



一种带有可控动态参数的优化覆盖算法

李川¹, 李学俊²

(1. 绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000;

2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘要: 能耗与覆盖问题是无线传感器网络研究领域的基本问题, 也是一个重点问题。针对传感器节点所呈现的同构性特点, 提出了一种带有可控动态参数的优化覆盖算法(OCCDP)。该算法首先给出了3节点联合覆盖时, 最大无缝覆盖率的求解过程; 其次, 给出了在监测区域内存在传感器节点覆盖时, 覆盖质量期望值求解方法以及与邻居节点进行覆盖比对时覆盖率的判定方法; 当存在冗余覆盖时, 给出了任意传感器节点处于冗余节点覆盖时的覆盖率的计算过程; 最后, 通过仿真实验与其他算法在覆盖质量和网络生存周期等方面进行对比, 其性能指标平均提升了11.02%和13.27%, 从而验证了提出算法的有效性和可行性。

关键词: 无线传感器网络; 覆盖质量; 节点联合; 网络生存周期; 优化覆盖

中图分类号: TP393.01

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016297

An optimization coverage algorithm with controllable dynamic parameters

LI Chuan¹, LI Xuejun²

1. Mianyang Vocational and Technical College, Mianyang 621000, China

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: The energy consumption and coverage is a fundamental problem in the field of wireless sensor networks, which is also a priority issue. Based on the isomorphism of the sensor nodes, an optimized coverage algorithm with controllable dynamic parameters (OCCDP) was presented. Firstly, it gave the solution of the largest seamless coverage probability under the joint coverage of three nodes. Secondly, it gave the solving method of the sensor nodes coverage quality expectation in monitoring area and compares to neighbor nodes coverage probability determination method. When there was a redundant coverage, it gave the process of calculation of coverage probability when any sensor node was in the condition of redundant nodes coverage. Finally, through the comparison of the simulation with other algorithms in terms of the coverage quality and the network lifetime, it can be concluded that the average performance can upgrade to 11.02% and 13.27%, which proves the effectiveness and feasibility of the algorithm.

Key words: wireless sensor network, coverage quality, nodes joint, network lifetime, optimization coverage

收稿日期: 2016-07-23; 修回日期: 2016-11-17

基金项目: 四川省教育厅自然科学重点项目(No.15ZA0369)

Foundation Item: Key Program of Nature Science of Sichuan Educational Committee(No.15ZA0369)

1 引言

无线传感器网络是由成千上万传感器节点通过自组织多跳方式连接成的一个新型网络系统,并完成了信息世界与物理世界的有机统一,实现数据采集、数据计算、数据通信以及数据存储等操作^[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、卫生医生、农业生产和交通运输等各种工程领域^[3,4]。

网络能耗和覆盖质量是无线传感器网络研究领域的两项重点问题^[5,6]。覆盖质量的优劣直接影响对移动目标的监测效果,其行为特性主要体现在传感器节点部署方式上;网络能耗问题主要表示在有效地抑制传感器节点能量的快速消耗,延长整个网络生存周期,以提高网络服务质量。覆盖质量优劣与网络能耗快慢主要取决于传感器节点部署的合理性^[7]。一般情况下,受到地形地貌以及环境因素等限制,在传感器节点部署问题上,通常采用随机抛撒方式。由于随机性的存在,在抛撒过程中,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多个或大量传感器节点,形成了 k 度覆盖。另一种情况是在随机抛撒过程中,也有可能使得某监测区域或某监测点未被传感器节点覆盖,形成了覆盖盲区,这样只能通过增加传感器节点数量达到有效覆盖。上述两种情况均可以达到覆盖的效果,但也存在着一定的不足:由于大量传感器节点以高密度形式聚集在一起,将会产生大量冗余信息,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;当所关注的目标节点处于盲区时,无法对所关注的目标节点进行实时监测与覆盖,对于传感器节点而言,无法向汇聚节点提供正确的数据信息,从而导致汇聚节点收集的数据信息存在较大的偏差和不确定性;经过几个工作周期后,传感器节点呈现出异构性,由于异构性的存在,使得节点覆盖范围发生了变化,一旦所关注的目标节点由覆盖状态变为未覆盖状态,采集的目标节点数据信息就失去了意义;覆盖的本质不是对所有目标节点进行完全覆盖,而是对所关注的目标节点进行有效覆盖。有效覆盖的本质主要体现在当所关注的移动目标节点穿越监测区域时,首先由传感器节点完成覆盖,同时唤醒其联合节点完成联动式覆盖,并将采集的移动目标节点的数据信息上传至汇聚节点。

针对上述研究存在的不足,本文主要贡献体现在以下

5点。

- 对国内外一些相关文献进行了研究与分析,同时借助于相关文献的理论思想,提出本文 OCCDP 算法。
- 利用几何相关理论,给出了3节点联合时,最大无缝对接覆盖率的推导过程,并计算了3节点联合覆盖时的最大有效覆盖率。
- 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,利用传感器节点感知半径的特性,给出了 k 个节点联合覆盖时,覆盖质量期望值的计算方法和过程。
- 给出了目标节点被联合节点或单节点覆盖时,其感知强度比较方法以及通过对可调参数 λ 的取值范围限定,给出任意传感器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,验证本文 OCCDP 算法的有效性和可行性。

