

无线传感器网络的 WPCS 覆盖策略

屈玉贵 蔺智挺 赵保华

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘要: 延长无线传感器网络生存时间的有效方法是让冗余节点进入休眠状态。而现有研究多是基于传感器感知模型为圆形的假设前提。该文集中讨论传感器感知模型非圆时,覆盖与连通性之间的联系,并提出适用性更广的 WPCS(Well-Proportioned Coverage Strategy)覆盖策略。WPCS 覆盖策略以最小化重叠面积为准则,其目的是最大化网络生存时间。仿真实验表明,WPCS 性能优于 CCP(Coverage Configuration Protocol),且具有一般性,并能很好地减少工作传感器数目,延长网络寿命。

关键词: 无线传感器网络;覆盖;WPCS

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0767-04

WPCS Coverage Strategy for Wireless Sensor Network

Qu Yu-gui Lin Zhi-ting Zhao Bao-hua

(Department of Electronic Engineering & Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: An effective approach for extending wireless sensor network lifetime is scheduling sleep intervals for extraneous nodes. But most of the existing coverage protocols are based on the circular sensing module. So, how to combine consideration of coverage and connectivity maintenance in a single activity scheduling is discussed in this paper, when the sensing module is not circular. The Well-Proportioned Coverage Strategy (WPCS) is presented which extends the lifetime of sensor network by minimizing the overlap area. Simulations show that WPCS outperforms Coverage Configuration Protocol (CCP) and is suitable for various situations. It effectively reduces the number of activity nodes and extends the lifetime of sensor network.

Key words: Wireless sensor network; Coverage; Well-Proportioned Coverage Strategy(WPCS)

1 引言

随着微机电系统的迅速发展,现在可以制作出大量体积小,功耗低,寿命长的传感器。在片上系统的基础上,将数据处理模块,通信模块和传感器高度集成,孕育出了一种新的信息获取和处理工具——无线传感器网络。无线传感器网络适用于在各种环境中监测环境信息。但因为节点能源和感知能力有限,如何有效地覆盖,延长网络的使用寿命,是传感器网络应用中的两个重要问题^[1,2]。

覆盖问题可归纳为两大类,一是最小化可控探测区域所需的传感器数目。所谓可控,即传感器节点放置位置可控。解决此类问题通常将探测区域划分为栅格。文献[3,4]提出了适合于栅格点组成的传感器区域的高效配置的方法。而覆盖问题另一类主要讨论最小化非可控探测区域^[5,6]所需的传感器数目(例如飞机大面积投撒)^[7,8]。国内外不少学者对此进行了研究^[9-11]。

为提高传感器网络的鲁棒性和监测数据的准确性,通常

进行高密度部署。但由于结点密度高,某个区域往往同时被多个传感器结点覆盖,称为“冗余覆盖”。近几年,大家将研究重点集中在,使感知区域被尽可能多的、不同的传感器组覆盖,这样,在每一时刻只有一组传感器工作,使网络生存时间得以延长^[12-14]。然而大部分文献是基于传感器感知模型为圆形的假设前提。实际应用时,种类繁多的传感器,其感知范围不一定都可以建模为圆形。基于这种现象,本文将提出适用性更广的 WPCS(Well-Proportioned Coverage Strategy)覆盖策略。

WPCS覆盖策略以最小化重叠面积为准则,其目的是最大化网络生存时间。WPCS覆盖策略使重叠面积少的传感器优先开启,尽量减少每轮开启的传感器数目,平衡节点间能量消耗。WPCS覆盖策略不仅适合传感器感知模型为圆形的情况,而且也适用与感知边界为非圆的情形。仿真表明,WPCS性能优于CCP(Coverage Configuration Protocol)^[13],且具有一般性。能很好地减少工作传感器数目,延长网络寿命。

2 WPCS覆盖策略

2.1 覆盖定理

无线传感器网络要求目标区域内的每个点至少被一个

2005-09-06 收到, 2006-03-13 改回

国家自然科学基金重大研究计划项目(90104010), 国家自然科学基金项目(60241004), 国家“973”计划项目(2003CB314801)和信息产业部项目(2005C56)的资助课题

