

基于三角剖分的 WSNs 元胞感知覆盖算法

王义君¹, 陈忠野¹, 缪瑞新², 宋忠炎¹

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林长春 130022; 2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林长春 130061)

摘要: 针对节点随机部署的静态无线传感器网络覆盖率低、能耗高和时延长等问题, 提出基于三角剖分的无线传感器网络元胞感知覆盖算法. 该算法通过改进的 Delaunay 三角剖分实现网络区域的唯一性划分; 采用元胞思想确认节点间邻域关系, 并通过设置节点感知半径完成网络拓扑控制; 将节点剩余能量、时间延迟和历史转发概率作为机器学习感知器的输入数据进行训练, 进而找到最优的数据转发通信路径. 仿真结果表明, 本文提出的算法将网络覆盖与数据传输相结合, 相较于其他算法, 覆盖率提高 13%~34%, 节点能量消耗减少了 2.25~2.50 J, 网络生命周期延长了 25%, 网络时延下降了 0.25~1.18 s.

关键词: 无线传感器网络; 区域覆盖; 三角剖分; 元胞感知

中图分类号: TN926+.2

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)10-2443-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200864

A Cellular Perceptron Coverage Algorithm Based on Triangulation in WSNs

WANG Yi-jun¹, CHEN Zhong-ye¹, MIAO Rui-xin², SONG Zhong-yan¹

(1. College of Electronic & Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China)

Abstract: Aiming at the problems of low coverage, high energy consumption and long delay of static Wireless Sensor Networks (WSNs) that are deployed randomly, a cellular perceptron coverage algorithm for WSNs based on triangulation is proposed. The algorithm applies improved Delaunay triangulation to achieve unique division of the network area. Then, it uses the cellular idea to confirm the neighborhood relationship between nodes and realizes network topology control by setting the node perception radius. Finally, the remaining energy of the node, the time delay and the historical forwarding probability are trained as the input data of the machine learning perceptron to find the optimal data forwarding communication path. The algorithm combines network coverage with data transmission. Compared with other algorithms, the coverage is increased by 13%~34%, the node energy consumption is reduced by 2.25~2.5 J, the network life cycle is prolonged by 25%, and the network delay is reduced by 0.25~1.18 s.

Key words: Wireless sensor networks; Regional coverage; Triangulation; Cellular perceptron

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 是一种特殊的无线自组织网络, 是未来 6G 和物联网应用的重要底层网络组成部分^[1]. WSNs 依赖无线连接和网络的自组形成, 可通过传感器采集数据, 监视物理或环境条件, 例如温度、声音、压力等, 并通过网络将数据协作地传递到目标中央节点. 为了实现这个目标, WSNs 需要监测整个环境空间, 其覆盖能力是保证

网络有效传输的基础^[2,3]. 同时, WSNs 需要节约能源消耗、延长网络寿命, 因此, 研究如何使 WSNs 兼具高覆盖率和低能耗是面向未来无线网络通信的重要内容.

部分学者对 WSNs 覆盖算法进行了相关研究. 文献[4]考虑了一种具有多等级通信半径的无源节点, 通过一种基于贪心策略的近似算法解决基于多等级通信半径的无源传感器网络覆盖问题. 但此算法一方面没有对由收敛性带来的时延进行分析, 另一方面仅考虑

理想无源场景对实际应用存在一定的局限. 文献[5]采用覆盖空洞修复算法, 基于计算 Delaunay 三角测量检测覆盖空洞, 通过修复覆盖空洞来最大化区域覆盖范围, 从而最小化节点总移动距离, 降低了整体移动能耗, 并提高了覆盖率, 但其缺乏有关节点部署的具体思路. 文献[6]基于元胞自动机进行了局部运动规划算法, 应用概率方法最大化网络覆盖范围, 并维护网络的连通性. 但在一定的参量变化下, 同步采集的效果可能会断开连接以形成多个集群. 文献[7]提出了一种基于子区域覆盖的新型随机调度算法, 将传感器覆盖范围划分为不同的子区域, 并通过随机调度传感器来确保各子区域的 K 阶覆盖, 但高阶覆盖缺少能量管理, 带来能量消耗过多、节点过早失效的弊端. 文献[8]提出了一种基于改进 Weed 算法的 WSNs 覆盖优化方法, 解决了节点分布不均导致监测区域覆盖过度和不完全的问题. 但该方法在覆盖率方面仅仅与原始 Weed 算法进行了比较, 缺少与其他覆盖优化方案的对比. 文献[9]为了解决 WSNs 随机部署导致节点偏离最优部署位置并出现覆盖空洞现象的问题, 提出了基于虚拟力定向蚁群优化算法的 WSNs 覆盖增强策略. 但此方法并未对节点移动所产生的能量消耗做进一步分析. 文献[10]提出了一种全面覆盖优化算法, 允许传感器动态地提供概率区域覆盖, 使其尽可能地延长网络生命周期, 但网络连通性存在可靠性差的问题. 从目前研究看, 由于节点的位置随机, 网络拓扑结构无法预测, 部分区域由于节点密度稀疏无法较好地完成覆盖工作. 同时, 一部分处于中心位置的节点频繁地转发数据, 导致节点能耗过高, 快速失效.

