

无线传感器网络基于参数可调 增强型覆盖控制算法

孙泽宇^{1,2}, 伍卫国¹, 王换招¹, 陈 衡¹, 邢萧飞³

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049; 2. 洛阳理工学院计算机与信息工程系, 河南洛阳 471023;
3. 广州大学计算机科学与教育软件学院, 广东广州 510006)

摘 要: 覆盖问题是无线传感器网络领域的一个基本问题,也是无线传感器网络特性其中的一个重点问题. 如何通过某种算法达到以最少传感器节点对监测区域的有效覆盖已成为目前研究的一项重要课题. 因此,提出一种增强型覆盖控制算法(Enhanced Coverage Control Algorithm, ECCA). 该算法通过概率理论知识可以有效地求解出对监测区域进行有效覆盖下的最少节点,给出了传感器节点概率的期望值计算方法以及目标节点首次被传感器节点覆盖和多次覆盖后的期望值求解过程,验证随机变量相互之间不独立时的比例函数关系. 仿真结果表明, ECCA 算法可以使用较少的传感器节点数量完成对监测区域的有效覆盖,提高了对监测区域的覆盖质量.

关键词: 无线传感器网络; 概率模型; 覆盖控制; 覆盖率

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0466-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.008

An Enhanced Coverage Control Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Adjustable Parameters

SUN Ze-yu^{1,2}, WU Wei-guo¹, WANG Huan-zhao¹, CHEN Heng¹, XING Xiao-fei³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;
2. Department of Computer and Information Engineering, Luoyang Institute of Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
3. School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: The coverage is a fundamental problem in wireless sensor network field, and it is also one of the important problems for wireless sensor network characteristic. How to use the minimum nodes to monitor the effective zone is currently an important research topic. Therefore, an enhanced coverage control algorithm (ECCA) is proposed. This algorithm employs the theory of probability to find out the minimum number of the effectively covered nodes in the monitored zone. It presents the computation method for the expectation value of probability of the sensor nodes and the solution of the expectation values for the initial coverage and is covered by many a time. The proportion relation under the condition that the random variables are not independent is proven. Simulation results show that ECCA algorithm can effectively cover the monitored zone with few nodes, which improves the coverage quality of the monitored zone.

Key words: wireless sensor network (WSN); probability model; coverage control; coverage probability

1 引言

无线传感器网络是由集成传感器技术、微特机电技术和无线通信技术融为一体的无线网络系统. 它是由大量传感器节点通过自组织形式, 以多跳方式进行数据的传输^[1]. 传感器节点其主要特性表现为体积小, 能量有

限, 具有一定的感知能力、计算能力和通信能力, 广泛应用于国防、军事、交通运输、医疗卫生、环境监测、抗震救灾、智能楼宇等工程领域^[2]. 目前, 传感器节点存在着两种部署方案^[3]. 第一种方案是人工部署; 另一种方案是随机部署. 人工部署主要应用在特定的环境中, 对环境具有严格的限定; 在绝大多数情况下, 部署方案采用的是

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-03-24; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(No. 2012AA01A306); 国家自然科学基金项目(No. 61170245); 河南省教育厅科学技术研究重点基金项目(No. 14BS20099); 河南省科技攻关计划基金项目(No. 142102210471, No. 142102210063); 陕西省自然科学基金青年人才项目(No. 2013JQ8024)

随机部署^[4],随机部署无需考虑特定环境,如:在自然条件非常恶劣环境下,传感器节点的部署方式一般采用的是利用飞行器随机部署机制,在随机部署方式中虽然可以减少自然界对为人类活动的损伤,但也存在着一些不足.主要体现在:由于随机部署的存在,将会使得监测区域内某些范围处于节点高密度集中状态,这样给无线传感器网络的扩展性、综合服务性能、数据通信带来信号干扰、能量浪费等一系列的问题^[5].

基于上述问题的存在,最为基本的问题就是如何实现监测区域内域的有效覆盖,减少传感器节点的能量的消耗,并以最少的传感器节点完成最大区域或是对所关注目标节点的有效覆盖.在满足一定覆盖率的提前下,并不是要求传感器节点对整个监测区域的完全覆盖,而是对监测区域保持一定的覆盖比率.因此,覆盖率在一定意义上来说是衡量网络服务质量体现的标准之一.

为了更好地研究无线传感器网络中覆盖问题,以监测区域对目标节点的覆盖模型进行研究,目标节点被传感器节点的覆盖时的概率为 1,未被覆盖时概率值为 0.因此,本文提出了一种增强型覆盖控制算法(EC-CA).本算法从以下四个方面进行研究:

(1)对国内外相关文献进行了研究,指出各种覆盖算法的优缺点,阐述了本文 ECCA 算法的中心思想,构建的网络覆盖体系模型.

(2)利用网络覆盖体系模型结合随机部署节点的正态分布特性,以移动目标节点通过传感器节点所形成的扇形区域给出传感器节点的覆盖率和监测区域内的 n 个传感器节点的覆盖质量的期望值的求解过程.

(3)对整个网络体系模型进行计算,给出了随机变量 X 在监测区域(以正方形区域为研究对象)内,首次在传感器节点覆盖时期望值和方差证明过程以及完成 N 次覆盖后的期望值的求解过程,同时完成了实现对整个监测区域进行有效覆盖最少传感器节点数量求解过程.

(4)通过仿真实验,验证本文 ECCA 算法在不同监测区域下有效覆盖,以及在不同参数下的工作传感器节点数量与覆盖率之间的对比情况.

本文算法的研究目的在于通过概率相关知识求解传感器节点期望值,并以该期望值作为研究基础给出了进行 N 次覆盖后的期望值,最终实现以最少工作节点数量完成对监测区域的有效覆盖.对本文算法做进一步的扩充后,可以完成对目标节点的多重覆盖,主要体现在本文算法主要是借助于概率理论来完成对目标节点的覆盖机制,而对目标节点进行多重覆盖,产生冗余数据时,通过传感器节点覆盖率的大小及传感器节点能量转换机制,让其概率值较小工作节点处于休眠

状态而完成对目标节点的多重覆盖.在现实生活中主要表现在:军事战场上对敌方坦克等所关注目标实现实时监测,同时为了获得更为准确的数据信息,需要对所关注的目标实行多重覆盖.

