

A Survey on the Critical Conditions for Connectivity and Coverage in Wireless Sensor Networks *

XIANG Martian¹, SHI Haoshan^{1*}, LI Li-hong²

{ 1. School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Software College, Nanchang University, Nanchang 330029, China }

Abstract: The topology attributes of both connectivity and coverage in a wireless sensor network depend on the spatial distribution of the nodes and their transmission range. This paper first models the network with random node distribution as a geometric random graph. Then it proposes an analytical expression of the required critical transmission range of a node, for a given node density, to create a connected network. Equivalently, if the maximum range of the nodes is given, it can estimate effectively how many nodes are needed to cover a certain area with a connected network. With experimental test in various scenarios, the method is proved to achieve guaranteed degrees of coverage and connectivity, valuable for researchers in this area.

Key words: wireless sensor networks; connectivity; coverage; critical condition

EEACC:6150P

无线传感器网络的连通覆盖临界条件分析 *

向满天¹, 史浩山^{1*}, 李立宏²

{ 1. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072; 2. 南昌大学软件学院, 南昌 330029 }

摘要: 连通与覆盖控制作为无线传感器网络中两个最基本的问题, 取决于网络配置及节点的传播距离, 反映了网络的感知质量与资源的优化分配。为了用最优化数量的传感器节点来改善和确保网络的连通与覆盖, 在分析现有研究成果的基础上, 提出了满足渐进连通覆盖的临界充分条件及必要条件。理论分析及仿真实验均表明, 提出的临界条件更紧凑和规则化, 有助于对无线传感器网络进行更细致的研究。

关键词: 无线传感器网络; 连通; 覆盖; 临界条件

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)11-1887-05

无线传感器网络的连接不需要固定的基础设施, 尤其是自组织的无线 Ad Hoc 网络, 所有的节点都参与协同路由数据包。当一个节点发送数据包时, 为了降低相同信道上不同接收节点之间的干扰, 并减少能量消耗, 确保网络的信息处理能力, 必须对节点射频发送的能力实行有效控制。衡量无线网络质量的两个重要性能参数是连通与覆盖^[1-6]。连通考虑的是节点间的连接情况能否保证采集的信息可以准确地传递给基站。连通性通常是指网络中任意

节点通过一定的路由可到达网络中其他所有节点的概率, 主要由节点的空间分布和节点的传播距离所决定。覆盖则是衡量初始节点的部署是否覆盖了整个目标区域, 以及这些节点能否完全准确地采集目标区域的信息。

多年来各国学者提出了很多有关连通覆盖问题的结论。文献[1-2]根据节点的空间部署以及传播范围来衡量最小节点度及多重连通。文献[3-4]提出了多传感器的多重覆盖方案。文献[5]分析了保

基金项目: 国家教育部博士点基金项目资助(20050699037); 江西省教育厅重点科技研究基金项目资助(赣教技字[2007]29号); 江西省主要技术带头人基金资助项目(070002); 江西省科技厅科技支撑计划基金资助项目(2007ZD03700)

收稿日期: 2008-05-19 修改日期: 2008-08-17

持连通的节点传播距离,但只研究了圆形传播范围下的一重连通情况。文献[7]从理论上证明了节点的通信范围大于二倍传感范围的情况下,覆盖问题就包含了纯连通问题,但未对节点通信范围小于二倍传感范围时的关系进行说明。这些初步的研究成果对于网络连通覆盖的条件分析并不精确,仅仅适用于小范围规则区域的部署,距离无线传感器网络整体优化的目标还不够。当目标区域不规则或者很大时,如何有效地确保其连通与覆盖,成为当前迫切要求解决的问题。

在网络以较高概率保持连通的基础上,基于能耗及复杂度考虑,如何计算出所需的节点最小传播距离呢?这是本文首先关注的重点。进一步,本文将给出在确保活动节点都连通的同时,使得网络覆盖的充分必要条件及其计算公式。本文的结论不需要借助节点的位置信息,从而降低了硬件成本,并减少节点获取和维护位置信息的开销,可以很方便地应用到节点部署、拓扑控制、负载均衡等领域。

