

无线传感器网络中应用鲁洛三角形的k度覆盖算法

邢萧飞^{1,3} 孙泽宇²

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)¹ (洛阳理工学院计算机与信息工程系 洛阳 471023)²
(日本筑波大学系统情报工学研究科 日本 筑波 305-8537)³

摘要 覆盖问题是无线传感器网络中的基本问题之一。着重考虑无线传感器网络在随机部署节点情况下的多重覆盖问题,提出一种应用鲁洛三角形的k度覆盖算法 RTCA(Reuleaux triangle-based k-coverage algorithm)。RTCA把每个传感器节点的覆盖圆划分成6个相同的双弧形区域,根据网络覆盖度要求,调度这些区域内的节点状态来实现k度覆盖监测区域。仿真实验结果表明,RTCA在保证网络覆盖质量要求的同时能够有效地减少活跃节点的数量,延长网络的生存时间。未来还可以对该算法做进一步推广,以较容易地判断异构无线传感器网络的多重覆盖。

关键词 无线传感器网络,k度覆盖,鲁洛三角形

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Reuleaux Triangle-based k-coverage Algorithm in Wireless Sensor Networks

XING Xiao-fei^{1,3} SUN Ze-yu²

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)¹

(Dept. of Computer and Information Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)²

(Graduate School of Systems & Information Engineering, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan)³

Abstract Coverage is one essential task in sensor deployment for the design of wireless sensor networks. This paper mainly focused on solving k-coverage under the case that the sensor nodes are deployed in randomly. A Reuleaux triangle-based k-coverage algorithm(RTCA) was proposed to ensure that coverage can satisfy the requirement of network. By slicing the sensing range of sensor into six overlapping Reuleaux triangle with same length, the RTCA algorithm can judge whether the region is k-covered. The simulation results show that RTCA algorithm can reduce the total number of active sensors and satisfy the requirement of coverage, which can improve the energy efficiency of sensor nodes. This algorithm can be applied in k-coverage of heterogeneous sensor networks in future.

Keywords Wireless sensor network, k-coverage, Reuleaux triangle

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量价格低廉的具有感知、计算和通信能力的微型传感器构成。覆盖技术是无线传感器网络的主要支撑技术之一,在军事监控、火山监测和工业安全等方面具有广泛的应用前景。在这些众多的应用中,网络覆盖技术非常关键,已成为近年来学术界和产业界研究的热点问题。

覆盖问题作为研究无线传感器网络的一个基础问题,它主要解决两个问题:第一个是在网络覆盖范围内如何确保每个监测目标在一个或多个传感器节点的感应范围内;第二个是在节点的能耗方面,如何调度节点状态以平衡网络的覆盖质量和网络的生存时间。覆盖解决的就是在保证覆盖质量的情况下,如何能够使整个传感器网络以较小的能量代价来监测给定的监测区域或目标。

1 相关工作

按照节点部署方式,无线传感器网络节点的部署方法可划分为确定性部署^[1]和随机性部署^[2-4]两种。当网络规模不

大,并且监测区域条件较好时,可以使用确定性部署方法来部署节点。其优点是可以人工方式来控制节点部署的位置,从而实现以最优的方式达到网络覆盖等各方面的要求。相反,如果无法以人工等方式来部署节点时,通常会使用飞机等工具以随机布撒的方式来部署传感器节点。由于在这种部署方式中节点位置不确定,流动性往往比确定性部署情况下要部署更多的节点,这就带来了节点冗余性问题,以及如何控制网络的覆盖质量等问题。同时,在网络运行时,为了监测的需要,有时需要对监测区域实行多重覆盖,这就是网络的k度覆盖问题。

因此,随机部署的无线传感器网络的覆盖问题成为一个非常重要的问题,在学术上已经对这一问题展开了一定的研究。对于随机部署的无线传感器网络,通常是部署大量的传感器节点。为了提高节点的能量利用效率,有必要进行节点的职能调度,即在保证网络覆盖质量要求的前提下让一部分节点处于活跃状态,其它大部分节点转入休眠状态。同时,由于节点的数目较多,因此采用分布式算法或者协议成为首选。

到稿日期:2010-02-23 返修日期:2010-04-30 本文受国家留学基金委基金(2009103025),河南省科技攻关基金项目(091037A)资助。

邢萧飞(1979-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络覆盖和连通,E-mail:lylg_sun1977@163.com;孙泽宇(1977-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线网络协议和算法。