2 相关工作

无线传感器网络是当前信息技术领域的一项重点工程.覆盖问题作为无线传感器网络特性当中一个重点问题已成为当今世界研究的一个热点问题,同时国内外许多学者对其展开了深入地研究.文献[6]以无线传感器网络覆盖作为前提并以分簇结构作为研究对象,提出一种自适应无线传感器网络分层数据采集框架,利用簇头节点完成了对所采集数据的分析和预测,同时给出了预测模型,实现了对簇首节点的选择过程及采集数据的融合.文献[7]所提出的覆盖算法是以节点能量有效及传感器节点位置信息作为研究的前提条件,对目标节点覆盖率进行计算,在理论上可以完成对监测区域的有效覆盖,给出了有效覆盖的计算过程及应用范围.文献[8]在研究有效覆盖问题的基础上,给出了节点能量转换模型,该模型可以有效地抑制节点的消耗,在某种程度上节省了节点能量的开销,对抑制节点能量消耗方面取得较好的效果,延长网络生存周期,提高网络服务性能.文献[9]提出了一种构造连通支配集分布式本地化的协议,同时也讨论了能量高效的支配集覆盖方法;为了平衡网络能耗,又利用剩余能量级别提出了一种选择覆盖节点的方法.这些都是利用静态节点对目标进行连续覆盖,但在一些实际应用中没有必要连续覆盖目标,少量的移动节点比只单纯用静态节点的工作效率要高的多.文献[10]给出了一种分布式自主移动调度规划算法,该算法通过传感器节点所形成的一组自治移动传感器组完成对目标节点的覆盖,当移动目标节点进入自治组,完成首轮覆盖的传感器节点将配置协议传递给下一个传感器节点时,已达到整个自治组的覆盖过程.该算法能够完成对移动目标的覆盖,提高了覆盖质量.文献[11]提出了一种基于遗传算法的最大覆盖节点部署方法.该方法在解集空间引入了遗传算法,通过蒙特卡罗特性构造出一个有效的评估函数,从随机样本中增加后代的数量对其优化,最终达到覆盖平衡.该方法在某种程度上加快了覆盖速度,达到了覆盖平衡的要求.文献[12]提出了一种覆盖保持协议,给出了传感器节点感知半径服从正态分布的无须地理位置信息的冗余度计算模型,实现传感器节点分布式调度机制,达到对监测区域的有效覆盖,延长了网络生存周期.该算法能够很好地解决覆盖问题,通过传感器节点的能量调度机制抑制了传感器节点能量的消耗.文献[13]提出一种感知模型下的

有效覆盖算法,该算法利用指数分布特性计算出监测区域内的传感器节点覆盖的事件概率,而后通过事件概率给出了覆盖质量的计算过程,最终完成了对监测区域的有效覆盖.该算法所采用的是指数分布加以计算覆盖质量,完成对某个监测的有效覆盖,提高了覆盖精度.

综合上述算法,在满足一定覆盖率的前提下,完成了对目标节点有效覆盖,但也存在着一些不足之处,主要体现在以下几个方面:第一,在完成对数据融合及对目标节点有效覆盖时,并未考虑到传感节点的能耗问题;第二:在获取传感器节点位置信息需要外加定位设备,如:GPRS(General Packet Radio Service),这样无形地增加了网络系统运营的成本,同时信号之间的干扰也会增强,如果信号之间存在着一定的干扰就无法准确地计算出传感器节点的覆盖关系;第三:网络模型过于理想化,在现实生活中难以达到预期效果;第四:算法的复杂度过高,计算量较大;第五:在考虑节点能量抑制方面,在某种程度上节省了节点能量的开销,虽然对抑制节点能量消耗取得较好的效果,但对所关注的目标节点的覆盖效果却有所降低.

基于文献[13]的基本思想,本文给出了一种增强型覆盖控制算法(ECCA).本文利用概率相关理论知识对监测区域进行有效求解,给出最少节点的求解方法及过程,同时给出移动目标节点所通过传感器节点所形成的扇形区域的覆盖率及监测区域内 N 个节点的覆盖质量的期望值;对于传感器节点而言,完成 N 次对目标节点覆盖后的期望值的求解过程.在仿真实验中,将本文算法与 CCP(Coverage Configuration Protocol)^[14]和 SCCP(Square region based Coverage and Connectivity Probability model)^[15]算法进行了对比实验,验证了三种算法在具有相同覆盖率时,本文算法所使用传感器节点数量少于其它两种算法所使用的传感器节点数量;对于相同传感器节点数量而言,在对监测区域覆盖过程中,本文算法的覆盖率高于其它两种算法覆盖率;同时又给出了不同参数下的覆盖率及工作节点与传感器节点之间的比例关系曲线示意图.

3 体系模型与覆盖质量分析

为了更好的研究覆盖问题,本文 ECCA 算法是基于以下四种假设:

(1)初始时刻,无线传感器网络当中的每一个传感器节点的通信范围与感知范围均显现圆盘形,并保持静止^[16];

(2)每个传感器节点都可以通过某种定位算法,如:质心定位算法,RSSI(Received Signal Strength Indication)定位算法获取传感器节点本身的位置信息^[17];

(3)所有传感器节点以正态分布方式随机部署在正方形区域内,不考虑边界存在的条件;

(4)初始时刻,每一个传感器节点的能量均相等,各自的地位也相同.

3.1 基本定义

定义 1(覆盖集) 设目标集合 T ,给定任意目标节点 t_k 且 $t_k \in T$,在某个时间间隔中,如果在目标集中存在至少一个目标节点 t_k 被传感器节点 s_i 所覆盖,则由 s_i 所形成的集合称之为覆盖集.

