修补覆盖空洞.覆盖空洞修复后的连通性主要和空洞与最近静态节点的距离有关.当 $r_c < d_{\min}^i - d_i$ 时,修补距离为 $d_{si}^s = d_{BD}$,同时需要在距离位置 D 的 $\frac{1}{2}(d_{\min}^i - d_i)$ 处、位置 C 处添加节点修复连通.因为修补半径 d_i 肯定大于 $r_s = 6$,只要 $d_{\min}^i < 2r_c + 6 = 30$,即空洞的面积小于 $\pi(d_{\min}^i - r_s)^2 = \pi(2r_c)^2 = 1808\text{m}^2$,在中间添加修补节点的方法就可以满足连通性.因此,后面的仿真对最大空洞面积进行研究.当 $r_c \geq d_{\min}^i + d_i$ 时, $d_i > 6$, $d_{\min}^i > 6$,如果 $d_{\min}^i < 6$,最近节点对空洞的感知率就已经达到最小感知率的要求,不需要修补节点,可以不考虑.当 $d_{\min}^i + d_i \leq r_c < d_{\min}^i - d_i$ 时,公式(13)得到的修补位置恰好可以满足连通性.也就是公式(13)得到的目标位置既可以满足覆盖性能,也可以满足连通性能. \square

作为分布式算法,中心节点没有为每个空洞计算优先级.这是因为移动节点与空洞的位置比较复杂,每个空洞针对不同移动节点的优先级是不同的.每个移动节点根据自己与空洞的距离和空洞面积,分别计算空洞优先级,这个移动节点再根据空洞的优先级寻找最优目标位置.

空洞的个数为 H ,移动节点的数目为 N_m ,基于空洞优先级的分布式修补策略时间复杂度为 $O(H \times N_m)$,通信复杂度为 $O(N_m + 1)$.中心节点需要广播覆盖空洞,移动节点都要广播自己的优先级结果,所以通信复杂度为 $O(N_m + 1)$.

与其他空洞修补算法相比,分布式空洞修补算法(DHCRS)的主要贡献在以下几个方面:

(1) 根据覆盖空洞的初始覆盖率创建覆盖空洞的修补半径,构造空洞的修补圆;移动节点只要移动到修补圆上,就可以有效地修补覆盖空洞,缩短了节点的移动距离.

(2) 提出了移动距离和修补半径的关系模型,通过这个关系模型,移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置;移动节点既可以修补覆盖空洞,也可以提高网络的连通性,提高了节点的利用效率.

(3) 根据移动距离和空洞面积,移动节点创建空洞的优先级模型,并选择优先级最高的空洞节能、高效地实现覆盖增强.移动节点不需要了解整个网络的拓扑信息,只需了解周围的覆盖空洞信息就可以分布式地修补空洞.

4 仿真与分析

为了评估算法性能,我们采用 Matlab 7.0 进行仿真.参照 shadowing 模型,参数采用和文献[15]一样的值,分别为 $\gamma = -27.85$, $P_{\alpha} = 32$, $\sigma = 4$, $\alpha = 2$, $PL_0 = -50$, $d_0 = 1000$, $X_{\sigma} = 147.476$, $r_s = 6$, $A_{\min} = 114\text{m}^2$,默认 $P_{\min} = 0.95$.距离目标 6m 一个节点对目标的概率感知率是 0.955.从以上的分析可知,覆盖空洞周围的最近节点、修补半径、连通性能三者有直接的关系;在概率感知模型下,事件的最小感知率对网络的覆盖性能有直接的影响,移动节点的移动距离反映节点能耗,移动距离越少,能耗越少,算法越节能.因此本文先研究最近节点、修补半径、连通性能三者的关系,

再研究最小感知率与空洞面积的关系,最后根据第 2 节覆盖度和连通性的定义,从覆盖度、连通性和移动距离考察算法性能.