覆盖配置协议(CCP)^[5]利用节点的局部位置信息来分布式判断节点职能的合格性,职能合格者将转换成活跃状态对目标区域进行监测,不合格者节点将转换成休眠状态而节省能量。该文证明了当无线传感器网络中节点的通信半径大于或者等于感应半径的2倍时,如果网络1度覆盖给定的监测区域,那么该区域中网络节点也是连通的。该文还考虑了多度覆盖,其协议可以满足多度覆盖要求。但是,在判断节点是否冗余时所采用的节点职能合格性判断算法的复杂度是 $O(N^3)$ 。

文献[4]提出一种传感器网络中随机布撒节点情况下的覆盖和连通概率模型(SCCP),通过该模型可以计算在满足不同覆盖与连通率要求下所需要的传感器节点数量,其计算方法比较简单;但该文并未考虑多重网络覆盖下的连通率问题。文献[5]提出了一种在不同通信半径与连通半径比值情况下实现完全覆盖和多度连通的传感器节点部署方式,证明了正六边形的节点模型是节点优化部署时一个比较好的模型。这些模型是在确定性节点部署上实现的。

本文提出了一个应用鲁洛三角形来判定网络k度覆盖的算法。其基本思想是:在随机部署节点的情况下,通过节点之间位置关系构造出鲁洛三角形,进而利用其几何性质来判断该区域是否被节点k度覆盖,并提出相应的实现算法。同时,当节点的通信半径与感应半径比值满足一定值、区域完全覆盖的情况下可以保证网络节点之间的完全连通。与传统的CCP协议相比,本文所提的应用鲁洛三角形来判定网络k度覆盖的方法在计算上开销较小,算法的复杂度低,适合大规模部署节点的情况下判断网络覆盖情况。

2 网络模型和基本定义

2.1 网络模型

本文的工作是基于如下基本假设:第一,无线传感器节点的通信模型和感应模型都是圆盘模型,即通信范围和感应范围都是呈圆盘状;第二,网络中的无线传感器节点是异构的,即节点的感应范围是一样的,所有节点的通信范围也不是一样的;第三,每个无线传感器节点都知道自己的地理位置信息(如通过某种定位算法^[6]获得)。

2.2 基本定义

定义1 区域 A_{s_i} 被节点 s_i 覆盖是指区域 A_{s_i} 中的任一点 p 都在节点 s_i 的覆盖范围之内,即

$$A_{s_i} = \{p | d(p, (x, y)) \leq R_i, i \in [1, n]\} \quad (1)$$

式中, d 为两点之间的欧氏距离, R_i 是节点的感应半径, n 是节点的数量。

定义2 k度覆盖是指监测区域 A_k 至少同时处在 k 个传感器节点的覆盖范围内,即 $A_k \in \bigcap_{i=c}^{c+k} A_{s_i}$,其中 $1 \leq c \leq n$ 。

3 k度覆盖条件和特征

为了有效地判断监测区域的覆盖情况,我们使用了一个叫做鲁洛三角形(Reuleaux Triangle)^[7]的几何图形的几何特征来判定一个区域是否被k度覆盖。其研究思想是:通过对网络节点子集覆盖监测区域,同时借助于Helly定理^[8]来判定整个网络是否被k度覆盖。

鲁洛三角形:以等边三角形的三个顶点为圆心,以该三角形的边长为半径的圆形组成的公共交叉区域,如图1所示。

图中的灰色区域即是该等边三角形所构成的鲁洛三角形。

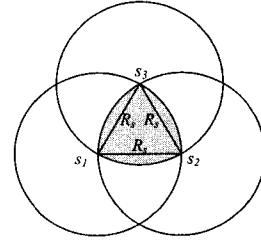


图1 边长为 R_i 的鲁洛三角形

Helly定理 假定 X_1, X_2, \dots, X_n 是 R^d 的一个有限子集,其中 $n > d$,假如这个 n 个子集中任意 $d+1$ 个子集的交集不为空,那么这个集合有一个非空交集,即 $\bigcap_{j=1}^n X_j \neq \Phi$ 。

根据Helly定理,可以得到在 $k \geq 3$ 情况下,当且仅当这 k 个圆周的任意3个圆周的交集不为空时,则由 k 个圆周的交集是一个非空集合。如图2所示,这是Helly定理在二维平面上的一个示例,它表示在 $n=4, d=2$ 情况下各几何图形相交所形成的覆盖交集情况。

