

DOI: 10.7652/xjtuxb201608013

无线传感器网络中能量均衡参数可控覆盖算法

孙泽宇^{1,2}, 伍卫国¹, 曹仰杰³, 邢萧飞⁴

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 洛阳理工学院计算机与信息工程学院, 471023, 河南洛阳;
3. 郑州大学软件与应用科技学院, 450001, 郑州; 4. 广州大学计算机科学与教育软件学院, 510006, 广州)

摘要: 针对目标节点进行 k 度覆盖的过程中会出现大量数据冗余迫使网络出现拥塞并导致网络通信能力和覆盖能力降低、网络能量快速消耗等问题,提出了一种能量均衡参数可控的覆盖算法(energy balance parameters-controlled coverage,EBPCC)。该算法利用节点之间的位置关系构造出覆盖网络模型,通过分析网络模型给出监测区域内节点覆盖期望值及对整个监测区域覆盖所需最少节点数的求解过程;在能耗方面给出了工作节点和邻居节点之间的能量转换函数比例关系,利用函数比例关系完成低能量节点的调度,进而达到全网能量平衡。实验结果表明:该算法不仅可以提高网络覆盖质量,还可以有效抑制网络节点能量快速消耗,在相同的监测环境下,该算法的网络生存周期比能量有效的目标覆盖 ETCA 算法延长了 12.91%,覆盖率比事件概率驱动机制 EPDM 算法提高了 7.06%。

关键词: 无线传感器网络; k 度覆盖;覆盖率;网络生存周期;能量均衡

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0077-07

EBPCC: Energy Balance Parameters-Controlled Covering Algorithm for Wireless Sensor Networks

SUN Zeyu^{1,2}, WU Weiguo¹, CAO Yangjie³, XING Xiaofei⁴

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

Abstract: An energy balance parameters-controlled covering algorithm for wireless sensor networks is proposed to improve the insufficiencies that network jam due to the redundant data generated during the k -coverage process of target nodes leads to the reduction in network's capabilities of communication and coverage as well as the rapid consumption of network energy. A network coverage model is constructed by using the location relationship of nodes, and the model is then analyzed to provide the expectation value of nodes within the monitored region and the computing process of the minimum nodes required for covering the whole monitored region. The proportional relation of energy conversion functions between the working nodes and the neighboring nodes is given, and is used to dispatch nodes with low energy and to balance energy consumption of the whole network. Experimental results show that the proposed k -degree

coverage algorithm improves the network's coverage quality and cuts down the rapid network nodes energy consumption, and that in the same monitoring environment, the network lifetime with the EBPCC algorithm is 12.91% longer than that with the ETCA and the coverage rate is 7.06% larger than that with EPDM.

Keywords: wireless sensor network; k -degree coverage; coverage rate; network lifetime; energy balance

无线传感器网络是由成千上万传感器节点通过自组织方式所形成的新型网络体系结构^[1-2],每个传感器节点都具有一定的感知、通信、计算和存储能力,被广泛地应用在军事国防、智能制造、卫生医疗、环境监测、紧急救援、智能家居等各种工程领域,其行为特征主要表现在对所感知的物理世界以多跳方式完成数据采集与通信传输^[3],并将物理世界与信息世界有机统一、融为一体,实现了从数据采集、存储计算到通信传输的链式网络服务体系^[4]。