4.1 修补半径与最近节点的关系

空洞周围的最近静态节点对连通性有影响,对空洞的感知概率更有影响,见表 2.这里最近距离代表空洞与最近静态节点的距离.当 $d_{\min}^i = 12\text{m}$ 时,距离空洞 12m 的节点 E 对空洞的感知率是 0.58,需要对空洞进行修补,根据公式(6)~公式(10)得到修补半径 $d_i = 7.65\text{m}$,修补圆与 E 的最近距离为 4.35m,公式(13)求出的修补距离能够同时满足连通和覆盖,此时空洞面积最大可达到 $\pi(d_{\min}^i - r_s)^2 = 113\text{m}^2$. 当 $d_{\min}^i = 18\text{m}$ 时,距离空洞 18m 的节点 E 对空洞的感知率是 0.25,计算得到修补半径 $d_i = 6.57\text{m}$,修补圆与 E 的最近距离为 11.43m,此时空洞面积最大可达到 452m^2 . 公式(13)求出的修补距离仍然能够同时满足连通和覆盖.当 $d_{\min}^i = 18.5\text{m}$ 时,距离空洞 18.5m 的节点 E 对空洞的感知率是 0.23,计算得到修补半径 $d_i = 6.5\text{m}$,修补圆与 E 的最近距离为 12m,此时空洞面积最大可达到 452m^2 . 公式(13)求出的修补距离仍然能够同时满足连通和覆盖.

当空洞的已知感知率大于等于 0.23 时,公式(13)产生的修补距离肯定可以同时满足连通和覆盖,换句话说,当空洞的最大面积= 452m^2 时,公式(13)产生的修补距离肯定可以同时满足连通和覆盖.

以上是一个节点对空洞的影响.现实中,多个节点对空洞的概率会有贡献,此时,根据图 3 的分析,只有在多个距离空洞更远的节点联合作用下,才能等于一个距离空洞 18.5m 节点的影响,才能达到 0.23 的感知概率.只要 $d_{\min}^i < 2r_c + 6 = 30$,也即空洞的面积小于 $\pi(d_{\min}^i - r_s)^2 = \pi(2r_c)^2 = 1808^2$,在中间添加修补节点的方法就可以满足连通性.因此,后面的仿真对最大空洞面积进行研究.

Table 2 Relationship between repair radius and detection probability

表 2 感知概率和修补半径的关系

d_{\min}^i	初始感知概率	最小感知率	需求的 P_d	修补半径 d_i	最近距离
12	0.58	0.95	0.88	7.65	4.35
14	0.45	0.95	0.91	7.09	6.91
16	0.33	0.95	0.925	6.77	9.23
18	0.25	0.95	0.934	6.57	11.43
18.5	0.23	0.95	0.935	6.5	12
19	0.21	0.95	0.937	6.5	12.5
20.4	0.17	0.95	0.94	6.42	14

4.2 最小感知率对覆盖性能的影响

最小感知率直接影响到网络的覆盖空洞情况.不同的静态节点数目,其区域覆盖率情况、平均空洞面积、最大空洞面积、连通性修补节点分别如图 6~图 9 所示.面积 $A=100 \times 100\text{m}^2$,网格数量为 $M=2500$.仿真结果表明,在同样的静态节点数目下,随着最小感知率的提高,覆盖率逐渐下降,但是平均空洞、最大空洞面积却在逐渐增高.静态节点数目越少,这个趋势越明显.仿真结果还表明,随着节点数目的增加,最小感知率对区域覆盖的影响逐渐减小.在达到一定值以后,覆盖率的影响已经很弱.当节点数目达到 150 时, $N_s \times A_{\min} = 15956\text{m}^2$,理论覆盖率已经达到 1.5 以上.如果小于 0.95,最小感知率则基本上对网络覆盖性能没有影响.

尽管覆盖率很高,平均空洞面积也很小,但是最大空洞面积很大,为最小感知区域的 2 倍以上.这些大面积的覆盖空洞对网络的监控性能影响很大,需要修补这些空洞,改善网络性能.而且这些大面积的空洞及时修补也容易造成信息孤岛,连通性不够,需要进一步考虑网络的连通性,对连通性进行修补.图 8 表明,80 个节点情况下,当密度分别为 0.95,0.98 时,需要 1,2 个移动节点修补连通性.当有 100 个节点时,密度 0.95,0.98 都只需要 1 个节点修补连通空洞.

