Computer Engineering

网络与通信。

文章编号: 1000-3428(2010)20-0113-03

文献标识码: A

中图分类号: TP301

无线传感器网络正六边形节点覆盖模型研究

赵仕俊 1,2 , 张朝晖 2

(1. 中国石油大学(华东)石油仪器研究所, 山东 东营 257061; 2. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:定义感知覆盖、通信覆盖和连通覆盖 3 个基本概念,并给出它们的物理模型和数学模型。提出二维区域上的正六边形节点覆盖模型,证明该模型是重复最少的无漏洞覆盖模型。分析基于正六边形节点覆盖模型的二维区域覆盖,当节点发射半径大于或等于 $\sqrt{3}$ 倍感知半径时,可保证网络的通信覆盖和连通覆盖的最少邻居节点数为 6,节点感知覆盖率为 82.7%。研究结果表明,正六边形节点覆盖模型更适于二维区域覆盖。

关键词:无线传感器网络;覆盖模型;邻居节点;发射半径;覆盖数

Study Regular Hexagonal Node Coverage Model of Wireless Sensor Networks

ZHAO Shi-jun^{1,2}, ZHANG Zhao-hui²

- (1. Research Institute of Petroleum Instruments, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
- 2. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

[Abstract] This paper defines three basic conception including sensorial coverage, communication coverage and connectivity coverage, and gives their physical models and mathematical models. It proposes the regular hexagonal node coverage model applying to 2-D region. It is proved that the model can get coverage to repeat the least without loopholes in 2-D region. The least neighbor nodes to ensure connectivity coverage and communication coverage are 6 for 2-D regional coverage based on the regular hexagonal node coverage model, when launching radius of the node is greater than or equal to $\sqrt{3}$ times of sensorial radius. Node's sensorial coverage rate is 82.7%. Study result shows that the regular hexagonal node coverage model is more suitable to the 2-D region.

[Key words] Wireless Sensor Networks(WSNs); coverage model; neighbor node; launch radius; coverage number

1 概述

在无线传感器网络中,研究节点在目标区域的部署方法 这一类问题属于网络覆盖问题。传感器网络的覆盖包含感知、 通信和连通3个方面。随着研究的深入,把覆盖涉及的感知、 通信和连通问题综合考虑是覆盖问题必然研究的内容。

节点覆盖模型和区域覆盖模型是覆盖问题研究的 2 个基本问题。通常人们把节点感知模型和节点覆盖模型混为一谈,所以,当把感知模型理想化为圆盘模型时,也同时认为覆盖模型为圆盘模型。相关研究在讨论覆盖问题时,都无意中使用了圆盘节点覆盖模型或隐含了正三角形、正四边形的节点覆盖模型概念^[1-3]。本文通过对感知覆盖、通信覆盖和连通覆盖的定义,综合考虑感知、通信和连通问题,研究适用于二维区域的正六边形节点覆盖模型。

2 节点的感知、通信和连通覆盖

2.1 感知、通信和连通覆盖的物理模型

感知覆盖、通信覆盖和连通覆盖的物理模型如图 1 所示。感知覆盖即以任一节点 S 为圆心, R_s 为半径的感知区域内的信息都能被感知到。通信覆盖即任意 2 个节点 S_A 和 S_B 必须有距离为 R_c 的发射能力才能保证节点感知到的信息能可靠地传送出去。连通覆盖即任一节点 S 应有恰当数量的邻居节点按某种方式部署才能确保监测区域内的信息都能感知到并以最优路径传送给用户。

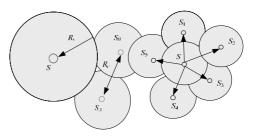


图 1 传感器网络节点覆盖物理模型

基于上面的分析,给出以下定义:

定义 1 感知覆盖指节点的信息感知能力所能波及的周 和空间。

定义 2 通信覆盖指节点的信号发送能力所能到达的有效空间距离。

定义 3 连通覆盖指网络中节点周围的邻居节点的分布 状态及数量。

由上面的定义可知,从物理意义上讲,节点覆盖模型应

基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金资助项目 (PLC200502)

作者简介:赵仕俊(1957-),男,研究员、博士,主研方向:无线传

感器网络;张朝晖,教授、博士生导师

收稿日期:2010-02-22 **E-mail:**wtzdh@126.com

能兼顾感知、通信和连通。从物理形式上看,节点覆盖模型 应因不同的物理空间而取不同的形式,才能够使无线传感器 网络覆盖问题的研究更加简明。目前,大量文献对传感器网 络覆盖问题的研究都因节点覆盖模型选取不当,使得研究过 程复杂化而结论趋同^[4]。

