

DOI: 10.7652/xjtuxb201610013

联合感知无线传感网的优化覆盖控制算法

孙泽宇^{1,2}, 李传锋^{1,3}, 邢萧飞⁴, 曹仰杰⁵

(1. 洛阳理工学院计算机与信息工程学院, 471023, 河南洛阳; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 3. 英国贝尔法斯特女王大学电气工程与计算机学院, BT95AH, 英国贝尔法斯特; 4. 广州大学计算机科学与教育软件学院, 510006, 广州; 5. 郑州大学软件与应用科技学院, 450001, 郑州)

摘要: 针对无线传感器网络覆盖过程中出现大量冗余节点导致网络能量快速消耗的问题,提出了一种联合感知优化覆盖控制算法。该算法给出了三节点联合覆盖时最大无缝覆盖率的求解过程。通过概率相关知识,验证了在监测区域内传感器节点覆盖时传感器节点覆盖质量期望值求解方法,以及在与邻居节点进行覆盖对比时的覆盖率判定方法;当存在冗余覆盖时,引入比例系数完成对任意传感器节点处于冗余节点覆盖时的冗余覆盖度的计算过程。仿真实验结果表明:该算法与其他算法在覆盖质量和网络生存周期等方面进行对比,其性能指标分别提升了 11.02% 和 13.27%;该算法不仅可以提高网络覆盖质量,而且可以有效地抑制节点能量的快速消耗,从而延长了网络生存周期。

关键词: 无线传感器网络;覆盖质量;节点联合;网络生存周期

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0086-07

An Optimal Coverage Control Algorithm with Joint Sensing for Wireless Sensor Networks

SUN Zeyu^{1,2}, LI Chuanfeng^{1,3}, XING Xiaofei⁴, CAO Yangjie⁵

(1. School of Computer and Information Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Electrical Engineering and Computer Science, Queen's University Belfast, Belfast BT95AH, UK; 4. School of Computer Science and Software Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 5. School of Software and Application Science Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An optimal coverage control algorithm with joint sensing (OCCAJS) is proposed to solve the problem of rapid consumption of network energy resulted from the large number of redundant nodes in the process of wireless sensor network coverage. The algorithm presents the solving process of maximal seamless coverage in the case of joint coverage of three nodes. Two methods are given, one calculates the expectations of coverage quality when sensor nodes are covered in the monitoring area and the other determines coverage rate when the expectation of a sensor node is compared with those of neighbor nodes. Moreover, when redundant coverage exists, the calculation process of the coverage rate for any sensor node in redundant coverage is presented by using ratio quotient. Simulation results and comparison with some existing algorithms in coverage quality and network lifetime show that the proposed algorithm improves

the average performance about 11.02% and 13.27%, respectively. The proposed algorithm not only improves the coverage quality, but also suppresses the rapid consumption of nodes energy and the network lifetime is prolonged.

Keywords: wireless sensor network; coverage quality; nodes joint; network lifetime

无线传感器网络是由成千上万个传感器节点通过自组织多跳方式连接的一个新型网络系统,可完成对信息世界与物理世界的有机统一,实现数据采集、计算、通信以及存储等操作^[1-2]。随着信息科技的快速进步,无线传感器网络应用范围主要涉及军事国防、环境监测、灾难救援、智能家居、卫生医疗、农业生产和交通运输等各种工程领域^[3-4]。

近几年,国内外一些专家学者对无线传感器网络的覆盖问题进行了深入而细致的研究。文献[5]提出一种增强型覆盖控制算法(ECCA),给出了对监测区域进行覆盖时覆盖期望值的求解过程,验证了随机变量相互独立时各参数之间的比例函数关系,通过对可调参数取值的变化达到对整个监测区域的有效覆盖。文献[6]提出了一种能量有效的目标覆盖算法(ETCA)。该算法利用非线性规划原理建立网络集群,并对任意集群节点进行能量评估和计算,选择出满足覆盖条件的传感器节点建立最优覆盖集,最终在达到最优覆盖效果的同时延长网络生存周期。文献[7]提出了一种基于事件概率驱动机制的覆盖算法(EPDM)。该算法首先建立传感器节点与目标节点覆盖网络模型,然后通过概率计算得到传感器节点与目标节点之间覆盖比值,最后利用节点调度算法完成节点之间状态转换过程,最终达到延长网络生存周期的目的。文献[8]提出一种基于感知模型的连通覆盖调度控制算法(SCA)。该算法利用网络连通性建立感知模型,通过节点性能参数关系计算出选取最少工作节点集合保证最大覆盖质量,从而达到最优覆盖效果。

