

无线传感器网络中基于网格的覆盖问题研究

汪学清 杨永田 孙 亭 张忠林

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘 要 在无线传感器网络中,传感器节点数量直接关系到整个无线传感器网络的成本,而且该问题也和无线传感器网络的性能如鲁棒性、容错性密切相关,同时这也是无线传感器网络设计时首先要考虑的问题,所以该问题的研究对无线传感器网络具有理论和实践的重要意义。通过把复杂的覆盖问题逐步化简,并利用数学建模、理论分析和公式推导,采用几何理论和数学归纳法的思想,从拓扑学的角度给出了传感器区域的一种网格划分方法。最后从理论上给出了在一个实现完全无缝覆盖的探测区域内最少需要多少节点的解析表达式。

关键词 无线传感器网络,覆盖问题,网格,解析式

Research on the Grid-based Coverage Problem in Wireless Sensor Networks

WANG Xue-Qing YANG Yong-Tian Sun Ting ZHANG Zhong-Lin

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract In wireless sensor networks, the size of radio nodes has direct relation to the cost of total wireless sensor networks, and at the same time, the problem is closely connected to wireless sensor networks' performance, such as robust, fault-tolerance, and further more, it is considered at first as wireless sensor networks are designed. Therefore, the research on the size of radio nodes has significant meanings of theory and practice to design of wireless sensor networks. The paper simplifies complex coverage problem step by step. By means of theoretical analysis, math modeling and geometry proving and making use of geometric theories and the method of mathematics induction, the method of grid plot of sensor field is proposed from the viewpoints of topology. In the end, the analysis formula of minimum number of nodes is theoretically deduced under circumstances of full and seamless coverage in wireless sensor networks.

Keywords Wireless Sensor Networks (WSN), Coverage problem, Grid, Analysis formula

1 引言

20世纪90年代以来,随着无线通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术及MEMS(微机电系统)等技术的快速发展,具有感知能力、计算能力和无线网络通信能力的微型传感器以及由其构成的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)引起了人们的极大关注^[1]。WSN由随机分布的集成了传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成网络。借助于节点中内置的形式多样的传感器,协作地实时感知、监测和采集周边环境众多人们感兴趣的物质现象,并对这些信息进行处理,获得更为详尽而准确的信息,其巨大的应用价值和前景引起军事部门、工业界、学术界的广泛关注^[2,3]。

在无线传感器网络中,节点通常被随机地布置在探测区域内,因此,覆盖问题是其一个基本问题。而该问题会对目标监测和跟踪产生一定的影响。文[4,5]提出如何在多项式时间内查找最大裂口路径(maximal breach path)和最大支持路径(maximal support path)即最差和最好地被监测到的区域。如何查找最小和最大暴露路径(minimal and maximal exposure path)即目标被监测的时间在文[6~8]被讨论。在文[9]里,给出了固定的基于暴露覆盖和位置发现算法。文[10]讨论了在传感器网络中各种盲区(holes)的分类、特征及对传感

器网络的影响,如覆盖盲区、路由盲区、收发盲区等。文[11]详细阐述了无线传感网络的通信结构,传感节点的组成结构及可能的实现方案,分析了各种拓扑结构的优缺点。文[12]描述了基于探测器的密度控制算法,即把一些节点放到节点稠密区域以确保长时间、健壮性的覆盖。基于簇的分布式传感器网络的效能和覆盖的关系在文[13]里进行了研究并提出VFA(Virtual Force Algorithm)算法。在文[14]里,证明了基于CDS(Connected Dominating Set)方法选择的活跃节点集满足完全覆盖和连通性的要求。覆盖质量即最好情况和最坏情况的覆盖距离在文[15]里进行了讨论并给出了算法。文[16]对无线传感器网络覆盖问题进行了分类并提出可以采用的方法。

本文所研究的问题是:对于一个给定的探测区域,至少需要多少节点才能实现对该区域的完全无缝覆盖,而对于该问题的解析解到目前为止尚未见报导。

2 问题描述

如图1所示,进行如下理论假设:

假设1:每个传感器节点能对其周围实行全方向探测,即其覆盖范围是一个半径为 r 的圆形区域 $D=\pi r^2$ 。

假设2:探测区域所有传感器节点都具有相同的发射功率,即所有节点的探测半径 r 均相等。

假设 3: 探测区域所有传感器节点都在同一个平面内。

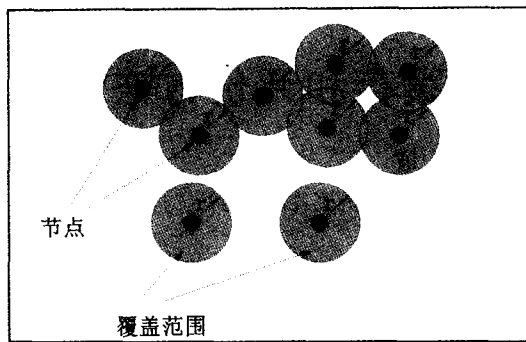


图 1 节点的探测范围及 WSN 的探测区域

依据以上假设,在图 1 所示传感器区域内至少有多少个节点能把该区域实现完全无缝覆盖,实际上也就是使该区域内的每一个节点所能覆盖的区域面积为最大,即在满足完全无缝覆盖的条件下,使得该区域内的每一个节点所能覆盖的有效区域面积为最大,尽量充分利用每一个圆面积。用数学式表示则为:

$$\text{对 } \forall p \in F, \exists i, \text{ 使得 } p \in D_i, \text{ 且 } \bigcup_{j \in N} D_j \text{ 为最大, 即}$$

$$\max \bigcup_{j \in N} D_j$$

此处, p —探测区域内的任一点, F —所要进行的探测区域, D —每个节点所能覆盖的圆形区域, N —该探测区域内的节点数, \cup —集合的并运算。

3 相关理论

定理 1 在圆的所有内接三角形中以内接等边三角形的面积为最大。

证明:如图 2(a)所示,在圆 $\odot A$ 内, $\triangle C_1C_2C_3$ 和 $\triangle C_1'C_2C_3$ 都是 $\odot A$ 的内接三角形, $C_1P_1 \perp C_2C_3$ 并且 C_1P_1 通过 $\odot A$ 的圆心。 $C_1'P_2 \perp C_2C_3$ 并且 C_1' 是 $\odot A$ 除 C_1 以外的任一点。

显然,对 $\forall C_1' \in \odot A$, 如果 $C_1' \neq C_1$, 则有 $|C_1P_1| > |C_1'P_1|$ ($|C_1P_1|$ 表示线段 C_1P_1 的长度)。

$$\text{又 } \because |C_2C_3| = |C_2C_3|$$

$$\therefore \triangle C_1C_2C_3 \text{ 的面积} > \triangle C_1'C_2C_3 \text{ 的面积}$$

$$\therefore C_1' \text{ 的任意性}$$

$$\therefore \triangle C_1C_2C_3 \text{ 的面积 } S \text{ 为最大}$$

$$\text{此时, } |C_1C_2| = |C_1C_3|$$

$$\text{又 } \because \text{对称性}$$

$$\therefore \text{同理可证: } |C_2C_1| = |C_2C_3| \text{ 和 } |C_3C_1| = |C_3C_2|$$

$$\therefore |C_1C_2| = |C_2C_3| = |C_3C_1|$$

$$\therefore \triangle C_1C_2C_3 \text{ 为等边三角形并且其面积为最大。}$$

定理 2 如图 2(c), (d)所示, 如果 3 个无缝拓扑的圆域: D_1, D_2 和 D_3 的无缝拓扑面积为最大, 则围成 3 个圆域相应的圆: C_1, C_2 和 C_3 必交于唯一点 A , 即: $D_1 \cap D_2 \cap D_3 \neq \emptyset$, 如果 $\max(D_1 \cup D_2 \cup D_3)$, 则 $C_1 \cap C_2 \cap C_3 = \{A\}$ 。

证明: $\text{Max}(D_1 \cup D_2 \cup D_3) \rightarrow \min(D_1 \cap D_2 \cap D_3)$

$$\therefore D_1 \cap D_2 \cap D_3 \neq \emptyset$$

$$\text{有交集的定义}$$

$$\therefore C_1 \cap C_2 \cap C_3 \text{ 必为点 } A$$

$$\text{即 } C_1 \cap C_2 \cap C_3 = \{A\}.$$

定理 3 如果围成 3 个无缝拓扑的圆域: D_1, D_2 和 D_3 相应的圆: C_1, C_2 和 C_3 交于一点 A 并且 $\triangle C_1C_2C_3$ 为等边三角形, 则 3 个圆域的无缝拓扑面积为最大, 即: $D_1 \cap D_2 \cap D_3$

$= \{A\}$, 且 $\triangle C_1C_2C_3$ 为等边三角形, 则 $\max(D_1 \cup D_2 \cup D_3)$ 。

证明: 要使 $\max(D_1 \cup D_2 \cup D_3)$ 成立, 根据定理 2, 则有 $\odot C_1, \odot C_2$ 和 $\odot C_3$ 必交于点 A 。

