

无线传感网中基于唤醒机制的覆盖洞修复方法

胥楚贵^{1*}, 邓晓衡²

(1. 三明学院 数学与信息工程学院, 福建 三明 365004; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(* 通信作者电子邮箱 xuchugui@126.com)

摘要:针对无线传感器网络中节点因能量耗尽或环境破坏而失效导致产生覆盖空洞现象,提出了一种基于唤醒机制的定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略(DFNFP)。该方法通过覆盖洞边界节点从其邻接表中选择距离其中心最远的非活跃节点替换失败节点,并激活替换节点达到修复覆盖洞目的。仿真结果表明,该方法能保证较好的网络覆盖质量,充分利用了能量资源,延长了网络的生存周期,且在修复空洞的所需平均时间和能耗方面,DFNFP 优于最佳匹配节点策略(BFNP)。

关键词:无线传感器网络;覆盖洞;覆盖质量;生存时间

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Method to repair coverage holes based on wake-up mechanism in wireless sensor networks

XU Chu-gui^{1*}, DENG Xiao-heng²

(1. Institute of Mathematics and Information Engineering, Sanming University, Sanming Fujian 365004, China;

2. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The failed nodes lead to the phenomenon of coverage holes in wireless sensor networks, which is due to the exhausted energy and destroyed environment. In this paper, the Directed Furthest Node First Policy (DFNFP) was proposed to solve this problem. The method would repair coverage holes by the principle that the boundary nodes of coverage holes select from its neighbor table the non-active node farthest from the center to replace the failed node and activate the replacement node. The simulation results show DFNFP can maintain better quality of coverage, and make full use of energy resources, and extend lifetime of networks. Moreover, DFNFP is superior to Best Fit Node Policy (BFNP) in average time and energy consumption for repairing the coverage holes.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); coverage hole; Quality of Coverage (QoC); lifetime

0 引言

目标监测是无线传感器网络最典型的应用之一。为使传感器网络的资源得以充分利用,目标监测网络通常采用休眠—唤醒机制。监测网络中的部分节点如果能量耗尽,遭受攻击或故障而过早死亡,将导致网络原有覆盖区域出现“覆盖洞”。覆盖洞的出现使网络覆盖质量与连通性下降,导致网络中的大量资源未被充分利用。因此,为保证目标监测网络的感知、获取及通信等性能,被唤醒的工作节点应保持网络的可用性,综合考虑节点的剩余能量、传输控制方式等因素^[1]。现有的覆盖控制方法通常是假设网络被完全覆盖或基本上保持原有的覆盖范围^[2]。但随机部署的传感网完全覆盖目标区域时仍留有大量冗余^[3],尤其是监测网络出现覆盖洞后将导致许多网络资源的浪费。

近年来已有一些学者针对上述问题提出了覆盖洞检测修复方法。Howard 等^[4]提出了由信息中心根据已部署节点的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)信息预测下一节点位置的算法,该算法可以在一定程度上避免覆盖洞的产生,却不适用于自组织的传感器网络。Wang 等^[5]基于 Voronoi 图来计算移动节点弥补覆盖洞的最佳目标位置提出了3种分布式协议,该机制在保证最小移动距离的前提下获得了较好的覆盖质量,但移动传感器节点能量有限且消耗大、

易死亡。Yao 等^[6]通过几何三角贴片的方法计算“最佳”修复位置并在该位置部署一个新节点以修补覆盖洞,但此方法的能量利用率和时间效率都比较低。Bulusu 等^[7]提出了一种基于添加无线信标的自适应节点部署算法,但该算法未考虑信标的成本和检测区域的环境影响。王良民等^[8]提出了一种三角形贴片式的逐步增加移动节点方法,利用覆盖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,但该方法只适用于规则网络,忽略了修复覆盖洞所需的时间和能耗。本文作者于2010年^[9]提出了一种最佳匹配节点策略(Best Fit Node Policy, BFNP)以达到修复覆盖洞目标,该方法能延长网络的生命周期,但在修复时间和能耗方面还不是很理想。

本文针对现有解决方案存在的问题提出了一种基于唤醒机制的定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略(Directed Furthest Node First Policy, DFNFP)。该方法首先是检测覆盖洞,然后通过选取某一覆盖洞边界节点到其通信半径内覆盖洞方向上距离最远非活跃节点来替换失败节点,并修复覆盖洞。