定义 2(覆盖关联) 任意给定两个传感器节点 s_i, s_j ,其对监测区域覆盖的面积为 $A(s_i), A(s_j)$,并且 $A(s_i) \cap A(s_j) \neq \Phi$,则称传感器节点 s_i, s_j 相互覆盖关联.

定义 3(覆盖率) 随机部署在监测区域 Ω 内的工作传感器节点 S_i 覆盖率为:

$$P(S, \Omega) = \sum A(S_i) / A(\Omega) \quad (1)$$

其中, S 为传感器节点的集合, $A(S_i)$ 是传感器节点 i 的覆盖面积, $A(\Omega)$ 是监测区域的面积.

3.2 体系模型

从研究问题方便的角度出发,本文以正方形和三个传感器节点及目标节点的移动轨迹作为研究对象,如图 1 所示.

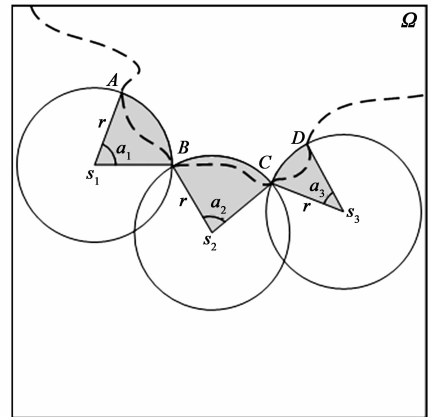


图1 关联属性覆盖示意图

在图 1 中, S_1, S_2, S_3 是传感器节点,虚线是目标节点的所行走的轨迹,从图 1 中可以看出,目标节点的行进轨迹与三个圆是相交的,连接相交点,构成了三个扇形.扇形 AS_1B 归属于 S_1 ,同理扇形 BS_2C 归属于 S_2 ,扇形 CS_3D 归属于 S_3 ,根据几何理论可以求解出扇形的面积,即:

$$U(S_i) = \frac{\alpha_i \pi}{360} r^2 = \varphi_i \pi r^2 \quad (2)$$

以 S_1 为例, S_s 是扇形的面积, θ_i 是圆心角,若以弧度制表示,令: $\varphi_i = \alpha_i / 360$, r 是感知半径.

对于目标节点行走的轨迹,通过数据似合的方式给出曲线的方程是:

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_0 \quad (3)$$

其中 a_i 是比例纲量, $f(x)$ 是数据似合方程.

3.3 覆盖质量分析

本节以图 1 为研究对象,主要讨论传感器节点的覆盖率,监测区域的内 n 个传感器节点的覆盖质量的期望值的求解过程以及期望值和方差的标准模型和覆盖监测区域最少传感器节点的数量验证过程.

定理 1 假设在覆盖区域内,传感器节点的覆盖率为 $P(A)$,则覆盖区域中 i 点的覆盖率为:

$$P(A) = 1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - P(A))$$

证明 采用数学归纳法加以证明.在覆盖区域中,传感器节点工作时,每个传感器节点并不相互独立.因此,当有两个传感器节点工作的概率为:

$$\begin{aligned} P(A+A) &= P(A) + P(A) - P(A)P(A) \\ &= 2p - p^2 = 1 - (1-p)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

当有三个传感器节点进行工作时,其概率为:

$$P(A+A+A) = P(A+A) + P(A) - P(A+A)P(A) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得:

$$P(A+A+A) = 1 - (1-p)^3 \quad (6)$$

当 $i = n$ 时,即:

$$P(nA) = P[(n-1)A] + P(A) - P[(n-1)A]P(A)$$

成立;当 $i = n+1$ 时,可得:

$$P(A) = 1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - P(A)) \quad (7)$$

证毕.

推论 1 假设在覆盖区域内,传感器节点的覆盖率为 P ,完成 N 次覆盖后,其传感器节点的期望值是 $E(X) = [1 - (1-p)^N]p^{-1}$.

证明 设为第一次覆盖目标节点时转移的次数,则 X 的可能取值为 $X \in [1, 2, 3, \dots, N]$,当 $X = k$ 时,并 $1 \leq k \leq N-1$ 时表示前 $N-1$ 次并没有覆盖目标节点,所以 X 的分布密度函数为:

$$P(X=k) = \begin{cases} p(1-p)^{k-1}, & k=1, 2, 3, \dots, N-1 \\ (1-p)^{N-1}, & k=N \end{cases} \quad (8)$$

解得:

$$E(X) = \sum_{k=1}^{N-1} kp(1-p)^{k-1} + N(1-p)^{N-1} \quad (9)$$

令: $q = 1-p$, $S = \sum_{k=1}^{N-1} k(1-p)^{k-1}$ 则 $S = \sum_{k=1}^{N-1} kq^{k-1}$, 在

等式左右两边乘以 q , 可得 $qS = \sum_{k=1}^{N-1} kq^k$, 即:

$$S = \frac{1 - q^{N-1}}{(1-q)^2} - \frac{(N-1)q^{N-1}}{1-q}$$

$$= \frac{1 - (1-p)^{N-1}}{p^2} - \frac{(N-1)(1-p)^{N-1}}{p} \quad (10)$$

将 S 代入式(9)得:

$$\begin{aligned} E(X) &= p \left(\frac{1 - (1-p)^{N-1}}{p^2} - \frac{(N-1)(1-p)^{N-1}}{p} \right) \\ &\quad + N(1-p)^{N-1} \\ &= \frac{1 - (1-p)^{N-1}}{p} - (N-1)(1-p)^{N-1} \\ &\quad + N(1-p)^{N-1} \\ &= \frac{1 - (1-p)^{N-1} + p(1-p)^{N-1}}{p} \\ &= [1 - (1-p)^N]p^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

证毕.