2 相关工作

无线传感器网络能耗与有效覆盖是目前无线传感器网络研究领域的一项重点问题,同时也是支撑无线传感器网络其他特征指标的一项基本问题。近些年,国内外许多专家学者为此开展了大量深入与细致的研究工作。参考文献[8]以圆内接正六边形的对称性作为研究对象,提出了连通覆盖优化调度算法。该算法能够减少覆盖的重叠区域,以提高对整个监测区域的有效覆盖。参考文献[9]给出一种增强型覆盖控制算法(enhanced coverage control algorithm, ECCA),该算法给出了对监测区域进行覆盖时,覆盖质量期望值求解过程,并验证了随机变量相互独立时,各参数之间的比例函数关系,通过调整可调参数的取值,实现对整个监测区域的有效覆盖。参考文献[10]在满足网络连通的前提下,利用传感器节点移动特性完成对目标节点的覆盖,提出了两种启发式算法,将泰森多边形图作为目标节点活动区域,以减少传感器节点能量消耗,从而达到网络能量均衡,提高网络覆盖率。参考文献[11]提出了一种网络生存周期最大化的栅栏覆盖算法。该算法以移动目标节点穿越监测区域为起点,利用传感器节点与邻居节点的关联属性对移动目标节点进行连续覆盖,最终达到对目标节点完全覆盖的目的。参考文献[12]提出一种分布式连通覆盖保持算法(distributed connectivity and coverage maintenance algorithm, CoCo)。该算法通过工作节点唤醒冗余节点的方



式保持整个网络的连通性,通过有限地移动传感器节点保持对目标节点的有效覆盖,抑制了由监测距离长度所带来的能量消耗,从而延长了网络生存周期。参考文献[13]提出了一种能量有效的目标覆盖算法 (energy-efficient target coverage algorithm, 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,建立最优化覆盖集,从而达到优化覆盖效果和延长网络生存周期的目的。参考文献[14]提出一种基于事件概率驱动机制 (event probability driven mechanism, EPDM) 的覆盖算法,该算法首先建立传感器节点与目标节点的覆盖网络模型,而后通过概率计算传感器节点与目标节点之间的覆盖比值,最后通过节点调度算法完成对节点之间状态的转换,最终达到延长网络生存周期的目的。参考文献[15]提出一种基于感知模型下的连通覆盖调度控制算法 (scheduling control algorithm, SCA),该算法利用网络的连通性与节点建立感知模型,通过对监测面积与节点性能参数关系的计算选取最少工作节点集合保证最大的覆盖质量,从而达到最优的覆盖效果。

上述算法在特定的条件下均可以达到对监测区域内目标节点的有效覆盖,延长网络生存周期。本文 OCCDP 算法借助于参考文献[13,14]的基本思想,给出 3 节点联合时最大覆盖面积的求解方法;利用概率论相关理论知识对监测区域目标节点覆盖质量的期望值进行验证,同时比较了联合节点集与单节点感知强度比例关系以及任意传感器节点处于冗余节点时的覆盖度判定方法。最后,对本文 OCCDP 算法进行仿真实验,本文算法在覆盖率和网络生存周期上均有所提升,验证了本文算法的有效性和可行性。

3 预备知识

所有传感器节点随机部署在一个二维监测区域 S 内,并具有如下性质:

- 初始时刻,所有传感器节点感知半径相同并与能量相等;
- 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^[15];
- 通信半径大于或等于 2 倍的感知半径;
- 所有传感器节点之间彼此相互独立,各自地位相同。

定义 1 (k 度覆盖) 某目标节点至少被 k 个传感器节点覆盖。

定义 2 (网络覆盖率) 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,用 p 表示。网络覆盖率的物理意义主要体现在覆盖率越大,则覆盖效果越好。

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

其中, $\text{area}(S)$ 是监测区域面积, $\bigcup_{i=1,2,\dots,N} s_i$ 为传感器节点覆盖区域面积之和, s_i 是第 i 个传感器节点。

定义 3 (有效覆盖面积率) 传感器节点有效覆盖面积与传感器节点区域面积的比值,用 p_c 表示。

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

定理 1 3 节点进行联合无缝对接时,最大覆盖面积为 $S_{\max} = \frac{(4\pi+3\sqrt{3})r^2}{2}$, 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 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 , 等边三角形面积为 S_3 。因为所求覆盖面积最大,因此,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, $OA=AB=BO=r$ 。

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

$$S_{\max} = 3(\pi r^2 - S_1) = 3\left(\frac{4\pi r^2 - 3\sqrt{3}r^2}{6}\right) = \frac{(4\pi - 3\sqrt{3})r^2}{2} \quad (4)$$

最大有效覆盖面积率为:

$$p_c = \frac{S_{\max}}{3\pi r^2} = \frac{4\pi + 3\sqrt{3}}{6\pi} = 94.24\% \quad (5)$$

证毕。

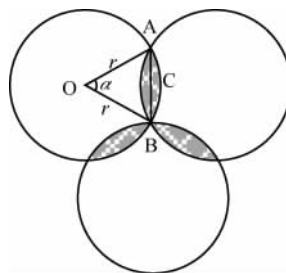


图 1 3 节点无缝对接示意

4 覆盖质量

4.1 覆盖质量期望值

第 3 节给出了 3 个节点无缝对接时最大覆盖面积的求解方法及证明过程。在监测区域内,传感器节点要完成目标节点数据采集、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,一个稳定的网络不仅要求有合理的网络服务体系,而且还要具备可行性的覆盖体系^[61]。在满足一定覆盖率的前提下,要完成对监测区域的有效覆盖,就要计算该监测区域的覆盖期望值。