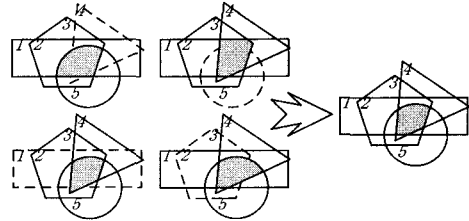


图2 Helly定理在二维平面上的例子

根据以上定理及说明,可以得出如下判断区域为k度节点覆盖的充分条件。

推论1 在 $k \geq 3$ 情况下,假如任意边长为 R_i 的鲁洛三角形区域里包含了 k 个活跃节点,那么这个区域为k度覆盖。

在随机部署传感器节点的情况下,由于把网络监测区域划分成一个个相邻的鲁洛三角形的困难性,我们可判断该监测点是否被节点感应圆形成的6个底边长 R_i 的弓形区域所覆盖。这样,两个有公共底边的相邻等边三角形所构成的两个鲁洛三角形的相交区域,其形状类似于一个镜头横切面的区域,我们称之为双弧形区域,如图3所示。该双弧形区域是由两个鲁洛三角形的弓形区域相接形成的。在下面部分,通过使用这个双弧形区域的几何特征来定义区域的k度覆盖判断方法。

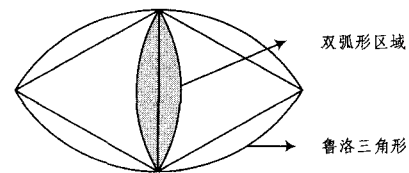


图3 两个鲁洛三角形所构成的双弧形区域

推论2 如果在由两个鲁洛三角形所形成的双弧形区域内存在 k 个活跃节点,那么这些活跃节点能够k度覆盖这两个鲁洛三角形区域。

证明:由于位于双弧形区域内 k 个节点中的任意节点,与这两个鲁洛三角形内的任意点之间的距离都不会大于 R_i ,则这 k 个活跃节点能够覆盖两个鲁洛三角形区域。证毕。

根据推论2,我们给出判断一个区域是否被k度覆盖的

充分条件。

定理 1 在 $k \geq 3$ 情况下,假如在网络监测区域内任意边为 r 的弓形存在相邻的边长也为 R 的弓形区域,并且它们所形成的双弧形区域内存在 k 个处于活跃状态的传感器节点,那么这个区域是 k 度覆盖的(这里的 R 是构成鲁洛三角形的等边三角形的边长,也即是节点的感应圆的半径)。

证明:假定网络的监测区域是由其划分成的若干弓形区域形成的一个弓形网格区域,对于这个区域内的任意弓形存在一个相邻的弓形邻居,这两个弓形所形成的双弧形区域内存在 k 个活跃节点,每个弓形的弦长为 R ,这个双弧形区域内的任意一个节点与这两个弓形所在的鲁洛三角形的最大距离都不超过 R ,那么在两个相邻的鲁洛三角形内的任一点都至少被 k 个节点所覆盖。同理,如果该区域内的其它弓形在判断后也被 k 度覆盖,那么这个区域是 k 度覆盖的。证毕。

推论 3 在 $k \geq 3$ 情况下,假如传感器节点的通信半径 R_c 与感应半径 R_s 的比值满足 $\frac{R_c}{R_s} \geq \sqrt{3}$, 那么一个同构的 k 度覆盖传感器网络能够保证节点之间的连通性。

证明:通过图 3 可以比较容易地求证出两个鲁洛三角形最远点之间的距离是覆盖关系的 $\sqrt{3}$ 倍。

根据推论 3,当节点完全覆盖监测区域时,它能够保证节点之间的连通性。

4 RTCA 算法

在这一部分里提出 RTCA 算法的内容。为了提高节点的能量效率,首先引入传感器节点状态的概念。

4.1 传感器节点状态

为了节省网络中节点的能量,可以延长网络的生存时间。在任一时刻,网络中传感器节点处于睡眠、侦听和活跃 3 种状态的一种。这 3 种状态的含义如下:第一状态是睡眠状态;传感器节点既不与其它节点通信也不监测其感应范围内的目标,节点能够周期性地转换到侦听状态以接收其它邻居节点广播的 AWAKE 消息。第二种状态是侦听状态,传感器节点侦听其它节点发送的 AWAKE 消息。侦听状态是节点的一个临时状态,持续时间较短。第三种状态是活跃状态,传感器节点能够与其它节点通信并监测感应范围内的目标。

在网络初始阶段,节点处于侦听状态,基站节点处于活跃状态。处于侦听状态的节点保存其周围处于活跃状态的邻居节点信息。假如该节点发现它的覆盖范围已经被其它节点 k 度覆盖,那么它把自身转换到睡眠状态以节省能量。