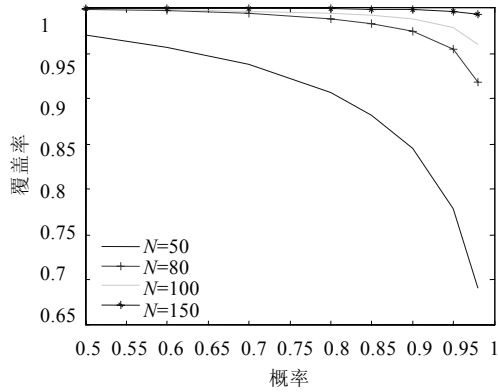


Fig.6 Coverage ratio with various P_{min}
图 6 不同感知概率的覆盖率

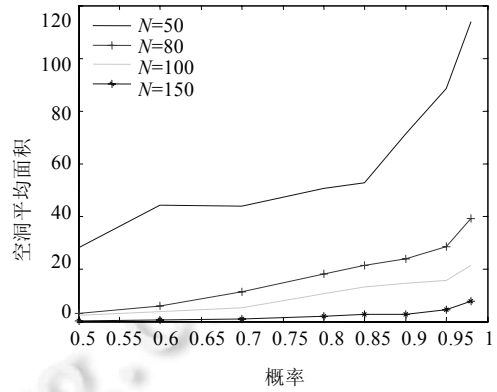


Fig.7 Mean hole area with with various P_{min}
图 7 不同感知概率的空洞平均面积

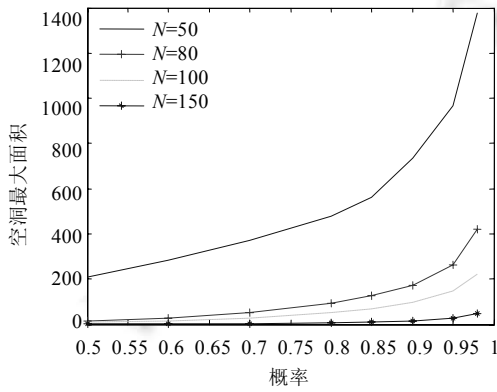


Fig.8 Maximum hole area with various P_{min}
图 8 不同感知概率的最大空洞面积

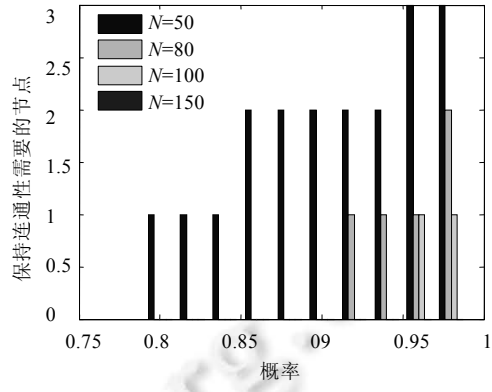


Fig.9 Connectivity with various P_{min}
图 9 不同感知概率的连通性

4.3 算法修补性能

DHCRS 算法修补性能如图 10、图 11 所示.面积仍是 $100 \times 100m^2$,移动节点数目为 30 个.

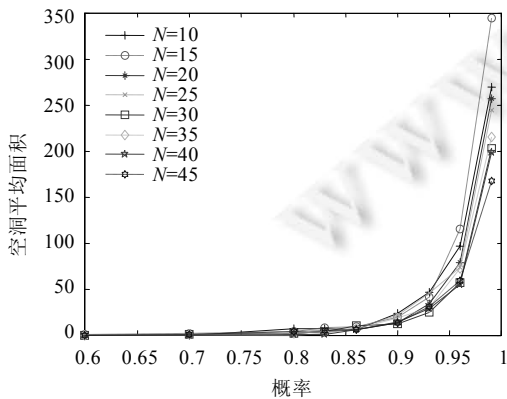


Fig.10 Total moving displacement with various P_{min}
图 10 不同感知概率的总移动距离

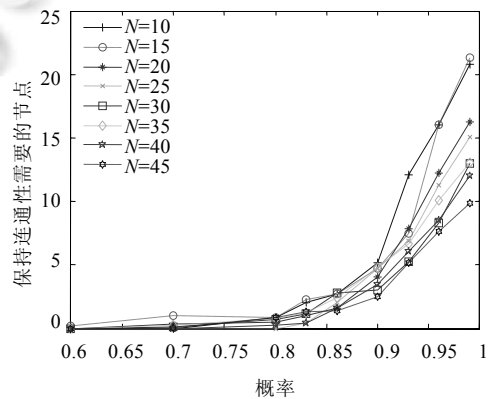


Fig.11 Mean moving displacement with various P_{min}
图 11 不同感知概率的平均移动距离

为了验证方法的有效性,我们采用较少的节点、较高的覆盖率要求,静态节点数量在 10~45 不等,最小覆盖率要求在 0.6~1.当感知概率小于 0.7 时,总移动距离和平均移动距离很小,也就是说,最少的静态节点 10 个基本上也能满足最小覆盖率要求,覆盖和连通都不需要修补.随着最小感知概率的增加,总移动距离和平均移动距离急剧增加,特别是最小覆盖率 0.95 以后,总移动距离几乎呈线性增加,但平均移动距离基本上都在 12,即 $2r_s$ 以下.所以,DHCRS 算法可以在保持连通性的同时,高效地提高覆盖性能.