覆盖质量和网络能耗是评价无线传感器网络体系性能的两个重要指标^[5]。覆盖质量优劣直接体现在对监测区域节点部署方式上。网络生存周期长短直接影响整个网络服务质量,主要体现在部署节点的能量消耗方式上^[6]。一般情况下,受地形地貌及环境因素等诸多条件的限制,在传感器节点部署方式上往往采用随机部署方式。在此部署过程中,由于事先无法获知传感器节点具体位置信息,就会使得对某一监测点处于多重覆盖之中,即 k 度覆盖。另一种情况,由于随机性的存在,有可能使得某一监测区域处于覆盖盲区^[7-8]。为了达到对该点的有效覆盖,只能增加更多的节点达到覆盖目的^[9]。上述两种情况虽然在某种程度上可以达到对目标的有效覆盖,但也存在着一些不足:①由于 k 度覆盖存在,在采集、计算数据过程中以及数据在通信链路传输过程中必然会产生大量的冗余数据,这些冗余数据对数据的计算及通信必将带来较大误差和不确定性^[10-11];②覆盖的真正意义并不是对整个监测区域的完全覆盖,而是对某一个或几个所关注的目标节点进行有效覆盖;在不考虑关注目标节点存在的情况下,对整个监测区域进行完全覆盖的过程中,就会消耗大量节点能量,加快了整个网络体系的崩溃速度;③在部署节点时,由于随机性的存在必然会导致监测区域某个覆盖区域节点密度过大,易产生瓶颈效应,最终将会在整个传输信道内产生信息冗余、信道干扰,同时也降低了网络扩展性。

针对上述研究存在的不足,本文提出一种能量均衡参数可控的覆盖算法(energy balance param-

eters-controlled coverage,EBPCC)。本文算法利用移动目标节点穿越监测区域时覆盖面所形成的扇形区域求解传感器节点的覆盖率及覆盖的期望值。在能量方面,本文给出多点传输与单点传输求解过程。对于工作传感器节点而言,在满足一定覆盖率的前提下,移动目标节点穿越 k 度覆盖区域时,通过传感器节点自适应转换机制关闭能量介于阈值取值之内或高于阈值上限的传感器节点,或将传感器节点置于休眠状态,而其他传感器节点则通过能量调度算法完成传感器节点之间的能量转换机制,以提高网络生存周期。

本文贡献主要体现在以下几点:①对相关知识进行分析与总结,在此基础上提出了EBPCC算法的网络模型;②根据随机部署特性,分析了在监测区域内部署传感器节点的分布形态,给出了服从 λ 、 $N(s)$ 为随机变量的泊松分布的计算过程以及网络覆盖率求解方法;③以网络模型作为研究对象,提出了计算覆盖期望值的方法,在对目标节点进行联合覆盖时,给出覆盖期望值的求解过程;④最后通过仿真实验与能量有效的目标覆盖算法(energy efficient target coverage algorithm,ETCA)和事件概率驱动机制(event probability drive mechanism,EPDM)对网络生存周期和覆盖率两项性能指标进行了比对实验,验证了本文EBPCC算法的有效性和稳定性。

1 网络模型与覆盖质量

为了更好地研究无线传感器网络覆盖问题,EBPCC算法基于以下4种假设:①初始时刻传感器节点均为同构形态,且感知区域均为圆盘形;②初始时刻任意节点均能量相等,感知半径相同,且与时钟同步;③传感器节点随机部署在边长为 l 的正方形监测区域内,并保证节点的感知半径远小于边长 l ,边界效应可以忽略;④任意节点无需采用某种定位方法获取自身的位置信息。

1.1 基本定义

定义1 覆盖质量 在监测区域内,所有传感器节点

的感知面积之和与监测区域面积的比值,称为覆盖质量。在某种程度上反映了对目标节点覆盖的程度。

定义 2 联合覆盖 目标集合中任意一个目标节点至少被一个传感器节点所覆盖的覆盖率为 p ; 当该目标节点被多个联合传感器节点所覆盖的覆盖率称为联合覆盖率

$$p_n = 1 - (1 - p)^N \quad (1)$$

式中: p_n 是联合覆盖率; p 是任意一个传感器节点的覆盖率; N 是传感器节点的个数^[12]。

定理 1 监测区域内随机部署节点服从于概率密度为 λ , $N(s)$ 为随机变量的泊松分布。

证明 设 $S_{i, \text{area}}$ 为任意传感器节点在监测区域的覆盖面积, S 是边长为 l 的正方形监测区域的面积。 $p_1 = |S_{i, \text{area}}|/S$, 由二项式定理可知, 在监测区域内, k 个工作传感器节点的联合概率为

$$p(N(s) = k) = C_N^k p_1^k (1 - p_1)^{N-k} \quad (2)$$

对于整个监测区域而言, 传感器节点密度 $\lambda = N/S$, 将 λ 和 p 代入式(2)可得

$$p(N(s) = k) = C_N^k \left(\frac{\lambda |S_{i, \text{area}}|}{N} \right)^k \left(1 - \left(\frac{\lambda |S_{i, \text{area}}|}{N} \right) \right)^{N-k} \quad (3)$$