2.2 感知、通信和连通覆盖的数学模型

(1)感知模型

节点的感知覆盖区域和通信覆盖区域一般被看作是圆域,传感器节点的感知能力包括监测范围和信号特征。设传感器节点的感知半径为 r_s , $d(S_i,P_j)$ 为部署区域中某点j 离其最近传感器节点i的距离,点j是否被覆盖取决于 r_s 和 $d(S_i,P_j)$ 之间的大小关系。用 P_i 表示点i是否被感知,被感知为1,否则为0,则有:

$$P_{i}(S_{i}, P_{j}) = \begin{cases} 0 & d(S_{i}, P_{j}) > R_{C} \\ e^{-ad(S_{i}, P_{j})^{2}} & R_{S} < d(S_{i}, P_{j}) & R_{C} \\ 1 & d(S_{i}, P_{j}) & R_{S} \end{cases}$$
(1)

其中, α是与传感器节点物理性能和感知环境有关的参数。

(2)通信模型

根据电磁波传播理论,电磁波在自由空间的传播,若发射机和接收机在视距范围内,可用自由空间传播模型预测接收信号的强度。若发射功率(信源强度)为 P_T , d 为收发天线之间的距离,则可由 Friis 自由空间模型公式得到收发节点之间的信号功率关系为:

$$P_R(r_c) = P_T G_T G_R \left[\frac{\lambda}{4\pi r_c} \right]^n \tag{2}$$

其中, P_R 为接收功率(接受强度); λ 为载波波长; G_T 和 G_R 分别是发送天线和接收天线的增益;n 为信道衰落系数,在自由空间 n=2,在金属建筑物中 n=6,在大部分情况下 n 取值范围为 $2\sim4$ 。

(3)连通模型

由于连通覆盖反映的是节点发送的信号在网络中的传播能力,因此节点的连通模型指基于某种网络拓扑结构,网络中节点周围分布的邻居节点数量(节点连通度)及分布状态。

一般来说,为了保证无漏洞重复最少的覆盖,对于一维 区域覆盖应采用圆盘节点覆盖模型,对于二维区域覆盖应采 用正六边形节点覆盖模型,对于三维区域覆盖应采用正方体 节点覆盖模型。

3 正六边形节点覆盖模型研究

3.1 正六边形节点覆盖模型

在传感器网络应用中,对于某一监测区域,如何做到"毫无遗漏"的监测即是无漏洞覆盖问题。按照节点覆盖的圆盘模型,这个问题可抽象为:对于面积为A的图形F,如果用半径为r的圆去覆盖,如何拼接这些圆,至少需要多少个这样的圆才能完全覆盖图形F。可以设想,无论用多么小的半径为r的圆对某一区域进行覆盖都不可能是无重复无漏洞覆盖。问题的解决只能退让到用最少个数的正多边形完成重复最小的无漏洞覆盖,这个问题的解有如下的定理。

定理 1 用感知半径为r的圆,以它的内接正六边形对区域进行覆盖,可得到重复覆盖最少的无漏洞覆盖。

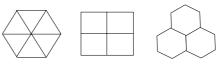
证明:用正多边形无漏洞覆盖某一区域,事实上只要求把若干个全等正多边形的角顶在一个点上即可实现,因为每个正n边形的一个内角为 $(n-2)180^\circ/n$,所以在一个顶点处集结的x个正n边形满足方程:

$$x\frac{(n-2)180^{\circ}}{n} = 360^{\circ} \tag{3}$$

解得·

$$x = 2 + \frac{4}{n^2} \tag{4}$$

为使 x 是正整数,只能取 n=3, $x_3=6$; n=4, $x_4=4$; n=6, $x_6=3$,即可以用全等正三角形、全等正四边形或全等正六边形无重复无漏洞覆盖全域,如图 2 所示。



