

无线传感器网络一维区域随机覆盖研究

赵仕俊^{1,3}, 路嘉鑫², 张朝晖³

(1. 中国石油大学(华东)石油仪器研究所, 山东东营 257061; 2. 四川大学电气信息学院, 四川成都 610064

3. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 研究了一维区域上的无线传感器网络覆盖问题, 首先提出了一维区域上的传感器节点随机覆盖模型并给出了节点覆盖概率计算公式; 其次研究了一维区域上的传感器节点发射半径的确定方法, 理论证明了传感器节点发射半径应大于或等于 2 倍感知半径; 最后讨论了一维区域覆盖数计算方法. 仿真实验表明节点感知半径是影响节点覆盖率和覆盖数的主要参数. 论文的研究结果可作为一维区域上传感器网络设计的技术参考.

关键词: 无线传感器网络; 覆盖模型; 网络节点

中图分类号: TN 925.93 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2010)04-0071-05

Research on Coverage Problems of Wireless Sensor Networks for One-Dimensional Region

ZHAO Shi-jun^{1,3}, LU Jia-xin², ZHANG Zhao-hui³

(1. Research Institute of Petroleum Instruments UPC, Shandong 257061, China

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China

3. Dept. of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083, China)

Abstract The coverage problems of the wireless sensor networks on the one-dimensional region are mainly studied in this paper. Firstly, the one-dimensional random coverage model is processed for the sensor nodes on the one-dimensional monitoring region, and the formula is given to calculate the node covering probability. Secondly, the method of determining the launching radius of the sensor nodes is studied. It is proved theoretically that the launching radius of the sensor node should be greater than or equal to 2 times to the sensing radius. Lastly, the calculation of the covering number is discussed. Simulation results show that the sensing radius of nodes has significant impact on the covering number and the node covering probability. The result of the study can be the technical specification used in the designing of the sensor networks on the one-dimensional region.

Key words wireless sensor networks; coverage model; network node

0 引言

为了保证传感器网络的工作性能, 人们提出了多种基于不同应用场景的无线传感器网络节点部署方法. 这些部署方法通常因传感器节点部署区域几何性质不同而有较大的差异. 为了研究问题的方便, 人们把传感器节点部署区域分为一维长线区域、二维平面区域和三维空间区域. 目前对传感器网络覆盖问题的研究大多集中在二维平面区域的覆盖问题^[1-5], 三维空间区域的覆盖问题也有一些研究^[6-8], 但对一维长线区域传感器网络覆盖问题的研究甚少. 石油天然气长输管线、地下巷道、江河流道、交通线、边界线等的监测, 这类问题可归结为一维长线区域的监测问题. 将无线传感器网络技术应用于一维长线区域的监测是一个经济、可行的解决方案. 因此, 对一维长线区域上无线传感器网络覆盖问题的研究具有重要的理论

收稿日期: 2009-08-24 基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目 (PLC200502).

作者简介: 赵仕俊 (1957-), 男, 博士, 研究员. 主要研究方向: 无线传感器网络应用. E-mail: zsj@mail@163.com

与现实意义.

在二维平面区域覆盖的研究方面, OPTZD 等人^[9]将传感器监测区域分成网格, 引进了发现概率矩阵来决定在哪个网格中放置传感器. AKSELA M 等人^[10]指出, 为了延长系统寿命, 将整个传感器节点集分割成互不相交的子集, 而且每个子集均能覆盖整个区域, 从而可以轮流工作, 算法的目标就是让子集数最大. 计算几何方法经常用来解决覆盖问题. Meguerdichian 等人^[11]首次将计算几何中的 Delaunay 与 Voronoi 方法应用到传感器网络覆盖问题上, 给出了多项式时间内的算法, 并计算覆盖最差的路径和覆盖最好的路径. Zhang Honghai Wang Xiaoru Di Tian 等人^[12-14]从数学上证明了覆盖和连通之间存在的内在联系, 并提出了保证传感器网络覆盖和连通的节点调度策略, 证明了当通信半径大于 2 倍感知半径时, 只要传感器网络充分覆盖了某块区域, 该网络是连通的.