在传感器节点随机部署^[9]过程中,由于事先无法预知传感器节点的具体位置,使得在某监测区域内或某个监测点上存在大量传感器节点。由于大量传感器节点以高密度形式聚集在一起,产生大量的冗余信息,使得通信链路出现拥塞现象,抑制了网络的可扩展性,降低了网络服务质量,缩短了整个网络生存周期;同时,对传感器节点而言,无法向汇聚节点提供正确的数据信息,从而导致汇聚节点所收集的数据信息存在着较大偏差和不确定性。

针对上述问题,本文提出了一种联合感知优化覆盖控制算法(optimal coverage control algorithm

with joint sensing, OCCAJS),借助于几何理论相关知识,给出三节点联合时最大覆盖面积的求解方法;在此方法的基础上,利用概率相关知识对传感器节点覆盖期望值进行验证,给出最少传感器节点数的求解方法,同时也给出了任意传感器节点处于冗余节点覆盖时的冗余覆盖度判定方法。本文主要贡献体现在以下3点:①在对监测区域进行有效覆盖时,给出节点联合时三节点最大无缝覆盖率的求解方法,计算了三节点联合覆盖时有效最大覆盖率;②在监测区域内,随机选择 k 个节点作为研究对象,以概率理论作为研究基础,通过传感器节点感知半径的特性,给出了 k 个节点联合覆盖时覆盖质量期望值的求解方法;③通过限定可调参数 λ 的取值范围,给出任意节点处于冗余节点覆盖下的冗余覆盖度判定方法。通过仿真实验与其他算法进行对比,验证了本文 OCCAJS 算法的有效性和可行性。

1 预备知识

所有传感器节点随机部署在一个二维监测区域内,并具有如下性质:①初始时刻,所有传感器节点均呈现圆盘形,且感知半径相同,能量相等;②所有传感器节点感知半径服从正态分布,并远小于监测区域的长度,忽略边界效应^[10];③通信半径大于或等于2倍感知半径,并保持所有传感器节点连通;④所有传感器节点之间彼此相互独立,各自地位相同;⑤所有工作的传感器节点均与时钟同步,且保证在监测区域内节点密度足够大^[11]。

定义 1 有效覆盖面为所有感知邻居节点覆盖面积与监测区域的交集

$$S_e = \text{area}((\bigcup_{i=1,2,\dots,N} s_i) \cap \text{area}(S)) \quad (1)$$

式中: S_e 为监测区域内的有效覆盖面积; S 为监测区域面积; s_i 为任意节点覆盖面积。

定义 2 网络覆盖率为在监测区域内,传感器节点的有效覆盖面积与监测区域面积的比值,表达式为

$$P = \text{area}((\bigcup_{i=1,2,\dots,N} s_i) \cap \text{area}(S)) / \text{area}(S) \quad (2)$$

网络覆盖率的物理意义主要体现在覆盖率越大,覆盖效果越好。

定义 3 有效覆盖面积率为传感器节点有效覆盖面积与传感器节点区域面积的比值

$$P_e = \text{area}((\bigcup_{i=1,2,\dots,N} s_i) \cap \text{area}(S)) / \text{area}(\bigcup_{i=1,2,\dots,N} s_i) \quad (3)$$

定理 1 三节点进行联合无缝对接时,最大覆盖面积为 $S_{\max} = (4\pi + 3^{3/2})r^2/2$,最大有效覆盖面积率为 94.24%,其中 r 为传感器节点感知半径, $S_{\max}$ 是最大覆盖面积。