推论 2 传感器节点的覆盖率为 P ,当移动目标节点被传感器节点集合首次覆盖时,传感器节点的期望是: $E(X) = 1/p$; 方差是: $D(X) = (1-p)/p^2$.

证明 在监测区域内,任意被传感器节点所覆盖的概率为 p ,那么未被该传感器节点所覆盖的概率为: $1-p$, 令: $q = 1-p$, 设: 传感器节点 k 是首次覆盖移动目标节点, 则:

$$E(X) = \sum_{k=1}^N kpq^{k-1} = p \left(\sum_{k=1}^N q^k \right)' = p \left(\frac{q}{1-q} \right)' = \frac{1}{p} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E(X^2) &= \sum_{k=1}^N k^2 pq^{k-1} = pq \sum_{k=1}^N k(k-1)q^{k-2} + \frac{1}{p} \\ &= pq \left(\sum_{k=1}^N q^k \right)'' + \frac{1}{p} = \frac{1+q}{p^2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$D(X) = E(X^2) - E(X) = \frac{1-p}{p^2} \quad (14)$$

证毕.

定理 1 和推论 1 以及推论 2 给出了传感器节点对移动目标节点覆盖计算过程.一般情况下,对于移动目标节点来说,其所行走的轨迹与传感器节点所覆盖的区域显现出扇形状态,计算扇形和正方形监测区域传感器节点的期望值和所覆盖监测区域最少节点数量,可以依托于概率论相关理论知识,根据传感器节点的感知半径和所形成覆盖夹角结合几何图形中的理论知识,对传感器节点的期望予以计算.

定义 4(有效覆盖) 在定义 1 的基础上,如果某一监测区域内所有目标节点均被传感器节点所覆盖,则由传感器节点所形成的覆盖称之为有效覆盖;由传感器节点所形成覆盖区域,称之为有效覆盖区域.

定义 5(节点冗余度) 对于传感器节点集合而言,任意传感器节点所感知其邻居节点的监测区域与多覆盖所形成的重叠区域面积和监测区域面积的比值,称为节点冗余度,即:

$$\psi(i) = \frac{S(\cup_{((i,j) \in N) \cup (i \cap j)} s_i)}{S(\Omega)} \quad (15)$$

定理 2 监测区域 Ω 内, k 个工作传感器节点的有效覆盖质量的期望值是:

$$E(S) = 1 - \left(1 - \frac{\varphi_i(11.89\sigma^2 - 3.3\sqrt{2\pi}\sigma^2 \cdot e^{-5.45})}{l^2} \right)^k$$

证明 以图 1 为研究对象, 设正方形监测区域内有 k 个工作传感器节点, 对于目标节点所行走的轨迹与 k 个工作传感器节点相交与其圆心的连线形成的扇形. 根据式(1)覆盖率的计算方法, 求得任意目标节点被阴影的部分所覆盖的覆盖率是:

$$P_i = \frac{\bigcup(S_s)}{S(\Omega)} = \frac{\varphi_i \pi r^2}{l^2} \quad (16)$$

其中 $\varphi_i = \sum_{i=1}^N \alpha_i$.

由于传感器节点集合中的所有传感器节点均服从正态分布 $N(r_0, \sigma^2)$, 其中 r_0 是传感器节点感知半径的均值, σ^2 是感知半径的方差, 且满足 $r_0 \geq 3.3\sigma$, 根据概率论有关理论知识可得^[12], 对于监测区域 Ω 内任意一点的覆盖概率为:

$$P_i = \int_0^{2r_0} \frac{\varphi_i \pi r^2}{\sqrt{2\pi}\sigma l^2} \cdot e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}} dr \quad (17)$$

令: $x = \frac{r-r_0}{\sigma}$ 代入式(17)可得:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{\varphi_i \pi}{\sqrt{2\pi}\sigma l^2} \int_{-\frac{r_0}{\sigma}}^{\frac{r_0}{\sigma}} \sigma (x\sigma + r_0)^2 \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= \frac{\varphi_i \pi}{\sqrt{2\pi}l^2} \left(\int_{-\frac{r_0}{\sigma}}^{\frac{r_0}{\sigma}} (x^2\sigma^2 + 2x\sigma r_0 + r_0^2) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \\ &= \frac{\varphi_i \pi}{\sqrt{2\pi}l^2} \left(\int_{-\frac{r_0}{\sigma}}^{\frac{r_0}{\sigma}} -x\sigma^2 d(e^{-\frac{x^2}{2}}) + r_0^2 \int_{-\frac{r_0}{\sigma}}^{\frac{r_0}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \\ &= \frac{\varphi_i \pi}{\sqrt{2\pi}l^2} \left(-x\sigma^2 \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \Big|_{-\frac{r_0}{\sigma}}^{\frac{r_0}{\sigma}} + \sqrt{2\pi}\sigma^2 + \sqrt{2\pi}r_0^2 \right) \\ &= \frac{\varphi_i (\pi(r_0^2 + \sigma^2) - \sqrt{2\pi}r_0\sigma \cdot e^{-\frac{r_0^2}{2\sigma^2}})}{l^2} \end{aligned}$$

即:

$$P_i = \frac{\varphi_i (\pi(r_0^2 + \sigma^2) - \sqrt{2\pi}r_0\sigma \cdot e^{-\frac{r_0^2}{2\sigma^2}})}{l^2} \quad (18)$$

若让 P 满足最小覆盖率时, 将 r_0 取之最小值代入式(18), 即 $r_0 = 3.3\sigma$, 代入上式得:

$$P_i \approx \frac{\varphi_i (11.89\sigma^2 - 3.3\sqrt{2\pi}\sigma^2 \cdot e^{-5.45})}{l^2} \quad (19)$$

式(19)给了某个传感器节点对于监测区域的覆盖率, 根据定理 1 证明, 当有 k 个传感器节点工作时的覆

盖率期望值应该为:

$$E(S) = 1 - \left(1 - \frac{\varphi_i(11.89\sigma^2 - 3.3\sqrt{2\pi}\sigma^2 \cdot e^{-5.45})}{l^2} \right)^k \quad (20)$$

证毕.