在三维空间曲面区域覆盖的研究方面, 任彦等人^[6]采用计算几何与图论着色方法建立了三维空间的随机最佳覆盖数学模型, 给出了一种分布式启发算法, 得到了完成最佳覆盖的低能量消耗路径. 并在此基础上设计了一种可以实现无线传感器网络三维空间曲面最佳覆盖的优化路由协议. V Ravemanana 和 C F Huang 等人^[7,8]对三维空间曲面的无线传感器网络覆盖情况做了研究, 只是单纯考虑了网络覆盖的连通性, 而没有解决更为复杂的三维随机最佳覆盖问题.

关于一维长线区域覆盖问题的研究, 目前的参考文献非常有限. P. Sant^[15]在讨论 AdHoc 网络的连通性(通信覆盖)时, 对于布置在边界几何尺寸为 l 的区域 $R = [0, l]^d$, $d = 1, 2, 3$ 上的 n 个节点, 给出了节点发射半径的计算公式为 $r_e \approx l\sqrt{d}$, $d = 1, 2, 3$ 又认为若节点随机分布在一条直线上, 则 $r_e \approx \frac{l \log n}{n}$, 由于问题的讨论未考虑节点感知覆盖, 因此其结论对无线传感器网络存在局限性. Mauro Leoncini 等人^[16]在研究无限传感器网络的不完全控制的部署策略时, 讨论了在长度为 l 的直线上, 节点的覆盖率服从标准正态分布, 如果节点覆盖的概率为 q 并且发射半径 $R_e \geq \mathcal{R}_s + (1-q)l$ 则形成的网络是连通的.

节点在一维长线区域上的覆盖应服从均匀分布(另有文章讨论). 因此, 提出一维长线区域上传感器网络的节点随机覆盖模型, 给出其节点覆盖概率计算公式, 讨论传感器节点发射半径和节点覆盖数计算方法成为研究的主要内容.

1 预备知识

1.1 问题假设

研究覆盖问题时, 在不失一般性的前提下为了降低问题的复杂性, 特做出如下假设: 假设 ①无线传感器网络的传感器节点是物理同构的, 即所有传感器节点的感知范围和信号接收能力是一致的, 传感器节点的信号发射功率是均衡的; 假设 ②无线传感器节点的感知模型和通信模型都是圆盘模型, 即传感器节点信号的感知和传播域为圆域; 假设 ③网络中的每个传感器节点知道自己的地理位置信息; 假设 ④传感器信号的感知和传播不受周边地理环境的影响; 假设 ⑤传感器网络部署的区域都是凸区域, 即区域里任何两点的连线完全落在该区域内.

1.2 基本定义

无线传感器网络一维区域覆盖问题的研究, 需要定义以下几个概念.

1) 一维区域. 定义 ①若传感器节点主要是沿线部署即可实现对区域的监测, 监测区域的宽度几乎不影响监测质量, 如长输管线、江河流道、交通线、边界线等的监测, 这一类监测区域称为一维长线监测区域, 简称一维区域.

2) 覆盖率. 定义 ②覆盖率是所有节点覆盖的总长度与目标区域总长度的比值. 其中节点覆盖的总长度取集合概念中的并集.

$$C = \frac{\bigcup_{i=1, \dots, n} L_i}{L} \quad (1)$$

其中 C 代表覆盖率, L_i 表示第 i 个节点的覆盖长度, n 代表节点的数目, L 表示整个目标区域的长度.

覆盖率还可以分为区域覆盖率和节点覆盖率, 上面的定义严格的说是区域覆盖率的定义, 节点覆盖率的定义与其类似.

3) 最小覆盖数. 定义 ③最小覆盖数 (覆盖数) 指无漏洞覆盖目标区域所需要的最少传感器节点数目.

