

无线传感器网络节点随机配置的覆盖和连通研究

黄刘生^{1,2}, 张 波¹, 徐宏力¹, 张俊霞¹

(1. 中国科技大学 计算机科学技术系, 安徽 合肥 230027;

2. 安徽省计算与通讯软件重点实验室, 安徽 合肥 230027)

(bzhang_1977@sina.com)

摘 要:节点配置是无线传感器网络研究的核心问题之一。为实现传感器节点的配置,随机散布方式被广泛地采用。主要研究了无线传感器网络节点随机配置的完全覆盖和连通问题。通过对网络完全覆盖和连通的分析,给出完全覆盖概率、检测半径和节点数目之间的定量关系;分析了参数对配置的影响,对比高斯分布和均匀分布的配置特性,以指导传感器网络的节点放置。提出了完全覆盖径向连通的配置方案来优化传感器节点数目,从而降低网络的配置代价。最后,利用模拟仿真试验来评定结论。

关键词:无线传感器网络;随机配置;完全覆盖;连通

中图分类号: TN915.01; TP393 **文献标识码:** A

Research of coverage and connectivity with sensor random deployment

HUANG Liu-sheng^{1,2}, ZHANG Bo¹, XU Hong-li¹, ZHANG Jun-xia¹

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Software in Computing and Communication, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: Sensor deployment is a critical issue in a wireless sensor network. Random diffusion is widely applied to sensor nodes deployment, for example Gauss diffusion and uniform diffusion. The network's coverage and connectivity were discussed on base of random placement. By analyzing full coverage and connectivity, an expression was presented which reflected the relationship among the probability of the full coverage, the range of detection and the number of sensor nodes. Furthermore, the effect of parameters on the probability of full coverage was addressed, compared with the effects of Gauss diffusion and uniform diffusion. In addition, a scheme was proposed to optimize the number of nodes, named "full coverage and radial connectivity". At the end experiment results are given to display our application.

Key words: wireless sensor network; random deployment; full coverage; connectivity

0 引言

无线传感器网络由大量传感器节点组成,通常它们被密集地布置在要测量环境或非常接近要测量的环境中,获取所需的数据信息。无线传感器网络节点配置是传感器网络研究的核心问题之一,它直接影响无线传感器网络代价和服务质量,如探测能力。由于客观条件的限制有些环境是“不可达”的,如恶劣的地形、灾难地域或敌方控制的军事区等。因此,随机放置将是一种首选的、广泛运用的传感器节点配置方式。

有关无线传感器网络节点配置的研究较多集中在确定性配置^[1],而对随机配置的研究则相对较少。文献[2]作者讨论了均匀随机配置连通性的充要条件。在文献[3]中,作者研究了基于不可靠传感器节点的网格覆盖和连通性。由于采取随机配置,根本无法预先确保网络覆盖和连通性能。本文则主要探讨了区域完全覆盖率和连通性与投放节点数目之间的定量关系、节点配置策略、配置参数的优化设置等问题,并比较了两种典型的随机配置(高斯分布和均匀分布)的网络覆盖和连通特性,从而指导网络节点的布置。

1 网络的完全覆盖和连通

1.1 完全覆盖的条件

如果点 i 在传感器节点 j 的探测范围内,称点 i 被节点 j 覆盖。若被覆盖区域中任意一点至少被一个传感器节点所覆盖,则该区域是完全覆盖的。从几何关系来看,把探测区域划分为若干个三角形区域,传感器节点置于每个三角形的顶点处,确保完全覆盖探测区域的充分条件就是,节点间距至多为 $\sqrt{3}r_s$, r_s 为节点的探测范围(如图1(a))。在此,把探测区域看作是由若干个边长为 αr_s 的等边三角形无缝拼接而成。构造以三角形顶点为圆心,以 βr_s 为半径的一组圆形区域。假定,在每个圆内存在一个传感器节点,传感器节点 p_1 在圆 R_1 内,传感器节点 p_2 在圆 R_2 内,传感器节点 p_3 在圆 R_3 内(如图1(b))。有:
 $d_{p_1 p_2} \leq d_{p_2 R_2} + d_{p_1 R_1} + \alpha r_s$, d_{ij} 表示点 i 与点 j 之间的距离。

$$d_{p_1 R_1} \leq \beta r_s, d_{p_2 R_2} \leq \beta r_s, d_{p_1 p_2} \leq 2\beta r_s + \alpha r_s$$

$$2\beta r_s + \alpha r_s \leq \sqrt{3}r_s \Rightarrow d_{p_1 p_2} \leq \sqrt{3}r_s$$

同理有 $d_{p_2 p_3} \leq \sqrt{3}r_s$, $d_{p_1 p_3} \leq \sqrt{3}r_s$ 。所以该区域可被节点完全覆盖。