对于整个监测区域的 k 个工作传感器节点来说, 其覆盖质量的期望值主要取决于扇形的夹角和正态分布的方差以及监测区域的面积.

定理 3 对正方形监测区域的进行有效覆盖最少节点数量是:

$$N = \ln(1 - \epsilon) \ln \left(1 - \frac{\varphi_i \pi r^2}{l^2} \right)^{-1}$$

证明 给定一个非常小数量 ϵ ($\epsilon = 0.00005$), 以定理 1 的结论作为计算标准, 对于任意节点能量不为零的传感器节点来说, 其覆盖率均大于 ϵ , 即:

$$P(A) = 1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - P(A)) \geq \epsilon \quad (21)$$

则: $1 - (1 - p)^N \geq \epsilon$, 将式(17)代入式(22)可得:

$$1 - \left(1 - \frac{\varphi_i \pi r^2}{l^2} \right)^N \geq \epsilon \quad (22)$$

经计算:

$$N \leq \ln(1 - \epsilon) \ln \left(1 - \frac{\varphi_i \pi r^2}{l^2} \right)^{-1} \quad (23)$$

式(23)左右两边相等时, N 为最少传感器节点数量.

证毕.

3.4 ECCA 算法实现

通过几何图形学理论, 将传感器节点部署在关键目标节点范围之内, 并保证所关注的目标节点至少被一个传感器节点所覆盖. 在传感器节点集合中找到工作传感器节点的关联属性关系^[18,19], 通过覆盖率之间的函数关系, 确定最少覆盖节点数量. ECCA 算法在计算开销较小, 算法的复杂度较低, 提高了网络质量性能. 其 ECCA 算法描述见算法 1:

算法 1 ECCA 算法

输入: $r_0, r, \sigma_{\max}, n_{\max}, l$

输出: $\sigma_{\text{opt}}, n_{\text{opt}}$

初始化: $n \leftarrow \text{null}$;

1 Procedure

2 Begin

3 for int $\sigma = 1$ to σ_{\max} //确定循环参数, 给出每一轮所确定的最大节点数量

4 for int $n = 1$ to n_{\max}

5 if (coverage(σ, r_0, r, n_{\max}) $\geq l$) //当满足覆盖条件, 计算传感器节点覆盖概率

6 Computing probability;

7 then

8 $n \leftarrow \text{add}(\sigma, n_{\max}, \text{coverage}(\sigma, r_0, r, n_{\max}))$; //当不满足覆盖条件, 在覆盖集中增加工作节点

```

9     end
10    end
11    end
12    for int n = 1 to n_max //确定工作节点的最大循环次数
13        if (node[i] == False)
14            {
15                node[i] = S(i); //当工作节点集为空时,从传感器
                                节点集中唤醒某个节点,并赋值
                                给工作节点集
16            }
17            Return the computing result
18            of Eq.(20); //通过式(20)计算传感器工作节点覆
                                盖率期望值
19            Return the computing result
20            of Eq.(21); //利用式(21)计算达到覆盖期望值时
                                所用最少节点数
21        }
22    then
23        goto (3) //如果工作节点集合不空时,返回第 3 步,重
                                新开始新一轮循环
24    end
25    printf("%d,%d", sigma_opt, n_opt); //输出 sigma_opt, n_opt 结果
26 end

```

3.5 ECCA 算法复杂分析

ECCA 算法复杂分析中,设传感器节点数量为 n ,任意两个传感器节点相连的边数为 m , p_{\min} 和 p_{\max} 分别代表所监测区域覆盖率的最小值与最大值, Δp 为每次覆盖后的覆盖率的增量,令 $p_{\min} = c$, $p_{\max} = bn$,其中 c 和 b 为常数,设:初始时刻某传感器节点覆盖率为 $p(0) = b/n$,在 t 时刻,某传感器节点的转移的概率大于 $c/2bn$,即传感器节点所覆盖的最小概率为 $p_{\min} = c/2bn$,令: $R = (1 - e)p(t - 1)$,在 $t + 1$ 时刻,传感器节点的覆盖率:

$$\begin{aligned}
 p(t+1) &= \frac{p_{t+1}(t+1)}{p_{t+1}(t+1) + p_t(t+1)} \\
 &\leq \frac{p_{t+1}(t+1)}{c + p_t(t+1)} \\
 &\leq \frac{b}{(1 - \Delta p)(c + ce + R)} \quad (24)
 \end{aligned}$$

令 $L = \frac{b}{(1 - e)(c + ce + R)}$, ECCA 算法的时间复杂度,设为 $E(T)$,即:

$$\begin{aligned}
 E(T) &= \sum_{m=1}^{n-1} \left(\frac{2bn}{c(n-m)} \cdot \left[1 - \frac{L}{n} \right]^{1-n} \right) \\
 &= \frac{2bn}{c} \left[1 - \frac{L}{n} \right]^{1-n} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{m} \\
 &\leq \frac{2bn}{c} e^{-LH_{n-1}} \quad (25)
 \end{aligned}$$

因为 $\sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{m}$ 是调和级数前 $n - 1$ 项之和,令 $H_{n-1} =$

$$\sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{m}, \text{故 } \sum_{x=1}^{n-1} \frac{1}{x} - 1 < \int_1^{n-1} \frac{1}{x} dx < \sum_{x=1}^{n-1} \frac{1}{x}, \text{即:}$$

$$H_{n-1} = \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{x} = \int_1^{n-1} \frac{1}{x} dx = O(\ln n) \quad (26)$$

4 体系评估

为了更好地验证本文算法的有效性和稳定性,本文利用 MATLAB7 作为仿真实验平台,通过改变监测区域范围,实现不同网络覆盖规模;利用 σ 取值范围的变化,给出了相同网络模型下的覆盖质量变化;对于不同的覆盖质量,给出了传感器节点集合与工作节点之间的变化曲线等.本文算法所涉及的参数如下:

监测区域 I : $100 \times 100 \text{ m}^2$

监测区域 II : $200 \times 200 \text{ m}^2$

监测区域 III : $400 \times 400 \text{ m}^2$

感知半径: 10 m

传感器节点能量: 5 J

传感器节点数量: 600

实验 1 当 $\sigma = 1$ 时,对三个不同监测区域进行有效覆盖,每次仿真实验均为 100 次的平均值,传感器节点数量与覆盖率变化曲线如图 2 所示.