1 覆盖洞修复方法

传感网的随机部署机制决定了无法从根本上避免覆盖洞的产生,而绝大部分传感网应用并不要求监测网络完全覆盖。因此,本文认为在一定的时间间隔内允许存在少量的较小覆

收稿日期: 2011-11-08; **修回日期:** 2012-01-14。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60903058); 福建省教育厅 A 类科技项目(JA11257); 三明学院自然科学基金资助项目(B201002/Q)。

作者简介: 胥楚贵(1982-),男,湖南衡阳人,硕士,主要研究方向:无线传感器网络; 邓晓衡(1974-),男,湖南衡阳人,教授,博士,主要研究方向:可信网络、网络优化、网络计算。

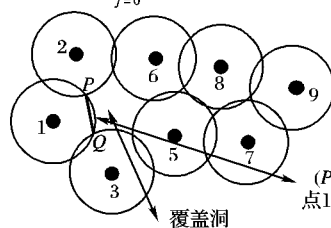
盖洞,只要求保证网络可用即可。

1.1 覆盖洞的检测

当信息处理中心收到盲点信息时,目标监测网络出现覆盖洞进而使部分数据丢失。若要保证网络的覆盖质量和连通性,必须迅速确定覆盖洞的所在位置及其大小。本文采用的覆盖洞检测方法与文献[6]相同:以某节点为起点构建最大单纯复形网,如果该节点与最大单纯复形网的边界相邻,那么可断定该节点为覆盖洞边界节点;反之则不是。以此方法可以识别全部覆盖洞边界节点。

覆盖洞的方向和大小是修复覆盖洞的前提条件,因此必须判断覆盖洞的方向和大小。如图1所示,节点1与覆盖洞有两个交点 P 和 Q ,这两个交点分别为节点1与覆盖洞边界线的起点与终点。本文的网络模型是假设在目标监测网络中与覆盖洞边界的工作节点都有一个或两个交点,则由这些交点的边所围成的多边形近似于覆盖洞的形状和大小。假设目标监测区域有 n 个节点, A_i 表示节点 i 感知的区域大小, CH 为覆盖洞的大小。则失败节点 i 所导致的覆盖洞大小可以近似表示为:

$$CH = A_i - (A_i \cap A_0 + A_i \cap A_1 + \dots + A_i \cap A_n) =$$

$$A_i - \sum_{j=0}^n A_i \cap A_j$$


(P,Q)是覆盖洞与节点1相交所形成的边界

图1 覆盖洞的检测

1.2 定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略

在工作节点的感知范围以外往往容易出现覆盖洞,因此工作节点感知区域以外覆盖洞方向的非活跃邻节点最有可能修复覆盖洞。如图2所示,DFNFP主要思想是覆盖洞边界节点从其邻接表中选择距离其中心最远的覆盖洞方向上的非活跃节点替换失败节点,并激活替换节点修复覆盖洞。伪代码基本步骤如下:若此非活跃邻节点不能完全修补覆盖洞,则其他非活跃邻节点继续重复以上过程,直到覆盖洞完全修复;当非活跃邻节点激活后,立即把其激活信息发送到通信半径内所有节点,这些节点收到信息后,立即更新信息表;若检测到覆盖洞未完全修复,则按照以上过程重新激活其他非活跃邻节点。

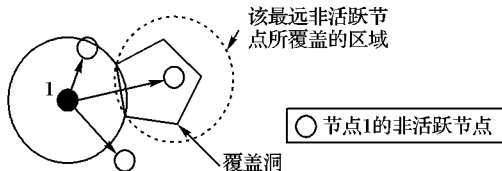


图2 定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略

算法 基于唤醒机制的定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略。

- 1) 当第一个边界节点 i 检测到覆盖洞边界消息 Hole_Boundary_Msg
If Hole_Boundary_Msg.Receive(i)为真,则
Send(i , Hole_Boundary_Msg, j);
//向所有邻节点发送覆盖洞边界信息
UpdateHole_Boundary_Msg (THIS);
//所有节点更新覆盖洞边界信息
否则 DiscardMSG.
- 2) $P = \text{SelectDeaction}(j)$
//从覆盖洞的所有非活跃节点中选取离节点 i 最远的节点
 $P(i, \text{Action});$ //激活该节点