本文以保证网络覆盖率的同时降低节点能耗, 实现节点的均衡覆盖为目标, 在随机部署的静态二维应用环境下, 提出一种基于三角剖分的 WSNs 元胞感知覆盖算法 (a Cellular Perceptron Coverage Algorithm based on Triangulation in WSNs, CPCAT). 本算法首先采用改进的 Delaunay 三角剖分方法划分网络区域并保证唯一性; 其次, 采用元胞自动机 Moore 模型确认节点间邻域关系, 并通过设置节点感知半径完成网络拓扑控制; 最后, 将节点剩余能量、时间延迟和历史转发概率作为感知器的输入数据, 通过机器学习进行训练, 进而找到最优的数据转发通信路径.

2 网络模型

对于 WSNs 而言, 网络环境的特点决定了传感器节点需按照某种原则合理部署, 从而在保证网络连通覆盖前提下, 完成源节点与目的节点的可靠通信, 同时, 参与通信传输的传感器节点应尽可能少, 进而保证网络能耗尽可能低^[11]. 假设在目标区域内随机部署 n 个

传感器节点, 每个节点具有不同的 ID (Identification number), 且每个节点的 ID 在全局具有唯一性. WSNs 的覆盖及传输主要体现在连通和通信两方面, 因此本节对 WSNs 的网络连通模型及网络通信模型进行定义.

2.1 连通模型

覆盖算法需要表现出节点发送信号在网络中的传播能力, 需要用连通模型来反映覆盖能力. 连通模型基于某种特定的网络拓扑结构及节点分布状态反映整个网络的通信能力^[12]. 连通度的大小直接决定网络通信能力发生变化时节点通信路径的数量. 节点与周围邻居约束连通度越大, 网络整体稳定性越高, 网络高峰时, 其通信路径的选择越多. 对网络连通模型中的部分概念, 做出如下定义.

定义 1 将 WSNs 用有向图 $G=(V, E)$ 来表示, 其中 V 表示网络中节点的集合, E 表示网络中任意两节点间所经历的边的集合, 如果 G 中任意两节点 p 与 q 间存在一条通路, 即两点间有可连接的边, 则 G 是连通的, 否则 G 为非连通.

定义 2 有向图 G 中节点之间的关系称为边缘约束, 在二维 WSNs 有向图中, 节点之间存在边的连线关系即表示为边缘约束关系.

定义 3 在信息传输过程中, 无法与其他任意节点通信的节点被称为孤点, 孤点被设定为休眠状态.

当节点随机部署在目标区域或经过一段时间的信息交换后, 由于传输距离以及感知半径的限制, 网络中可能会出现孤点, 此时 WSNs 中的孤点处于非连通状态. 图 1、图 2 表示在 $8 \times 8 \text{ m}^2$ 的目标区域内布置 10 个节点后形成的连通状态和非连通状态. 在图 2 中, 节点 1 与其他节点均无边缘约束关系, 所以其为网络中的孤点.