收稿日期:2006-05-30;修订日期:2006-09-26 基金项目:国家发展与改革委员会资助项目(CNGI-04-10-2A)

作者简介:黄刘生(1957-),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,主要研究方向:分布式算法、并行分布式系统、信息安全; 张波(1977-),男,黑龙江海伦人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 徐宏力(1977-),男,江苏常州人,博士研究生,主要研究方向:软件工具与环境、无线传感器网络; 张俊霞(1972-),男,安徽合肥人,讲师,硕士,主要研究方向:计算机体系结构。

因此,得到如下结论:由若干个边长为 αr_s 的等边三角形无缝拼接成的区域,完全覆盖的充分条件是,以各顶点为圆心,以 βr_s 半径的每个圆内至少存在一个传感器节点,且满足 $\alpha + 2\beta \leq \sqrt{3}$ 。

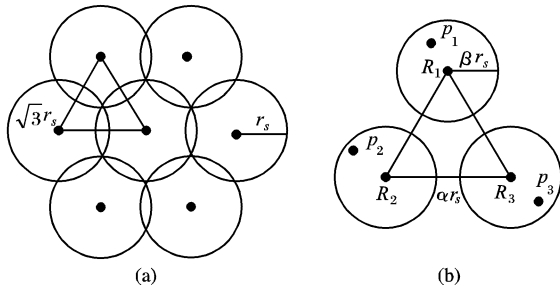


图1 最小重叠完全覆盖

1.2 连通性分析

类似于完全覆盖,我们得出由若干个边长为 αr_c 的等边三角形无缝拼接成的区域,网络连通的充分条件是,以各顶点为圆心,以 βr_c 半径的每个圆内至少存在一个传感器节点,且满足 $\alpha + 2\beta \leq 1$ 。

同时得到网络连通且完全覆盖的条件:当 $r_c \geq \sqrt{3}r_s$ 完全覆盖可确保连通;当 $r_c < \sqrt{3}r_s$ 连通可确保完全覆盖。

1.3 完全覆盖概率

$$p(n) = p(\text{there is at least one node in each circle } i) \\ = p_r(\cap_i C_i) = p_r(C_1)^k \quad (1)$$

k 是确保完全覆盖,目标区域内半径为 βr_s 的圆数目的最小值; C_i 表示事件(至少要一个节点落入圆 i)。

2 随机分布完全覆盖

2.1 高斯(正态)分布

高斯分布联合密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} h(\|x - c\|), \quad h(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

节点落入半径为 r 圆内的概率为:

$$p_c(r) = F(r) = \int_0^r f(x) x dx = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

至少有一个节点的概率:

$$p_r(C_1) = 1 - (1 - p_c(r))^n \quad (4)$$

n 为在该圆内放置的节点数目。这里研究的高斯分布的配置方案是经过多次配置完全的。也就是说第 i 次配置 n 个节点服从均数 c_i 的密度函数,第 k 次配置 n 个节点服从均数 c_k 的密度函数,那么配置节点的总数为 nk 。其中,均数 c_i 为三角形顶点的位置。

区域内的圆与等边三角形的顶点是一一对应的,圆的数目可以通过近似地估算整个探测区域(面积为 S)内等边三角形个数来得到。每个三角形对应 3 个顶点,每个顶点对应 6 个三角形。圆的数目约为三角形个数的 $1/2$ 。由此得到, $k \approx \frac{2\sqrt{3}S}{3\alpha^2 r_s^2}$ 。

高斯分布完全覆盖概率为:

$$p(n) = p_r(C_1)^k = \left(1 - \exp\left(-\frac{(\beta r_s)^2}{2\sigma^2}\right)n\right)^{\frac{2\sqrt{3}S}{3\alpha^2 r_s^2}} \quad (5)$$

其中 $\alpha + \beta \leq \sqrt{3}$,进而得到:

$$n = \frac{\log\left(1 - p(n)^{\frac{\sqrt{3}\alpha^2 r_s^2}{2S}}\right)}{\left(-\frac{(\beta r_s)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

把(6)式看作是 $n = f(\alpha)$,即关于 α 的函数,当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, $f(\alpha) \rightarrow \infty$;当 $\alpha \rightarrow \sqrt{3}$ 时, $f(\alpha) \rightarrow \infty$ 。所以, $f(\alpha)$ 在区间 $(0, \sqrt{3})$ 内存在一个最小值。由于 α 的取值直接关系到式(2)中 c 的值,在实际的配置过程中要充分地注意到这一点。同时 $f(\alpha)$ 的值也受标准差的影响,假若 $p(n)$ 确定, σ 越大,所需节点数目越多。为此,在配置时要优先选择标准差较小的散布策略。