证明 如图 1 所示,设阴影面积为 S_1 ,扇形 $OACB$ 面积为 S_2 ,三角形面积为 S_3 。因为所求覆盖面积最大,所以 3 个传感器节点相交于一点 B ,由对称性及圆心角所对同弦定理可知,阴影中心弦是圆 O 内接正六边形的一条边长,即扇形 $OACB$ 为圆 O 的 $1/6$,弦所对的圆心角为 $\pi/3$,故 $\triangle OAB$ 为等边三角形, $OA=AB=BO=r$ 。

$$S_1 = 2(S_2 - S_3) = (2\pi - 3^{3/2})r^2/6 \quad (4)$$

$$S_{\max} = 3(\pi r^2 - S_1) = 3((4\pi r^2 - 3^{3/2}r^2)/6) = (4\pi + 3^{3/2})r^2/2 \quad (5)$$

有效覆盖面积率为

$$P_e = S_{\max}/(3\pi r^2) = (4\pi + 3^{3/2})/6\pi = 94.24\% \quad (6)$$

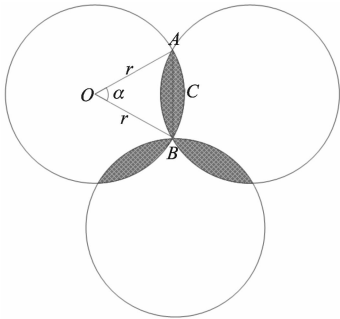


图 1 三节点无缝对接示意图

2 覆盖质量与算法分析

2.1 覆盖质量期望值

在监测区域内,传感器节点要完成对目标节点数据采集、数据通信等操作,其行为特征主要体现在随机抛掷传感器节点分布密度问题,分布密度的优劣直接影响覆盖质量,一个稳定网络不仅要求有合理的网络服务体系,而且还要具备可行的网络覆盖体系。在满足一定覆盖率的前提下,要完成对监测区域有效覆盖,就要计算该监测区域的覆盖期望值。

定理 2 在监测区域内,随机选择 k 个节点,其覆盖期望值需满足 $E(P_k) = 1 - (1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2)/\text{area}(S))^k$ 。

证明 根据定义 2 可知,任意一个传感器节点在监

测区域内的覆盖率为

$$P_1 = \pi r^2 / \text{area}(S) \quad (7)$$

由于传感器节点感知半径服从于正态分布 (R_0, σ^2) , R_0 为均值, σ^2 为方差,在监测区域内任意目标节点被传感器节点所覆盖的覆盖率为

$$P_2 = \int_0^{2R_0} P_1 \exp(-(r - R_0)^2 / 2\sigma^2) / (2\pi)^{1/2} \sigma dr \quad (8)$$

令 $x = (r - R_0) / \sigma$, 则

$$P_2 = (\pi/2)^{1/2} (1/\text{area}(S)) \int_{-R_0/\sigma}^{R_0/\sigma} (x\sigma + R_0)^2 \exp(-x^2/2) dx \quad (9)$$

经计算得

$$P_2 = (\pi/2)^{1/2} (1/\text{area}(S)) (-\sigma^2 x \exp(-x^2/2) + (x^2/2) \Big|_{-R_0/\sigma}^{R_0/\sigma}) + (\pi/2)^{1/2} (\sigma^2 + R_0^2) \quad (10)$$

化简式(10)可得

$$P_2 = \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S) \quad (11)$$

由于随机分布在监测区域内的传感器节点之间相互独立,因此,在监测区域内任意目标节点被 k 个传感器节点所覆盖的覆盖期望值为

$$E(P_k) = 1 - (1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S))^k \quad (12)$$

推论 1 完成对监测区域有效覆盖时,最少节点数为 $\ln(1 - \pi r^2 / \text{area}(S)) / \ln(1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S))$ 。

证明 设 n 为部署在监测区域内的最少传感器节点数,根据定理 2 可知,目标节点被任意一个传感器节点所覆盖的覆盖期望值不大于节点联合时的覆盖期望值,即

$$\pi r^2 / \text{area}(S) \leq 1 - (1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S))^n \quad (13)$$

式(13)两边取对数可得

$$n \ln(1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S)) \leq \ln(1 - \pi r^2 / \text{area}(S)) \quad (14)$$

$$n \leq \ln(1 - \pi r^2 / \text{area}(S)) / \ln(1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S)) \quad (15)$$