解之得

$$p(N(s) = k) = (1 - (\lambda |S_{i, \text{area}}|/N))^N ((\lambda |S_{i, \text{area}}|/N)^k / k!) \cdot (N!/(N-k)!(N - \lambda |S_{i, \text{area}}|)^k) \quad (4)$$

当监测区域内的传感器节点数趋于无穷大, 即 $N \rightarrow \infty$ 时

$$p(N(s) = k) = (e^{-\lambda |S_{i, \text{area}}|} (\lambda |S_{i, \text{area}}|)^k / k!) \quad (5)$$

证毕。

由定理 1 可以看出, 随机部署在监测区域内的传感器节点之间呈现出相互独立且均匀分布, 其传感器节点数的分布服从于概率密度为 λ , $N(s)$ 为随机变量的泊松分布。

传感器节点随机部署模型主要解决传感器节点分布密度问题^[13-14]。如何使用最少传感器节点完成对监测区域的有效覆盖, 取决于在监测区域内随机部署传感器节点数^[15]。当在某个监测区域内部署足够多的传感器节点时, 虽然可以达到完全覆盖的目的, 但从节点能耗与节点冗余角度来说, 又不切实际。其一, 当大量的传感器节点部署在监测区域时, 无形中会消耗大量传感器节点的能量, 不利于延长整个网络生存周期, 甚至当某个汇聚节点能量耗尽, 使得整个网络体系快速崩溃; 其二, 由于大量传感器节点的存在, 在传感器节点之间的连通过程中

将会产生大量的冗余节点, 这些冗余节点的存在必然对无线信道产生干扰, 消耗冗余节点能量, 缩短了网络生存周期。

为了克服上述两点不足, 更好地提高网络服务质量, 最大限度延长网络生存周期, 要求以某种方式来实现对监测区域的有效覆盖, 以便提高整个监测区域的覆盖率, 为此本文引入推论 1。

推论 1 在监测区域内, 当多个传感器节点进行联合覆盖时, 联合覆盖率 $p_2 = 1 - e^{-\lambda \pi R^2}$ 。

证明 任意目标节点未被传感器节点所覆盖的覆盖率为 $p_3 = 1 - (|S_{i, \text{area}}|/S)$, 根据式(4)和定理 1 可知, 当目标节点处于至少 k 个传感器节点联合覆盖时, 未被传感器节点覆盖的覆盖率为

$$p_k = (e^{-\lambda |S_{i, \text{area}}|} (\lambda |S_{i, \text{area}}|)^k / k!) \cdot (1 - (|S_{i, \text{area}}|/S)^k) \quad (6)$$

经计算

$$p_k = e^{-\lambda \pi R^2} \quad (7)$$

因此, 在监测区域内的联合覆盖率 $p_2 = 1 - e^{-\lambda \pi R^2}$ 。

证毕。

1.2 网络模型

图 1 给出了以扇形为覆盖区域的 k 度覆盖网络模型, 以 4 个传感器节点以及坦克和士兵作为研究对象进行分析, 如图 1 所示。

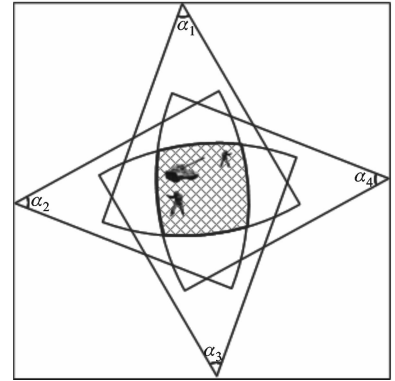


图 1 k 度覆盖网络模型

由图 1 中可以看出, 以 l 为边长的正方形作为监测区域, 对于传感器节点而言, 其扇面为覆盖区域, 同时也给出 4 个扇面的不同夹角, 以弧度制表示。目标节点坦克和士兵置于 $k=4$ 度覆盖中。设传感器节点的感知半径为 R , 其覆盖扇面的面积为