当节点冗余或网络覆盖度降低时,需要将活跃节点转换到侦听状态,同时送一个 STATUS 消息通知邻居节点自己的状态信息。

节点状态之间的转换关系图 4 所示。

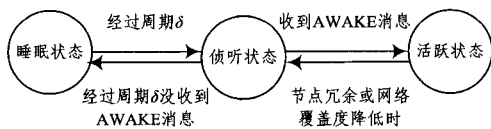


图 4 传感器节点各状态之间转换关系图

4.2 RTCA 算法思想

每个节点 s_i 把它的感应范围以随机形式划分成 6 个重叠的鲁洛三角形,其边长等于节点的感应半径大小,如图 5 所

示。根据定理 1,节点 s_i 随机选择其中的一个双圆形区域,判别这个区域是否被节点 k 度覆盖。然后根据这些节点的剩余能量和它们的感应半径大小,优先把位于这个双弧形区域内的传感器节点置于活跃状态。

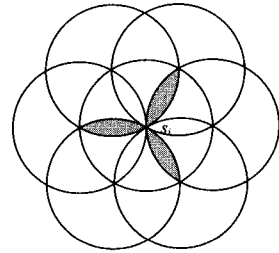


图 5 节点 s_i 划分的 6 个双弧形区域

具体地说,节点 s_i 在其所构造的双弧形区域中选择 k 个传感器节点,这些双弧形大小要大于或等于节点 s_i 的感应半径 R_s 。然后,节点 s_i 向这 k 个节点发送一个 AWAKE 消息,当节点收到这个 AWAKE 消息,它就转换为活跃状态并广播一个 STATUS 消息通知其邻居节点。每个节点都知道其邻居节点状态。同样,假如一个处于侦听或睡眠节点的感应覆盖范围没有被其它节点 k 度覆盖,那么它就将自身转换为活跃状态。

下面给出求解目标覆盖度的 RTCA 算法描述:

Algorithm Reuleaux Triangle-Based k -Coverage (RTCA)

输入:传感器节点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$;

目标监测区域 A ;

输出:实现 k 度覆盖监测区域的最小节点集 G ;

初始化:基站节点处于活跃状态,其余节点处于侦听状态,节点之间相互交换位置等信息。

For each sensor $s_i \in S$

构造节点 s_i 的 6 个双圆形区域 Arc_j ;

For each Arc_j

If(节点 s_i 的感应区域没有被 k 度覆盖)

Set itself into Active status;

//调度自己进入活跃状态;

Send STATUS message to neighbor nodes;

$G \leftarrow s_i$;

end if

else

Keep listening status;

end for

end for

5 性能评价

为了评价 RTCA 算法的性能,我们使用了仿真的方法来研究在不同网络覆盖情况下统计网络中活跃节点的数量,以及网络剩余能量随时间变化的情况。仿真采用 NS-2^[9] 平台,仿真的环境是一个 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的正方形区域。传感器节点发送数据和接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{Tr}(k, d) = E_{Telec}k + E_{amp}(k, d)$$

$$= \begin{cases} E_{Telec}k + \epsilon_{fs}d^2k, & d < d_0 \\ E_{Telec}k + \epsilon_{amp}d^4k, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{Rc}(k) = E_{Relec}k \quad (3)$$

(下转第 86 页)

- [10] Tolle G, Culler D. Design of an Application-cooperative Management System for Wireless Sensor Networks[C]//Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN). Istanbul, Turkey, 2005
- [11] Ramanathan N, Chang K, Kapur R, et al. Sympathy for the sensor network debugger[C]//Proc. 3rd ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005). New York, NY, USA, 2005
- [12] Rost S, Balakrishnan H. Memento: A health monitoring system for wireless sensor networks[C]//Proc. 3rd IEEE Communications Society Conf. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON 2006). IEEE, Piscataway, NJ, 2006
- [13] Ringwald M, Romer K. Deployment of Sensor Networks; Problems and Passive Inspection[C]//Fifth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems. 2007; 179-192
- [14] Dressler F, Nebel R, Awad A. Distributed Passive Monitoring in Sensor Networks[C]//Proceedings of 26th IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2007). Demo Session, Anchorage, Alaska, USA, 2007
- [15] Yuan F, Song W, Peterson N, et al. Lightweight Sensor Network Management System Design[C]//Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. 2008; 288-293
- [16] Ngoc H P, Peditakis D, Boulis A. From Simulation to Real Deployments in WSN and Back[C]//The 1st IEEE International Workshop from Theory to Practice in Wireless Sensor Networks. Helsinki, Finland, 2007
- [17] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Telos: enabling ultra-low power wireless research[C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. 2005; 364-369