(a)全等正三角 (b)全等正四边形 (c)全等正六边形 图 2 全等正多边形的无漏洞覆盖

以节点感知圆域的内接正多边形对区域进行覆盖,无漏洞覆盖后一个节点圆域的重复覆盖面积 A_C 是节点圆域面积 A_L 与内接正多边形面积 A_S 之差,即:

$$A_C = A_L - A_S = \pi r^2 - \frac{nr^2}{2} \sin \frac{2\pi}{n} \tag{5}$$

在式(5)中,n 为节点感知圆域的内接正多边形的边数。 当 $n\to\infty$ 时, $A_C\to 0$,所以,为了保证无漏洞覆盖,当 n=3、4、6 时,以 n=6 取得重复覆盖最小,即:

$$A_{C \min} = (\pi - \frac{3\sqrt{3}}{2})r^2 \tag{6}$$

因此,当节点的感知半径为 r 时,以它的内接正六边形对区域进行覆盖,可得到感知覆盖重复最少的无漏洞覆盖,这就是正六边节点覆盖模型。

对于部署在监测区域内部的节点,每一个节点的感知覆盖率 η_s 为感知圆域内接正六边形面积 A_S 与感知圆域面积 A_L 之比,即:

$$\eta_s = \frac{A_s}{A_l} = \frac{3\sqrt{3}r^2/2}{\pi r^2} \times 100\% = 82.7\% \tag{7}$$

3.2 节点通信半径

节点通信半径的确定应考虑节点的感知半径和发射功率 2 个重要因素。文献[5]设计了一种基于目标区域 Voronoi 划分的集中式近似算法(Centralized Voronoi Tessellation, CVT),研究得出的结果是:如果 $R_c=2R_s$,则 CVT 算法构造的覆盖集是连通的。

对于一个用正六边形节点覆盖模型建立的无漏洞覆盖, 节点集 Voronoi 划分的 Delaunay 三角剖分是 Voronoi 划分的 对偶图,如图 3 所示。

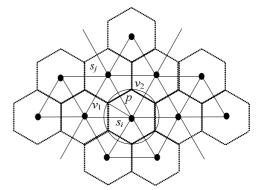


图 3 正六边形模型部署传感器节点的 Voronoi 图

定理 2 正六边形节点覆盖模型建立的覆盖集,如果 R_c $\sqrt{3}R_c$,则覆盖集是连通的。

证明:如图 4 所示,一个确定区域上随机分布的传感器节点可描述为给定二维平面上 R^2 的一个有限点集 $S=\{s_1,s_2,...,s_n\}$,定义与 s_i 相关联的 Voronoi 区域 V_i : $V_i=\left\{p\in R^2\middle|d(p,s_i)-d(p,s_j),j\neq i\right\}$,其中,d 为欧氏距离。点集 $\{s_i\}_{i=1}^n$ 称为 Voronoi 产生点,Voronoi 区域的边称为 Voronoi 边,其顶点称为 Voronoi 顶点,共享一条 Voronoi 边的 2 个点互为 Voronoi 邻居。集合 $\{v_i\}_{i=1}^n$ 称为 R^2 的 Voronoi 划分。 Delaunay 三角剖分是 Voroni 划分的对偶图。用 GD=(VD,ED)表示点集 $S=\{s_1,s_2,...,s_n\}$ 形成的 Voronoi 划分所对应的 Delaunay 三角剖分。其中, $VD=S,(s_i,s_j)\in ED$,当且仅当 s_i 与 s_i 互为 Voronoi 邻居。

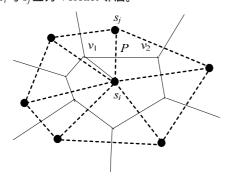


图 4 随机部署传感器节点的 Voronoi 图

考虑节点部署完成后形成的覆盖集中的 2 个节点 s_i 、 s_j ,假定两者互为 Voronoi 邻居,且共享边 v_1v_2 ,根据 Voronoi 划分的定义,边 v_1v_2 是线段 s_is_j 的垂直平分线。设 v_1v_2 与 s_is_j 相交于点 p_o 由于节点 s 属于覆盖集,则其有界 Voronoi 多边形的每个顶点都位于其感知圆盘内,因此 $d(s_i,v_i)$ R_s 。从而 $d(s_i,s_j)=2d(s_i,p)< d(s_i,v_i)$ $2R_s$,仅当 R_c $d(s_i,s_j)$ 时,节点 s_i 、 s_j 是连通的,则 R_c $2R_s$ 。因此,覆盖集中的每个节点都能够与其每一个 Voronoi 邻居节点直接通信,则对应的 Delaunay 三角剖分图中的每条边长度都小于 R_c 。由于最小生成树是 Delaunay 图的子图,因此该覆盖集是连通的。

同样的方法,对于正六边形节点覆盖模型建立的无漏洞覆盖网,其节点集 Voroni 划分的 Delaunay 三角剖分如图 3 所示,因此,有:

$$d(s_i, v_1) = R_s \tag{8}$$

$$d(s_i, s_j) = 2d(s_i, p) = 2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} d(s_i, v_1) = \sqrt{3} R_s$$
 (9)