因此,完成对监测区域有效覆盖时,所需传感器节点数最小值应为

$$\ln(1 - \pi r^2 / \text{area}(S)) / \ln(1 - \pi(R_0^2 + \sigma^2) / \text{area}(S))$$

2.2 冗余覆盖

初始时刻的传感器节点部署是以随机形态、高密度部署方式抛掷在监测区域内^[12]。由于随机性的存在,会导致监测区域某处产生大量的冗余节点,而大量冗余节点的存在会降低网络扩展性,产生网络拥塞、过快消耗网络能量等一系列问题。目前,解决上述问题主要有两种算法,分别是集中优化算法

和分布式优化算法。集中式优化覆盖算法主要应用于中小型规模网络体系,其工作原理是,传感器节点计算出本身地理位置信息,对计算后的位置信息进行融合并上传至汇聚节点;汇聚节点对收集的信息进行分析后,关闭或休眠冗余节点以达到抑制网络能量消耗。分布式优化算法主要应用于大规模部署传感器网络,其工作原理是,传感器节点与其邻居节点交互信息后,通过某种算法求解出各自节点的冗余度,当冗余度超过事先设定的阈值时,则关闭或休眠冗余度较高的节点,以达到节省网络能量的目的。与集中式优化算法相比,分布式优化算法应用范围更广,适应范围更大。

定义 4 冗余覆盖节点。任意两个传感器节点 s_i, s_j 互为邻居节点,两节点之间的欧氏距离小于冗余临界阈值 l 时,称为冗余覆盖节点。

定义 5 冗余覆盖度。传感器节点 s_i 与邻居节点互为冗余节点时,传感器节点 s_i 的感知面积与其邻居节点感知面积的比值,称为冗余覆盖度。

定理 3 对于隶属于任意一个传感器节点 s_i 的 n 个冗余节点,其冗余覆盖度为

$$P(n) = 1 - \{1 - 1/\pi[\pi/4 - \lambda(4 - \lambda^2)^{1/2}/8 + \lambda^2/2\arccos(\lambda/2) - \lambda^3(4 - \lambda^2)^{1/2}/16]\}^n$$

证明 以图 2 为例加以证明。由假设条件可知,传感器节点均为同构节点,通信半径 R 与感知半径 r 的比例关系为 $R = \lambda r$, λ 是比例系数,设 $\angle BCE = \alpha$, 点 B 与点 C 之间的距离 l 为随机变量,由概率密度函数可知

$$f_l(x) = 2x/\lambda^2 r^2, \quad 0 \leq x \leq \lambda r \quad (16)$$

两圆盘相交区域的面积 S_4 为

$$S_4 = (2\alpha - \sin 2\alpha)r^2 \quad (17)$$

令 BC 之间距离 $l = 2r\cos\alpha$, $dl = 2r\sin\alpha d\alpha$, 其中 $\alpha \in [\arccos(\lambda/2), \pi/2]$, 代入概率密度公式,化简可得

$$P_3 = \int_{\pi/2}^{\arccos(\lambda/2)} (2\alpha - \sin 2\alpha)(4r^2 \cos\alpha/\lambda^2) \sin\alpha d\alpha = 1/\pi[\pi/4 - \lambda(4 - \lambda^2)^{1/2}/8 + \lambda^2/2\arccos(\lambda/2) - \lambda^3(4 - \lambda^2)^{1/2}/16]r^2 \quad (18)$$

由式(18)可知,对于任意冗余节点的冗余覆盖率可表示为

$$P_4 = P_3/\pi r^2 = 1/\pi^2[\pi/4 - \lambda(4 - \lambda^2)^{1/2}/8 + \lambda^2/2\arccos(\lambda/2) - \lambda^3(4 - \lambda^2)^{1/2}/16] \quad (19)$$

当 n 个冗余节点进行有效覆盖时,其冗余覆盖率为

$$P(n) = 1 - \{1 - 1/\pi[\pi/4 - \lambda(4 - \lambda^2)^{1/2}/8 + \lambda^2/2\arccos(\lambda/2) - \lambda^3(4 - \lambda^2)^{1/2}/16]\}^n \quad (20)$$

