

基于可信信息覆盖模型的 WSN 覆盖可靠性优化^①



梅斯曼¹, 高鹏毅¹, 陈凯¹, 李升辉¹, 吴亚环²

¹(华中科技大学 网络空间安全学院, 武汉 430074)

²(华中科技大学 工程实践创新中心, 武汉 430074)

通信作者: 高鹏毅, E-mail: pengyi_gao@hust.edu.cn

摘要: 随着智能物联网的快速发展及运用, 其对网络的使用寿命、可靠性及覆盖范围提出了新的挑战. 目前的无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 是由大量部署在监测区域内的自组织型传感器节点组成, 其具备低成本、节能、自组织和大规模部署等优势. 然而, 如何在此基础上进一步延长网络寿命, 提高 WSN 的覆盖可靠性, 是当前研究面临的主要挑战. 为此, 将骨干网络与覆盖模型、传感器节点协同感知和空间相关性结合, 提出了一种覆盖可靠性评估模型. 在此基础上, 提出了一种基于可信信息覆盖的覆盖可靠性优化算法, 一方面, 利用可信信息覆盖模型保证数据的协同感知, 增强网络服务质量, 另一方面, 采用骨干网络优化路由, 节省能量消耗. 进一步地, 为验证所提算法的优越性, 以传感器多状态、覆盖率为评价指标, 以 RMSE 阈值和能耗为性能指标, 将所提算法与 ACR 和 CICR 算法进行对比. 最后, 在 Matlab 仿真软件上搭建了验证模型, 仿真结果表明, 所提算法能显著提高覆盖可靠性.

关键词: 无线传感器网络; 覆盖可靠性; 可信信息覆盖; 骨干网络

引用格式: 梅斯曼, 高鹏毅, 陈凯, 李升辉, 吴亚环. 基于可信信息覆盖模型的 WSN 覆盖可靠性优化. 计算机系统应用. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9700.html>

WSN Coverage Reliability Optimization Based on Confident Information Coverage Model

MEI Si-Man¹, GAO Peng-Yi¹, CHEN Kai¹, LI Sheng-Hui¹, WU Ya-Huan²

¹(School of Cyber Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

²(Center for Engineering Practice Innovations, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid development and application of Artificial Intelligence and the Internet of Things (AIoT), new challenges are posed to the network's useful life, reliability, and coverage. The current wireless sensor network (WSN) consists of a large number of self-organizing sensor nodes deployed in monitoring areas, exhibiting advantages such as low cost, energy efficiency, self-organization, and large-scale deployment. However, how to further extend the network life and enhance the coverage reliability of wireless sensor networks remains a primary challenge in current research. To address these challenges, a coverage reliability assessment model is proposed by integrating the backbone network with coverage models, collaborative sensing of sensor nodes, and spatial correlation. Subsequently, a coverage reliability optimization algorithm based on the confident information coverage model is proposed. On one hand, the algorithm utilizes the confident information coverage model to ensure collaborative sensing of data, enhancing network service quality. On the other hand, it employs backbone network optimization for routing to conserve energy consumption. Furthermore, to validate the superiority of the proposed algorithm, sensor multi-states, and coverage rate are taken as evaluation metrics, with RMSE threshold and energy consumption as performance indicators. The proposed algorithm is compared with ACR and CICR algorithms. Finally, a verification model is built on Matlab simulation software.

^① 基金项目: 国网智能研究院双创孵化项目 (20233026)

收稿时间: 2024-05-07; 修改时间: 2024-06-28; 采用时间: 2024-07-04; csa 在线出版时间: 2024-11-15

Simulation results demonstrate that the proposed algorithm significantly improves coverage reliability.

Key words: wireless sensor network (WSN); coverage reliability; confident information coverage (CIC); backbone network

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 是由大量传感器节点分布式组成的自组织网络, 每个节点都能够感知、处理、存储并通过无线通信传输环境信息^[1]. 无线传感器网络被广泛应用于医疗保健^[2]、家庭安全^[3]、铁路监测^[4]和远程监测^[5]等多个领域, 对人们的生活起到了十分重要的作用.

传感器节点通常是被随机部署在监测区域内, 因此如何利用随机部署的传感器节点进行有效组网, 实现监测区域的有效覆盖, 并且定量化评估不同组网方案的可靠性, 是 WSN 的核心问题. 目前有不少学者针对覆盖可靠性问题进行研究, 并取得了一些成果. 文献[6]提出了一种定量测量指标 ACR 来评估多状态 WSN 的区域覆盖可靠性, 利用蒙特卡罗模拟方法和能量矩阵估计能量耗尽节点和面向能量的数据传输能力对 ACR 的影响. 文献[7]基于 D-S 证据理论, 定义了感知结果置信程度的概念, 利用隶属函数计算基本概率分配, 提出了两种计算覆盖可靠性的算法. 文献[8]引入了覆盖可靠性指标 CORE, 并提出了一种基于蒙特卡罗和马尔可夫链的仿真方法来评估 CORE. 上述文献讨论了覆盖可靠性的定量化计算方法, 但仍存在一些不足: 一方面, 3 篇文献均采用传统圆盘模型作为网络覆盖模型, 没有考虑传感器的协同感知和环境空间相关性, 导致覆盖率的计算不够准确; 另一方面, 上述文献研究的模型过于理想化, 其忽略了路由结构对网络寿命的影响, 因此不具备实用性.