1 网络模型与描述

在无线传感器网络中,节点的状态分三种:休眠(SLEEP)、活动(ACTIVE)、监听(LISTEN)。在休眠状态,节点储备能量。在活动状态,节点主动感知周边环境并且与其他节点进行通信。每个节点都会周期性地进入监听状态,收集来自于其邻居的信号,并进而决定自身的下一个状态。为了便于理论分析,我们采取随机部署方式。在节点数目较多时,泊松分布可以较好地近似二项分布,因此节点的部署可以视为一个泊松过程,从而区域 S 中的任意一个节点落入 S 中某个子区域 C 的概率只与 C 的面积有关,为 C/S 。

假定 n 个节点均匀而独立随机地分布,在任意一个位置上不可能存在两个以上的节点。一个基本的几何随机图以 $G(n, p(n), r(n))$ 表示,其中 $p(n)$ 是节点保持活动状态的概率, $r(n)$ 是节点的传播距离。所有节点的这两个参数都一致。

定义 1 如果网络中的任意两个节点之间都存在一条通信路径(可以是多跳),就称网络是连通的。如果每两个节点之间存在相互独立(也就是不相交)的 k 条路径,则称网络为 k 重连通的。

如果网络连通的概率 $P(k\text{con}) \geq 0.95$,就称网络是几乎确定($a.s$) k 重连通的。

定义 2 如果网络中的任意一个节点都处于一个活动节点的通信范围内,就称网络是覆盖的。

定义 3 与某个节点 u 直接连通的节点数目,也就是其邻居数目,称为节点的度,用 $d(u)$ 表示。如果 $d(u) = 0$,说明其没有邻居节点,称为孤立节点。

最小节点度是网络中所有节点度的最小值。

$$d_{\min}(G) = \min_u \{d(u)\}$$

2 连通的临界条件

定理 一个无线传感器网络区域 S , 内含 n 个均匀分布的节点,密度为 $\rho = n/S$ 。不考虑边界效应,为了使得网络中没有孤立节点的概率至少为 P_1 ,所需要的节点最小传播距离 r_1 (临界传播距离) 为

$$r_1 \geq \sqrt{\frac{-\ln(1 - P_1^{1/n})}{\rho}} \quad (1)$$

同样,为了使得网络二重连通的概率至少为 P_2 ,所需的临界传播距离必须满足

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{W_{-1}((P_2^{1/n} - 1)e^{-1}) + 1}{\rho}} \quad (2)$$

其中 Lambert 函数 W_{-1} 定义: $W(x)e^{W(x)} = x$ 。

证明 每个节点的度的概率分布为

$$P(d = i) = \binom{n-1}{i} \left(\frac{r^2}{n-1}\right)^i \left(1 - \frac{r^2}{n-1}\right)^{n-1-i} \frac{(\rho r^2)^i}{i!} e^{-\rho r^2} \quad (3)$$

由于这些概率分布都几乎相互独立,故节点最小度的概率边界满足

$$P(d_{\min} \geq k) = \left[1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\rho r^2)^i}{i!} \cdot e^{-\rho r^2}\right]^n \quad (4)$$

$d_{\min} \geq k$ 是网络 k 重连通的必要但非充分条件。在 n 足够大的时候,可以使得网络以接近于 1 的概率保持 k 重连通,故

$$P(\text{网络 } k \text{ 重连通}) \cong P(d_{\min} \geq k) \quad (5)$$

分别令 $k = 1, 2$, 结合(4)、(5),便可得到一重、二重连通的临界传播距离,如(1)、(2)。

推论 1 一个网络没有孤立节点的概率为

$$P(d_{\min} > 0) = (1 - e^{-\rho r_0^2})^n$$

推论 2 $P(\text{网络不连通}) \geq 1 - P(d_{\min} > 0)$

3 覆盖的临界条件

下面推导网络保持覆盖的条件。由于二维全覆盖概率难以显式表达,本文讨论随着节点数目趋于无限大时的渐进覆盖情况。 n 个节点均匀随机分布在单位正方形区域 1×1 内,节点处于活动状态的概率为 $p(n)$,传播距离为 $r(n)$ 。为了获得紧凑的条件结论,我们取通信圆的内接正方形作为每个节点的通信覆盖范围。