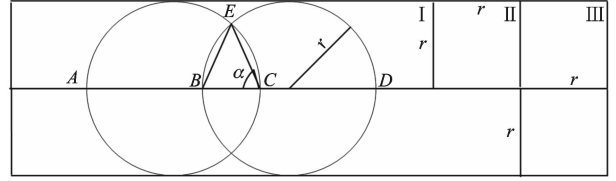


图 2 节点覆盖关联示意图

2.3 OCCAJS 算法实现

定义 6 图连通度。给定无向连通图 $G, G = (V, E)$, 传感器节点 $s_i \in V$, 其节点的连通度定义为邻居节点数; G 连通度指 V 中节点连通度最小值。

在传感器节点冗余方面,本文借助于分簇原理对管理员节点和成员节点进行分类管理。首先建立传感器节点冗余连通图,即节点集合中所有节点通过某种定位算法(例如和质心定位, RSSI 测距定位方法)计算出本身与邻居节点的冗余信息,并将该数据信息在本簇内进行融合,通过通信链路发送给汇聚节点,当汇聚节点接收到该冗余信息后,根据计算结果构造冗余关系连通图 G ; 当传感器节点数增加时,其冗余度也随之增加。在连通图 G 中,当传感器节点冗余度超过事先设定的阈值时,将该节点状态转为休眠。在同一时刻,连通图 G 中存在多个 ($n > 2$) 高冗余度节点时,则以节点能量作为选择条件,利用排序算法选择最高能量节点作为休眠节点,同时在连通图 G 中删除该节点以及该节点所对应的邻居节点,然后通过迭代算法,逐一找出下一个高能量节点,直到连通图 G 所有传感器节点的冗余度均小于阈值为止。在传感器节点能耗方面,首先由成员节点发送一个“inf_coverage”信息至汇聚节点,其中“inf_coverage”信息中包含了节点的位置信息、节点的 ID 信息、能量信息等。经过一个或几个周期,汇聚节点收到各个传感器节点发送来的信息后对信息进行计算,将节点能量由高至低依次存储在链表 CL 中,排序靠前的节点拥有权值较高的覆盖能力。管理节点依据目标节点的位置信息在链表中寻找符合覆盖条件的传感器节点,并发送一个“inf_notice”信息启动该传感器节点对目标节点进行有效覆盖,其余节点处于休眠状态,以达到节省网络能量开销的目的。

3 体系评估

为了进一步验证本文算法的有效性和可行性,以 Matlab 7.0 作为仿真平台,采用本文算法与文献[6-8]算法对网络覆盖率、休眠冗余节点动态变化以

及网络生存周期等进行两组仿真实验对比。通过改变节点自身状态达到优化节点部署形态;通过改变传感器节点数达到对监测区域的有效覆盖;在冗余覆盖过程中,完成了在特定参数作用下的冗余节点数与冗余覆盖率之间的对比;最后,在网络生存周期与算法运行时间上与文献[6]ETCA 算法对比,其特性参数平均高于 ETCA 算法 13.27%,验证了本文算法的稳定性。每组实验数据均取 50 次仿真数据的平均值。