针对上述问题, 现有研究人员分别进行了以下研究. 文献[9]提出了一种基于信噪比检测的概率感知模型, 能够最大化无人机服务区域的覆盖率, 但是没有考虑多无人机的路由结构对网络性能的影响. 文献[10]提出了一种基于二元决策图和分而治之方案的连通和覆盖可靠性分析方法, 同时评估 WSN 在连通性和覆盖范围方面的可靠性, 考虑了路由结构的问题, 但忽略了环境空间相关性对覆盖的影响. 现有研究大多仅考虑覆盖率或路由结构来评估覆盖可靠性, 很少有将两者结合考虑的工作.

针对现有研究的不足, 本文基于可信信息覆盖模

型和骨干网络提出一种新的覆盖可靠性评估模型, 充分考虑传感器节点和环境对覆盖的影响, 通过骨干节点优化网络结构, 减少能耗. 在此基础上, 提出一种覆盖可靠性优化算法, 从覆盖率和路由结构两方面对覆盖可靠性进行优化, 并通过仿真验证了其有效性与优越性.

1 模型构建

1.1 传感器节点的权值计算

WSN 通常将传感器节点划分为骨干节点和非骨干节点. 其中骨干节点充当中继节点, 负责完成通信过程中的消息传递任务, 而非骨干节点则具备在空闲时进入睡眠状态的能力, 从而显著降低网络运行过程中的能耗^[11]. WSN 将路由任务限制于骨干节点可以有效提高网络的路由效率. 骨干网络示意图如图 1 所示.

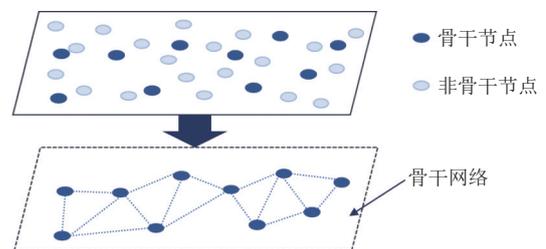


图 1 骨干网络示意图

在骨干网络中, 相比于骨干节点需要长时间处于工作状态, 非骨干节点只需与相邻的骨干节点间歇性地通信, 因此其能量消耗显著减小, 最终导致骨干节点的能耗明显高于非骨干节点. 为此, 在构造骨干网络时, 选择质量较优的节点作为骨干节点变得至关重要.

一般来说, 选择具有最大度的节点作为骨干节点是被广泛使用的方法, 这种方法有助于最小化非支配点之间的冗余无线通信链路, 从而显著减少路由表的规模和通信开销, 有效缓解广播风暴^[12]. 然而这种方法未充分考虑节点能耗的因素, 导致选择低剩余能量的节点作为骨干节点后可能因能量耗尽而死亡. 虽然也有部分算法考虑了能耗问题^[13], 但都未能全面考虑影响网络可靠性的多种因素.

在 WSN 中, 节点通常以电池为电源, 一旦能量耗尽, 将难以短时间内进行补充. 为了延长网络寿命, 避免节点能量过早耗尽导致系统故障, 应尽量选取剩余能量较多的节点充当骨干节点. 因此, 本文设定了一个能量阈值. 在骨干节点的选择过程中, 更倾向于选择能量大于阈值的节点; 另一方面, 当骨干节点的能量降至阈值以下时, 表明其已不适合继续作为骨干节点, 因此主动退出骨干网络, 成为非骨干节点. 这避免了骨干节点因能量耗尽而失效的情况.

在此基础上, 本文综合节点度、剩余能量和能量阈值 3 个指标, 引入了一种用来衡量传感器节点质量优劣的新概念——节点权值, 定义节点权值如式 (1) 所示:

$$W(s_i) = \begin{cases} \alpha \cdot e^{-|d(s_i)-N|} + \beta \cdot e^{-\frac{E_{res}}{E_{thr}+\mu}}, & E_{res} \geq E_{thr} \\ \gamma \cdot \left(\alpha \cdot e^{-|d(s_i)-N|} + \beta \cdot e^{-\frac{E_{res}}{E_{thr}+\mu}} \right), & E_{res} < E_{thr} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $d(s_i)$ 表示节点 s_i 的度; N 表示网络平均节点度; μ 和 γ 是恒大于零的常数; E_{res} 和 E_{thr} 分别是节点剩余能量和节点剩余能量阈值; α 和 β 为常数, 且和为 1; $W(s_i)$ 值越大表示优先级越高. 较高的节点权值表示节点在网络中具有更高的重要性, 更适合作为骨干节点; 而较低的节点权值则表示节点在网络中的贡献相对较小或其能量有限, 更适合被选为非骨干节点.

1.2 可信信息覆盖模型

圆盘覆盖模型因其计算简单且适用性强在定义传感器覆盖方面被广泛采用. 在圆盘模型中, 当检测空间与传感器节点的欧氏距离小于感知半径时, 认为检测空间被覆盖. 然而, 传统的圆盘模型及其相关衍生模型过于理想化和简单, 未充分考虑环境空间的相关性, 因此与实际应用存在较大的差距.

为弥补这一不足, 可信信息覆盖 (confident information coverage, CIC) 模型充分利用信息协同和环境相关性的概念, 使其更为适用于实际应用^[14]. 在 CIC 模型中, 覆盖的定义不仅基于传感器节点与检测区域的几何距离, 还考虑了环境的特征和信息协同的概念, 从而更全面地反映了感测状态, 并且根据变程对不同环境变量的空间特性进行分析, 制定相应的覆盖标准, 以此提高覆盖可信度.