结点覆盖，同时保证网络内各结点间的通信连通性。文献[12-14]讨论了传感器感知边界为圆形时，传感器网络覆盖与连通性两者之间的关系。本文将讨论感知边界非圆的情况，提出并证明以下定理。假设传感器通信半径为 R_c ，感知边界非圆，节点感知距离为 $R_s, R_{s-\min} \leq R_s \leq R_{s-\max}$ ，则有如下定理。

定理 1 如果一组感知边界为任意形状传感器，能完全覆盖凸区域 A ，仅当 $R_c \geq 2R_{s-\max}$ 时，传感器间必然连通。

证明 对任意两个在区域 A 内的节点 U, V ，假设 P_{UV} 为此两者间的连线。由于 A 是凸区域， $\forall p, p \in P_{UV}$ ，则 $p \in A$ 。因为 A 是被完全覆盖，所以 p 至少被一个传感器覆盖。同时， $\forall p, p \in P_{UV}$ 拥有一个或多个距离相等且最近的传感器 S_Group 。假设有限序列 $S_{UV} = S_Group_1, S_Group_2, \dots, S_Group_n$ 将 P_{UV} 划分成片断 f_1, f_2, \dots, f_n 。其中若 p 被同一组传感器 S_Group_i 覆盖，则 $p \in f_i$ 。进一步，传感器节点 $x \in S_Group_i, y \in S_Group_{i+1}$ ，由于 p 至少被一个传感器覆盖，则 $|xy|_{\max} = |px|_{\max} + |py|_{\max} = 2R_{s-\max}$ 。所以 $R_c \geq 2R_{s-\max}$ 时，才能确保节点间的连通性。

可见， $R_c = 2R_{s-\max}$ 是使凸区域连通的下限，若不满足，不能充分确保节点间的连通性。在定理 1 的保证下，设计 WPCS 覆盖策略，只要满足 $R_c \geq 2R_{s-\max}$ ，就无须过多考虑网络的连通性。此外，为解决高密度的传感器部署带来的冗余覆盖，需减少每时刻工作传感器节点数目。在文献[14]中，给出了传感器感知边界为圆形时，减少工作节点数目的等价条件。同理，下面给出传感器感知边界为非圆形时的等价条件。

定理 2 如果所有传感器节点 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 的覆盖范围一致，并且可以完全覆盖区域 R ，那么最小化工作节点数目与最小化重叠区域面积是等价的。

证明 设 E 为 $\{S_1$ 覆盖区域 $\cup S_2$ 覆盖区域 $\cup \dots \cup S_n$ 覆盖区域 $\}$ ， $E \supseteq R$ ， $|S|$ 为单个传感器覆盖面积，

$$I_R(x) = \begin{cases} 1, & x \in R \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, I_i(x) = \begin{cases} 1, & x \in |S_i| \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

因此， x 点的重叠程度可以用下式衡量：

$$L(x) = \sum_{i=1}^n I_i(x) - I_R(x)$$

同理，整个探测区域重叠程度为

$$\begin{aligned} L &= \int_E L(x) = \int_E \left(\sum_{i=1}^n I_i(x) - I_R(x) \right) dx \\ &= \sum_{i=1}^n \int_E I_i(x) dx - |R| = n|S| - |R| \end{aligned} \quad \text{证毕}$$

因此设计覆盖算法时，依据定理 2，可以通过减少重叠面积达到减少工作节点数量的目的，延长网络生存时间。

2.2 WPCS 覆盖策略详述

为了延长网络生存时间，需要对随机部署的网络拓扑结构进行优化，在保证覆盖性能的基础上，减少工作结点数。

WPCS 以最小化重叠面积为准则，其目的是最大化网络生存时间。WPCS 将传感器划分为 5 个状态：判断状态，等待状态，启动状态，休眠状态和消亡状态。如图 1 所示。