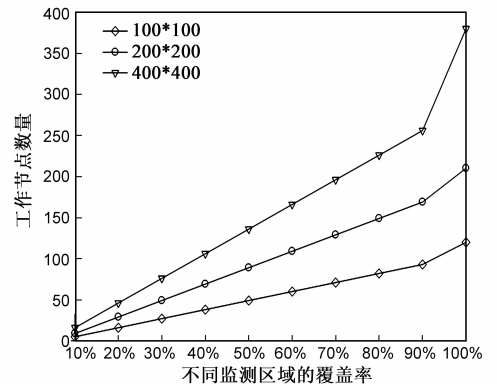


图2 不同监测区域传感器节点数量与覆盖率变化曲线

图 2 反映了在不同监测区域内的传感器节点与覆盖率变化曲线,从图 2 中可以看出,随着传感器工作节点数量的增加,其覆盖率也随之增加,对于监测区域较小覆盖区域所需传感器工作节点数量也较小,在本文算法中,其覆盖率达到 99.9% 时,就认为达到对监测区域的有效覆盖.当完成对 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 时,所需传感器工作节点数量为 120, $200 \times 200 \text{ m}^2$ 时,所需传感器工作节点数量为 204,而 $400 \times 400 \text{ m}^2$ 时,所需传感器工作节点数量为 378,在覆盖率为 90% 之前,其覆盖率呈现出一种平稳递增关系,当在覆盖率为 90% ~ 99.9% 之间所呈现出一种快速的递增,其主要原因是在较大的监测区域中所需传感器工作节点数较多,而形成的覆盖空洞数量较小,其覆盖率增量变化速率较快;而对于较小

的监测区域而言,所需传感器工作节点较少,相对于较大监测区域其覆盖率增量变化速度较为缓慢。

实验 2 以 $400 \times 400 \text{ m}^2$ 作为仿真区域,比较 σ 在不同取值范围下的覆盖率随着传感器工作节点数量变化曲线,如图 3 所示。

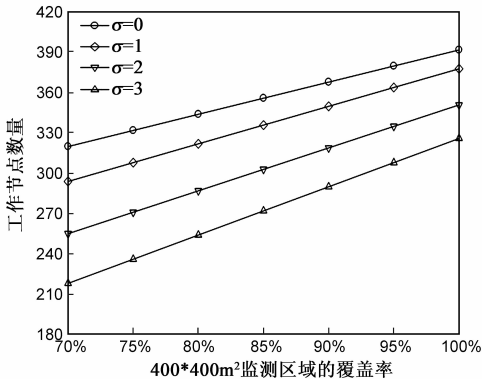


图3 不同 σ 下传感器节点数量与覆盖率变化曲线

图 3 反映了在不同 σ 下传感器节点数量与覆盖率变化曲线. 由于受到 $r_0 \geq 3.3\sigma$ 限制, 本文选用的 σ 值为 $\sigma = \{0, 1, 2, 3\}$, 从图 3 中可以看出, 在四种不同 σ 取值的情况下, 其覆盖率均是呈现递增属性; 在相同的覆盖率下, σ 越小则需要的工作的节点数量越多, 反之亦然, 这主要取决于定理 2 中对监测区域覆盖质量的期望值的大小, 对于同一监测区域而言, 覆盖质量的期望值越大, 其达到完全覆盖所需要节点数越少, 对监测区域覆盖速度越快。

实验 3 以 $400 \times 400 \text{ m}^2$ 作为监测区域, 在相同 σ 下, 对满足不同覆盖率所需要工作节点数占总传感器节点数量的比较关系, 如图 4 所示。

图 4 给出了在相同 σ 情况下, 对于不同覆盖率 (Coverage Probability, CP) 的四种工作节点占总传感器节点数量的变化曲线. 图 4(a) 给出的是 $\sigma = 0$ 时, CP 由 85% 变化至 100% 的过程. 以 CP = 100% 为例加以说明,

当 CP = 100% 时, 工作节点的数量基本保持在 390, 上升阶段其斜率值大于 CP = 85%, 90%, 95%, 其原因主要是对于同一个 σ 而言, CP 越高所需要工作节点数量就越多, 所以当 CP = 100% 时, 其斜率值较大; 其它三幅图的原理与上述过程相似. 在实验 3 的四幅图中可以分成两组看待, 第一组: 图 4(a) 和图 4(b); 第二组是图 4(c) 和图 4(d). 分析图 4(b) 与图 4(c) 的对比过程. 在对比图 4(b) 和图 4(c) 时, 在纵轴方向可以看出图 4(c) 所使用的工作节点数量小于图 4(b), 主要是图 4(c) 中的参数取值大于图 4(b), 又因为节点的感知半径的均值与标准差显现出线性关系, 所以图 4(c) 的斜率小于图 4(b), 故图 4(c) 所使用的工作节点数量小于图 4(b); 再分析图 4(c) 和图 4(d) 工作节点变化情况. 可以看出图 4(c) 和图 4(d) 曲线变化情况均显现了“水平”状, 原因主要是当参数 σ 为 2 或 3 时, 对应于 CP 而言, 均达到了各自的覆盖标准; 从纵轴可以看出图 4(d) 所需工作节点数量小于图 4(c), 其原因与图 4(b) 和图 4(c) 的原因相似, 用同样的办法可以分析出图 4(b) 所需工作节点数量小于图 4(a). 在图 4(a) 和图 4(b) 中, 初始时刻, 总传感器节点数在 300 ~ 350 之间时, 四条曲线的上升速度较快, 所需要传感器工作节点数量较多, 此时尚未达到 99.9% 的覆盖率, 当大于 350 时, 四条曲线趋于平稳;