对于 CIC 模型的定义如下: 在一个随机场中, 给定一个重建函数 f , 如果该随机场中一个空间位置点 x 上

的重建信息 $\Phi(x)$ 在时域上的均方根误差均值小于等于网络用户给定的误差阈值 ε_0 , 即对于某一空间位置点 x 的重建信息只要满足 $\Phi(x) \leq \varepsilon_0$, 就可以判定该空间位置点 x 被可信信息覆盖. 在实际应用场景中, 使用均方根误差 (root mean error, RMSE) 来评价点 x 的重构和估计误差, 如式 (2) 所示:

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\mu^t(x) - \hat{\mu}^t(x))^2} \quad (2)$$

其中, $\mu^t(x)$ 表示空间位置点 x 在 t 时刻的真实值, $\hat{\mu}^t(x)$ 表示空间位置点 x 在 t 时刻的估计值. $\Phi(x)$ 取决于空间位置点 x 与其最近的传感器节点之间的几何距离, 通常距离越大 $\Phi(x)$ 数值越大.

可信信息覆盖模型如图 2 所示, 图中 s_i 和 p_i ($i=1, 2, 3$) 分别代表不同的传感器节点和空间位置点, r 为圆盘模型的感知半径. 黄色实线表示以传感器节点为中心的圆盘模型覆盖区域, 在考虑节点协同和环境变量的空间特性后, 蓝色虚线表示节点 s_2 和 s_3 协同感知的可信信息覆盖区域, 绿色虚线表示 s_1, s_2 和 s_3 协同感知的可信信息覆盖区域. 因此可以观察到, 空间点 p_1 能被 s_3 可信信息覆盖; p_2 不能被 s_2 或 s_3 可信信息覆盖, 但是能被 s_2 或 s_3 协同可信信息覆盖; p_3 不能被 s_2 或 s_3 协同可信信息覆盖, 但是能被 s_1, s_2 和 s_3 协同可信信息覆盖.

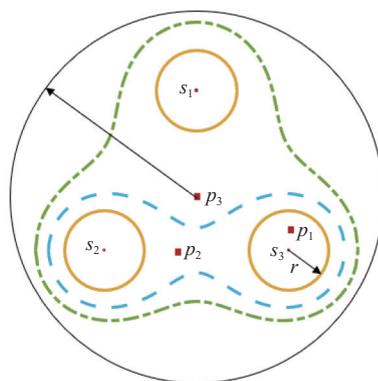


图 2 可信信息覆盖模型

进一步地, 当一定数量的传感器节点被随即部署在监测区域中, 将监测区域划分为面积相同的重建邻域 (即边长等于变程的正方形网络区域), 取重建邻域的中心点为重建点, 根据式 (2) 计算每个重建点的 RMSE 值, 从而判断重建邻域是否被可信信息覆盖^[15]. 如果重建点 x 的 RMSE 值不大于阈值 ε_0 (即 $\Phi(x) \leq \varepsilon_0$), 则重建点 x 所表示的重建邻域可判断为被可信信息

覆盖。

克里金插值法在估计重建点的真实值时具有较高的精度和可靠性,并且具有良好的解释性和适应性,因此被广泛应用于空间数据的插值和预测中。为更好地解释环境变量间的空间相关性,本文采用克里金插值法估计重建点 x 的真实值,重建点 x 的估计值计算公式为:

$$\hat{\mu}^I(x) = \sum_{i=1}^{|S(x)|} \lambda_i \mu(s_i), s_i \in S(x) \quad (3)$$

其中, λ_i 表示插值权重系数,根据普通克里金插值的无偏特性,所有权重之和等于1,即 $\sum_{i=1}^{|S(x)|} \lambda_i = 1$; $\mu(s_i)$ 表示传感器区域 $S(x)$ 内节点 s_i 的真实值。

1.3 覆盖可靠性评估模型

假设 n 个传感器节点 $\{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ 被随机部署在一个二维检测区域 Δ ,每个传感器节点具有相同的传感半径 R_s 和通信半径 R_c 。为满足实际传感器节点状态要求,本文引入随机占空比方法^[16]讨论节点状态。每个传感器节点 s_i 的占空比(α_{s_i})为传感器节点处于工作状态平均时间与工作或睡眠状态的总时间之比,需要注意的是,每个传感器节点的占空比完全随机。因此传感器节点 s_i 处于活动状态 $p_a(s_i)$ 、中继状态 $p_r(s_i)$ 、睡眠状态 $p_{slp}(s_i)$ 和死亡状态 $p_f(s_i)$ 的概率分别如式(4)–式(7)所示:

$$p_a(s_i) = p_{comm}(s_i) \times p_{sense}(s_i) \times \alpha_{s_i} \quad (4)$$

$$p_r(s_i) = p_{comm}(s_i) \times (1 - p_{sense}(s_i)) \times \alpha_{s_i} \quad (5)$$

$$p_{slp}(s_i) = 1 - \alpha_{s_i} \quad (6)$$

$$p_f(s_i) = (1 - p_{comm}(s_i)) \times \alpha_{s_i} \quad (7)$$

其中, $p_{comm}(s_i)$ 和 $p_{sense}(s_i)$ 表示传感器节点 s_i 的收发单元和传感单元工作的概率。

处于活动状态的节点可以感知、发送和接收数据;处于中继状态的节点可以发送和接收数据,但由于其传感单元失效,无法进行感知;处于睡眠状态的节点既不能感知,也不能发送和接收数据,因为其所有电路都暂时关闭;处于死亡状态的节点也不能感知、发送和接收数据,和睡眠状态不同的是,因为收发单元失效或者电池耗尽的原因,死亡节点的状态是永久的。为了确定传感器节点 s_i 的状态,本文生成一个遵循均匀分布的随机值 $state_{s_i}$ ($0 < state_{s_i} < 1$),当 $0 < state_{s_i} \leq p_a(s_i)$ 时,