3.1 覆盖的必要条件

如图 1 所示,单位正方形区域网格内的小正方形个数为 $\frac{1}{2r^2(n)}$, 每个小正方形面积为 $2r^2(n)$ 。令每个小正方形内至少有一个活动节点的概率为 $P_a(n)$, 网络覆盖的概率为 $P_c(n)$ 。显然

$$P_c(n) \leq P_a(n) \leq [1 - (1 - p(n))^{2r^2(n)n}]^{\frac{1}{2r^2(n)}} = [1 - e^{-2r^2(n)n(1-p(n))}]^{\frac{1}{2r^2(n)}} \leq \exp\left[-\frac{e^{-2r^2(n)n(1-p(n))}}{2r^2(n)}\right]$$

此处应用了当 $0 < p < 1$ 时 $1 - p < e^{-p}$ 的结论。

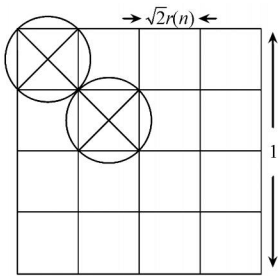


图 1 覆盖的必要条件

定义 $c(n) = \frac{nr^2(n)}{\ln(n)}$ 。显然对于 n 时 $P_a(n)$

1 的必要条件是

$$2r^2(n) \cdot e^{-2r^2(n)n(1-p(n))} \cdot n$$

$$\text{即 } 2c(n)\ln(n) \cdot n^{-2c(n)\ln(1-p(n)) - 1} \cdot n$$

因此网络覆盖的必要条件为

$$p(n)r^2(n) \geq \frac{p(n)}{-2\ln(1-p(n))} \cdot \frac{\ln(n)}{n} \quad (6)$$

3.2 覆盖的充分条件

如图 2 所示,假定每个小正方形里均有一个活动节点。考察 4 个活动节点 A, B, C, D 都相距最远的极端情况。活动节点之间最远距离如果不大于节点的传播距离,就可以保证这两个小正方形中任意点之间都可以连通,同时自然也就是覆盖的。于是覆盖的充分条件就是要求

$$AD = \sqrt{2}(\sqrt{2} + 2)r(n) \leq r(n)$$

$$\text{即 } \sqrt{2} + 2 \leq \frac{\sqrt{2}}{2}。显然 0 < \frac{\sqrt{2}}{2} < \frac{\sqrt{2}}{4} \approx 0.35。$$

$P_s = P(\text{每个小正方形中至少有一个活动节点}) \geq$

$$1 - \left[\frac{1}{r(n)}\right]^2 \cdot [1 - p(n)]^{4 \cdot 2r^2(n)n} \geq$$

$$1 - \left[\frac{1}{r(n)}\right]^2 \cdot e^{-p(n) \cdot 4 \cdot 2r^2(n)n}$$

为了使 $P_s \rightarrow 1$, 令

$$\left[\frac{1}{r(n)}\right]^2 \cdot e^{-p(n) \cdot 4 \cdot 2r^2(n)n} \rightarrow 0$$