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

证明 因为随机抛掷在监测区域内的传感器节点服从于均匀分布。任意传感器节点在监测区域内的覆盖率为 P_a 为:

$$P_a = \frac{\pi r^2}{\text{area}(S)} \quad (6)$$

由于传感器节点感知半径服从于正态分布 (R_0, σ^2) , 所以对于监测区域来说,任意目标节点被传感器节点所覆盖的覆盖率为:

$$P = \int_0^{2R_0} P_a \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(r-R_0)^2}{2\sigma^2}\right) dr \quad (7)$$

令 $x = (r - R_0)/\sigma$, 则:

$$P = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\text{area}(S)} \int_{\frac{\sigma}{R_0}}^{\frac{R_0}{\sigma}} (x\sigma + R_0)^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (8)$$

经计算:

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\text{area}(S)} \left(\int_{\frac{\sigma}{R_0}}^{\frac{R_0}{\sigma}} \sigma^2 x^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \int_{\frac{\sigma}{R_0}}^{\frac{R_0}{\sigma}} 2\sigma x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \int_{\frac{\sigma}{R_0}}^{\frac{R_0}{\sigma}} R_0^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right) \\ &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\text{area}(S)} \left(-\sigma^2 x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \Big|_{\frac{\sigma}{R_0}}^{\frac{R_0}{\sigma}} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (\sigma^2 + R_0^2) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

化简式(9)可得:

$$P = \frac{\pi(R_0^2 + \sigma^2)}{\text{area}(S)} \quad (10)$$

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:

$$E(P) = 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \sigma^2)}{\text{area}(S)}\right)^k \quad (11)$$

证毕。

推论 1 完成对监测区域的有效覆盖,最少节点数量为: $\ln\left(1 - \frac{\pi r^2}{\text{area}(S)}\right) / \ln\left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \sigma^2)}{\text{area}(S)}\right)$ 。

证明 设 n 为部署在监测区域内的最少传感器节点数量,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为:

$$\frac{\pi r^2}{\text{area}(S)} \leq 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \sigma^2)}{\text{area}(S)}\right)^n \quad (12)$$

式(12)两边取对数可得:

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

求 n :

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

因此,完成对监测区域有效覆盖时,所需传感器节点数量最小值应为 $\ln\left(1 - \frac{\pi r^2}{\text{area}(S)}\right) / \ln\left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \sigma^2)}{\text{area}(S)}\right)$ 。

4.2 节点覆盖率

定义 4 (邻居节点)任意 s_i, s_j 两个传感器节点之间距离小于感知半径 2 倍时,这两个节点称为邻居节点。

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq 2r \quad (15)$$

其中, (x_i, y_i) 与 (x_j, y_j) 分别为 s_i, s_j 两个传感器节点的坐标值, d 代表两个传感器节点之间的欧氏距离, r 为传感器节点感知半径。

定义 5 (感知强度)任意传感器节点 s , 在某点 a 处的感知强度为^[18]:

$$I = \begin{cases} e^{-\alpha d_{(s,a)}}, & 0 < d_{(s,a)} \leq r \\ 0, & r < d_{(s,a)} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $d_{(s,a)}$ 是传感器节点 s 到任意点 a 的欧氏距离, α 是感知模块物理参数, r 是传感器节点感知半径。设联合节



点集为 T , 在某点 a 的感知强度为:

$$I(T, a) = 1 - \prod_{s_i \in T} (1 - I(s_i, a)) \quad (17)$$

式(17)表示形式与任意目标节点被 n 个感知邻居节点中至少一个节点所覆盖的概率表述形式非常类似, 参考文献[2,13]给出了相关证明。因此, 在监测区域内, 某点的感知强度可转化对某点覆盖概率形式加以表达。由于在监测区域内所部署的传感器节点状态显现出随机性, 当所关注的移动目标节点被联合节点集或单节点覆盖时, 如何以某种方法确定两者感知强度的大小关系, 以提高对监测区域的有效覆盖, 为此, 本文引入定理 3。

定理 3 在感知范围内, 联合节点集感知强度高于邻居节点的感知强度。

证明 设联合节点覆盖移动目标节点时, 感知强度为 c ; 移动目标节点被单节点覆盖时, 其感知强度为 w 。在感知范围内, 移动目标节点首次被联合节点所覆盖时, 感知强度为 c_1 , 而未被联合节点所覆盖, 却被单节点所覆盖的感知强度为 $w_1(1-c_1)$ 。第二次, 移动目标节点被联合节点和单节点所覆盖的概率值为 C_2 和 W_2 。

$$C_2 = c_2(1-c_1)(1-w_1) \quad (18)$$

$$W_2 = w_2(1-c_1)(1-w_1)(1-c_2) \quad (19)$$

当完成第 m 次覆盖时, 联合节点与单节点的感知强度值分别为:

$$C_m = \sum_{i=1}^m c_m \prod_{i=1}^{m-1} (1-c_i)(1-w_i) \quad (20)$$

$$W_m = \sum_{i=1}^m w_m (1-w_m) \prod_{i=1}^{m-1} (1-c_i)(1-w_i) \quad (21)$$

因为, 任意传感器节点各自地位相同, 其发生的概率均为等概率事件, 故感知强度也相同, 即 $c_1=c_2=\dots=c_m, w_1=w_2=\dots=w_m$, 由几何级数定理可知:

$$C_m = c \frac{1 - [(1-c)(1-w)]^m}{1 - (1-c)(1-w)} \quad (22)$$

$$W_m = w(1-c) \frac{1 - [(1-c)(1-w)]^m}{1 - (1-c)(1-w)} \quad (23)$$

当 $m \rightarrow \infty$ 时, 化简式(22)、式(23)可得:

$$C = \frac{c}{1 - (1-c)(1-w)} \quad (24)$$

$$W = \frac{w(1-c)}{1 - (1-c)(1-w)} \quad (25)$$

由于联合节点的覆盖面积大于单节点的覆盖面积, 因此 $C > W$, 即:

$$c > 1 - \frac{1}{1+w} \quad (26)$$

由概率论相关知识可知, $q \in [0, 1]$, 以单节点完全覆盖目标节点来计算, 即 $w=1$ 时, $c > 1/2$, 其物理意义是不管单节点是否覆盖目标节点, 其联合节点的感知强度占总感知强度的 50% 以上, 从而验证联合节点的感知强度高于单节点感知强度。

4.3 冗余覆盖

传感器节点部署的初始时刻, 是以随机形态、高密度部署方式抛掷在监测区域内。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^[9]。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, 解决上述问题主要基于两种算法, 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, 经数据融合后上传至汇聚节点; 汇聚节点对收集的信息进行计算与分析后, 关闭或休眠冗余节点, 以达到抑制网络能量消耗的目的。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, 适应面更大。

定义 6 (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, 其两节点之间的欧氏距离小于冗余临界阈值 I_0 时, 称为冗余覆盖节点。

定义 7 (冗余覆盖度) 传感器节点 s_i 与邻居节点互为冗余节点时, 其传感器节点 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, 通常用 $P(\alpha)$ 来表示。

定义 8 (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 $d(u)$ 为它的邻居节点数量, G 连通度定义 V 中节点度的最小值。

定理 4 隶属于任意一个传感器节点 s_i 的 n 个冗余节点, 其冗余覆盖度需满足:

$$P(n) = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\lambda \sqrt{4-k^2}}{8} + \frac{\lambda^2}{2} \arccos\left(\frac{\lambda}{2}\right) - \frac{\lambda^3 \sqrt{4-\lambda^2}}{16} \right] \right\}^n \quad (27)$$

证明 以图 2 为例加以证明。根据泊松分布性质可知,传感器节点 s_i 的 n 个冗余邻居节点的分布状态也服从均匀分布。由假设条件可知,传感器节点均为同质节点,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:

$$f_L(x) = \frac{2x}{\lambda^2 r^2}, 0 \leq x \leq \lambda r \quad (28)$$

两圆盘相交区域的面积 S_1 表示为:

$$S_1 = (2\alpha - \sin 2\alpha)r^2 \quad (29)$$

令 BC 之间距离 $l = 2r \cos \alpha$, $dl = 2r \sin \alpha d\alpha$, 其中,

$\alpha \in \left[\arccos \frac{\lambda}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$, 代入概率式,化简可得:

$$\begin{aligned} P_a &= \int_{\frac{\lambda}{2}}^{\arccos \frac{\lambda}{2}} (2\alpha - \sin 2\alpha) \frac{4r^2 \cos \alpha}{\lambda^2} \sin \alpha d\alpha \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\lambda \sqrt{4 - \lambda^2}}{8} + \frac{\lambda^2}{2} \arccos \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \frac{\lambda^3 \sqrt{4 - \lambda^2}}{16} \right] r^2 \end{aligned} \quad (30)$$

由式(30)可知,对于任意一个传感器节点覆盖冗余邻居节点而言,其冗余覆盖率可表示为:

$$\begin{aligned} P_b &= \frac{P_a}{\pi r^2} \\ &= \frac{1}{\pi^2} \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\lambda \sqrt{4 - \lambda^2}}{8} + \frac{\lambda^2}{2} \arccos \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \frac{\lambda^3 \sqrt{4 - \lambda^2}}{16} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

即当 n 个通信节点覆盖任意传感器节点时,其冗余覆盖率为:

$$P(n) = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\lambda \sqrt{4 - \lambda^2}}{8} + \frac{\lambda^2}{2} \arccos \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \frac{\lambda^3 \sqrt{4 - \lambda^2}}{16} \right] \right\}^n \quad (32)$$

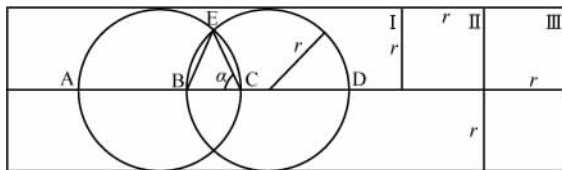


图 2 节点覆盖关联示意

4.4 OCCDP 算法实现

在传感器节点冗余方面,首先建立传感器节点集合冗余连通图,即节点集合中所有节点通过某种定位算法(如

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,经过计算与分析后,根据计算结果构造冗余关系连通图 G 。连通图 G 的度是与顶点相关联有限边的数量,对应于传感器节点的冗余度。当传感器节点数量增加时,其冗余度也随之增加。在连通图 G 中,当传感器节点冗余度越过事先设定阈值时,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,则以能量作为选择条件,利用排序算法选择出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对应的邻居节点,然后通过迭代算法进行迭代,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,本文借助于分簇原理对管理员节点和成员节点分别进行管理。在网络初始阶段,首先由成员节点发送一个 `inf_coverag` 信息至汇聚节点, `inf_coverag` 信息中包含了节点的位置、节点的 ID、能量信息等。经过一轮或几轮周期后,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,并根据节点的剩余能量将节点能量由高至低依次存储链表 CL 中,排名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目的。