$$S_1 = \pi R(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) \quad (8)$$

令 $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$, 即

$$S_1 = \pi \theta R \quad (9)$$

对于边长为 l 的正方形监测区域而言, 当目标节点

始终处于传感器节点覆盖区域时,其整个网络的覆盖率为

$$P_N = \pi\theta R/l^2 \quad (10)$$

定理 2 在扇形监测区域内,移动目标节点被传感器节点联合覆盖的期望值为 $E(X) = \pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2$ 。

证明 以图 1 网络模型作为研究对象。边长为 l 的正方形作为监测区域,传感器节点扇面作为有效覆盖区域, θ 是扇面夹角之和;由于传感器节点的感知半径 R 服从于正态分布 $N(l, \sigma^2)$,对于正方形监测区域来说,其覆盖期望值为

$$E(X) = \int_0^{2l} (P_N / (2\pi)^{1/2} \sigma) \exp(-(R-l)^2 / 2\sigma^2) dR \quad (11)$$

令 $x = (R-l)/\sigma$, 则

$$dR = \sigma dx \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得

$$E(X) = \int_{-l/\sigma}^{l/\sigma} \pi\theta(x\sigma + l)^2 ((2\pi)^{1/2} \sigma)^{-1} \cdot \exp(-x^2/2) \sigma dx = \pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2 \quad (13)$$

证毕。

推论 2 满足一定覆盖率的前提下,使用最少数量的传感器节点完成对监测区域的联合覆盖时,相应的覆盖期望值是 $(1-\epsilon)/\ln(1-\pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2)$ 。

证明 随机部署在监测区域内的所有传感器节点位置相对独立。根据定理 2 可知,监测区域内任意目标节点至少被覆盖集中一个节点所覆盖的期望值为

$$E(k_1) = \pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2 \quad (14)$$

若覆盖集中存在 n 个工作节点,对监测区域内任意目标节点构成联合覆盖所产生的期望值为

$$E(k_n) = 1 - (1 - \pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2)^n \quad (15)$$

在满足一定覆盖质量时,必存在一个极小的数 ϵ ,使得联合覆盖期望值小于 ϵ 时,极限存在,即

$$1 - (1 - \pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2)^n \leq \epsilon \quad (16)$$

解之得

$$n \geq \ln(1-\epsilon)/\ln(1-\pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2) \quad (17)$$

即当完成对监测区域有效覆盖时,最少传感器节点数覆盖期望值是 $\ln(1-\epsilon)/\ln(1-\pi\theta(\sigma^2 + l^2)/l^2)$ 。

证毕。

定理 2 和推论 2 给出了覆盖期望值和联合覆盖期望值的计算过程。一般情况下,移动目标节点所行进的轨迹在监测区域内被传感器节点所覆盖时呈现出扇面形态。在计算覆盖期望值时,采用概率理论和数学几何理论计算方法来完成。但是,对于移动目标节点首次进入监测区域时,如何得到首次覆

盖期望值是必须解决的问题。为此本文引入定理 3。

定理 3 传感器节点首次完成对移动目标覆盖时,其覆盖期望值为 $E(X) = [1 - (1-p)^M]p^{-1}$, 其中 M 是移动目标节点完成转移最多的次数, p 是传感器节点的覆盖率。