2.2 均匀分布

均匀分布的密度函数 $f(x) = 1/|A|$, $|A|$ 为区域 A 的面积,每个节点落入圆内的概率为 $\pi\beta^2 r_s^2/S$ 。当配置的节点数目 N 较大时, $p_r(C_1) = 1 - \exp(-\lambda)$,其中 $\lambda = \pi N \beta^2 r_s^2/S$ 。均匀分布的完全覆盖概率为:

$$p(N) = \left(1 - \exp\left(-\frac{N\pi\beta^2 r_s^2}{S}\right)\right)^{\frac{2\sqrt{3}S}{3\alpha^2 r_s^2}} \quad (7)$$

2.3 完全覆盖的充分条件

完全覆盖的充分条件是指当节点数目 N 足够大时,完全覆盖率趋近于 1 的充分条件。在此,仅以均匀分布为例,采用与文献[2,3]中类似的方法,得到完全覆盖的充分条件。

假设 $C(N)$ 满足 $r_s^2 \geq C(N) \frac{S \log N}{\pi N}$,那么有:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sup C(N) = \infty$$

$$p(N) > \left(A = \left(1 - \frac{1}{N^{\frac{2\pi\sqrt{3}N\beta^2}{3\alpha^2 N\beta^2 - 1 \log N}}}\right)\right)$$

$$c(N) > \frac{1}{\beta^2} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} A = 1$$

$$r_s^2 > \frac{4S \log N}{3\pi N} \quad (8)$$

这就意味着, N 足够大且满足不等式(8)时,完全覆盖概率可以趋近于 1。

2.4 高斯分布和均匀分布的比较

对于高斯和均匀分布要达到相同的完全覆盖率即 $N = nS/2\pi\sigma^2$,欲使高斯分布比均匀分布更加有效率,即达到相同的完全覆盖率所需的节点数目较少。有 $N \geq \frac{2\sqrt{3}S}{3\alpha^2 r_s^2} \Rightarrow r_s^2 \geq \frac{4\pi\sqrt{3}}{3\beta^2} \sigma^2$,由于 $\beta < \sqrt{3}$,所以其必要条件是 $r_s^2 \geq \frac{4\pi\sqrt{3}}{9} \sigma^2$ 。

3 完全覆盖径向连通

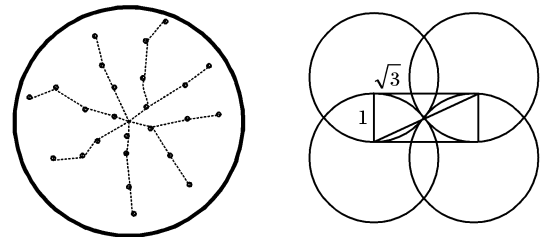


图2 完全覆盖径向连通

从能量效率的观点来看,传感器节点星形配置是能量有效的^[4]。据此,提出完全覆盖径径向连通节点配置策略,它可以很好地实现应用需求,在划分子区域时,近似地用矩形对覆盖区域进行分割。考虑在轴向上满足 $\alpha + 2\beta \leq \sqrt{3}$,而在径向上只要满足 $\alpha + 2\beta \leq 1$,即可实现网络的完全覆盖和径向连通。这样,子区域可以看作是一个 $(1 - 2\beta)r_s \times (\sqrt{3} - 2\beta)r_s$ (边长 \times 边长)的矩形(图2)。

矩形区域的面积 $S_1 = (1 - 2\beta)(\sqrt{3} - 2\beta)r_c^2$, 根据圆的数目与矩形数目的——对应关系, 得到 $k \approx S/S_1$ 。此时, 可以方便地写出两种随机分布完全覆盖径向连通的概率公式。

4 实验及分析

4.1 随机配置节点数目和探测半径

S 设置为 1000×1000 , $\sigma = 10$, $\alpha = 0.5$ 。完全覆盖概率为 0.95, 图 3 显示了节点数目随探测半径的变化情况。当探测半径减少时, 达到期望完全覆盖概率, 所要配置的节点数目迅速增加。也可以看出当满足 $r_s^2 \geq \frac{4\pi\sqrt{3}}{3\beta^2}\sigma^2$, $r_s \approx 53.8$ 时, 高斯分布更加有效。

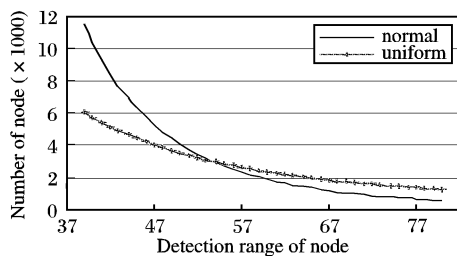


图3 探测范围与节点数目关系

4.2 完全覆盖概率与节点数量的关系

S 设置为 1000×1000 , 传感器探测范围为 50, $\sigma = 10$, $\alpha = 0.7$ 。图 4 显示了完全覆盖概率随节点数目的变化。通过适当的增加节点数目也可有效提高完全覆盖概率, 增加节点的探测距离同样可以提高网络的覆盖率。在配置时, 不妨考虑以网络成本作为评价函数来优化传感器设计。