OCCDP 算法描述如下。

```

procedure
begin
  n ← Null //初始化参数
  CL ← Null
  while (i < n)
  {
    {
      s[i].information → s[i].bata //计算节点信息并
      存储
      s[i].neighbor.information → s[i].neighbor.bata
      s[i].broadcast → Gn //将节点发送到汇聚节点
    }
  }
  ConstuctGraph() //创建连通图
  while(s[i].energy >= minenergy)

```



```

if(redundancy.nodes<=Ith) //节点能量不小于阈值
    Network_working
else
{
    sorting(s[i].energy) //以节点能量进行排序
    s[i].maxenergy→dormancy//休眠高能量节点
}
if(Gn←s[i].inf_covergae) //汇聚成功接收节点信息
{
    CL[i]←s[i].inf_coverage //将接收到信息存储在
    链表中
    i++ //指向下一个传感器节点
}
if(s[i].energy>= s[i+1].energy)
{
    Gn. inf_notice→s[i].data //汇聚节点发收信息到
    当前节点
    s[i].coverage→target.nodes //当前节点覆盖目标
    节点
}
}

```

4.5 OCCDP 算法复杂度

算法在发送与接收时,采用单循环方式完成对数据的发送与接收,因此,算法复杂度为 $O(n)$;而在对节点能量排序过程中,则采用嵌套式调用方式完成节点排序,即算法复杂度为 $O(n^2)$ 。因此,本文算法复杂为 $O(n^2)$ 。

5 体系评估

传感器节点在工作期间,其能量消耗主要取决于节点感知模块和通信模块。感知模块是以节点感知单元在单位周期内,采集 1 bit 数据所消耗的节点能量;而通信模型则是在与通信邻居节点为 d 的条件下,发送与接收 k bit 数据位所消耗的能量。

$$E_T(k, d) = \begin{cases} E_{T\text{-elec}}k + \varepsilon_{fs}d^2k, & d < d_0 \\ E_{R\text{-elec}}k + \varepsilon_{amp}d^4k, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (33)$$

$$E_R(k) = E_{R\text{-elec}}k \quad (34)$$

其中, $E_{T\text{-elec}}$ 和 $E_{R\text{-elec}}$ 分别代表发送与接收 1 bit 数据时所消耗的能量; d_0 表示节点与通信邻居节点之间欧氏距离的阈值; ε_{amp} 表示为多路衰减能耗能数; ε_{fs} 表示为节点自

由空间能耗,在节点发送数据时,其路径衰减能量指数分别是 2 和 4。

为了进一步验证本文 OCCDP 算法的有效性和可行性,本文以 MATLAB 7.0 作为仿真平台,以不同规模监测区域和动态参数为研究对象,与参考文献[9,13,14]中的算法在节点部署、网络覆盖率、休眠冗余节点动态变化以及网络生存周期方面进行了一系列的比对实验。每组实验数据均采取 20 次仿真数据的平均值,其仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数说明

仿真参数	仿真数值	参数说明
监测区域 I	100 m×100 m	仿真区域 1
监测区域 II	200 m×200 m	仿真区域 2
监测区域 III	300 m×300 m	仿真区域 3
r/m	10	感知半径
n	500	传感器节点数量
$\varepsilon_{amp}/(J \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^2)^{-1})$	10	多路衰减能耗
e_{min}/J	0.005	节点最少能量
R/m	20	通信半径
$E_{R\text{-elec}}/(J \cdot \text{bit}^{-1})$	30	接收端消耗能量
$E_{T\text{-elec}}/(J \cdot \text{bit}^{-1})$	30	发送端消耗能量
$\varepsilon_{fs}/(J \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^2)^{-1})$	10	自由空间能耗
energy/m	2	节点能量
time/m	600	运行时间

5.1 实验一

在 300 m×300 m 区域下, λ 分别为 0.4、0.8、1.2, 对传感器节点初始时刻进行优化部署,结果如图 3、图 4 所示。

图 4 给出了在不同 λ 参数作用下,传感器节点初始时刻与 OCCDP 算法优化后节点部署示意。在初始时刻,节点以高密度形式随机部署,存在大量冗余节点;当 λ 值增大以后,通过本文算法进行优化后,传感器节点与邻居节点