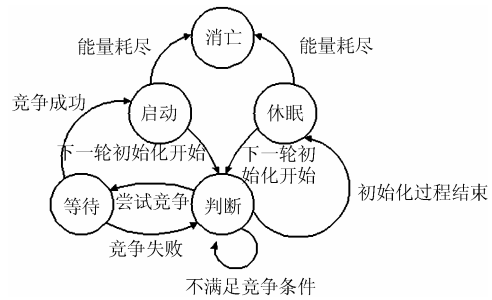


图 1 WPCS 状态转移图

(1) 判断状态：传感器利用自身剩余能量和控制范围的覆盖情况决定是否休眠。判断状态共分为 $m+1$ 个时段， m 值按可容忍时延选取，各时段的竞争阈值依次递增 d 。目的是使重叠面积少的传感器优先开启，以促使整个网络重叠面积尽可能少(图 2)。

$$\text{在每个时隙中，传感器用自身的冗余覆盖 } C_r = \frac{\int_S L(x)}{|S|}$$

与该时隙竞争阈值 $k+id$ ($i=0,1, \dots, m$) 作比较。若 $C_r < k+id$ ，则发送 JOIN 包。其中 JOIN 包需包括传感器节点 ID，位置，覆盖范围和剩余能量等信息。同时启动定时器 TimeJ，进入等待状态。反之 $C_r > k+id$ 时，在下一时隙重复以上操作，直至 $k+id > k_{\max}$ 。本轮竞争失败，进入休眠状态。

时隙 1, 阈值 k	时隙 2, 阈值 $k+d$...	时隙 $m+1$, 阈值 $k+md$
--------------	----------------	-----	----------------------

图 2 判断状态

(2) 等待状态：传感器进入此状态后，若定时器 TimeJ 超时，则传感器顺利进入启动状态，发送 SUCCESS 包，通知邻居修改覆盖状态。但若在此期间收到邻居的 JOIN 包，则需根据包中信息与自身状态进行比较。竞争成功，进入启动状态，发送 SUCCESS 包，通知邻居修改覆盖状态；竞争失败，返回判断状态(尝试竞争的邻居此时也进行类似操作)。

(3) 启动状态：履行职责，监测区域直至下一轮初始化开始，重新进入判断状态。或者由于能量消耗殆尽，进入消亡状态。

(4) 休眠状态：传感器关闭不必要的装置，尽可能节省能量，延长网络生存时间。

(5) 消亡状态：传感器因能量耗尽关闭。

可见 WPCS 覆盖策略使重叠面积少的传感器优先开启，尽量减少每轮开启的传感器数目，平衡了节点间能量消耗，有利于延长网络整体寿命。

3 仿真实验

为了测试 WPCS 覆盖策略性能，考虑在面积为 $50 \times 50 m^2$ 的区域分别投放 100, 300, 600, 900 个传感器， k 取 0.2， m 取 9， d 取 0.1。从图 3，可以看到以上各种情况，

WPCS 每轮工作节点数目较少,可较好地减少冗余数据和传输冲突导致的额外能耗,延长网络生存时间。

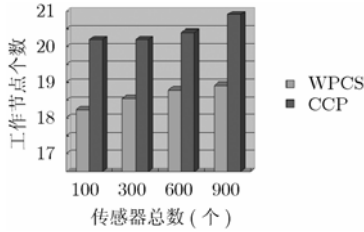


图3 工作节点数目比较

图4,图5为50×50m²的区域分别投放100个,300个传感器,k取0.2,m取9,d取0.1时,传感器网络的生存时间,可见WPCS覆盖策略整个区域覆盖>90%的持续时间比CCP算法延长60%。

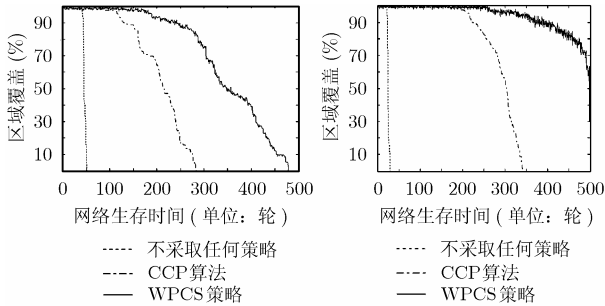


图4 网络生存时间比较 (投放100个传感器)

图5 网络生存时间比较 (投放300个传感器)