传感器节点 s_i 处于活动状态;当 $p_a(s_i) < state_{s_i} \leq p_a(s_i) + p_r(s_i)$ 时,传感器节点 s_i 处于中继状态;当 $p_a(s_i) + p_r(s_i) < state_{s_i} \leq p_a(s_i) + p_r(s_i) + p_f(s_i)$ 时,传感器节点 s_i 处于死亡状态;当 $state_{s_i} > p_a(s_i) + p_r(s_i) + p_f(s_i)$ 时,传感器节点 s_i 处于睡眠状态。

WSN的连通性由节点以及节点间的链路决定。传感器节点 s_i 和 s_j 存在通信链路,当且仅当满足以下条件。

- (1) 节点 s_i 和 s_j 处于活动或中继状态;
- (2) 节点 s_i 和 s_j 在彼此的通信范围内,即节点 s_i 和 s_j 之间的欧氏距离小于通信半径 R_c ;
- (3) 节点 s_i 和 s_j 都有足够的能量传输数据给对方,即满足能量阈值。

符合这3个要求的链路称为可用链路,在本文中假设传感器节点都是可靠的,不考虑环境对链路质量的影响。

骨干网络的构造由节点状态和节点权值共同决定,需要注意的是,当传感器节点处于活动或中继状态时才能被选为骨干节点。定义 $D(s_i)$ 表示传感器节点 s_i 是否被选为骨干节点,如果被选为骨干节点,则 $D(s_i) = 1$;否则 $D(s_i) = 0$ 。骨干节点的选取如式(8)所示:

$$D(s_i) = \begin{cases} 1, & W(s_i) \geq W_{\max}(N_1(s_i)) \cap n_i = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $N_1(s_i)$ 表示传感器节点 s_i 的一跳邻节点中非骨干节点集合, $W_{\max}(N_1(s_i))$ 表示一跳邻节点中非骨干节点集合最大权值, $W(s_i) \geq W_{\max}(N_1(s_i))$ 表示骨干节点的权值不小于一跳邻节点中非骨干节点集合的最大权值; $n_i = 1$ 表示传感器节点 s_i 处于活动或中继状态。当且仅当传感器节点的权值在一跳范围内最大,且处于活动或中继状态时,才能被选为骨干节点,其他节点则为非骨干节点。

在确定了传感器节点的拓扑结构后,将监测区域分为大小相同且边长为变程的重建邻域,根据式(1)计算每个重建点的RMSE值。如果重建点 x 的RMSE值不大于阈值 ε_0 (即 $\Phi(x) \leq \varepsilon_0$),则重建点 x 所属的重建邻域被可信信息覆盖。

覆盖可靠性评估模型示意图如图3所示。圆圈表示在仿真区域随机抛撒的传感器节点,红色圆圈表示组成骨干网络的骨干节点,绿色圆圈表示非骨干节点,蓝色实线表示通信路径,两个节点之间有蓝色实线代

表两个节点分别在对方的通信距离内. 传感器节点可信息覆盖的区域用黄色表示, 蓝色小方块表示重建点, 如果重建点的 RMSE 值不大于 RMSE 阈值, 则该区域被判断为可信信息覆盖, 标记为黄色. 图 3 展示了面积为 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 的仿真快照, 仿真的覆盖率为 50%.

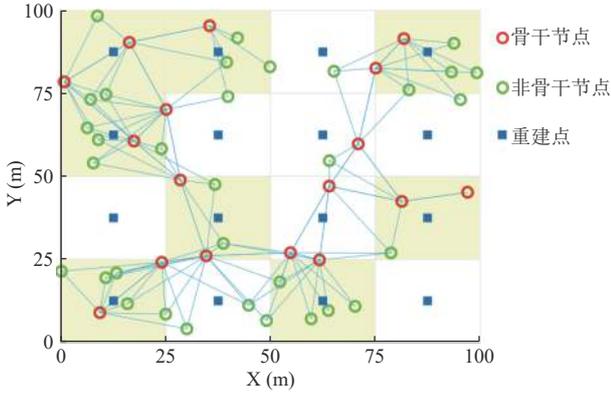


图 3 覆盖可靠性评估模型示意图

2 覆盖可靠性优化算法

本文基于可信信息覆盖模型和骨干网络, 提出一种覆盖可靠性优化算法 (coverage reliability optimization algorithm, CROA), 来评估第 1.3 节提出的覆盖可靠性评估模型.

首先对于每次迭代 $t = 1, 2, 3, \dots, T$ 模拟一个网络配置, 将传感器节点随机部署在仿真区域, 网络的随机性受随机节点状态和节点的能量可用性的影响. 因此, 有 T 个网络配置, 算法 1 总共执行 T 次仿真.

算法 1. 覆盖可靠性优化算法

输入: S : 一组节点; N : 节点数量; E_{in} : 节点初始能量; C_{thr} : 覆盖阈值; W_L : 仿真区域的宽度; W_B : 仿真区域的长度; T : 迭代次数; α_{s_i} : 节点占空比.

输出: A : 覆盖可靠性.