(上接第 68 页)

式中, $E_{T\text{-elec}}$ 和 $E_{R\text{-elec}}$ 表示无线发送和接收模块的能耗; ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别表示自由空间模型和多路衰减模型的放大器能耗参数; d_0 是常数。其它的仿真参数详见表 1。

表 1 仿真参数表

参数	值	参数	值
网络尺寸	400 * 400m ²	$E_{R\text{-elec}}$	50nJ/b
节点数	2000	E_{min}	0.02J
R_s	25m	数据包报头	25B
$E_{T\text{-elec}}$	50nJ/b	初始能量	60J
ϵ_{fs}	10(pJ/b)/m ²	广播包大小	25B
ϵ_{amp}	100pJ/b/m ²	每轮时间	100ms

5.1 不同网络覆盖度下活跃节点数量对比

本实验研究在不同网络覆盖度情况下网络中活跃节点的数量,如图 6 所示。随着网络覆盖度的提高,网络中活跃节点的数量明显增加。通过与 CCP 协议对比,可以看到使用 RTS 算法的网络中处于活跃状态的节点数量明显比使用 CCP 协议的网络活跃节点的数量要少。在保证网络 3 度覆盖情况下,两种算法下活跃节点数量相差不大。但随着网络覆盖度的提高,两者的活跃节点数量差距增大,这说明了 RTCA 算法在保证网络覆盖度要求的条件下能更有效地提高计算网络覆盖度的准确性,从而调度更少的传感器节点处于活跃状态。

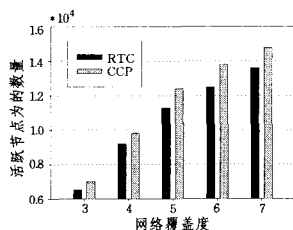


图 6 不同网络覆盖度时网络中活跃节点数量对比

5.2 网络生存时间对比

图 7 反映的是在网络 3 度覆盖条件下网络中节点剩余能量随时间变化的对比情况。从图中可以看到,运行中的网络节点总的剩余能量随时间变化而在不断地减少。与 CCP 协议相比,RTCA 算法在保证网络覆盖度要求的同时消耗的能量更少。当网络运行相同长度的时间后,使用 RTCA 算法的网络能够比使用 CCP 协议的网络大约平均节省 20% 的能量,

这是因为 RTCA 算法在计算网络覆盖度时计算开销较小,对节点的能量消耗较少。

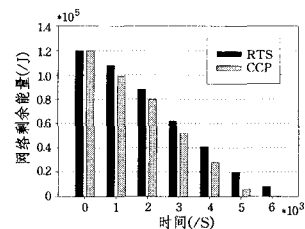


图 7 网络剩余能量随时间变化对比

结束语 本文以无线传感器网络的 k 度覆盖为出发点,提出了一种应用鲁洛三角形的分布式 k 度覆盖算法。算法根据传感器节点局部位置信息判断网络监测区域覆盖度大小,并根据网络节点的剩余能量和冗余情况调整传感器节点的状态,以提高节点的能量效率。仿真结果表明,本文算法在保证网络覆盖质量时能够有效地减少活跃节点的数量,延长网络的生存时间。本文算法做进一步的扩展后还可以用于判断异构无线传感器网络多重覆盖。

参考文献

- [1] Bai X, Yun Z, Xuan D, et al. Pattern Mutation in Wireless Sensor Deployment[C]//Proceedings of INFOCOM-10. 2010
- [2] 毛莺池,梁奕,周晓峰.一种能量异构自适应的无线传感器网络覆盖控制协议[J].计算机学报,2009,36(5):39-44
- [3] Xing G, Wang X, Zhang Y, et al. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2005, 1(1): 36-72
- [4] Xing X, Wang G, Wu J, et al. Square Region-based Coverage and Connectivity Probability Model in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of CollaborateCom-09. Washington DC, USA, 2009: 1-8
- [5] Bai X, Xuan D, Yun Z, et al. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k-connectivity ($k \leq 6$) wireless sensor networks[C]//Proceedings of ACM MobiHoc-08. 2008: 401-410
- [6] Talluri R, Aggarwal J. Mobile Robot Self-Location Using Model-Image Feature Correspondence[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996(1): 63-77
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Reuleaux_triangle
- [8] Bollobas B. The Art of Mathematics; Coffee Time in Memphis [M]. Cambridge University Press, 2006
- [9] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>