实验 1 采用不同规模仿真平台,将本文算法与文献[7-8]算法在覆盖率和冗余节点数上进行对比,结果如图 3~8 所示。

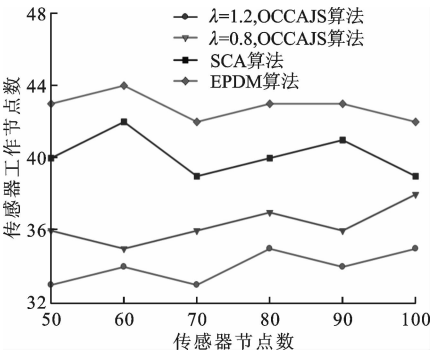


图 3 100 m×100 m 区域传感器节点数与工作节点数关系对比

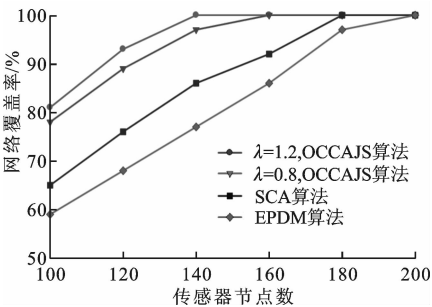


图 4 200 m×200 m 区域网络覆盖率变化对比

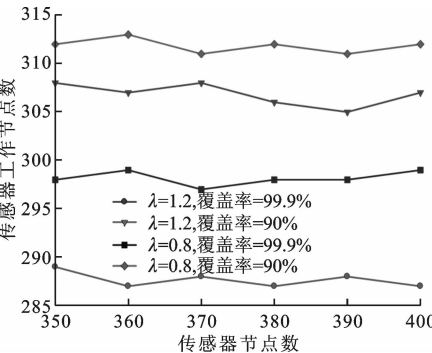


图 5 300 m×300 m 区域不同覆盖率下 OCCAJS 算法的传感器节点数与工作节点数的关系

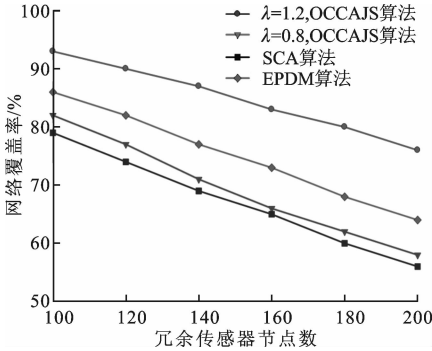


图 6 300 m×300 m 区域冗余节点数与覆盖率关系对比

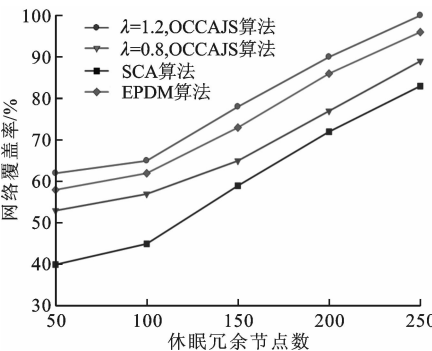


图 7 300 m×300 m 区域休眠冗余节点数与网络覆盖率关系对比

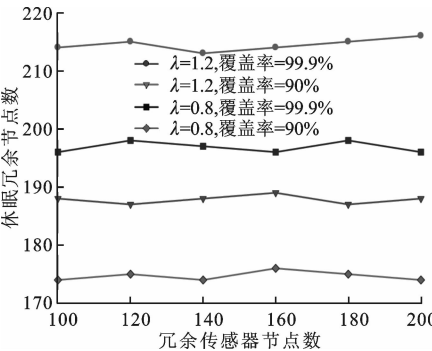


图 8 300 m×300 m 区域冗余节点数与休眠节点数关系对比

图 3~8 分别给出了在不同网络规模、不同参数作用下的覆盖率变化曲线以及冗余节点数与覆盖率变化曲线示意图。图 3 给出了在 100 m×100 m 仿真区域,本文 OCCAJS 算法与 SCA 算法^[8]、EPDM 算法^[7]在传感器节点数与传感器工作节点数之间关系的变化曲线。由图 3 中可以看出,本文 OCCAJS 算法在不同参数作用下所需工作节点数较少,而 EPDM 所需传感器节点数较多,其原因在于:当 $\lambda = 1.2$ 时,其传感器节点与邻居节点所构成的覆盖面积大于 $\lambda = 0.8$ 时的覆盖面积,而 SCA 算法与 EPDM 算法是通过增加传感器节点数达到对监测区域