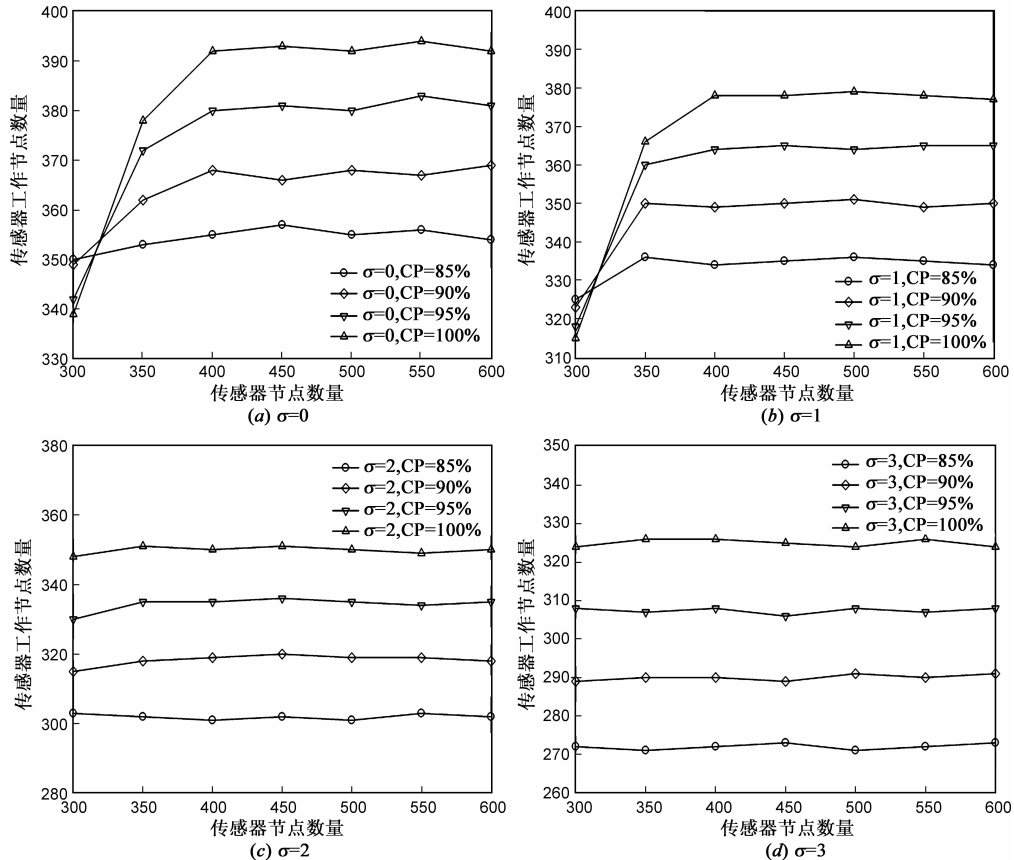


图4 不同 σ 值下传感器节点数量与工作节点数量变化曲线图

在同一个 σ 情况下,对于覆盖率较高的曲线来说,所需要较多的工作节点,所以覆盖率较高的曲线位于上端,而覆盖率较低的曲线位于下端;在图 4(c)和图 4(d)中,四条曲线基本上趋于平稳,主要是原因 σ 相对于上述两种情况取值较大,并且对覆盖率低的曲线来说,工作节点数量基本保持在 270~300 之间,对于覆盖率较高的曲线来说,工作节点数量基本保持在 310~350 之间,说明了本文 ECCA 算法具有一定扩展性,就总体而言,在不同参数下和相同覆盖率的前提下,图 4(a)到图 4(d)所需工作节点数量依次显现为递减关系,实现了一种增强型覆盖过程,图 4(c)和图 4(d)的覆盖速度要高于图 4(a)和图 4(b),对于同一覆盖率而言,图 4(c)和图 4(d)所需工作节点数量要小于图 4(a)和图 4(b),验证本文 ECCA 算法的有效性。

实验 4 为了更一步验证 ECCA 算法的有效性,我们选取了 CCP 算法和 SCCP 算法进行对比实验,本文算法采用 $\sigma = 3$,监测区域选择为 $400 \times 400 \text{ m}^2$,如图 5 所示。

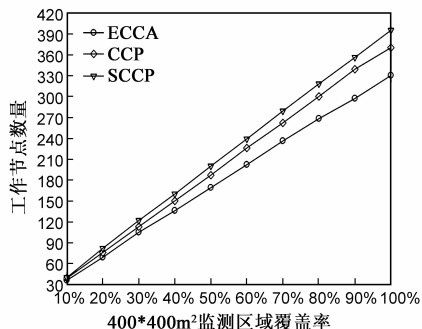


图5 三种算法覆盖率变化曲线示意图

图 5 反映了本文 ECCA 算法与 CCP 算法和 SCCP 算法在同一监测区域内覆盖率变化曲线示意图,可以看出,在整个时间段里,三种算法的变化曲线都呈现出平稳上升趋势.初始时刻,三种算法的覆盖率的变化相当,当 CP = 50% 时,CCP 算法和 SCCP 算法,所需工作节点数量高于 ECCA 算法;本文算法所使用的传感器节点数量为 170,而 CCP 使用的传感器节点数量为 187,SCCP 所使用的传感器节点数量为 201,本文算法的所使用传感器节点数量分别比 CCP 和 SCCP 算法降低了 9% 和 15.42%;随着时间的推移,CCP 算法和 SCCP 算法所需工作节点数量明显高于 ECCA 算法,当 CP = 99.9% 时,ECCA 算法的所需工作数量 330,而 CCP 算法所需工作节点数量为 371,SCCP 算法所需工作节点数量为 395.本文算法的所使用传感器节点数量分别比 CCP 和 SCCP 算法降低了 11% 和 16.45%,综合覆盖全部过程,本文算法与 CCP 算法和 SCCP 算法相比,工作节点数量分别降低了 10.37% 和 15.65%.综合上述分析过程,ECCA