4.4 3种算法的空洞修补效率对比

在同样的区域、同样的节点数,不考虑连通性 PSO^[17],考虑连通 PSO(简称 HRMC),DHCRS,这 3 种算法的覆盖率、最小移动距离之和、最小平均移动距离对比如图 12~图 14 所示.

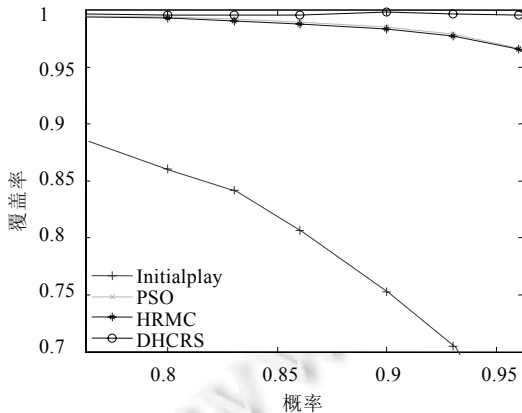


Fig. 12 Comparison of 3 repairing schemes in terms of coverage ratio

图 12 3 种修补算法的覆盖率对比

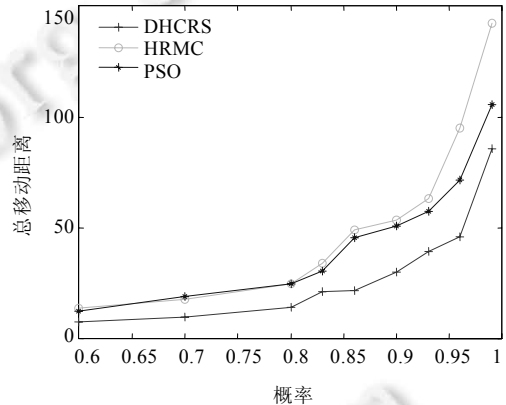


Fig. 13 Comparison of 3 repairing schemes in terms of total moving displacement

图 13 3 种修补算法的移动距离对比

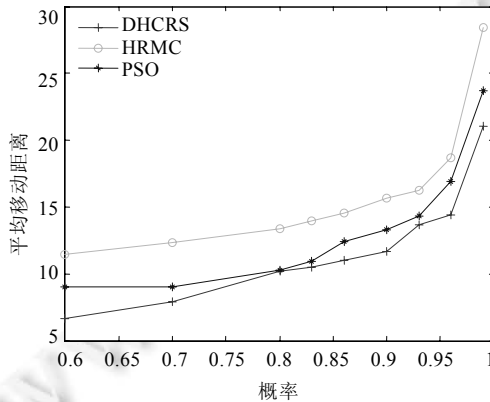


Fig. 14 Comparison of 3 repairing schemes in terms of mean moving displacement of

图 14 3 种修补算法的平均移动距离对比

图 12 表明,进行空洞修补后,网络的覆盖率得到了有效的提高,达到了 0.98 以上.图 12 还表明,当最小感知概率=0.93 时,初始网络的覆盖率仅有 0.72,已经远远不能满足覆盖性能要求.图 13、图 14 表明,随着概率的提高,要达到同样的覆盖率,移动距离、平均移动距离就要逐渐增加.在低概率要求下,DHCRS 和 HRMC 有同样的移动距离,但是 DHCRS 平均移动距离要低,这说明更多的节点参与了空洞修补.高概率要求下,3 种算法的移动距离、平均移动距离虽然都在增加,但是分布式算法的移动距离、平均移动距离比 HRMS 要小得多.这表明,在

DHCRS 算法中,更多移动节点参与了空洞修补,移动节点的选择更加合理,整个网络的能耗更加均匀.

5 结束语

本文主要研究在概率感知模型下考虑连通性的概率覆盖增强算法,构建了覆盖空洞的修补半径,提出了移动距离和修补半径的关系模型.通过这个关系模型,移动节点在修补圆上选择保持连通的修补位置;根据这个移动距离和空洞面积,进一步创建空洞的优先级模型,节能、高效地实现覆盖增强.仿真实验结果验证了算法的有效性.

接下来我们将进一步研究覆盖空洞修补算法在目标点概率 $k(k>1)$ 覆盖中的实现.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是浙江工业大学计算机科学技术学院智能研究所的各位教授和同学表示感谢.