此外在面积为50×50m²区域投放100个传感器,分析网络剩余能量,如图6所示,网络剩余能量递减平缓,从另一角度显示了WPCS覆盖策略优越性。

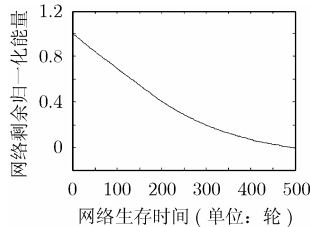


图6 网络剩余能量

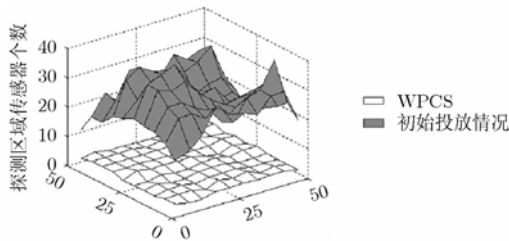


图7 传感器感知边界非圆 WPCS 性能

进一步,考虑传感器感知边界非圆的情况。在面积为50×50m²的区域放置300个感知边界为椭圆的传感器。从图7可见,WPCS覆盖策略适应性广,有效减少每轮工作传感器节点,降低各点覆盖情况差异。

4 结束语

在非可控探测区域,为提高传感器网络的鲁棒性和监测

数据的准确性,通常进行高密度部署。为了尽可能延长网络生存时间,需要对网络拓扑优化控制,在保持覆盖性能的前提下,尽量减少工作节点数。本文集中讨论了传感器感知模型非圆时,覆盖与连通性之间的联系,并提出适用性更广的WPCS覆盖策略。但未讨论不满足定理1时的覆盖策略这将是进一步的工作。

参考文献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
Ren Feng-yuan, Huang Hai-ning, and Lin Chuang. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
Li Jian-zhong, Li Jin-bao, and Shi Sheng-fei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. *Journal of Software*, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [3] 屈玉贵, 翟羽佳, 蔺智挺, 赵保华, 张英堂. 一种新的无线传感器网络传感器放置模型. 北京邮电大学学报, 2004, 27(6): 1-5.
Qu Yu-gui, Zhai Yu-jia, Ling Zhi-ting, Zhao Bao-hua, and Zhang Ying-tang. A novel sensor placement model in wireless sensor network. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2004, 27(6): 1-5.
- [4] Dhillon S S and Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks. In Proc. Wireless Communications and Networking, Louisiana, USA, Mar. 2003, vol.3: 1609-1614.
- [5] Adlakha S and Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks. In Proc. Wireless Communications and Networking, Louisiana, USA, Mar. 2003, vol.3: 1615-1620.
- [6] Heo N and Varshney P K. A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks. In Proc. Wireless Communications and Networking, Louisiana, USA, Mar. 2003, vol.3: 1597-1602.
- [7] Meguerdichian S. Coverage problems in wireless Ad-hoc sensor networks. In Proc. INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Anchorage, Alaska, Apr. 2001, vol.3: 22-26.
- [8] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, and Srivastava M. Exposure in wireless Ad-hoc sensor networks. In Proc. ACM MobiCom' 01, Rome, Italy, 2001: 139-150.
- [9] Kannan R and Iyengar S S. Game-theoretic models for reliable path-length and energy-constrained routing with data aggregation in wireless sensor networks. *IEEE Journal*

- on *Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1141–1150.
- [10] Bulusu N, Heidemann J, and Estrin D. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Journal on Personal Communications Magazine*, 2000, 7(5): 28–34.
- [11] Slijepcevic S and Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In Proc. Communications, 2001. ICC 2001, Helsinki, Finland, 2001, vol.2: 472–476.
- [12] Tian D and Georganas N D. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004, Canada, 2004, vol.2: 1097–1100.
- [13] Wang Xiaorui, Xing Guoliang, Zhang Yuanfang, Lu Chenyang, Pless R, and Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In Proc. Embedded Networked Sensor Systems SenSys'03, Los Angeles, California, USA, Nov. 2003.
- [14] Zhang H and Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Technical report UIUCDCS-R-2003-2351, June 2003.
- 屈玉贵: 女, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络、协议理论和工程.
- 蔺智挺: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络.
- 赵保华: 男, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为协议理论与工程、无线传感器网络.