的有效覆盖。图 4 以 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 区域作为仿真平台,给出了覆盖率随传感器节点数变化曲线,从图 4 可以看出,随着传感器节点数的增加,3 种算法的覆盖率也随之增加,由于本文 OCCAJS 算法通过动态参数 λ 设定与调节完成对监测区域的有效覆盖,因此,在覆盖初始阶段本文算法的覆盖率要高于其他两种算法。在传感器节点数为 137 时,本文算法已达到有效覆盖,而 SCA 算法和 EPDM 算法在节点数为 180 和 199 时,才达到有效覆盖,与两种算法平均覆盖率相比,平均提升了 11.02%。图 5~图 8 给出了以 $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 区域作为仿真平台,对不同覆盖率和冗余节点数的对比。由图 5 可以看出,在满足一定覆盖率的前提下, λ 越大其所需传感器节点数就越少,原因同图 3 分析相似。图 6 给出了冗余传感器节点数与覆盖率关系的对比。由图 6 可以看出,随着冗余节点数的增加,其覆盖率均有所下降,其主要原因是 EPDM 算法是通过事件概率驱动方式完成对冗余节点状态的调度,而 SCA 算法则是通过节点之间的接发信息方式完成冗余节点状态转换。图 7、图 8 的分析过程与图 4、图 5 相似。

实验 2 不同仿真规模下本文算法与文献[6]所提出的 ECTA 算法在网络生存周期与算法运行时间上进行比对实验。

图 9 和图 10 分别给出了本文算法与 ECTA 算法在网络生存周期和算法运行时间上的对比。由图 9 中可以看出,在初始时刻,两种算法的网络生存周期基本相等,随着传感器节点数的增加,两种算法的网络生存周期都有所延长,但 ECTA 算法采用的是非线性不间断连续覆盖模式完成对目标节点的监测,在能耗方向高于 OCCAJS 算法,当传感器节点数为 180 时,两种算法的网络生存周期趋于平稳,本文算法的平均网络生存周期比 ECTA 算法提升了 13.27%。图 10 给出了传感器节点数与算法运行时间

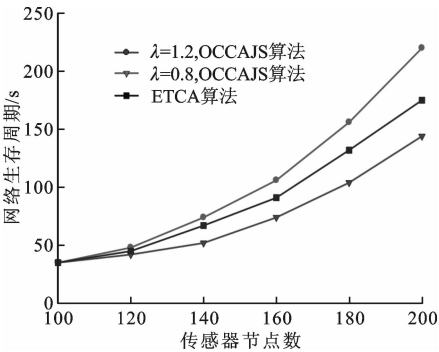


图 9 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 区域两种算法的网络生存周期对比

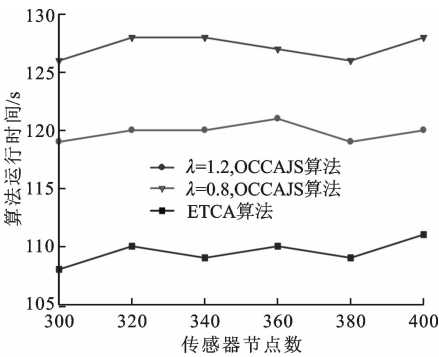


图 10 两种算法的运行时间对比

间的对比,由于 ECTA 算法在节点能量存储方式上采用的是链表式存储,通过遍历算法对整个链表中高能量节点进行排序,让高能量节点获得更高权限以完成对目标节点的覆盖,其算法复杂度低于本文算法,因此,在算法运行时间上,本文算法的运行时间多于 ECTA 算法。

4 结 论

为了更好地解决无线传感器网络覆盖问题,本文提出一种联合感知优化覆盖控制算法。该算法利用几何理论给出了三圆无缝对接的最大覆盖面积的求解方法。在此基础上,利用概率相关理论给出监测区域内 k 个随机节点的覆盖期望值的求解方法和计算过程;定理 2 验证了监测区域有效覆盖最少节点数的求解过程。在冗余节点覆盖度方面,本文引入了比例纲要,建立传感器节点集合冗余连通图,证明了传感器节点冗余覆盖度满足的条件。最后,本文算法与其他算法在覆盖率、冗余度、网络生存周期和算法运行时间上进行了一系列仿真实验对比,并对仿真结果进行了分析与说明,验证了本文算法的有效性和可行性。

今后的工作重点是研究如何实现对边界区域的有效覆盖以及对多个移动目标节点的有效覆盖。

参考文献:

[1] ERDELJ M, LOSCRI V, NATALIZIO E, et al. Multiple point of interest discovery and coverage with mobile wireless sensor [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11 (8): 2288-2300.