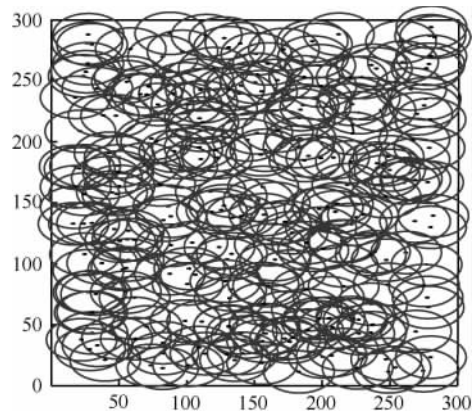


图 3 $t=0$, 初始时刻传感器节点部署

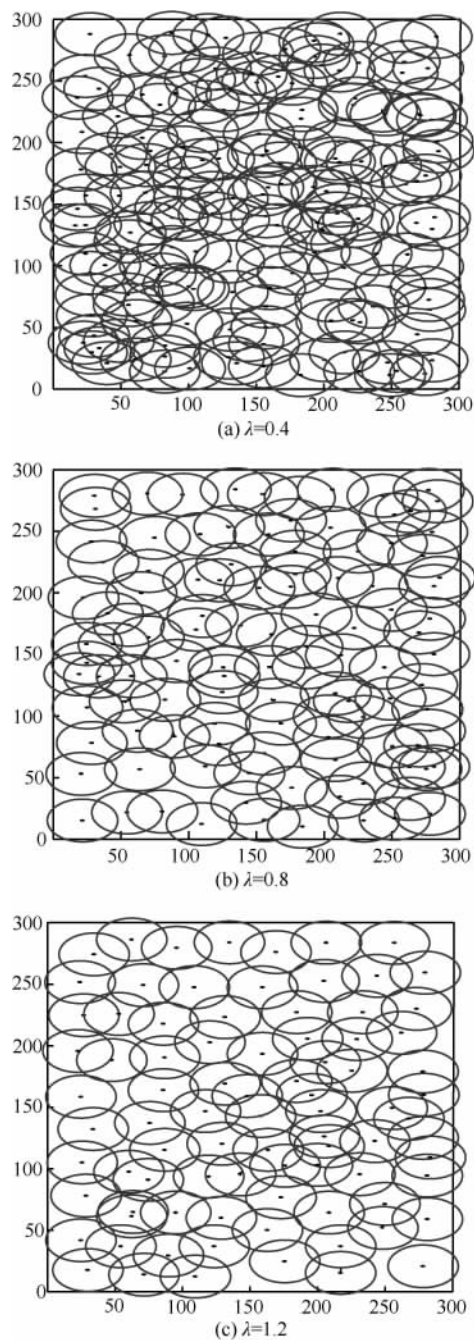


图4 OCCDP 算法优化部署

之间的距离增加,在满足一定覆盖率的前提下,让高能量节点处于休眠状态,以减少对监测区域的覆盖,延长了网络生存周期。

5.2 实验二

采用不同规模仿真平台,对本文 OCCDP 算法与参考文献[14,15]在覆盖率和冗余节点数量进行对比,结果如图5~图10所示。

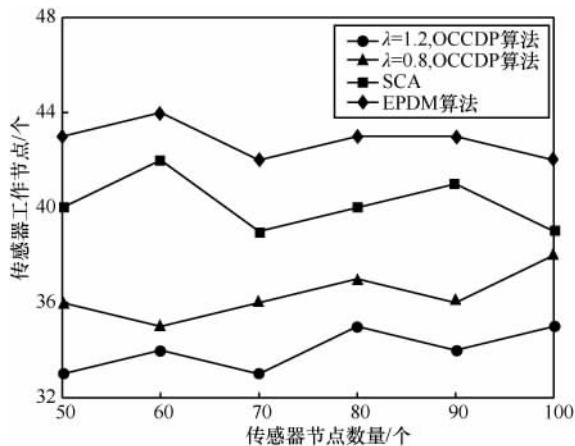


图5 100 m×100 m,传感器节点与工作节点数量对比

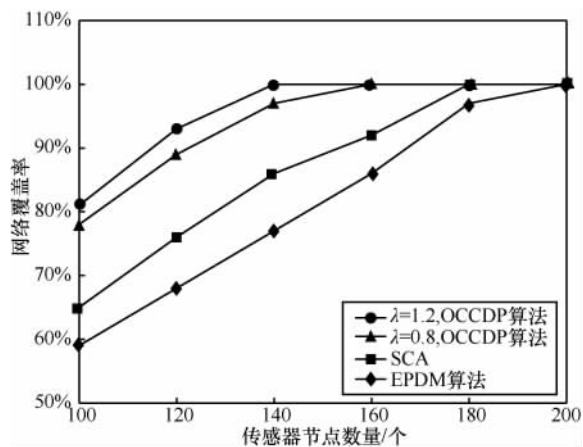


图6 200 m×200 m,网络覆盖率变化曲线

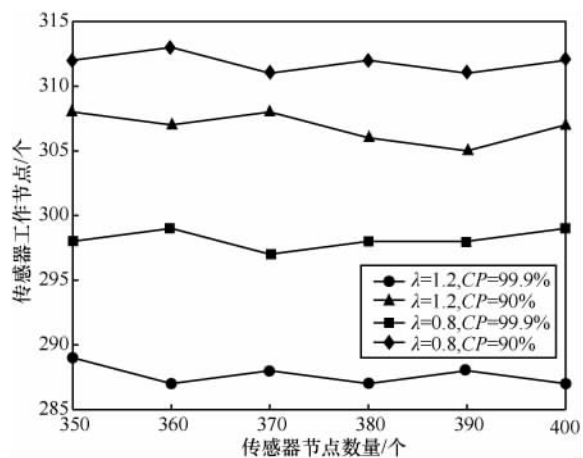


图7 300 m×300 m,不同覆盖率下 OCCDP 算法对比

图5~图10分别给出了在不同网络规模以及不同参数作用下的覆盖率变化曲线和以及冗余节点数量与覆盖率变化曲线示意。图5给出了在100 m×100 m 仿真区域,

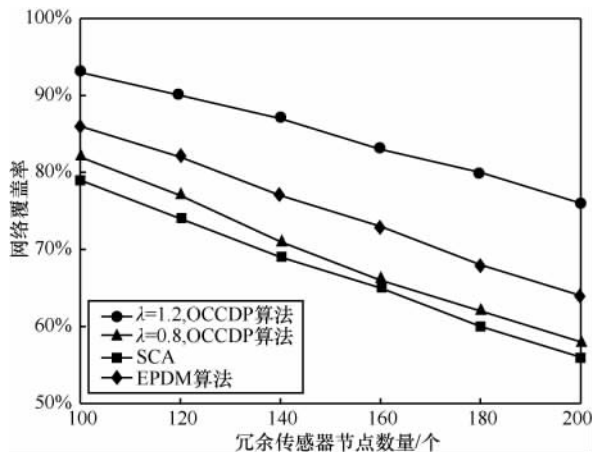


图8 300 m×300 m,冗余传感器节点数量与覆盖率对比

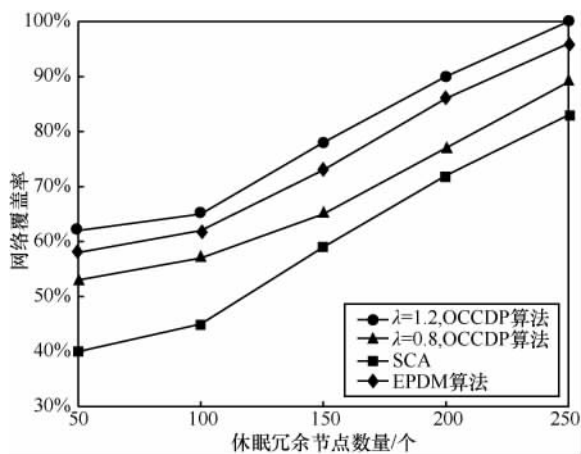


图9 300 m×300 m,休眠冗余节点数量与网络覆盖率对比

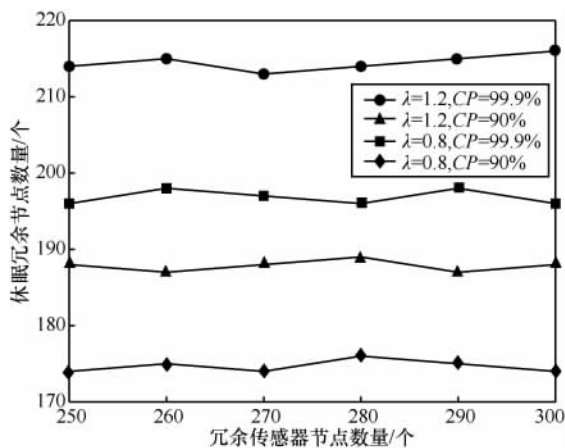


图10 300 m×300 m,冗余节点数量与休眠节点数量对比

本文 OCCDP 算法与 SCA 和 EPDM 算法在传感器节点数量与传感器工作节点数量之间的变化曲线。从图 5 中可以看出, 本文 OCCDP 算法在不同参数作用下所需工作节点

数量较少, 而 EPDM 所需传感器节点数量较多, 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 与 EPDM 算法则是通过增加传感器节点数量达到对监测区域的有效覆盖。