算法所需工作节点数量明显少于上述两种算法,验证了本文 ECCA 算法的有效性。

5 总结

本文对无线传感器网络感知特性进行了分析,给出了传感器节点与正态分布的关系,提出一种增强型覆盖算法(ECCA).该算法对移动目标节点通过传感器节点所形成的扇形区域给出了传感器节点的覆盖率和覆盖质量期望值的求解过程以及首次被传感器节点覆盖时的期望值和方差;利用上述三条定理的推论又给出了完成 N 次覆盖后的期望值和最少传感器节点数量的求解过程;对于整个算法而言,本文也给出了算法复杂度的证明过程,在证明过程可以看出本文算法的复杂较小,容易实现;最后通过仿真实验进一步验证了 ECCA 算法的有效性;本文算法在进一步扩充后可以完成对异构传感器网络多重覆盖.今后的工作重点是如何实现对随机分布节点的二次线性规划以及如何提高对边界覆盖问题的精度计算。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubra A Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393 - 422.
- [2] 奎晓燕, 杜华坤, 梁俊斌. 无线传感器网络中一种能量均衡的基本连通支配集的数据收集算法[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1521 - 1528.
Kui X Y, Du H K, Ling J B. An energy-balanced connected dominating sets for data gathering in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1521 - 1528. (in Chinese)
- [3] Silvia F, Guo X Z, Thomas A W. Probabilistic track coverage in cooperative sensor networks[J]. IEEE Transactions on Systems, 2010, 40(6): 1492 - 1504.
- [4] Kushal M, Shalabh G, Asok R, et al. Statistical-mechanics-inspired optimization of sensor field configuration for detection of mobile targets [J]. IEEE Transactions on Systems, 2011, 41(3): 783 - 791.
- [5] Hamid R K, Efraim P, Yadid P. Effective lifetime-aware routing in wireless sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3359 - 3367.
- [6] Jiang H B, Jin S D, Wang C G. An energy-efficient framework for clustering-based data collection in wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(6): 1064 - 1071.
- [7] Zhao Q, Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(6): 1378 - 1391.

- [8] Xu X H, Li X Y, Mao X F. A delay-efficient algorithm for data aggregation in multihop wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(1): 163 – 175.
- [9] Jie W, Fei D, Ming G. On calculating power-aware connected dominating sets for efficient routing in ad hoc wireless network [J]. Journal of Communications and Networks, 2002, 4(1): 1 – 12.
- [10] Teddy M C, Andrey V S. A distributed self-deployment algorithm for the coverage of mobile wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(11): 877 – 879.
- [11] Yourim Y, Yong H K. An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 45(5): 1473 – 1483.
- [12] 王换招, 孟凡治, 李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议 [J]. 软件学报, 2010, 21(12): 3124 – 3137.
Wang H Z, Meng F Z, Li Z Y. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2010, 21(12): 3124 – 3137. (in Chinese)
- [13] Hossain A, Chakrabarti S, Biswas P K. Impact of sensing model on wireless sensor network coverage [J]. IET Wireless Sensor Systems, 2012, 2(3): 272 – 281.
- [14] Xing G L, Wang X R, Zhang Y F, et al. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor network [J]. ACM Transactions on Sensor Network, 2005, 1(1): 36 – 72.
- [15] Xing X F, Wang G J, Wu J, et al. Square region-based coverage and connectivity probability model in wireless sensor networks [A]. Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing, 2009 Collaborate 5th International Conference [C]. Washington, USA: IEEE Press, 2009. 1 – 8.
- [16] 刘云璐, 蒲菊华, 方维维, 等. 一种无线传感器网络 MAC 协议优化算法 [J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 529 – 539.
Liu Y L, Pu J H, Fang W W, et al. A MAC layer optimization algorithm in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 529 – 539. (in Chinese)
- [17] 陈衡, 钱德沛, 伍卫国, 等. 传感器网络基于邻居信息量化的能量平衡路由 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 1 – 6, 23.
Chen H, Qian D P, Wu W G, et al. Neighbors quantification based energy balance routing in wireless sensor network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 1 – 6, 23. (in Chinese)
- [18] Alper B, Ozgur B. Communication coverage in wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(2): 133 – 135.

- [19] Bang W, Kee C C, Vikram S. Information coverage in randomly deployed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2994 – 3004.

作者简介



孙泽宇 男, 1977 年出生于吉林省长春市. 洛阳理工学院计算机与信息工程系讲师, 现为西安交通大学电子学院博士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、并行计算.

E-mail: lylgszy@163.com



伍卫国 男, 1963 年出生于江西省吉安市. 现为西安交通大学电信学院教授, 博士, 博士生导师, IEEE 会员, CCF 高级会员, 西安交通大学新型计算研究所副所长, 主要研究方向为无线传感器网络、高性能计算、嵌入式网络系统.

E-mail: wgwu@mail.xjtu.edu.cn



王换招 (通信作者) 女, 1963 年出生于山西省运城市. 西安交通大学电信学院副教授, 博士, CCF 高级会员, 主要研究方向为无线传感器网络、软件定义网络.

E-mail: hzhwang@mail.xjtu.edu.cn



陈衡 男, 1979 年出生于山西省运城市. 西安交通大学电信学院讲师, 博士, CCF 会员, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、云计算.

E-mail: hendschen@163.com



邢箫飞 男, 1979 年出生于河南省周口市. 广州大学计算机科学与教育软件学院讲师, 博士后, CCF 会员, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、并行计算.

E-mail: xxfsu@gmail.com