在上述定义的基础上, 在 G 中节点 a 的边缘约束连通度集合可表示为

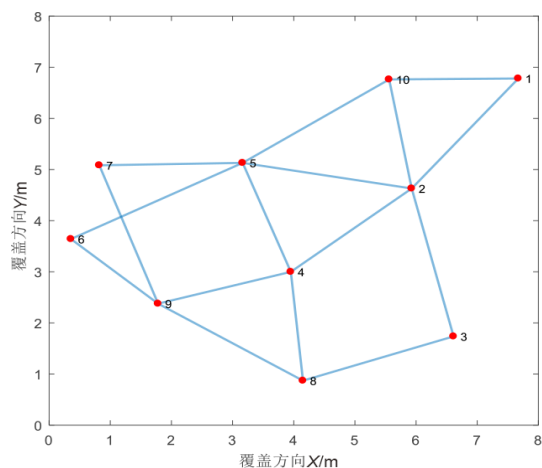


图 1 节点连通状态

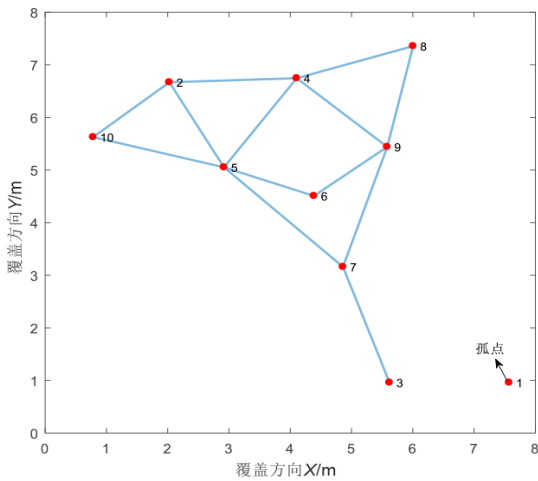


图2 节点非连通状态

$$\text{con}_a = \text{sum}\{G[a, t], t \in [1, w]\} \quad (1)$$

其中, t 是所有在该图中与节点 a 通过边缘约束连在一起的节点; w 为 a 满足边缘约束的节点个数.

边缘约束连通度越高的路径, 网络越稳定, 当节点需频繁交换数据信息时, 下一跳路径的选择性越多. 因此, 可以采用式(2)表示源节点 p 到目的节点 q 数据转发过程的连通模型, 即

$$\text{CON}_{p \rightarrow q} = \frac{1}{n_p} \sum_{a=1}^N \text{con}_a \quad (2)$$

其中, n_p 为通信路径上所经历的节点数量.

2.2 通信模型

WSNs 覆盖区域中的监测节点需要感知监测数据并完成转发, 因此节点通信范围的变化对覆盖算法是否有效起到关键作用. 此时需考虑发射功率对接收节点的影响.

根据电磁波传播理论, 当其在自由空间中传播时, 如果发射端与接收端在视距范围之内, 则可用自由空间传播模型预测接收信号的强度. 如果发射端的信源发射功率为 P_s , r 为收发端的距离, 则收发节点之间的信号功率关系为

$$P_R = P_S \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^U A_S A_R \quad (3)$$

其中, P_R 为信宿接收功率; λ 为载波波长; A_S 和 A_R 分别为信源天线和信宿天线的增益; U 为信道衰落系数.

3 CPCAT 算法实现

WSNs 覆盖算法的目的是保证监测区域内在任何情况下都处在一种最大限度的信息获取和数据传输状态^[13]. 在监测区域内应尽可能实现高覆盖率并减少覆盖的空洞现象. 因此本文所提到的 CPCAT 算法共包括 3 个方面: 监测区域划分、网络拓扑控制和数据转发选择.

3.1 监测区域划分

当节点随机部署在监测区域后, 监测区域划分是保证拓扑结构稳定的基础. 本节采用改进的 Delaunay 三角剖分方法构建覆盖区域内所有节点的划分结构, 步骤如下.

步骤 1 构造超级三角形. 如图 3(a) 所示, 节点 N, W, S, E 分别为监测区域内 4 个方向上位于最边缘位置的节点, 连接 NW, WS, SE, EN 及 WE , 此时 ΔNWE 和 ΔWSE 为构造的 2 个超级三角形, 将 ΔNWE 和 ΔWSE 放入三角形链表中.

步骤 2 嵌入节点. 此时, 剩余节点均在 2 个超级三角形形成的外接空心圆内部, ΔNWE 和 ΔWSE 的外接圆如图 3(b) 所示, P 为 2 个三角形内的待嵌入节点. 删除边 WE , 将嵌入点同超级三角形的全部顶点连接起来, 即连接 NP, WP, SP, EP . 此时, 完成了点 P 在 Delaunay 三角形链表中的嵌入, 如图 3(c) 所示. 新形成的三角形放入 Delaunay 三角形链表中, 此时的三角形链表为 $\Delta NWP, \Delta WSP, \Delta SEP, \Delta ENP$.

