

无线传感器网络覆盖性能研究

郭小清 谢忠红

(南京农业大学信息科技学院 南京 210095)

摘要 针对无线传感器网络的覆盖性能问题,已有研究大都集中于节点的优化放置、定位等内容,对在复杂环境中评价指标的量化关注较少。首先分析影响覆盖性能的主要因素;然后对数据融合模型及策略进行讨论,找到模型选择的依据;接着从理论的角度探讨采用数据融合方式下的覆盖性能评价及两者之间的关系,发现融合范围与覆盖范围和网络密度的关系。应用环境相关的最优融合范围可以通过试验取经验值或者通过分析推导出近似解。

关键词 数据融合,无线传感器网络,覆盖,连通

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Research on Coverage Performance in Wireless Sensor Network

GUO Xiao-qing XIE Zhong-hong

(College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract To address coverage performance of wireless sensor networks issues, most studies have focused on the optimization of node placement, positioning, etc., in a complex environment, pay less attention to the quantitative evaluation. The paper first analyzed the performance of the main factors affecting coverage. Secondly, the data fusion model and strategy were discussed to find a basis for model selection. Then from a theoretical point of view of the use of data fusion performance evaluation of the coverage under way and the relationship between the two, found integration of range and network density and coverage relationship, an optimal integration of environment-related application range can be obtained by experiment or experience derived through the analysis of the approximate solution.

Keywords Data fusion, Wireless sensor network, Coverage, Connectivity

1 引言

传感器网络中的传感节点通常能量有限,解决这个问题可以从硬件和软件设计两个角度考虑。覆盖和连通问题的解决可以促进传感器网络节能技术的发展,覆盖通常包括以下方面^[1]:(1)如何评价某个部署了传感节点监控区域的覆盖性能;(2)如何改善某个不能有效满足应用需求的传感器网络的覆盖性能。

国内外的研究者们已经对覆盖问题进行了一些探讨,提出了很多算法。部分研究^[2]关注网络对应用的自适应需求,结合覆盖性能综合考虑。部分研究解决覆盖问题只关注特定的应用需求(如网络连通性)^[3,4]。文献^[5-9]分析了大规模 WSN 中的传感覆盖性能问题,但都是基于简单的传感模型,即一个传感节点的感知范围是以 r 为感知半径的圆,这种模型很难捕获感知目标的随机特性。

本文首先总结了 WSN 中覆盖性能相关的因素,然后讨论采用分布式数据融合模型的优势,寻找其与网络密度、覆盖范围之间的基本关系,以期通过与感知模型协作的覆盖性能分析,理解已有机制的不足,优化采用融合机制的 WSN 设计。

2 与覆盖性能相关的因素

覆盖是指网络中的任何欲控物理区域都能被至少一个节点感知,故性能评价可以通过覆盖范围、感知节点数(达到全局覆盖所需的最少节点)和目标感知概率(发现处于两个节点之间的目标的概率)等指标进行。与这些指标相关的因素很多,下面列出一些重要的条件:

(1)感知模型(传感节点感知目标的方式):有确定式和概率式两种。在确定式感知模型中,感知节点只能发现设定范围内的目标和事件。这种方式下网络设计简单且易管理,计算覆盖性能指标比较容易,但是若目标被遮挡或变化则无法被感知。在概率式感知模型中,感知对象的移动、感知距离可以是随机的,感知节点以概率方式发现目标。这种方式适合大规模 WSN,对覆盖性能的评价影响较大。

(2)感知节点部署策略(网络中传感节点的部署方式):有随机型和确定型两种。确定型指每个传感节点的位置明确,网络总节点数、活动节点数、休眠节点数清晰。这种方式下覆盖性能评价简单,适合小规模应用需求。随机型指每个传感节点是类似 Poisson 点的独立分布,应用于如大规模环境监测、海底探测、军事等方面,节点位置、网络总规模不确定,节

本文受中央高校基本科研业务费专项基金(KYZ200916)资助。

郭小清(1976—),女,博士,讲师,主要研究方向为感知技术、农业信息化, E-mail: gxqing@njau.edu.cn; 谢忠红(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为机器视觉、农业信息化。

点资源无法或不便补充更换。这种方式下覆盖性能评价较为困难。

(3)信息获取(节点测量数据如何传递到总监控点):有簇集方式、基站方式、星形集中方式等,这个过程也称为数据处理融合。关于数据融合及对覆盖性能的影响将在第3.4节进行详细论证。