1. for 每次仿真 $t = 1, 2, 3, \dots, T$ do
2. 在 $W_L \times W_B$ 的仿真区域随机生成节点位置
3. for 每个节点 s_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) do
4. 计算传感器节点 s_i 的当前状态
5. 计算传感器节点 s_i 的权值
6. end for
7. 构造骨干网络
8. for 每个地址块 do
9. 计算每块是否被可信信息覆盖
10. end for
11. if 可信信息覆盖的面积 $< C_{thr}$ then
12. continue

13. end if
14. 更新剩余能量
15. end for
16. 计算覆盖可靠性

第 4 行列举了每个节点的当前状态. 每个节点的当前状态受随机占空比、硬件部件故障或工作状态以及电池能量状态的影响.

第 5 行计算了每个节点的权值. 骨干节点的选取由式 (8) 计算得出, 作为中继节点负责完成通信过程中的消息传递任务, 而非骨干节点则负责传感和传输数据, 在空闲时可以进入睡眠状态.

第 7-13 行评估可信信息覆盖率, 即评估该网络满足监测区域覆盖需求的能力. 为量化衡量可信信息覆盖率, 本文引入覆盖阈值 (coverage threshold, C_{thr}) 的概念, 用于判断覆盖率是否满足要求. 计算一次仿真中可信信息覆盖的区域块数, 若可信信息覆盖的区域没有达到覆盖阈值 C_{thr} , 则表示该次仿真没有满足覆盖要求, 进入下一次迭代.

第 14 行更新每个节点的剩余能量, 用传感器节点开始当前仿真运行之前的能量减去当前仿真运行中消耗的能量来更新剩余能量. 本文选用无线电能量损耗模型 REDM (radio energy dissipation model) 来评估网络能量消耗^[17]. 假设不考虑数据包在传输期间产生因碰撞或丢失导致数据重传而损耗的能量, 以及空闲监听状态下的能耗. 传感器节点发送和接收 m 比特数据消耗的能量如式 (9)、式 (10) 所示:

$$E_{Tx}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{Rx}(m) = mE_{elec} \quad (10)$$

其中, E_{elec} 表示接收或发送 1 比特数据消耗的能量; d 是信号传输距离, d_0 为距离阈值, $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$, ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别为信号放大器在自由空间衰减模型 (free space mode) 和多路信号衰减模型 (multi-path fading mode) 中的增益表示.

最后在 16 行, 评估 T 次仿真运行后的覆盖可靠性, 如式 (11) 所示:

$$A = \frac{1}{T \times M} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \chi_{t,m} \quad (11)$$

其中, M 表示检测区域中的重建点数量; $\chi_{t,m}$ 表示第

m 个重建点在第 t 次仿真时是否满足阈值, 如果第 t 次仿真时第 m 个重建点的均方根误差小于阈值, 则设 $\chi_{t,m} = 1$, 否则 $\chi_{t,m} = 0$.

基于以上描述, CROA 的伪代码如算法 1 所示.

3 仿真验证

本节将 CROA 算法与 ACR 算法和仅基于可信信息覆盖的改进 ACR 算法(简称 CICR)进行比较, 根据占空比、覆盖阈值、能耗、RMSE 阈值来衡量 CROA 的效率. 本文在 64 位 Windows 系统上的 Matlab 软件进行仿真, 每个实验中配置相同的初始条件, 包括仿真区域大小、初始节点数量和网络配置, 以保证比较的公平性.

3.1 参数设置

仿真参数设置如表 1 所示. 本文假设所有的传感器节点具有相同的性能、传感范围和数据传输能力.

表 1 参数设置

参数	数值
节点数量 N (个)	1
仿真区域面积 $W_L \times W_B$ (m^2)	100×100
重建领域面积 $W_g \times W_g$ (m^2)	25×25
传感半径 R_s (m)	12.5
通信半径 R_c (m)	25
初始能量 E_{in} (J)	2
能量参数 E_{elec} (J per bit)	0.937×10^{-6}
能量参数 $\epsilon_{fs}(\epsilon_{mp})$ (J per bit)	$0.1(0.0013) \times 10^{-12}$
感知能耗 E_{sense} (J per bit)	50×10^{-9}
占空比 α_{s_i}	0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95
收发单元工作概率 P_{comm}	0.95
传感单元工作概率 P_{sense}	0.8
覆盖阈值 C_{thr}	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7
均方根误差 RMSE	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8

3.2 不同参数的影响

3.2.1 占空比

占空比用于描述传感器节点在一定时间内处于活动状态的时间比例, 代表传感器节点的多个状态, 能够平衡能耗, 延长节点寿命. 传感器节点活动、中继、睡眠和死亡状态的概率可由占空比计算得出. 图 4 展示了传感器节点在 $N = \{70, 80, 90, 100\}$ 时, 从 0.7 到 0.95 这 6 种占空比下的覆盖可靠性. 设置覆盖阈值 $C_{thr} = 0.5$, 其余参数如表 1 所示.

由图 4 可知, CROA 的可靠性值最高, CICR 其次,

ACR 最低. 这是因为 CROA 采用 CIC 模型, 与圆盘模型相比, 可以在相同数量的传感器下感知更多区域, 提高覆盖率, 同时利用骨干网络提升路由效率, 降低能耗, 延长网络寿命.

对于 CROA、CICR 和 ACR, 覆盖可靠性随节点数量的增多而增大; 随占空比的增大而增大, 更大的占空比意味着有更多传感器能够正常工作. 在占空比较小时, CROA 的优势更明显, 这是因为正常工作的传感器节点较少, 协同感知的区域更多, 通过传感器节点的配合可以覆盖更大的区域; 当正常工作的节点增多, 区域对协同感知的依赖减少. 如图 4(b) 所示, 对于 $N = 80$ 的 CROA, 当占空比从 0.7 增加到 0.95 时, 覆盖可靠性从 0.8711 增加到 0.9793.