仅当 R_c $d(s_i,s_j)$ 时,节点 s_i 、 s_j 是连通的,则 R_c $\sqrt{3}R_s$ 。与文献[5]的结果比较,定理 2 说明用正六边形节点覆盖模型建立的网络,在保证通信覆盖的情况下,传感器节点信号可以以较小的发射半径传送信号,从而降低发射功率,节省能耗。

3.3 邻居节点数

基于正六边形节点覆盖模型部署节点完成的区域覆盖,每一个节点的最少邻居节点数是多少才能保证网络的连通性,即是连通覆盖问题。

定理3 无线传感器网络中的每个节点必须拥有至少6个邻居节点才能保证监测区域的连通性。

证明:作半径为 2r 圆的内接正六边形,分别将半径为 r 圆的圆心与各边中点重合,再将第 7 个半径为 r 圆的圆心与 半径为 2r 圆的圆心重合,即 7 个以 r 为半径的小圆完全覆盖 半径为 2r 的一个大圆,如图 5 所示。在图 5 中,对于正 OAB,

设 OA、OB 中点为 A_1 、 B_1 ,那么 $AA_1B = AB_1B = 90^\circ$,故四 边形 AA_1B_1B 被以 AB 为直径的圆覆盖。另外, OA_1B_1 被小圆 O 所覆盖。类似地,可推得 7 个以 r 为半径的小圆完全覆盖半径为 2r 的一个大圆,即一个节点必须拥有至少 6 个邻居节点才能对监测区域形成无漏洞覆盖。

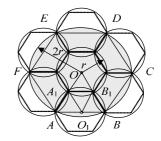


图 5 网络节点的最少邻居节点

仿照上述方法,基于正六边形节点覆盖模型所做的区域覆盖,若不考虑边界因素,相邻 7 个节点构成的节点簇和周围均分布的 6 个节点簇所覆盖的区域是无漏洞覆盖,以此可推广到整个覆盖区域。因此,基于正六边形节点覆盖模型的区域覆盖,正六边形拼接的图就是节点的感知覆盖图,一个正六边形中心点与邻近 6 个正六边形中心点的连线构成节点的网络连通覆盖图。

文献[6]在假设每个节点可以确定自己通信范围的基础上,对最优邻居节点数目做了研究,认为保证网络连接的"魔鬼数字"在 $5\sim8$ 之间。上述定理3证明了所谓的"魔鬼数字"就是6。

基于正六边形节点覆盖模型的区域覆盖,以中心节点为 0 层,逐层记为 1, 2, ...层向外分布,无漏洞覆盖的区域面积为:

$$A_{c} = \frac{3\sqrt{3}r^{2}}{2}(3L(L+1)+1), \quad L = 0,1,\dots$$
 (10)

最小重复覆盖区域面积为:

$$A_{K \min} = (3L(L+1)+1)(\pi - \frac{3\sqrt{3}}{2})r^2$$
 (11)

最小传感器节点数为:

$$N_{\min} = 3L(L+1)+1, \quad L = 0,1,\cdots$$
 (12)

由式(12)可知,对层次型传感器网络进行分簇,当 L=1 时,邻居节点数 $n_b=6$,当 L=2、 $n_b=18$ 时,若 n_b 取 $6\sim18$,可使簇头数与节点总数的比率达到 $5\%\sim14\%$,簇内节点到簇头的 3 跳数在 74%以上,这恰好与研究层次型网络拓扑结构时,当簇的大小和簇头总数在此范围内即可获得较好的拓扑结构的结论相吻合。

3.4 区域的最小覆盖

要对某一监测区域实施覆盖,可以有多种覆盖,但是否存在一种使用传感器节点数最少的无漏洞覆盖,有以下定理。

定理 4 已知一个图形 F , 若存在 m 个对应节点数为 K_1 , $K_2,...,K_m$ 的图形 $G_1,G_2,...,G_m$ 可覆盖图形 F , 则存在一个最小 $K_{\min}\{K_{\min}$ ($K_1,K_2,...,K_m$)} , K_{\min} 对应的图形 G_{\min} 是图形 F 的最小覆盖。

证明:设图形 F 的直径为 D, 节点圆域直径为 d。

若 d D ,则 $K_{\min}=1$,即一个单节点的图形 G_{\min} 是图形 F 的最小覆盖。

若 d < D ,当 $K_1 = K_2, K_3, \ldots, K_m$ 时 , $K_{\min} = K_1 = K_2, K_3, \ldots, K_m$,则节点数相同的图形 G_{\min} 是图形 F 的最小覆盖。

(下转第118页)