[2] ZAIRI S, ZOUARI B, NIEL E, et al. Nodes self-scheduling approach for maximizing wireless sensor networks lifetime based on remaining energy [J]. IET Wireless Sensor Systems, 2012, 2(1): 52-62.

[3] 毕冉, 李建中, 高宏. 无线传感器网络中最小化通信

- 开销的近似监测算法 [J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 2092-2105.
- BI Ran, LI Jianzhong, GAO Hong. Approximate monitoring algorithm for minimizing communication cost in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(10): 2092-2105.
- [4] 任倩倩, 李建中, 王宇. 无线传感器网络具有跟踪质量保证的节点选择算法 [J]. 计算机学报, 2012, 35(10): 2007-2014.
- REN Qianqian, LI Jianzhong, WANG Yu. Tracking quality aware nodes selection algorithms in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(10): 2007-2014.
- [5] 孙泽宇, 伍卫国, 王换招, 等. 无线传感器网络基于参数可调增强型覆盖算法 [J]. 电子学报, 2015, 43(3): 466-474.
- SUN Zeyu, WU Weiguo, WANG Huanzhao, et al. An enhanced coverage control algorithm for wireless sensor networks based on adjustable parameters [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 466-474.
- [6] XING Xiaofei, WANG Guojun, LI Jie. Polytype target coverage scheme for heterogeneous wireless sensor networks using linear programming [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2012, 14(14): 1397-1408.
- [7] SUN Zeyu, WU Weiguo, WANG Huanzhao, et al. A novel coverage algorithm based on event-probability-driven mechanism in wireless sensor network [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1): 1-17.
- [8] 孟凡治, 王换招, 何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议 [J]. 电子学报, 2011, 39(4): 772-779.
- MENG Fanzhi, WANG Huanzhao, HE Hui. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 722-779.
- [9] 何欣, 桂小林, 安健. 面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 6-9.
- HE Xin, GUI Xiaolin, AN Jian. A deterministic deployment approach of nodes in wireless sensor networks for target coverage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(6): 6-9.
- [10] 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 Huanzhao, MENG Fanzhi, LI Zangzhi. Energy efficient conserving protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2010, 21(12): 3124-3137.
- [11] 孙泽宇, 伍卫国, 王招换, 等. 概率模型下的一种优化覆盖算法 [J]. 软件学报, 2016, 27(5): 1285-1300.
- SUN Zeyu, WU Weiguo, WANG Huanzhao, et al. Optimized coverage algorithm in probability mode [J]. Journal of Software, 2016, 27(5): 1285-1300.
- [12] 魏全瑞, 刘俊, 韩九强. 改进的无线传感器网络无偏距离估计与节点定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 1-6.
- WEI Quanrui, LIU Jun, HAN Jiuqiang. An improved DV-hop node locational algorithm based on unbiased estimation for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 1-6.

[本刊相关文献链接]

- 孙泽宇, 伍卫国, 曹仰杰, 等. 无线传感器网络中能量均衡参数可控覆盖算法. 2016, 50(8): 77-83. [doi:10.7652/xjtuxb201608013]
- 汪志伟, 曹建福, 郑辑光. 一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议. 2013, 47(6): 61-67. [doi:10.7652/xjtuxb201306011]
- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012, 46(6): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201206001]
- 代亮, 许宏科, 陈婷. 无线传感器网络可分负载调度算法. 2012, 46(6): 23-28. [doi:10.7652/xjtuxb201206005]
- 梁庆伟, 姚道远, 巩思亮. 一种保障时延能量的无线传感器网络路由协议. 2012, 46(6): 48-52. [doi:10.7652/xjtuxb201206009]
- 方维维, 钱德沛, 刘轶. 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠方案. 2009, 43(2): 33-37. [doi:10.7652/xjtuxb200902008]
- 王换招, 孟凡治, 李增智. 最大化网络有效寿命的传感器网络覆盖保持协议. 2009, 43(10): 66-70. [doi:10.7652/xjtuxb200910014]
- 王换招, 董贝, 罗韩梅, 等. 基于 k -覆盖保证的异构传感器网络节点调度策略. 2008, 42(8): 940-944. [doi:10.7652/xjtuxb200808003]

(编辑 武红江)