Send(i , Hole_Boundary_Repair_Msg);

//给邻节点发送覆盖洞修复信息

UpdateHole_Neighbour_Msg (THIS);

//各个节点更新邻居节点信息

3) 若覆盖洞还存在,则其他边界节点继续执行以上过程,直到此空洞完全修复。

2 仿真实验与性能分析

对本文提出的基于唤醒机制的定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略进行仿真实验,并比较了该方法与最佳匹配节点策略(BFNP)、没有修复策略(No repair)在覆盖质量、平均能耗、网络生存周期三方面的性能。仿真参数如表1。

表1 仿真参数

参数	值
覆盖区域(A)	50×50
感知半径(r_s)	4
通信半径(r_c)	8
节点初始能量(E)	30 000 J
传输单个数据包的能耗(E_{tx})	1 J
接收单个数据包的能耗(E_{rx})	0.5 J
节点数目(N)	100 ~ 1 000
通信半径内的活跃节点数目(s)	5
通信半径内的非活跃节点数目(n)	1 ~ 10

2.1 网络覆盖质量

覆盖质量(Quality of Coverage, QoC)是无线传感器网络有效性的重要度量指标之一。根据 Parikh 等^[10]提出的理论:传感器网络的覆盖率为100%是不可能的,当覆盖率 $\geq 70\%$ 时,网络才有效。

图3是当通信半径内非活跃节点数目 $n = 5$ 时,不同的修复策略的覆盖率。在图3中没有修复策略(No repair)作为最基本的情况统计,开始的网络覆盖率为100%,当节点开始失败,网络覆盖率明显下降;DFNFP与BFNP分别可以保持网络有效覆盖到181 s和259 s,很显然BFNP保持网络有效的时间比DFNFP多约40%。

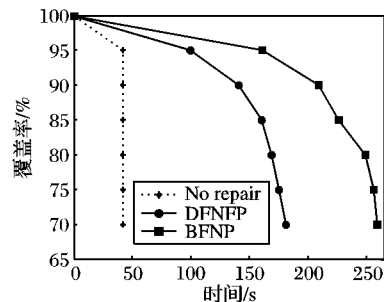


图3 当 $n = 5$ 时各种修复策略的覆盖率

图4是当通信半径内非活跃节点数目 $n = 10$ 时,各种修复策略的覆盖率。在图4中,No repair无变化,随着通信半径内非活跃节点数目的增加,找到最佳替换节点的概率也增大,DFNFP与BFNP分别可以保持网络有效覆盖到335 s和421 s,其之间的差额缩小到了约为20%。

2.2 时间效率与能耗分析

图5统计了各种策略替换单个失败节点所需的平均时间。由于网络中通信半径内的活跃节点数目(s)设定为5,BFNP需要与所有存活的边界节点通信,此时其替换单个失败节点所需的平均时间保持约为16 s,且比DFNFP所需的修复时间长很多。在DFNFP中,开始替换单个失败节点所需的

平均时间随通信半径内非活跃节点数目增加而减少,当通信半径内非活跃节点数目为5后,其替换单个失败节点所需的平均时间保持约为4 s。

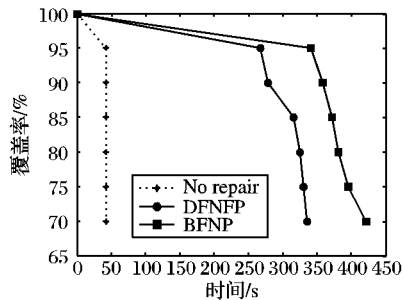


图4 当 $n=10$ 时各种修复策略的覆盖率

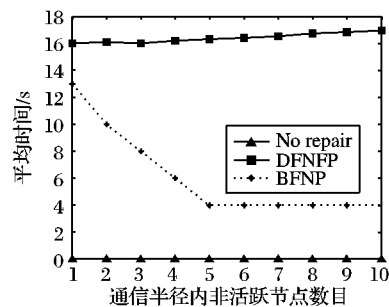


图5 各种修复策略替换单个失败节点所需的平均时间

图6统计了各种策略替换单个失败节点所需的平均能耗。在BFNP中,由于网络中通信半径内的活跃节点数目(s)设定为5,且都参与覆盖洞的修复,其替换单个失败节点所需的平均能耗保持约为21 J,在DFNFP中,开始替换单个失败节点所需的平均能耗随通信半径内非活跃节点数目增加而减少,当通信半径内非活跃节点数目为5时,其替换单个失败节点所需的平均能耗保持约为8 J。