2 一维区域上节点的覆盖分析

2.1 节点的一维随机覆盖概率

根据假设 ①和假设 ②, 节点在一维区域上的随机覆盖模型如图 1 所示, 感知半径为 R_s 的节点分布只能出现图中所示的 A, B, C, D 4 种情形, 可认为 A 情形的覆盖率为 0, D 情形的覆盖率为 $2r/L$, 更一般的是 B, C 情形, 且 B, C 同质, 因此主要讨论 B 情形.

在 B 情形, 一维目标区域的长度为 L , 节点对目标区域的覆盖长度为 L_s . 节点覆盖均匀分布的密度函数为

$$f(r, \theta) = \left| \frac{2}{L} \sin\theta \right| \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 < r \leq R_s \quad (2)$$

因此, 目标监测区域内, 节点的覆盖概率为

$$p(r, \theta) = \iint \frac{2s \sin\theta}{L} dr d\theta = \frac{2r}{L} \cos\theta \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 < r \leq R_s \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 节点在一维长线上部署的覆盖概率不仅与节点的感知半径有关, 还和节点与长线的偏离程度 θ 角有关. θ 角称为节点在一维区域上的覆盖概率角.

当 θ 角为 $\pi/2$ 时, 节点的覆盖概率为 0, 表示 A 情形; 当 θ 角为 0 时, 节点的覆盖概率为 $2r/L$, 表示 D 情形. 所以, 上述一维随机覆盖模型是普适的.

2.2 节点的发射半径

为了保证节点在一维区域上部署时的连通性, 对节点的发射半径可作如下分析. 如图 2 所示, 任意 2 邻居节点感知圆的关系只能是相离、相交和相切 3 种情形. 第一种情形, 当 2 邻居节点感知圆相离时, 中间出现漏洞, 不能完全覆盖区域, 如 H, I 节点. 第 2 种情形, 当 2 邻居节点感知圆相切时, 既不出现漏洞, 也不出现覆盖重叠, 如 C, D 节点. 更一般的情形是第 3 种情形, 即 2 邻居节点感知圆相交的情形, 如 E, F 节点.

在图 2 中, E, F 节点之间的距离为 EF , 设节点的发射半径为 R_c . 显然, 节点的发射半径应满足

$$R_c \geq EF = 2R_s \cos\alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/2 \quad (4)$$

在式 (4) 中, R_c 的最大值为 $2R_s$. 所以, 在一维区域上的节点部署, 只要节点发射半径大于等于 2 倍节点感知半径时, 在保证无漏洞覆盖的条件下, 网络是连通的.

3 一维区域的节点覆盖数

3.1 区域随机覆盖率

随机分布的概率模型假设每个传感器节点能监控整个区域的概率为 p , 所有的传感器节点独立工作, 即相互独立, 则无线传感器网络的覆盖问题可描述为在目标监测区域内, 要部署多少节点才能以一定的区域覆盖概率对这个区域进行监测.