证明 根据概率理论可知,设随机变量 X 为移动目标节点转移的次数,则 X 的可能取值范围是 $X \in [1, 2, 3, \dots, M]$, 当 $X=m$, 且满足 $1 \leq m \leq M-1$ 时,即前 $M-1$ 次移动目标节点并没有被传感器节点所覆盖,得 X 的分布密度函数为

$$P(X=k) = \begin{cases} p(1-p)^{k-1}, & k=1, 2, 3, \dots, M-1 \\ (1-p)^{M-1}, & k=M \end{cases} \quad (18)$$

由覆盖期望公式可得

$$E(X) = \sum_{k=1}^{M-1} kp(1-p)^{k-1} + M(1-p)^{M-1} \quad (19)$$

$$\text{令 } q = 1 - p, S = \sum_{k=1}^{M-1} k(1-p)^{k-1}, \text{ 即 } S =$$

$$\sum_{k=1}^{M-1} kq^{k-1}, \text{ 在等式两端乘以 } q, \text{ 可得 } qS = \sum_{k=1}^{M-1} kq^k, \text{ 即}$$

$$S = \frac{1-q^{M-1}}{(1-q)^2} - \frac{(M-1)q^{M-1}}{1-q} = \frac{1-(1-p)^M}{p^2} - \frac{M(1-p)^{M-1}}{p} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得

$$E(X) = p \left(\frac{1-(1-p)^{M-1}}{p^2} - \frac{(M-1)(1-p)^{M-1}}{p} \right) + M(1-p)^{M-1} = \frac{1-(1-p)^{M-1}}{p} - (M-1)(1-p)^{M-1} + M(1-p)^{M-1} = \frac{1-(1-p)^M}{p} = [1-(1-p)^M]p^{-1} \quad (21)$$

证毕。

2 算法描述与分析

2.1 能量转换

在正方形监测区域内,经过一个或多个周期后,由于工作节点自身能量的消耗必然会引起覆盖面积相应的变化。为了更好地抑制传感器节点能量的消耗,最大限度地延长网络生存周期,采用节点能量模型对多边及单边传输数据所消耗节点能量进行分析,其节点发送端能量消耗模型为

$$E_1(l, d) = lE_T + E_{\text{amp}}(l, d) = \begin{cases} lE_T + l\epsilon_{\text{fs}}d^2, & d < d_0 \\ lE_T + l\epsilon_{\text{amp}}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (22)$$

接收端能量消耗模型为

$$E_2(l) = E_R(l) = lE_3 \quad (23)$$

式中: l 为发送端与接收端之间传输数据的长度; ϵ_{fs} 为自由空间能耗; ϵ_{amp} 为多路衰减能耗; E_T 和 E_R 分别表示发送与接收单位数据长度所消耗的能量; d 代表通信节点之间的欧氏距离; d_0 是欧氏距离上限阈值,当通信节点之间的距离小于 d_0 时,能量衰减指数为2,反之衰减指数为4; E_3 代表通信节点之间接收与发送模块所消耗的能量^[15]。

EBPCC算法借助于传感器节点在感知半径范围内的邻居节点所形成的联盟,将所有节点划分成若干个联盟,并以节点能量较高、计算能力和通信能力较强的节点当作管理员节点,其他节点称之为成员节点。在网络初始化阶段,由于节点属性相同,所以任意选取一个节点作为管理员节点,成员节点首先发送一个“Coverage”消息到管理员节点,管理员节点根据自身特性开辟一定容量的存储空间,并将收集来的信息存储在开辟空间的一个链表CL中,其中“Coverage”消息主要包含发送节点自身属性和当前状态,例如发送节点的能量变化情况、ID信息以及发送节点对关注节点覆盖情况等。经过一轮或几轮周期后,管理员节点收集了该联盟中所有节点的发送信息。管理员节点根据所收集来的各种信息按照剩余能量和覆盖期望值大小对所有成员节点进行排序,并将其存储在链表中,对排序的所有节点赋予一定权值,使排名靠前节点的权值高于排名靠后节点的权值。管理员节点根据对目标节点覆盖情况从链表中依次查找符合条件的成员节点,并标记符合条件的成员节点,同时向该成员节点发送“Notice”消息,以调度其他成员节点完成相应的覆盖任务。