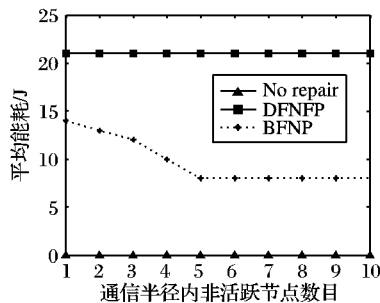


图6 各种修复策略替换单个失败节点所需平均能耗

图7、图8统计了随通信半径内非活跃节点数目变化各种修复策略对网络存活时间的影响。从图7、图8可以看出, No repair 中的网络性能没有变化,其网络存活时间保持为42 s;DFNFP 与 BFNP 的网络存活时间都随通信半径内活跃节点数目增加而增加,特别是通信半径内活跃节点数目为10时,DFNFP 的网络存活时间是 No repair 的近8倍,大大延长了网络生存时间,也说明了 DFNFP 的有效性。

3 结语

无线传感器网络中常常由于节点能耗不均以及故障、遭受攻击等各种内外因素导致覆盖洞的产生。覆盖洞不仅会造成传感器采集信息时在监控区域中形成盲点,更会造成数据传输及相关网络服务的故障,进而影响整个网络性能。本文提出的基于唤醒机制的定向最远非活跃邻节点优先覆盖洞修复策略(DFNFP)主要是通过选取某一覆盖洞边界节点到其

通信半径内覆盖洞方向上距离最远非活跃节点来替换失败节点,达到修复覆盖洞目的。通过仿真实验证明了该方法能保证较好的网络覆盖质量,充分利用了能量资源,延长了网络的生存时间,而且在修复覆盖洞所需的平均时间和能耗方面,DFNFP 优于 BFNP。

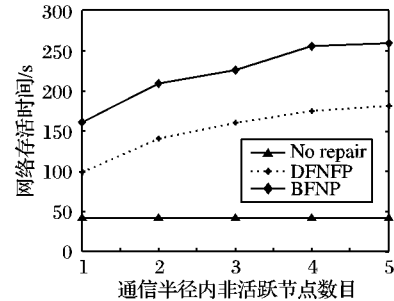


图7 当 $n=1 \sim 5$ 时各种修复策略的网络存活时间

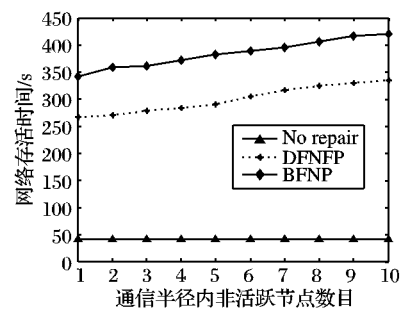


图8 当 $n=1 \sim 10$ 时各种修复策略的网络存活时间

参考文献:

- [1] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006, 7(3): 422-433.
- [2] CARBUNAR B, GRAMA A, VITEK J C O. Coverage preserving redundancy elimination in sensor networks[C]// Proceedings of 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2004: 377-386.
- [3] 刘巍, 崔莉, 黄长城. EasiFCCT: 一种基于保证连通性的传感器网络局部覆盖算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 196-204.
- [4] HOWARD A, MATARI M J, SUKHATME G S. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(2): 113-126.
- [5] WANG GUILING, CAO GUOHONG, LA PORTA T P. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640-652.
- [6] YAO JIXING, ZHANG GUYU, KANNO J K, et al. Decentralized detection and patching of coverage holes in wireless sensor networks[C]// International Conference on Intelligent Sensing, Situation Management, Impact Assessment, and Cyber-Sensing. Orlando, Florida: SPIE, 2009: 7352. [2011-11-01]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.819294>.
- [7] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Self-configuring localization systems: design and experimental evaluation[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 24-60.
- [8] 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[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 1-8.
- [9] 胥楚贵, 邓晓衡, 邹豪杰. 无线传感器网络覆盖空洞修复策略[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 256-259.
- [10] PARIKH S, VOKKARANE V, XING LIUDONG. Node-replacement policies to maintain threshold-coverage in wireless sensor networks[C]// Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2007: 760-765.