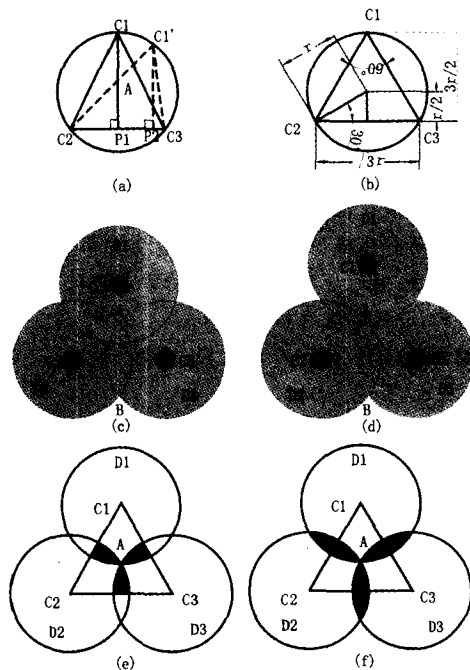


图 2 定理 1、2、3 的示意图

$$\text{又 } \because |AC_1| = |AC_2| = |AC_3| = r$$

\therefore 点 C_1, C_2 和 C_3 共圆
 $\therefore \triangle C_1C_2C_3$ 为 $\odot A$ 的内接三角形
 要使 $\triangle C_1C_2C_3$ 的面积最大, 依据定理 1, 则 $\triangle C_1C_2C_3$ 必为等边三角形。

既然 $\triangle C_1C_2C_3$ 的面积最大, 此时, 图 2(e) 中灰色区域的面积一定最小, 即 2(f) 中灰色区域的面积最小, 即 $\max(D_1 \cup D_2 \cup D_3)$ 。

\therefore 问题得证。

4 网格设计

依据定理 3 和根据图 2(b), 对给定的传感器区域 $F(L \times W)$, 进行如下的网格划分: 距离底边界 $r/2$ 处作一与底边界平行的辅助线, 辅助线与左边界的交点为 A , 以 A 为起点, 以 $\sqrt{3}r$ 为线段长度等分该辅助线, 分别以等分点为起点, 以夹角 60° 和 120° 作射线直到和区域边界相交; 以 A 为起点, 以 $3r/2$ 为线段长度等分左边界, 分别以等分点为起点作与底边界平行的射线直到与右边界相交, 这样就将整个区域划分成如图 3 所示的菱形或三角形的网格, 那么各个菱形和三角形的顶点则为传感器的位置。这样, 无线传感器网络就实现了完全无缝覆盖(如图 4 所示)。从上面网络划分的过程, 不难看出如下公式成立:

$$N = \left\lfloor \frac{L}{\sqrt{3}r} \right\rfloor * \left\lfloor \frac{W}{3r/2} \right\rfloor \quad (1)$$

其中: N —最小簇首数量, L —传感器区域长度, W —传感器区域宽度, r —通信半径, $\lfloor \cdot \rfloor$ —不小于 \cdot 的最小整数。这就是无线传感器网络在满足完全无缝覆盖的条件下所需要的最少传感器数。

(下转第 78 页)

分析:由定理1的证明过程可知,至少 k 个验证者合作计算的 M' 满足 $M'=M$;而 $k-1$ 个或更少的验证者不可能计算出正确的 M' ,除非他可以攻破 Shamir 的门限方案,这在计算上是不可行的。因此,该方案符合 (k, m) 门限验证要求。

结论 基于离散对数的安全机制,提出了一个 (t, n) 门限签名- (k, m) 门限验证的群数字签名方案, n 个签名者中至少 t 个合作可以生成有效的群签名;而 m 个验证者中至少 k 个合作可以验证签名的有效性。由于无需可信中心来管理参与者密钥,而且参与者之间无需进行秘密通信,因此,该体制具有良好的安全性和执行效率。

参考文献

- 1 Mehta M, Harn L. Efficient one-time proxy signatures [J]. IEE Proceedings-Communications, 2005, 152(2): 129~133
- 2 许春香,董庆宽,肖国镇. 矢量空间秘密共享-多重签名方案[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 48~50
- 3 Desmedt Y, Frankel Y. Shared generation of authenticators [A]. In: Advances in Cryptology, Proceedings of the CRYPTO'91 [C], 1991. 457~469

- 4 Wang C T, Lin C H, Chang C C. Threshold signature schemes with traceable signers in group communications [J]. Computer Communications, 1998, 21(8): 771~776
- 5 Pedersen T P. A threshold cryptosystem without a trusted party [A]. Advances in Cryptology, Proceedings of the CRYPTO'91 [C], 1991. 522~526
- 6 Wang C-T, Chang C C, Lin C-H. Generalization of threshold signature and authenticated encryption for group communications [J], IEICE Trans, Fund, 2002, E83-A (6): 1228~1237
- 7 Hsu C-L, Wu T-S, Wu T-C. Improvements of threshold signature and authenticated encryption for group communications [J]. Inform. Process. Lett, 2002, 81(1): 41~45
- 8 Chang Ting-Yi, Yang Chou-Chen, Hwang Min-Shiang. A threshold signature scheme for group communications without a shared distribution center [J]. Future Generation Computer Systems, 2004, 20(6): 1013~1021
- 9 Rivest R L, Shamir A, Adleman L. A method for obtaining digital signatures and public key cryptosystem [J]. Communication of the ACM, 1978, 21(2): 120~126
- 10 Pang Liaojun, Wang Yumin. A new (t, n) multi-secret sharing scheme based on Shamir's secret sharing [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 167(2): 840~848