图 6 是以 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 作为仿真平台, 并给出了覆盖率随传感器节点数量变化曲线, 从图 6 可以看出, 随着传感器节点数量的增加, 3 种算法的覆盖率也随之增加, 由于本文 OCCDP 算法是通过动态参数 λ 设定对覆盖率进行调节, 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。在传感器节点数量为 137 个时, 本文算法已达到有效覆盖, 而 SCA 和 EPDM 算法在节点数量为 180 个和 199 个时, 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 7~图 10 给出了以 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 作为仿真平台, 对不同覆盖率和冗余节点数量的对比过程。从图 7 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量就减少, 其原因同图 5 分析相似。图 8 给出了冗余传感器节点数量与覆盖率对比示意。从图 8 可以看出, 随着冗余节点数量的增加, 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 则是通过节点之间的接发信息方式完成冗余节点的状态转换。图 9、图 10 的分析过程与图 6 和图 7 相似。

5.3 实验三

本文算法不同仿真规模下与参考文献[13]提出的 ECTA 在网络生存周期与算法运行时间上进行对比实验。

图 11 和图 12 分别给出了本文算法与 ECTA 在网络生存周期和算法运行时间上的对比。从图 11 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, 随着传感器节点数量的增加, 两种的网络生存周期都有所延长, 但 ECTA 采用非线性不间断连续覆盖模式完成对目标节点的监测, 在能耗方面要高于本文 OCCDP 算法, 当传感器节点数量在 180 个时, 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与 ECTA 相比提升了 13.27%。图 12 给出了传感器节点数量与算法运行时间的对比示意, 由于 ECTA 在节点能量存储方式上采用链表式存储, 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高于 ECTA。