2.2 EBPCC算法描述

EBPCC算法实现过程主要分为7个步骤。

步骤1 首先计算每个联盟结构中所有成员节点的覆盖期望值,记作 $E(X) = \bigcup \{(s_i, L) | s_i \sim N(L, \sigma^2)/l^2\}$ 。

步骤2 管理员节点将收集来的成员节点信息存储在一个CL链表中,其中“Coverage”消息包含了发送节点的ID信息、能量信息和覆盖期望值信息等。

步骤3 经过一轮或几轮周期后,管理员节点对所有存储在链表中的成员节点信息以剩余能量和覆盖期望值大小进行排序,并把较高的权值赋予排名靠前的成员节点。

步骤4 管理员节点对链表中成员节点是否覆盖目标节点进行查找,并对符合条件的成员节点做标记。

步骤5 管理员节点对链表中成员节点进行查找,当某个成员节点剩余能量高于上限阈值时,则向其邻居节点发送一个“Notice”消息,邻居成员节点接收到“Notice”消息后,转为启动状态,同时启动感知模块对监测区域进行覆盖。

步骤6 如果存在一个目标节点同时被 k 个成员节点所覆盖时,管理员节点则会重新遍历链表,查找满足覆盖要求的成员节点,并将该成员节点关闭。

步骤7 管理员节点完成对链表遍历后,通过自适应调度机制查找满足下一轮覆盖条件的传感器节点,并利用该节点完成对监测区域的下一轮覆盖,否则转向步骤2。

2.3 复杂度分析

定理4 在理想状态下EBPCC算法的算法复杂度为 $O(n)$,非理想状态下的算法复杂度为 $O(n^2)$ 。

证明 EBPCC算法通过发送与接收不同类型信息来完成对成员节点之间的能量转换,并通过查找链表方式,获取最佳节点完成后续覆盖。如果EBPCC算法在一个周期内或小于一个周期完成对监测区域覆盖,则其算法复杂度为 $O(n)$,当EBPCC算法运行时间大于一个周期或小于最大周期时,则需完成 n 次循环覆盖过程,即最差算法复杂度为 $O(n^2)$ 。证毕。