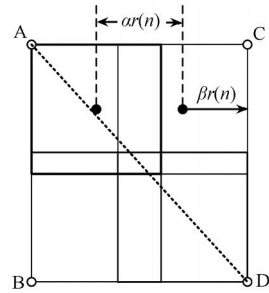


图 2 覆盖的充分条件

根据 $c(n) = \frac{nr^2(n)}{\ln(n)}$, 转化为

$$\frac{n^{1-4 \cdot 2c(n)p(n)}}{2c(n)\ln(n)} \rightarrow 0$$

所以网络覆盖的充分条件为

$$p(n)r^2(n) \geq \frac{1}{4} \cdot \frac{\ln(n)}{n} \quad (7)$$

根据式(6)、式(7), 可见充要条件与必要条件实际上就是网络覆盖概率函数的上界与下界。

4 仿真实验

4.1 网络的连通条件

实验场景为 2000×2000 的正方形区域网络, 考察不同的节点总数以及传播距离对于网络连通概率的影响, 如图 3 所示。当节点数较少为 200 时, 如果节点传播距离足够大为 230 m, 网络连通概率高达 95%, 而利用式(1)的理论计算值为 229.4 m。另一方面, 限定传播距离仅为 120 m, 如果要求网络中没有孤立节点, 则所需节点数多达 1000, 而利用式(4)计算, 在网络节点数为 1000 时, 要使得网络连通的概率为 99%, 所需最小传播距离为 121 m。由此说明本文的结论可以给出紧凑的理论值。在网络规模扩大后, 需要更远的射频传播距离以及更多的节点来保持连通。

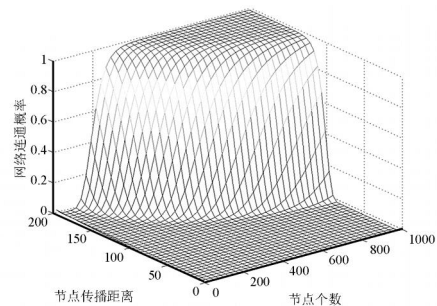


图 3 一重连通概率与节点数量及传播距离的关系

下面集中讨论节点传播距离对于节点最小度的影响。取节点个数为 1000, 如图 4 所示, 为了使得网络几乎确定连通, 传播距离必须至少为 113 m 才能保证网络没有孤立节点。利用式(1)计算, 在传播

距离分别为 112 m 和 114 m 时,网络连通概率分别为 93.2 %和 96.7 %。为了达到 2、3 重连通,传播距离应该分别增加到 126 m、137 m。在传播距离增加的时候,连通概率从 0 迅速上升至 1,增加速度远远超过传播距离的增加。例如,在传播距离为 80 m 时,网络几乎不连通,但是当增加到 110 m 时,网络几乎确定连通。这符合随机图论中的阶跃效应。同样的,在固定传播距离,而增加节点密度时,也会出现类似的阶跃效应。

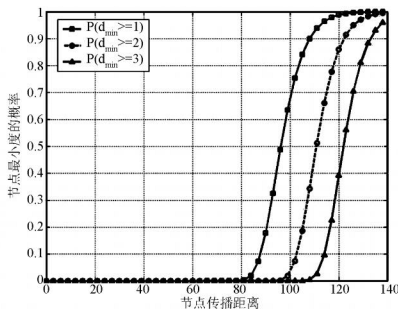


图 4 传播距离对节点最小度的影响

4.2 网络的覆盖条件

在一个网络内随机均匀分布了 25 ×25 个节点,变换节点维持活动状态的概率 $p(n)$,要求以不低于 0.95 的概率保持网络覆盖,则节点的传播距离应该为多少?我们用单个节点传播覆盖范围内(就是 $2r^2(n)$)的节点数占整个网络节点总数的比例来表示对于节点传播距离的要求。如图 5 所示,在节点活动概率为 0.5 的时候,每个节点的覆盖范围内必须包含全部节点数目的 36 %,为 225 个。取 $\alpha = 0.3$,用式(6)和式(7)计算出的充分条件与必要条件值分别为 221 和 10。可见理论值与实验值误差很小。