(4)节点状态:是否移动、是否激活。传统WSN中的节点为静态的,网络初始化后即知定位信息。即位置不会随着时间的变化发生大的变动,网络的覆盖性能容易估计。随着应用需求的发展,出现了如飞机播撒的微小节点、水下感知节点,此类感知节点的位置是时变的,对网络覆盖性能有较大影响。为了节省能量,WSN中一般会采用活动/休眠来设置节点行为,因为不需要不间断地发送监测数据,这样计算覆盖性能时就会涉及路由、位置等的动态变化问题。

其实还有其它一些因素与覆盖性能相关,如节点感知范围、工作方式(同步 or 异步)、网络结构的鲁棒性和可扩展性等。

3 数据融合模型

3.1 数据融合简介

多传感器数据融合是指:充分利用不同时间不同空间的节点资源数据,采用计算机技术对按时间序列获得的多传感器观测数据,在一定准则下进行分析、综合、支配和使用,获得对被测对象的一致性解释与描述,进而实现相应的决策和估计,使系统获得比其它组成部分更充分的信息。数据融合是减少节点间数据通信量、节约能量的有效手段,实现模型可概括为两大类:集中式和分布式。

分布式数据融合模型指:本地节点根据测量数据做出决策然后上传,上层节点再根据汇总的下层决策给出结果。集中式数据融合模型指:终端节点把测量值直接上传,然后上层节点根据接收到的测量值做出决策。后者做最终决策时考虑到网络性能,所以在很多情况下感知性能优于前者^[10]。

3.2 融合模型选择

传感网络中的噪声是一定存在的,环境中的自然噪声、节点电路产生的噪声,这些都是不可避免的,所以数据融合过程中应考虑噪声。关于数据融合已有很多研究^[11],选择融合算法应以应用特征和需求为依据,选择融合模型要考虑到对噪声的处理,本文选择集中式融合方式,同时结合传输噪声的测量值以期作为上层决策做事实依据。

本文中噪声假设为高斯白噪声。

4 数据融合下的覆盖性能

4.1 问题描述

覆盖性能受诸多因素的影响,评价其优劣需要捕获多种网络参数,通过覆盖范围发现概率表征。上一节描述了采用数据融合手段的有效性,那么它与覆盖性能的关系如何呢?是我们这节要探讨的问题,下面给出文中所用符号的定义:

n_i :节点 i

d_i :节点 i 到感知目标的距离

D_p :网络中位于 p 点的目标被发现的概率

F_p :网络中位于 p 点的目标被错过的概率

w_i :节点 i 的噪声(衰减后的噪声)

x_i :节点 i 的测量值

$F(x)$:标准正态分布的 CDF

R :融合距离

$N(p)$:点 p 融合范围内的感知节点数

T_f :概率感知模型中错报的阈值

T_d :概率感知模型中感知概率的阈值

ρ :网络密度

E :目标发射的能量

C :设定数据融合范围和感知模型后的网络覆盖范围

研究覆盖性能与数据融合的关系,就是要找到覆盖范围、网络密度与融合范围的联系,为此,我们采用如下以测量值作决策依据的融合模型:一个融合距离为 R 的簇,簇头接收到的数据为 $X = \sum_{i \in N(p)} x_i$,若 $X < T_f$,则簇头决策结果为 $Z1$;反之则为 $Z2$, R 的取值对系统节点噪声的传输影响明显。虽然可以通过设置较低的 T_f 获得较高的 D_p ,但是会增加 F_p 的值。

融合中噪声的处理通过以下方式:所有节点噪声的测量通过一个相等的权重常量,这样距离探测目标较远的节点因测量值低于信噪比而不参与数据融合过程。融合范围值成为节点是否能参与簇头决策的重要因素,所以下一小节会分析最优融合范围值的求解。

采用上述融合模型后的系统工作流程如下:

(1)定时或事件驱动探测目标,本文中假定节点位置相对固定,不是移动的;

(2)目标周围融合范围内的节点组成簇,簇头根据接收到的测量值做出决策;

(3)簇头的初始化有很多机制可以参考,如较简单的设置获得最大测量能量的节点为簇头;