(上接第 39 页)

在图 4 中,小黑圆点表示传感器节点,圆表示传感器的辐射范围。由图可见,用最少的节点数实现了无线传感器网络的完全无缝覆盖。

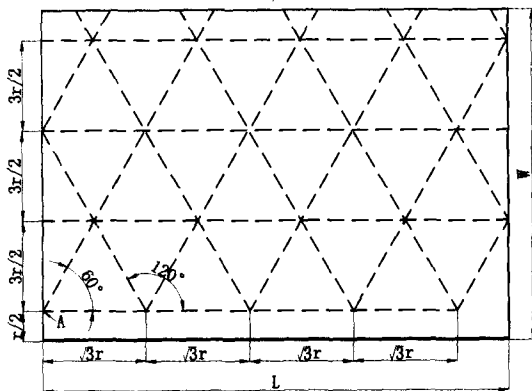


图 3 传感器区域的网格划分

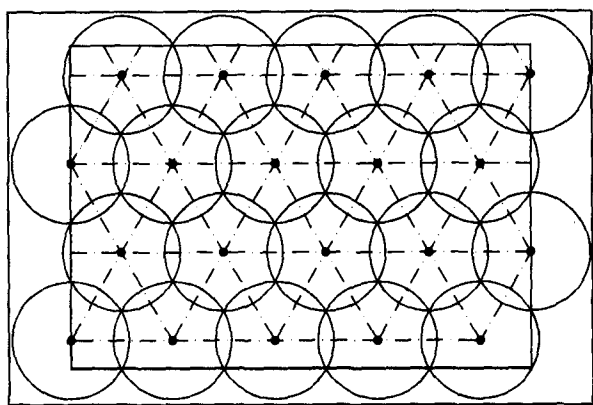


图 4 传感器区域布置图

结论 通过把复杂的覆盖问题逐步化简,并利用数学建模、理论分析和公式推导,采用几何理论和数学归纳法思想,从拓扑学的角度给出了传感器区域的一种网格划分方法。最后从理论上给出了在一个实现完全无缝覆盖的探测区域内最少需要多少节点的解析表达式。该解的给出和传感器区域的网格划分方法,解决了无线传感器网络中的一个数学问题,

并对无线传感器网络的理论研究和网络设计具有重要的意义。在此基础上,该理论将对其算法研究和协议设计产生一定的影响。这也是作者以后的研究内容。

参考文献

- 1 Akyildiz F, Su W, Sankarsubramaniam Y, et al. Wireless sensor Networks; a Survey [J]. Computer Networks, 2002, 38: 393~422
- 2 李健中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14 (10): 1717~1727
- 3 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163~174
- 4 Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, Potkonjak M. Coverage problem in wireless ad-hoc networks [J]. IEEE infocom, 2001, 1380~1387
- 5 Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks [C]. In: ADM Int'l Workshop on Wireless sensor Networks and applications, 2002
- 6 Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, et al. Exposure in wireless ad-hoc sensor networks [C]. In: ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2001. 139~150
- 7 Seapahn Megerian, Farinaz Koushanfar, Qu G, et al. Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions [J]. Wireless Networks, 2002, 8: 443~454
- 8 Veltri G, Huang Q, Qu G, Potkonjak M. Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks [J]. In: ACM Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), 2003. 40~50
- 9 Meguerdichian S, Slijepcevic S, Karayan V, Potkonjak M. Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: location discovery and sensor exposure [J]. In: ACM Int'l Symp. on Mobile ad hoc Networking and Computing (MobiHOC), 2001. 106~116
- 10 Ahmed N, Kanhere S S, Jha S. The holes problem in wireless sensor networks: a survey [J]. Mobile Computing and Communications Review, 9(2): 4~18
- 11 Ye F, Zhong G, Lu S, et al. PEAS: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks [C]. In: Int'l Conf. on Distributed Computing Systems, 2003
- 12 石军锋, 钟先信, 陈帅, 等. 无线传感器网络结构及特点分析[J]. 重庆大学学报, 28(2): 16~19
- 13 Zou Y, Chakrabarty C. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 61~91
- 14 Zou Y, Chakrabarty K. A distributed coverage- and Connectivity-Centric Technique for Selecting Active Nodes in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(8): 978~990
- 15 Huang H, Richa A W. Dynamic coverage in Ad-Hoc sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10: 9~17
- 16 王燕莉, 安世全. 无线传感器网络的覆盖问题研究[J]. 传感技术学报, 18(2): 307~312