若不考虑节点可能落入边界区域造成覆盖长度的减小, 令 1 个节点的覆盖概率为

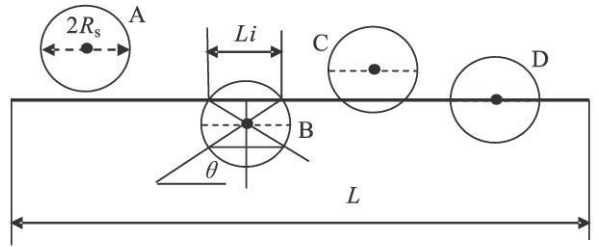


图1 一维区域上的节点随机覆盖
Fig.1 Node random coverage in one-dimensional region

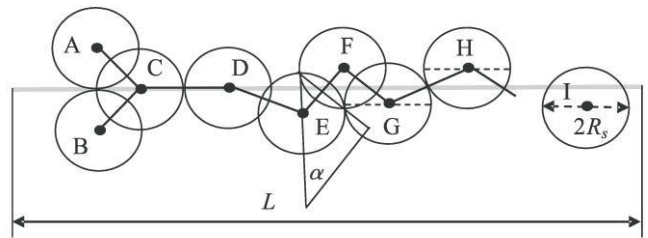


图2 一维长线区域上的节点发射半径
Fig.2 Node launching radius of one-dimensional region

$$P(A) = p$$

2个传感器节点所能监测的覆盖概率为

$$P(A + A) = 1 - (1 - p)^2$$

则, n 个节点的覆盖概率为

$$P(A + A + \dots + A) = 1 - (1 - p)^n \tag{5}$$

所以, 若要保证目标监测区域的覆盖率为 P , 则监测区域内随机部署的传感器的个数为

$$n = \log_{1-p} (1 - P) = \frac{\lg(1 - P)}{\lg(1 - p)} \tag{6}$$

由式(6)可知, 当需求的区域覆盖概率 P 和传感器节点的覆盖概率 p 确定之后, 即可计算满足区域覆盖概率 P 需要部署的传感器节点数。

3.2 覆盖数计算

由上面的分析可知, 在一维目标监测区域内, 感知半径为 R_s 的节点的覆盖概率为

$$p(r, \theta) = \frac{2r}{L} \cos\theta \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 < r \leq R_s \tag{7}$$

可以计算, 一维目标监测区域内节点的平均覆盖概率为

$$p_{avg}(r, \theta) = \frac{2}{\pi L} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{R_s} r \cos\theta dr d\theta = \frac{4R_s}{\pi L} \tag{8}$$

所以, 一维长线上目标监测区域的覆盖数应为

$$n \geq \frac{\lg(1 - P)}{\lg(1 - p_{avg}(r, \theta))} \tag{9}$$

式(9)可用作一维区域上无线传感器网络工程设计的参考。

4 仿真实验分析

设定一维区域长度为 10 000 m, 节点感知半径不大于 100m, 覆盖概率角的变化范围 $0 \sim \pi/2$ 。仿真实验将考察一维长线区域上随机部署时, 节点的覆盖概率和区域覆盖数受节点感知半径和节点覆盖概率角 2 个因素的影响。如图 3 所示, 若节点感知半径较小, 覆盖概率角较小, 节点覆盖概率将会很低; 节点覆盖概率顶点明显向感知半径轴偏移, 说明节点感知半径是影响节点覆盖率的主要因素。如图 4 所示, 取感知半径 $R_s = 10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}, 50\text{m}$, 当覆盖概率角在 $0 \sim \pi/2$ 之间变化时, 覆盖数受感知半径的影响远大于覆盖概率角的影响。

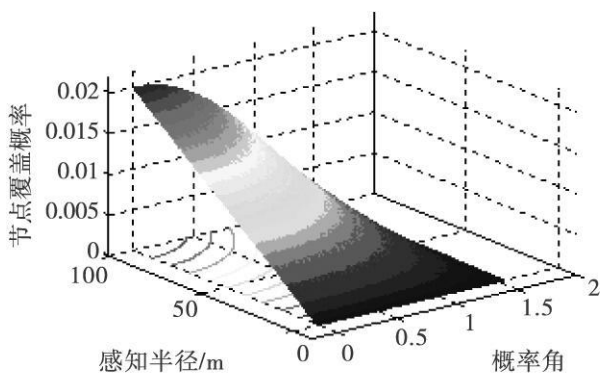


图3 一维节点随机覆盖模型的覆盖率
Fig.3 Node coverage probability of the one-dimension model

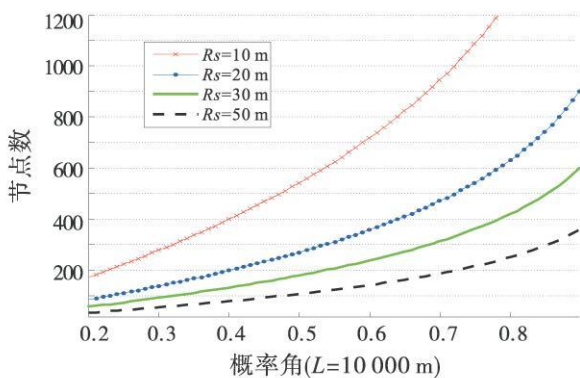


图4 一维节点随机覆盖模型的节点数随覆盖概率角的变化
Fig.4 The change of the number of nodes with probability angle