(4)融合范围 R 可以作为参数动态设置。

4.2 关系探讨

网络覆盖可以表示为 C ,下面我们探讨 C 的求解。

定理 1 给定 T_f 和 T_d ,采用上述数据融合模型固定部署的网络覆盖范围为:

$$C = P\left(\frac{\sum_{i \in N(p)} x_i}{\sqrt{N(p)}} \geq \sigma(F^{-1}(T_f) - F^{-1}(T_d))\right) \quad (1)$$

证明:当 p 点没有目标时, $X | Z1 = \sum_{i \in N(p)} x_i \sim N(\mu N(p), \sigma^2 N(p))$,则 $F_p = P(X \geq T_d | Z1) = F((T_d - \mu N(p)) / (\sigma \sqrt{n(p)}))$ 。设 $F_p = T_f$,则最优阈值为 $T_o = \mu N(p) + \sigma F^{-1}(T_f) \sqrt{N(p)}$ 。当 p 点出现目标时,则 $X | Z2 = \sum_{i \in N(p)} x_i + w_i \sim N(\mu N(p) + \sum_{i \in N(p)} x_i, \sigma^2 N(p))$,有 $D_p = P(X \geq T_d | Z2) = F((T_d - \mu N(p) - \sum_{i \in N(p)} x_i) / (\sigma \sqrt{n(p)}))$,则 $D_p \geq T_d$ 时,有

$$\left(\sum_{i \in N(p)} x_i / \sqrt{N(p)}\right) \geq \sigma(F^{-1}(T_f) - F^{-1}(T_d)) \quad (2)$$

由于随机网络处于稳态,得证。

式(1)中 $(\sum_{i \in N(p)} x_i) / \sqrt{N(p)}$ 的 cdf 求解较为困难,所以给出它的近似解。

定理 2 给定融合模型、任意点 p 的均值 μ_x 、方差 σ_x^2 ,则采用上述数据融合模型固定部署的网络覆盖范围 $C = F\left(\frac{((F^{-1}(T_f)\sigma - F^{-1}(T_d))\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma^2})/\mu_x - \rho R^2}{\sqrt{\rho R^2}}\right)$ 。

证明:因为感知节点的独立同分布, $\{X_i | i \in N(p)\}$ 也为独立同分布。则 $\mu_x = (2x_i/R^2) \int_0^R xw(x)dx$, $\sigma_x^2 = (2x_i^2/R^2) \int_0^R xw^2(x)dx - \mu_x^2$, 依据中心极限定理, $\sum_{i \in N(p)} x_i \sim N(\mu_x N(p), \sigma_x^2 N(p))$, $N(p)$ 一般为常量, 故 $D_p = P(X \geq T_d | Z) \cong F((T_d - \mu_x N(p) - \mu N(p)) / (\sigma \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma^2} \sqrt{N(p)}))$, 用 T_d 代替 T_d , 得证。

上面定理形式化了覆盖范围的求解, 下面探讨网络密度与感知距离、融合范围的关系。

定理 3 网络密度与感知距离、融合范围的关系如下:

$$\rho_f = O(2r^2/R^2 \cdot \rho_d), c \rightarrow 1$$

式中, ρ_d 和 ρ_f 表示圆模型与融合模型下的网络密度。

证明:若 $E \cdot w(R) \cdot \sqrt{N(p)} \geq \sigma(F^{-1}(T_f) - F^{-1}(T_d))$, 则式(2)一定成立, 令 $\Phi(R) = (F^{-1}(T_f) - F^{-1}(T_d))^2 \cdot 1/w(R)$, $C = P(p \in N(p)) \geq P(N \geq \Phi(R)) = 1 - F_p(\Phi(R) | \rho \pi R^2)$, 其中 $F_p(\lambda)$ 是泊松分布的 CDF, 可以通过正态分布 $N(\rho \pi R^2, \rho \pi R^2)$ 近似。让 $f_1(\rho_f) = (\Phi(R)/\sqrt{\pi R}) \cdot 1/\sqrt{\rho_f}$, $f_2(\rho_f) = \sqrt{\pi R}$, 则 $C = F(f_1(\rho_f) - f_2(\rho_f))$, $\lim_{\rho_f \rightarrow \infty} \frac{f_1(\rho_f)}{f_2(\rho_f)} = 0$, 当 $C \rightarrow 1$ 时, $\rho_f \leq x^2/(\pi R^2)$, $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\rho_f}{\rho_d} < \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2/(\pi R^2)}{(1/\pi R^2) \ln F(x)} = -\frac{r^2}{R^2}$, $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2}{\ln F(x)} = -2^{[10]}$, 得证。