3.2.2 覆盖阈值

覆盖阈值表示监测区域需要满足的覆盖要求, 用于衡量监测区域的覆盖程度. 图 5 展示了传感器节点在 $N = \{70, 80, 90, 100\}$ 时, 覆盖阈值从 0.4 到 0.7 的覆盖可靠性. 设置占空比 $\alpha_{s_i} = 0.8$, 其余参数如表 1 所示.

如图 5 所示, CROA 优于其他算法, 并且覆盖可靠性随节点数量的增多而增大. 在大多数情况下, 覆盖可靠性随着覆盖阈值 C_{thr} 的增加而降低, 因为相同的网络配置需要满足更高的覆盖率. 如图 5(a) 所示, 对于 $N = 70$ 的网络配置, 当 C_{thr} 从 0.55 上升到 0.6 时, 覆盖可靠性下降了 27.55%. 然而, 由于传感器能量消耗、传感器硬件故障、传感器多状态等因素, 覆盖可靠性并不总是随着覆盖阈值的增加而降低, 如图 5(c) 所示, 当 C_{thr} 从 0.4 增加到 0.45 时, 覆盖可靠性从 0.9883 降低到 0.9824; 当 C_{thr} 从 0.45 增加到 0.5 时, 覆盖可靠性从 0.9824 提升到 0.9833.

3.2.3 能耗

为了量化 CROA 的能耗指标, 选取节点平均能耗和节点剩余能量标准差两个能耗指标进行分析. 定义每轮数据传输节点能耗的平均值为节点平均能耗, 如式 (12) 所示:

$$E_r = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N E_r(S_i) - \sum_{i=1}^N E_{r+1}(S_i) \right] \quad (12)$$

其中, N 表示检测区域中传感器节点的数量; $E_r(S_i)$ 表示第 r 轮中节点 S_i 的剩余能量值.

在 WSN 中, 节点的能量分布通常是不均匀的, 一些节点可能会更早地耗尽能量, 而一些节点可能会保留

更多的能量. 如果某些关键位置的节点提前耗尽能量, 可能导致整个区域的监测和覆盖出现漏洞, 因此本文提出节点剩余能量标准差的概念. 节点剩余能量标准差代表着节点能量的离散程, 标准差越大, 网络能量负载均

衡性差. 定义节点剩余能量标准差 $\sigma(r)$ 如式(13)所示:

$$\sigma(r) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E_r(S_i) - E_r]^2} \quad (13)$$

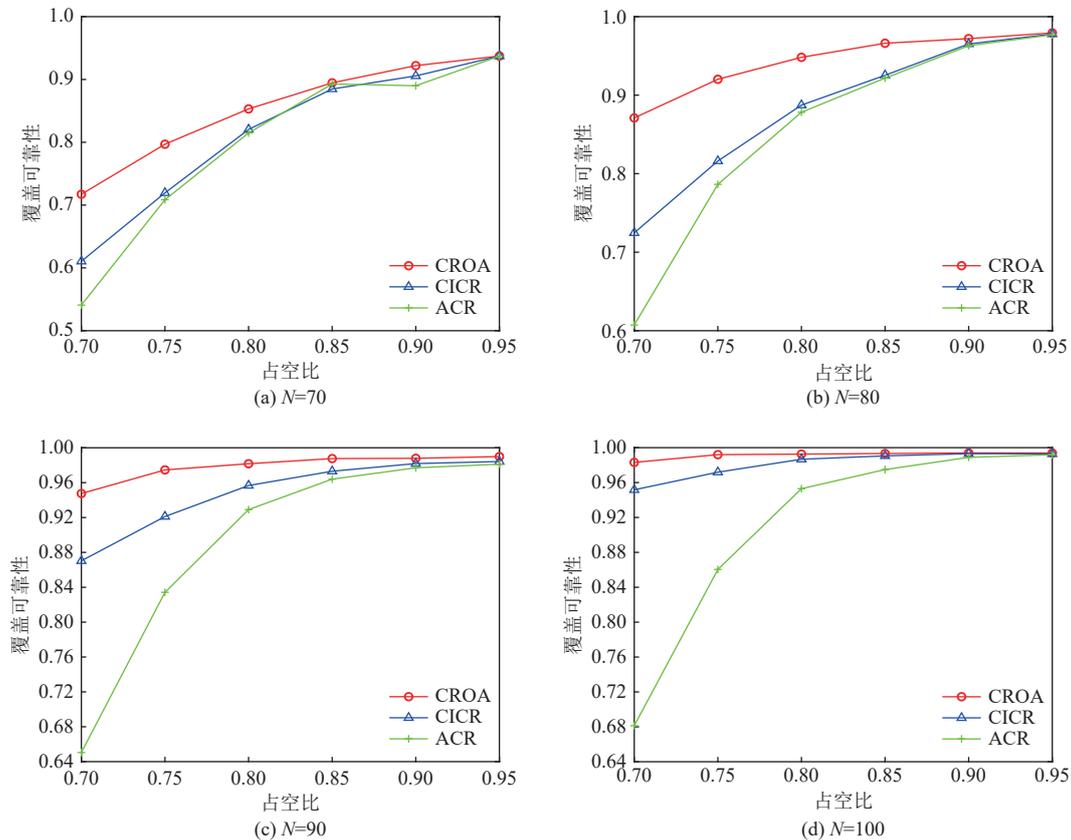


图4 随占空比增加的覆盖可靠性

表2展示了传感器节点在 $N=\{60, 70, 80, 90, 100\}$ 时, CROA和ACR运行一次仿真的节点平均能耗和节点剩余能量标准差. 设置占空比 $\alpha_{s_i} = 0.8$, 覆盖阈值 $C_{thr} = 0.5$, 其余参数如表1所示.