3 体系评估

为了验证EBPCC算法的有效性和稳定性,本文采用Matlab7作为仿真平台,与文献[14]和文献[15]中的算法进行对比。

实验1 在延长网络生存周期上,将EBPCC算法与文献[14]ETCA算法进行对比,实验数据是200次仿真数据的平均值,如图2~4所示。

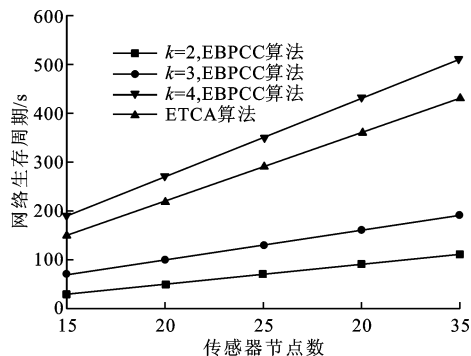


图2 100 m×100 m监测区域内EBPCC与ETCA算法的网络生存周期对比

实验1是在不同监测区域下,EBPCC算法与ETCA算法在网络生存周期上的对比实验。实验

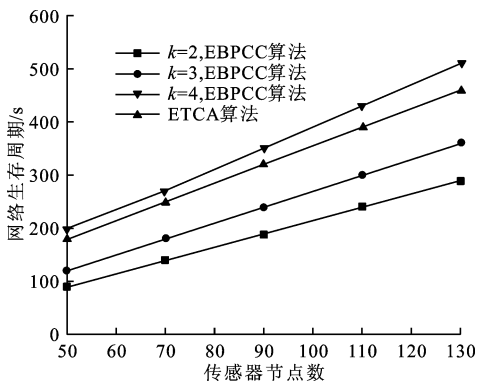


图3 200 m×200 m 监测区域内 EBPCC 与 ETCA 算法的网络生存周期对比

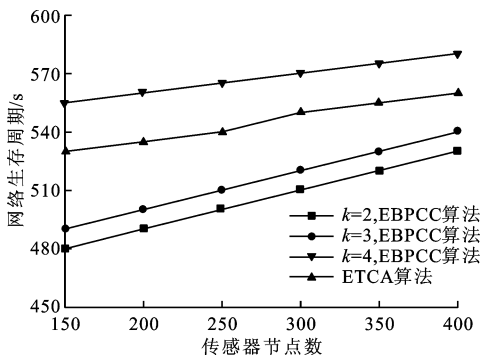


图4 300 m×300 m 监测区域内 EBPCC 与 ETCA 算法的网络生存周期对比

中 k 取不同的数值,通过改变随机部署在监测区域内节点数来改变网络规模。对于规模较小的监测区域来说,随机部署的节点数初始值为 15,并以 15 作为单位基数,逐步递增。通过仿真图 3 可以看出:无线传感器网络的生存周期随着传感器节点数的增加而呈线性上升趋势,主要原因是在传感器节点集合中的成员节点通过节点的调度机制轮流对目标节点进行覆盖,延长了网络生存周期;对于规模较小的 100 m×100 m 和 200 m×200 m 网络监测区域来说,在相同的网络参数作用下,EBPCC 算法比 ETCA 算法的网络生存周期平均延长了 11.71%、13.89%;对于规模较大的网络监测区域,随机部署的节点数初始值为 150,并以 50 作为单位基数,逐步递增,网络生存周期变化曲线随着传感器节点数的递增也呈现出上升趋势,其上升的幅度超过小规模网络监测区域,与 ETCA 算法相比,网络生存周期平均提高了 13.19%。综合上述 3 种情况,本文算法的网络生存周期平均提高了 12.91%。

实验 2 将 EBPCC 算法与文献[15]所提出的 EPDM 算法在覆盖率方面进行对比。以 200 m×200 m 网络监测区域为例,实验数据是 200 次仿真数据