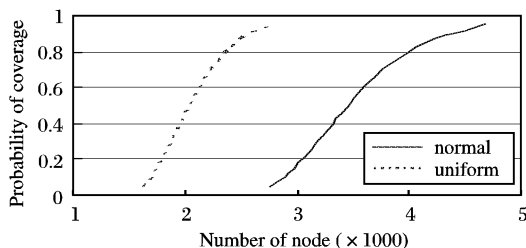


图4 完全覆盖率与节点数目关系

4.3 配置参数选择

S 设置为 1000×1000 , 传感器探测范围为 50, $\sigma = 10$, 完全覆盖概率为 0.95。在概率公式中, 参数 α 取值对所需配置的传感器节点数目影响很大。但是在均匀分布中 α 值对具体的配置并无实质性的影响; 而高斯随机分布使密度函数中的均数 c 是随 α 值变化的。

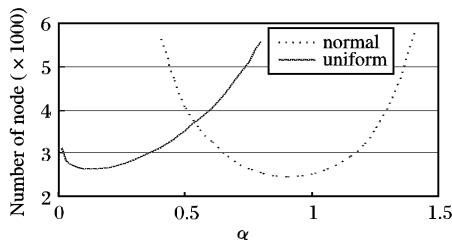


图5 参数 α 对完全覆盖率影响

4.4 径向连通的优化程度

S 设置为 1000×1000 , $\sigma = 10$, $\beta = 0.2$, 完全覆盖概率为 0.95。假设节点的探测范围和通信范围相同, 比较完全覆盖连通、完全覆盖径向连通以及完全覆盖三种配置策略的效率。完全覆盖径向连通, 既有效地节约了传感器节点又很好地满足了网络的需求。图 6 显示了完全覆盖径向连通对网络配

置效率的优化。

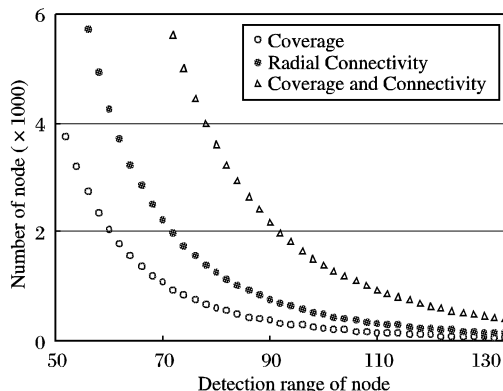


图6 径向连通的优化比较

5 结语

本文以完全覆盖概率为出发点, 探讨了网络的覆盖和连通的相关问题, 得到高斯分布和均匀分布的完全覆盖的概率表达式, 在此基础上比较两种分布的性能, 分析参数对覆盖的影响, 得出完全覆盖的充分条件。提出了一种完全覆盖径向连通配置方案, 在很大程度上提高了配置效率。

参考文献:

- [1] DHILLON SS, CHAKRABARTY K, IYENGAR S. Sensor Placement for Grid Coverage under Imprecise Detections [A]. Proceedings of International Conference on Information Fusion [C], 2002.
- [2] GUPTA P, KUMAR PR. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks [A]. MCENEANY WM, YIN G, ZHANG Q, ed. Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications [C]. Boston: Birkhauser, 1998. 547 - 566.
- [3] SHAKKOTTAI S, SRIKANT R, SHROFF N. Unreliable sensor grids: coverage, connectivity and diameter [A]. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. 2003. 2. 1073 - 1083.
- [4] CHENG P, CHUAH C-N, LIU X. Energy-aware node placement in wireless sensor networks [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C], 2004. 5. 3210 - 3214.

2006 中国计算机大会在京举行

由全国最大的计算机专业学术组织——中国计算机学会主办的“中国计算机事业创建五十周年纪念会暨 2006 中国计算机大会 (CNCC06)”于 2006 年 10 月 26 ~ 27 日在北京新世纪日航饭店举行, 会议的主题是“计算机改善人类生活”。

从 1956 年到 2006 年, 中国计算机事业整整走过了五十个春秋, 实现了从科研型向产业型、从主要服务于国防建设到全方位服务于国民经济建设、从内向型向国际化的“三大转变”。为总结我国五十年来计算机发展的经验和教训、展望未来的发展方向、以创新精神带动科研、教育、产业及应用, 用科技成果提升生产力, 用计算机改善人类生活, 在科学技术部、信息产业部、教育部和中国科学院支持下, 中国计算机学会等单位联合举办“中国计算机事业创建五十周年纪念会暨 2006 中国计算机大会”。

更多新闻背景资料请查看: 中国计算机学会网站
<http://www.ccf.org.cn>