4.3 性能分析

在 Matlab 中, 对上述理论推导关系进行了数值化的验证, 图 1 和图 2 分别描述了覆盖范围与所需感知节点数以及采用数据融合方式下融合范围与覆盖范围的关系。

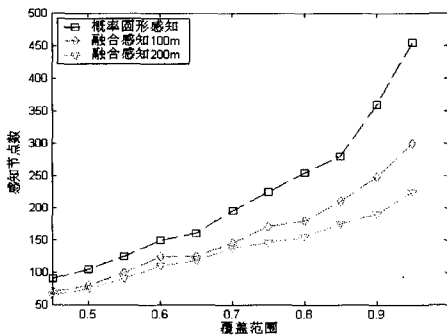


图 1 覆盖范围与所需节点数

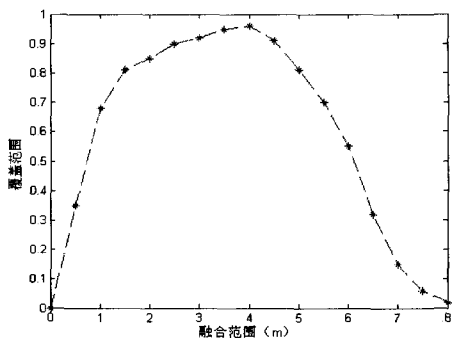


图 2

覆盖范围性能会随着融合范围的增加快速上升, 但是当融合范围增加到某个值时, 覆盖范围会迅速下降甚至趋于 0。这种现象的原因是: 融合范围变大, 更多的节点参与决策, 导致较好的覆盖性能; 但是当融合范围很大时, 目标信号衰减迅速, 即距离低能量目标点很远的节点的感知结果会较差。这就需要寻找一个相对最优的融合范围值, 可以通过数值实验获得一个经验值, 也可以通过分析推导得到一个近似解。

定理 1 和定理 2 说明对大规模传感网络而言, 采取数据融合与直接使用传统二维圆形感知模型相比, 数据融合可以获得较好的覆盖范围, 较低的网络密度。

合适的数据融合可以取得较好的覆盖性能, 但从前面的分析发现基于非本地测量值的决策融合会增加网络的通信负载, 探讨综合考虑覆盖性能和流量约束的最优融合范围是我们下一步的工作。

结束语 感知覆盖是 WSN 中的重要性能指标, 本文从分析与其相关的网络因素着手, 从网络设计和性能评价的角度发现数据融合的必要性和可行性, 尤其指出融合范围与覆盖性能的关系, 这不仅有助于理解已有覆盖机制的不足, 而且为设计适当的数据融合模型提供了思路。

参考文献

- [1] Huang Chi-fu, Chee T Y. The coverage problem in a wireless sensor network[C]//ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications(WDNA). 2003:115-121
- [2] Singh D S, Krishnendu C. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks[J]. Wireless Communications and networking(WCNC), IEEE, 2003(3): 1609-1614
- [3] Adlakh S, Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and networking (WCNC), IEEE, 2003(3):1615-1620
- [4] 蔺智挺. 无线传感器网络若干关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009
- [5] Liu Ben-yuan, Don T. A study on the coverage of large-scale sensor networks [C] // Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2004:475-483
- [6] Liu Ben-yuan, Olivier D, Wang Jie, et al. Strong barrier coverage of wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 9th ACM International symposium on Mobile ad hoc networking and computing MobiHoc. New York: ACM Press, 2008:411-420
- [7] Sanjay S, Rayadurgam S, Shroff Ness B. Unreliable sensor grids: coverage, connectivity and diameter [C] // IFCOMM. 2003:1073-1083
- [8] Santosh K, TenH L, J'ozsef B. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network[J]. Springer, 2008(14):277-294
- [9] Fan Gao-jun, Jin Shi-yao. Coverage problem in wireless sensor network; a survey[J]. Journal of Networks, 2010, 5(9): 1033-1040
- [10] Promod V K, Burrus C S. Distributed detection and data fusion [M]. Springer, 1997:75-78
- [11] 付兴武. 无限传感器网络内数据融合的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 3(7):41-42