如表2所示, CROA的平均能耗和标准差明显低于ACR, 表示CROA的网络性能更好, 拥有更长的网络寿命. 这是因为骨干网络可以灵活调整传感器节点的活动状态, 使非骨干节点在空闲时进入睡眠, 节约能耗; 节点剩余能量标准差能够反映网络的负载能力, CROA在节点权值计算时着重考虑了剩余能量, 优先选择剩余能量多的节点为骨干节点, 均衡节点能耗.

当节点数量从60增加到100时, CROA的平均能耗和标准差随着节点数量的增加而减少. 因为更多的活动节点协同感知数据, 每个节点消耗的能量

更少.

3.3 RMSE 阈值

RMSE用来度量重建点的信息重建误差, RMSE阈值越大, 表示容错能力越强. 图6展示了传感器节点在 $N=\{50, 60, 70, 80, 90, 100\}$ 时, RMSE阈值从0.4到0.8的覆盖可靠性. 设置占空比 $\alpha_{s_i} = 0.8$, 覆盖阈值 $C_{thr} = 0.5$, 其余参数如表1所示.

如图6所示, 覆盖可靠性随节点数量的增多而增大; 并且与RMSE阈值 ϵ_0 呈正相关. 在CROA中, RMSE阈值越大, 表示传感器节点的协同感知能力越强, 覆盖面积越大. 当传感器节点数较少时, 覆盖可靠性受RMSE阈值的影响较大, 这是因为传感器节点较少的网络, 更依赖节点间的协同感知; 当传感器节点数较多时, 网络能满足更大的面积覆盖要求, 受RMSE阈值的

影响较小. 例如, 对于 $N=80$ 的CROA, 当RMSE 阈值从0.45 增加到0.5 时, 覆盖可靠性提升了27.53%; 当

RMSE 阈值从0.65 增加到0.7 时, 覆盖可靠性仅提升了0.55%.

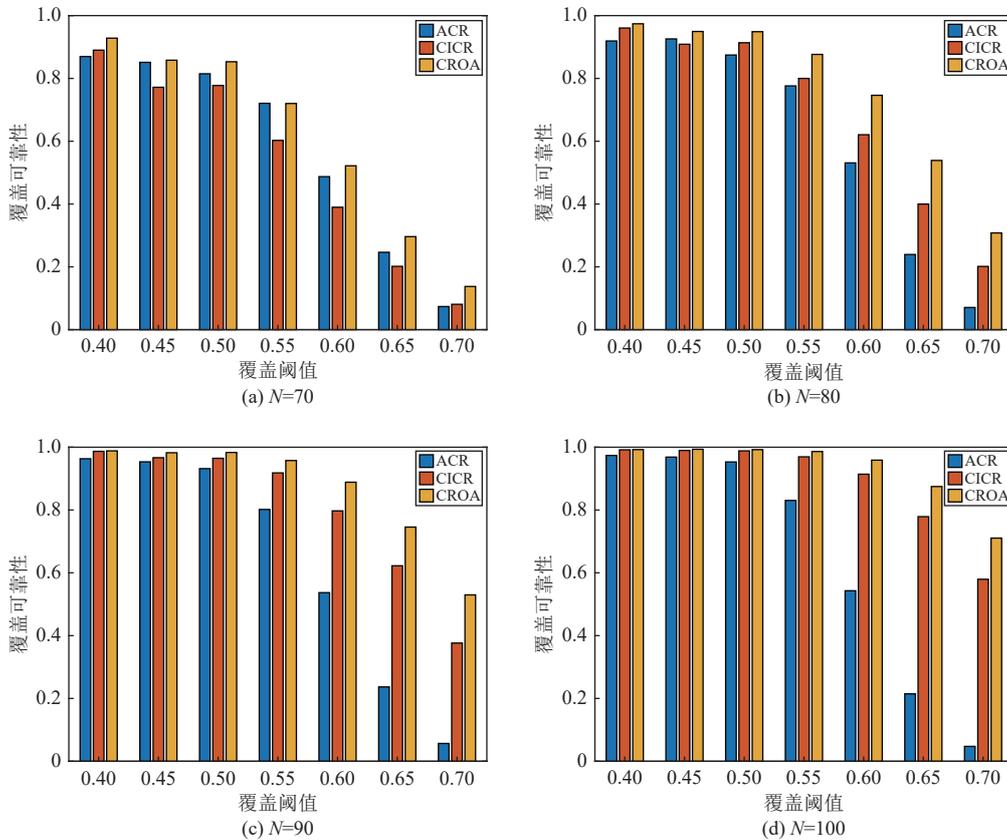


图5 随覆盖阈值增加的覆盖可靠性

表2 节点平均能耗和节点剩余能量标准差

节点数量	平均能耗 ($J \times 10^{-4}$)		标准差 ($J \times 10^{-4}$)	
	CROA	ACR	CROA	ACR
60	1.909 4	8.456 8	2.462 8	12.880 6
70	1.883 6	7.314 2	2.349 9	11.592 5
80	1.797 5	6.440 1	2.213 7	10.541 5
90	1.702 8	5.685 2	2.050 0	9.432 4
100	1.612 5	4.990 3	1.902 8	8.456 5