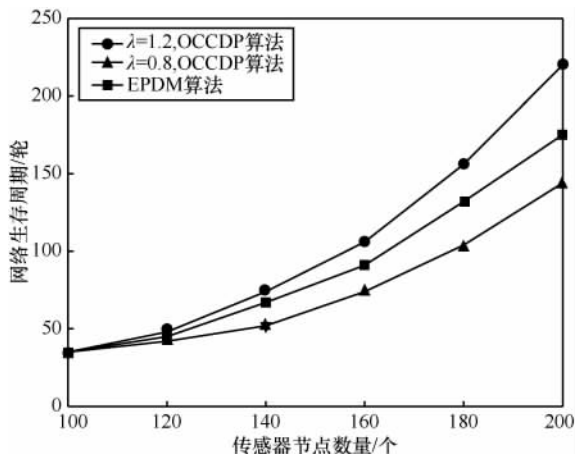


图 11 两种算法在网络生存周期对比

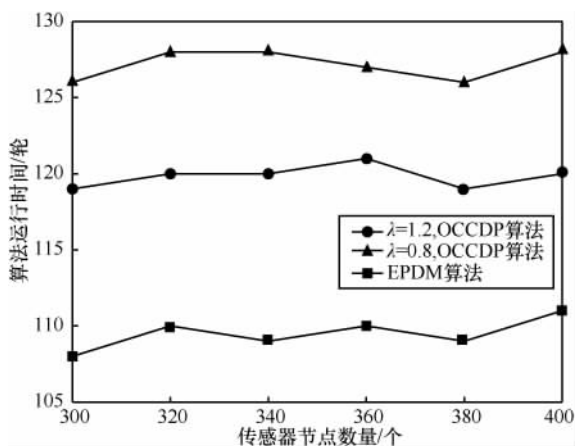


图 12 两种算法的运行时间对比

6 结束语

为了更好地解决无线传感器网络覆盖问题,本文提出一种动态参数可控的优化覆盖算法。该算法首先给出了3圆无缝对接的最大覆盖面积的求解方法;其次利用概率相关理论求解出监测区域覆盖质量期望值,在此基础上给出最少传感器节点数量的求解方法;在分析节点覆盖率的基础上,又给出了联合节点感知强度与单节点感知强度的对比关系;在研究冗余节点覆盖度方面,本文证明了传感器节点冗余覆盖存在的条件;最后,通过仿真实验对本文算法在优化部署、覆盖率、冗余度以及网络生存周期和算法运行时间上进行了一系列仿真,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 R, LI J Z, GAO H. Approximate monitoring algorithm for minimizing communication cost in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(10): 2092-2105.
- [4] DERR K, MANIC M. Wireless sensor network configuration-part II: adaptive coverage for decentralized algorithms [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1728-1738.
- [5] 孙力娟, 魏静, 郭剑, 等. 面向异构无线传感器网络的节点调度算法[J]. 电子学报, 2014, 42(10): 1907-1912.
SUN L J, WEI J, GUO J, et al. Node scheduling algorithm for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 42(10): 1907-1912.
- [6] FAN X G, ZHANG Z J, WANG H. The probabilistic sense model for coverage hole Elimination in WSN [C]//33rd Chinese Control Conference, July 28-30, 2014, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Computer Society, 2014: 422-427.
- [7] BACHIR A, BECHKIT W, CHALLAL Y, et al. Joint connectivity-coverage temperature-aware algorithms for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2015, 26(7): 1923-1936.
- [8] ADULYASAS A, SUN Z L, WANG N. Connected coverage optimization for sensor scheduling in wireless sensor networks [J]. IEEE Sensor Journal, 2015, 15(7): 3877-3892.
- [9] 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 Z Y, WEI W G, WANG H Z, et al. An enhanced coverage control algorithm for wireless sensor networks based on adjustable parameters [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 43(3): 466-474.
- [10] LIAO Z F, WANG J X, ZHANG S G, et al. Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(7): 1971-1983.
- [11] KIM H, COBB J A. Maximum lifetime of reinforced barrier-coverage in wireless sensor networks [C]//19th IEEE International Conference on Networks, Dec 11-13, 2013, Singapore. Piscataway: IEEE Computer Society, 2013: 1-6.



- [12] SAHOO P K, SHEU J P. Limited mobility coverage and connectivity maintenance protocols for wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2011, 55(13): 2856-2872.
- [13] XING X F, WANG G J, LI J. Polytype target coverage scheme for heterogeneous wireless sensor networks using linear programming [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2012, 14(14): 1397-1408.
- [14] SUN Z Y, WU W G, WANG H Z, 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, 36(1): 1-17.
- [15] 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 F Z, WANG H Z, HE H. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(4): 772-779.
- [16] LU Z X, LI W W, PAN M. Maximum lifetime scheduling for target coverage and data collection in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (2): 714-727.
- [17] SUN G D, ZHAO L, CHEN Z B, et al. Effective link interference model in topology control of wireless ad hoc and sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 52 (6): 69-78.

- [18] 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 Z. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2010, 21(12): 3124-3137.
- [19] 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.

[作者简介]



李川(1972-),男,绵阳职业技术学院副教授,主要从事信号处理与传输研究工作。



李学俊(1975-),男,博士,西南科技大学计算机学院副教授,CCF会员,主要从事数据库应用、多源图像数据融合及处理研究工作。