5 结 论

对于一维长线区域的无线传感器网络的覆盖问题, 论文详细讨论了节点在一维长线区域上随机部署的覆盖模型及覆盖概率, 证明了连通条件下节点感知半径和通信半径之间的关系, 给出一维长线区域上部署节点的覆盖数计算方法. 仿真结果表明, 感知半径是决定节点覆盖率和区域覆盖数的主要因素. 研究所得结论可作为一维长线区域上无线传感器网络设计时的技术参考. 一维区域无线传感器网络的拓扑结构、路由控制、节点能量平衡等都是很有意义的问题, 应是今后一维区域无线传感器网络的主要研究内容.

参考文献:

- [1] Heo Nojeong and Varshney P K An Intelligent Deployment and Clustering Algorithm for a Distributed Mobile Sensor Network [C] // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2003
- [2] Koushanfar S, Meguerdichian P, Potkojak F, Srivastava M B, Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks [C] // IEEE Infocom, 2001, 380-1387.
- [3] 汪学清. 无线传感器网络中连通与覆盖问题研究 [D]. 工学博士学位论文, 2006
- [4] Li Xiang-Yang, Wan Peng-Jun, Frieder O, Coverage in Wireless Ad-hoc Sensor Networks [J], IEEE Transactions on Computers 2003, 52(6): 753-763
- [5] Megerian S, Koushanfar F, Potkojak M, et al Worst and Best-Case Coverage in Sensor Networks [J], IEEE Transactions on Mobile Computing 2005 (4): 84-92
- [6] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络三维空间最佳覆盖路由协议 [J]. 电子学报, 2006, 34(2): 306-311.
- [7] Ravelomanana V. Extremal Properties of Three-Dimensional Sensor Networks with Applications [J], IEEE Transactions on Mobile Computing 2004 3(3): 246-257.
- [8] Huang C F, Tseng Y C, Lo L C, The Coverage Problem in Three-Dimensional Wireless Sensor Networks [C] // In Proc. IEEE GLOBECOM'04 New York: IEEE Press, 2004, 3182-3186
- [9] OPIFZ D, MACLIN R. Popular Ensemble Methods: An Empirical Study [J], Journal of Artificial Intelligence Research, 1999 11(1): 169-2198
- [10] AKSELA M, LAAKSONEN J T. Using Diversity of Errors for Selecting members of a Committee classifier [J], Pattern Recognition, 2006, 39(4): 608-2623
- [11] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkojak M, et al Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks [C] // IEEE Infocom New York, 2001, 1380-1387.
- [12] Zhang Honghai, CHou Jennifer. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks [J], Wireless Ad-hoc and Sensor Networks 2005(1-2): 89-123.
- [13] Wang Xiaojun, Xing Guoliang, Zhang Yuanfang, et al. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks [C] // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems 2003 ACM Press Los Angeles 28-39
- [14] Di Tian, Georganas N D. Connectivity Maintenance and Coverage Preservation in Wireless Sensor Networks [C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004, 1097-1100
- [15] Sant P. Topology Control in Wireless AdHoc and Sensor Networks [M]. John Wiley & Sons Ltd 2005.
- [16] Mauro Leoncini, Giovanni Resta, Paolo Santi. Partially Controlled Deployment Strategies for Wireless Sensors [J]. AdHoc Networks 2009(7): 1-23.