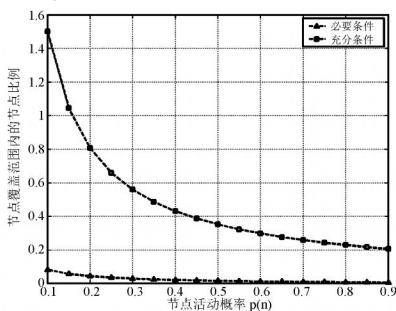


图 5 覆盖的充分条件与必要条件对比(25 ×25 个节点)

图 6 中的节点数目增多到 100 ×100,相应的每个节点覆盖范围内的节点数就只需要总数的 2.7 %,也就是 270 个。当增加节点数目时,网络节点密度增大,对于每个活动节点所需功耗的要求(也就是对传播距离的要求)相应降低,而且降低的速度比节点数目增加的速度快,因此网络所需的总功耗减少了。

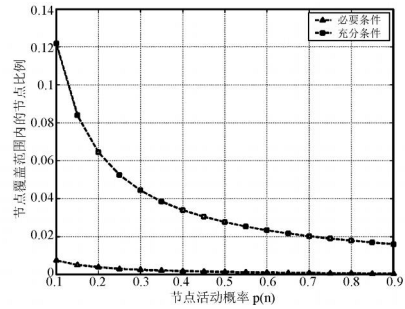


图 6 覆盖的充分条件与必要条件对比(100 ×100 个节点)

5 结论

连通与覆盖问题要解决的就是:用尽可能少的活动节点和尽可能小的能量代价来监测目标,达到延长网络生存期的目的。本文说明对于包含 n 个节点的传感器网络区域,为了确保网络是覆盖的并且活动节点之间是连通的,必须满足的条件是 $p(n) r^2(n) \sim \frac{\ln(n)}{n}$,并且给出了对于节点传播能力以及网络节点数目的临界要求。只要节点数目足够大,每个节点就可以高度独立,并且可以在传播功耗非常小的条件下实现网络的连通覆盖。

未来将对不均匀不规则的网络、节点传播不一致等复杂情况下的连通覆盖进行深入研究。

参考文献:

- [1] Christian Bettstetter. On the Connectivity of Wireless Multi-hop Networks with Homogeneous and Inhomogeneous Range Assignment [C]// Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC), Sept 2002.
- [2] Bogdan, A Grama. Redundancy and Coverage Detection in Sensor Networks[J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2006, 2 (1) :94-128.
- [3] Huang C-F, Tseng Y-C. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network [C]// WSN03, September 19, 2003, San Diego. CA. 2003.
- [4] Zhang H, Hou J C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks[J]. International Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, 2005, 1(1-2) : 89-123.
- [5] Paolo, Douglas M. Blough. The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks [C]// IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003, 2(1).
- [6] Jiang Jie, Fang Li. An Algorithm for Minimal Connected Cover Set Problem in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(2) :175-184.
- [7] Di T, Georganas N D. Connectivity Maintenance and Coverage Preservation in Wireless Sensor Networks [C]// Electrical and Computer Engineering, May 2004.
- [8] 向满天,史浩山,李立宏.一种基于连通度的无线传感器网络节点定位算法.传感技术学报[J],2007,20(10) :2308-2312.

- [9] 刘巍, 崔莉, 黄长城. EasiFCCT:一种保证连通性的传感器网络局部覆盖算法. 计算机研究与发展[J], 2008, 45(1):196-204.



向满天(1977-),男,湖北恩施人,西北工业大学电子信息学院博士研究生,主要研究领域为计算机网络、无线传感器网络理论及应用等。现致力于无线传感器网络及自组织网络的定位技术研究, sosmt @163. com



李立宏(1970-),男,湖北武汉人,博士,高工/教授,硕士生导师。主要从事嵌入式软件平台、无线传感器网络、手机终端、增值业务等领域的研究,近年来发表研究论文 30 余篇, li. lihong @ztenc. com. cn



史浩山(1946-),男,河南开封人,西北工业大学教授,博士生导师,主要研究领域为数据通信与计算机网络、多媒体通信、网络信息处理等, shilaoshi @nwpu. edu. cn

www.cnki.net