步骤 3 优化三角形链表. 如图 3(d) 所示, 新形成的三角形需满足空圆特性, 而如何保证空圆特性是实现 Delaunay 三角剖分的关键, 即如何判断任意三角形的外接圆内不会存在第 4 个顶点. 对于二维覆盖区域, 设节点 A, B, C 和 D 的坐标分别为 $(A_x, A_y), (B_x, B_y), (C_x, C_y)$ 和 (D_x, D_y) , A, B 和 C 三点构成三角形, D 点为待判断节点, 则可通过计算式(4)的行列式来判断 D 点是否在三角形的外接圆内. 当 A, B 和 C 按逆时针顺序排序时, 当且仅当 D 位于外接圆内时, 式(4)所表示的行列式值为正.

$$\begin{vmatrix} A_x & A_y & A_x^2 + A_y^2 & 1 \\ B_x & B_y & B_x^2 + B_y^2 & 1 \\ C_x & C_y & C_x^2 + C_y^2 & 1 \\ D_x & D_y & D_x^2 + D_y^2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_x - D_x & A_y - D_y & (A_x - D_x)^2 + (A_y - D_y)^2 \\ B_x - D_x & B_y - D_y & (B_x - D_x)^2 + (B_y - D_y)^2 \\ C_x - D_x & C_y - D_y & (C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 \end{vmatrix} > 0 \quad (4)$$

步骤 4 循环执行步骤 2, 直到所有节点嵌入完成.

本文改进的区域划分方法优点包括: (1) Delaunay 三角剖分网络是唯一的 (任意 4 点不能共圆), 即在构建的 Delaunay 三角剖分网络中任意三角形的外接圆范围内不会有其他点存在, 利用这个特点可保证网络的唯一性和鲁棒性; (2) 在所有节点形成的三角剖分中, 在 2 个相邻的三角形构成凸四边形的对角线, 在相互交换后, 6 个内角的最小角不再增大, 该方法所形成的三角形的最小角最大, 利用这个特点可保证每个三角形区域不会因角度问题过窄, 在感知半径确定的情况下, 可使节点间通信能耗相对减少; (3) 通过优化三角形列表准则, 三

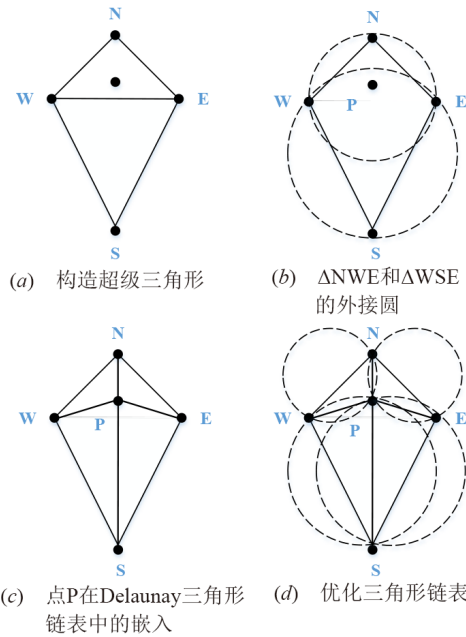


图3 Delaunay三角区域划分形成

角形连通性可用于定位在外接圆中包含新点的三角形,而不必检查所有三角形,因此算法时间复杂度可降低至 $O(n \log n)$. 构造算法伪代码如算法1所示.

算法1 区域划分

- 1) triangulation 定义为空三角形网格数据链表
- 2) 在4个方向上连接最边缘节点以构造2个超级三角形
- 3) 将超级三角形添加到 triangulation 数据链表中
- 4) bad-Triangles 定义为空集
- 5) **FOR** 点列表中各点 **DO**
- 6) **IF** 式(4)的行列式值大于零
- 7) 将该点形成的三角形加入 bad-Triangles
- 8) polygon 定义为空集
- 9) **FOR** 每个在 bad-Triangles 中的三角形 **DO**
- 10) **FOR** 三角形中的每条边 **DO**
- 11) **IF** 边不被 bad-Triangles 中的任何其他三角形共享
- 12) 将该边加入到 polygon
- 13) **FOR** 每个在 bad-Triangles 中的三角形 **DO**
- 14) 从 triangulation 中移除三角形
- 15) **FOR** 在 polygon 中的每条边 **DO**
- 16) newTri 定义为从边到点形成的三角形
- 17) 将 newTri 加入 triangulation
- 18) **FOR** triangulation 中的每一个三角形
- 19) **IF** 三角形包含来自原始超级三角形的顶点
- 20) 从 triangulation 中移除该三角形
- 21) **RETURN** triangulation