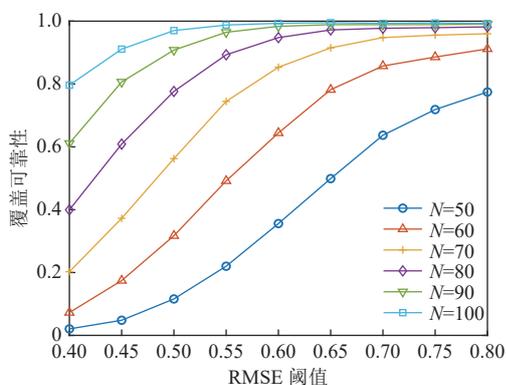


图6 随 RMSE 阈值增加的覆盖可靠性

4 结论

为了延长网络寿命, 提高无线传感器网络的覆盖可靠性, 本文提出一种覆盖可靠性评估模型. 在此基础上, 提出了一种基于可信信息覆盖的覆盖可靠性优化算法 CROA, 充分利用了节点之间的协同和空间相关性, 设置了能量均衡的骨干节点筛选机制, 优化节点覆盖和能量损耗. 结果表明, CROA 在占空比、覆盖率要求、能耗和 RMSE 阈值限制等方面均优于比较算法, 显著提高了覆盖可靠性. 在后续工作中, 计划将连通性和链路可靠性纳入网络可靠性评估, 研究出链路可靠的评估方案.

参考文献

1 Amutha J, Sharma S, Nagar J. WSN strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues. *Wireless Personal Communications*, 2020, 111(2): 1089–1115. [doi:

- 10.1007/s11277-019-06903-z]
- 2 Ar-Reyouchi EM, Ghoumid K, Ar-Reyouchi D, *et al.* Protocol wireless medical sensor networks in IoT for the efficiency of healthcare. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(13): 10693–10704. [doi: [10.1109/JIOT.2021.3125886](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3125886)]
 - 3 Wu XW, Lv XT. A sustainable energy strategy powered wireless sensor network system for monitoring child safety. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 57: 103183. [doi: [10.1016/j.seta.2023.103183](https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103183)]
 - 4 李翠然, 王雪洁, 谢健骊, 等. 基于改进 PSO 的铁路监测线性无线传感器网络路由算法. *通信学报*, 2022, 43(5): 155–165. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022109](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022109)]
 - 5 García L, Parra L, Jimenez JM, *et al.* DronAway: A proposal on the use of remote sensing drones as mobile gateway for WSN in precision agriculture. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6668. [doi: [10.3390/app10196668](https://doi.org/10.3390/app10196668)]
 - 6 Chakraborty S, Goyal NK, Soh S. On area coverage reliability of mobile wireless sensor networks with multistate nodes. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(9): 4992–5003. [doi: [10.1109/JSEN.2020.2965592](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2965592)]
 - 7 Liu Q. Coverage reliability evaluation of wireless sensor network considering common cause failures based on D-S evidence theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, 70(1): 331–345. [doi: [10.1109/TR.2020.2999576](https://doi.org/10.1109/TR.2020.2999576)]
 - 8 Chakraborty S, Goyal NK, Mahapatra S, *et al.* A Monte-Carlo Markov chain approach for coverage-area reliability of mobile wireless sensor networks with multistate nodes. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 193: 106662.
 - 9 董瑶瑶, 王亚飞, 姚媛媛, 等. SINR 概率感知下的无人机覆盖优化. *电讯技术*, 2022, 62(7): 929–935. [doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2022.07.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2022.07.014)]
 - 10 Yang HB. A practical method for connectivity and coverage reliability analysis for linear wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2023, 146: 103183. [doi: [10.1016/j.adhoc.2023.103183](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103183)]
 - 11 解文斌, 李佳, 鲜明, 等. 基于拓扑特性的分布式虚拟骨干网算法. *软件学报*, 2010, 21(6): 1416–1425. [doi: [10.3724/SP.J.1001.2010.03572](https://doi.org/10.3724/SP.J.1001.2010.03572)]
 - 12 凌飞, 吴振华. 能量均衡的最小连通支配集分布式算法. *传感技术学报*, 2012, 25(9): 1316–1321. [doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2012.09.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2012.09.027)]
 - 13 Wang K, Wang L, Obaidat MS, *et al.* Extending network lifetime for wireless rechargeable sensor network systems through partial charge. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(1): 1307–1317. [doi: [10.1109/JSYST.2020.2968628](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2968628)]
 - 14 Wang B, Zhu JJ, Yang LT, *et al.* Sensor density for confident information coverage in randomly deployed sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3238–3250. [doi: [10.1109/TWC.2016.2518689](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2518689)]
 - 15 Tang Y, Deng XJ, Yi LZ, *et al.* Collaborative intelligent confident information coverage node sleep scheduling for 6G-empowered green IoT. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(2): 1066–1077. [doi: [10.1109/TGCN.2022.3193996](https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3193996)]
 - 16 Carrano RC, Passos D, Magalhaes LCS, *et al.* Survey and taxonomy of duty cycling mechanisms in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1): 181–194.
 - 17 Singh P, Singh R. Energy-efficient QoS-aware intelligent hybrid clustered routing protocol for wireless sensor networks. *Journal of Sensors*, 2019, 2019(1): 8691878.

(校对责编: 王欣欣)