References:

- [1] Mustapha RS, Abdelhamid M, Khalid A. Localized movement-assisted sensor deployment algorithm for hole detection and healing. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2014,25(5):1267–1277. [doi: 10.1109/TPDS.2013.137]
- [2] Liu Y, Chen HP, Tang ZM, Sun GX. A bat-like switched flying and adhesive robot. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on IEEE 2012 CYBER*. Bangkok: IEEE, 2012. 92–97. [doi: 10.1109/CYBER.2012.6392533]
- [3] Zhao XM, Mao KJ, He WX, Niu YB, Chen QZ. Deployment algorithm for wireless sensor network with irregular sensing range. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23:59–68 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12007.htm>
- [4] Dinesh D, Arobinda G, Arijit B, Subhas C. Line coverage measures in wireless sensor networks. *Journal of Parallel & Distributed Computing*, 2014,24(24):2596–2614. [doi: 10.1016/j.jpdc.2014.03.004]
- [5] Wang LL, Wu XB. Decentralized detection and patching of trap coverage hole for sensor networks. *Control and Decision*, 2012, 27(12):1810–1815.
- [6] He SB, Chen JM, Sun YX. Coverage and connectivity in duty-cycled wireless sensor networks for event monitoring. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2012,23(3):475–482. [doi: 10.1109/TPDS.2011.191]
- [7] Erdelj M, Razafindralambo T, Simplot-Ryl D. Covering points of interest with mobile sensors. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2013,24(1):32–43. [doi: 10.1109/TPDS.2012.46]
- [8] Su H, Wang Y. A self-healing algorithm without location information in sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(10):1957–1971 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wang KM, Li F, Qin Y. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes. *Journal on Communicaitons*, 2011,32(4):1–8 (in Chinese with English abstract).
- [10] Vibhav K, Edward J. Optimal nonuniform deployment of sensors for distributed detection in wireless sensor networks. *ACM Networks on Sensor Networks*, 2014,10(2):1–27. [doi: 10.1145/2530288]
- [11] Lu HC, Li YJ, Zhu YH. Simultaneous deployment and scheduling for real-time event capture in sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22:182–190 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11020.htm>
- [12] Tan R, Xing GL, Liu BY, Wang JP, Jia XH. Exploiting data fusion to improve the coverage of wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2012,20(2):450–462. [doi: 10.1109/TNET.2011.2164620]
- [13] Mang FZ, Wang HZ, He H. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2011,39(4):1–8 (in Chinese with English abstract).
- [14] Wen J, Jiang J, Fang L, Ban DS, Dou WH. Maintaining relay-connectivity and coverage in heterogeneous wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(9):2304–2319 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3623.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03623]
- [15] Zorbas D, Razafindralambo T. Prolonging network lifetime under probabilistic target coverage in wireless mobile sensor networks. *Computer Communications*, 2013,36(9):1039–1053. [doi: 10.1016/j.comcom.2012.07.021]

- [16] Lu YH, Guo ZW. Optimized deployment strategy of barrier coverage based on probability sensing model. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014,25:85-92 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14010.htm>
- [17] Fan XG, Zhang ZJ, Wang H. The probabiistic sense model for coverage hole elimination in WSN. In: Proc. of the 33rd Chinese Control Conf. Nanjing: IEEE, 2014. 422-427. [doi: 10.1109/ChiCC.2014.6896660]

附中文参考文献:

- [3] 赵小敏,毛科技,何文秀,钮一波,陈庆章.感测范围不规则情况下无线传感器网络节点部署算法.软件学报,2012,23:59-68. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12007.htm>
- [5] 王力立,吴晓蓓.传感器网络中陷阱空洞的分布式检测及修复.控制与决策,2012,27(12):1810-1815.
- [6] 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.电子学报,2011,39(4):772-779.
- [7] 温俊,蒋杰,方力,班冬松,窦文华.异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法.软件学报,2010,21(9):2304-2319. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3623.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03623]
- [8] 苏瀚,汪芸.传感器网络中无需地理信息的空洞填补算法.计算机学报,2009,32(10):1957-1971.
- [9] 王良民,李菲,秦颖.基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法.通信学报,2011,32(4):1-8.
- [11] 陆汉城,李燕君,朱艺华.传感器网络面向实时事件捕获的联合部署与调度策略.软件学报,2011,22:182-190. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11020.htm>
- [16] 卢云宏,郭忠文.一种概率感知模型的栅栏覆盖优化部署策略.软件学报,2014,25:85-92. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14010.htm>



范兴刚(1974—),男,山东阳谷人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络的覆盖控制,物联网拓扑结构.



王恒(1990—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.



杨静静(1990—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.