的平均值,结果如图 5、6 所示。

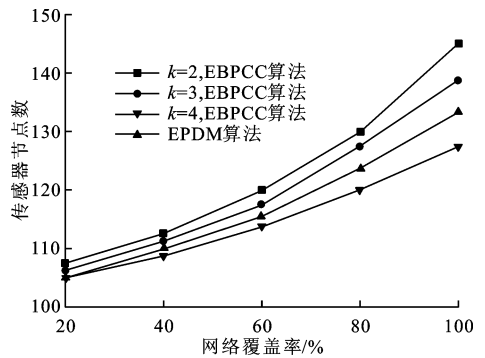


图5 200 m×200 m 监测区域内 EBPCC 与 EPDM 算法的覆盖率对比

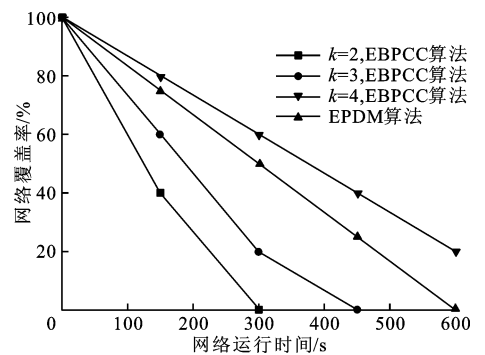


图6 200 m×200 m 监测区域内网络运行时间与覆盖率对比图

在图 5 中,随着传感器节点数增加,其覆盖率也呈现递增变化。当 EBPCC 算法覆盖率达到 99.9% 时,对应不同 k 值时的传感器节点数分别是: $k=2$ 时, $N=144$; $k=3$ 时, $N=137$; $k=4$ 时, $N=126$,而 EPDM 算法覆盖率在 $N=126$ 时,尚未达到 99.9%,这说明本文 EBPCC 算法的覆盖率要高于 EPDM 算法。由图 6 可以看出,初始时刻 2 种算法覆盖率基本相同,但是随着时间的推移,EBPCC 算法与 EPDM 算法的覆盖率均呈现下降趋势,主要原因是 EPDM 算法在网络运行时间内采用的是对监测区域的目标节点连续覆盖,直到该节点能量消耗完毕为止。在 $t=150$ s 时,EBPCC 算法与 EPDM 算法的覆盖率下降较为明显:EBPCC 算法的覆盖率分别为 $k=2$ 时的 40.24%, $k=3$ 时的 64.05%, $k=4$ 时的 82.19%; EPDM 算法覆盖率为 75.13%。可以看出,在整个网络生存周期内,EBPCC 算法覆盖率明显高于 EPDM 算法,验证了本文算法的有效性。

4 总 结

本文在对无线传感器网络覆盖特性分析的基础

上,提出了一种能量均衡参数可控的覆盖算法(EB-PCC)。该算法给出对监测区域内覆盖期望值的计算方法,并在此基础上,给出使用最少传感器节点完成对监测区域的期望值的求解过程,同时对移动目标节点完成首次覆盖时的期望值也做了相应的计算和推导。在能量方面,给出了抑制节点能量消耗的具体步骤与算法描述过程。最后,在不同参数 k 值的作用下,在网络生存周期以及网络覆盖率2个方面与ETCA算法和EPDM算法进行了仿真对比实验,验证了EBPCC算法的有效性和稳定性。今后的主要工作重点是实现在非线性规则区域对多目标节点的有效覆盖以及提高对监测区域边界的有效覆盖。

参考文献:

- [1] 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 localization algorithm based on unbiased estimation for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 1-6.
- [2] XING Xiaofei, WANG Guojun, LI Jie. Collaborative target tracking in wireless sensor networks [J]. Ad-hoc and Sensor Networks, 2014, 23(8): 117-135.
- [3] YANG Changlin, CHIN Kwanwu. Novel algorithm for complete targets coverage in energy harvesting wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(1): 118-121.
- [4] 李孜,高春玲,孙泽宇,等.基于概率模型的无线传感器网络优化覆盖算法[J].光通信研究,2015,32(4):68-71.
LI Zi, GAO Chunling, SUN Zeyu, et al. Probability model-based optimization coverage algorithm for wireless sensor networks [J]. Study on Optical Communications, 2015, 32(4): 68-71.
- [5] 毕冉,李建中.无线传感器网络中能量高效的Top- k 监测算法[J].计算机研究与发展,2015,51(11):2361-2373.
BI Ran, LI Jianzhong. Energy efficient top- k monitoring algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 51(11): 2361-2373.
- [6] 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控制算法[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.
- [7] AMMARI H M, DAS S K. Centralized and clustered k -coverage protocols for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2012, 61(1): 118-132.
- [8] SEOK J H, LEE J Y, KIM W, et al. A bipopulation-based evolutionary algorithm for solving full area coverage problems [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 13(12): 4796-4807.
- [9] YANG Changlin, CHIN K W. Novel algorithms for complete targets coverage in energy harvesting wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(1): 118-121.
- [10] MINI S, UDGATE S, SABAT S. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 636-644.
- [11] CHENG T M, SAVKIN A V. A distributed self-deployment algorithm for the coverage of mobile wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(11): 877-879.
- [12] SUN Zeyu, LI Heng, CHEN Heng, et al. Optimization coverage of wireless sensor networks based on energy saving [J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2014, 7(4): 35-48.
- [13] 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): 772-779.
- [14] XING Xiaofei, WANG Guojun, LI Jie. Polytype target coverage scheme for heterogeneous wireless sensor networks using linear programming [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014, 14(8): 1397-1408.
- [15] 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.

(编辑 武红江)