3.2 网络拓扑控制

在实现监测区域划分后,各个节点的位置及相互

关系已经明确,两节点间如果有连接的三角形边,则认为它们具备邻域条件,可以通过调整节点的感知半径维持网络拓扑控制. 因此,网络拓扑控制包括2部分内容:邻域关系确认及感知半径设置.

(1) 邻域关系确认

假设 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为经过区域划分后的网络节点集合, $S = \{s_i, s_w, s_i\}$ 为节点状态集合, s_i 代表节点处于正在传输状态, s_w 代表等待传输状态, s_i 代表空闲传输状态. 将处在正在传输状态的节点称为中心元胞节点(Center Cell, CC), CC需要决定下一跳节点的选择;将处在等待传输状态的节点称为过渡元胞节点(Transitional Cell, TC);将处在空闲传输状态的节点称为空闲元胞节点(Idle Cell, IC).

采用元胞自动机中的 Moore 邻域确认网络拓扑控制的元胞节点间邻域关系. 该邻域关系定义在二维元胞网格中,由中心元胞节点 CC 和围绕它的8个方位上的单元节点组成,它们与 CC 存在三角形边缘约束关系,称这样的节点具有邻域条件,如图4所示.

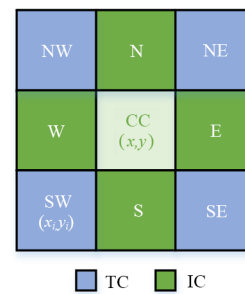


图4 邻域关系

假设 CC 的坐标为 (x, y) , 具有邻域条件的节点(如节点 SW)的坐标为 (x_i, y_i) , 则两节点间的切比雪夫距离可表示为

$$D_{\text{chess}} = \max(|x - x_i|, |y - y_i|) \quad (5)$$

如果要成为 CC 的邻域节点,则该节点必须满足

$$D_{\text{chess}} < R_{\text{max}} \quad (6)$$

其中, R_{max} 为节点可控的最大感知半径. 假定图4中 CC 周围的8个节点均为其邻域节点,则它们的状态可分为2类,即 TC(如节点 NW, SW, SE, NE)和 IC(如节点 N, W, S, E). 邻域关系确认伪代码如算法2所示.

(2) 感知半径设置

为了提高 WSNs 的覆盖拓扑控制,需要对节点的感知半径进行合理设置. 而对于随机部署且不移动的传感器节点,拓扑控制的关键是节点感知半径的确定. 节点感知半径的值越大,其控制效率越高,但相对能耗就越大,重叠冗余面积也越大.

在网络节点 D 集中,节点 d_n 根据 Delaunay 三角剖分

算法2 邻域关系确认

```

1) 输入: 可连接  $k$  个元胞  $(c_1, c_2, \dots, c_k)$  的中心元胞  $T$ 
2) 输出: 元胞邻域节点序列集合  $B(b_1, b_2, \dots, b_k)$ 
3) 定义:  $M(a)$  为元胞  $a$  的 Moore 邻居
4) 定义:  $s$  为 Moore 边界元胞
5) 定义:  $c$  为 Moore 边界元胞的下一跳扫描元胞
6) 定义:  $b$  为  $c$  的镜像元胞
7) BEGIN
8) LET  $b_k = c_k$ 
9) UPDATE B
10) 对  $B$  中元胞进行扫描, 直至找到  $B$  中第一个边界 Moore 元胞  $s$ 
11) 将  $s$  存入  $B$  中
12) WHILE  $c \neq s$  DO
13) IF  $c$  满足三角约束关系
14) 将  $c$  存入  $B$  中
15) LET  $b = s$ 
16) LET  $s = c$ 
17) LET  $c = M(T)$  中从  $b$  开始下一顺时针位置元胞
18) ELSE
19) LET  $b = c$ 
20) LET  $c = M(T)$  中从  $b$  开始下一顺时针位置元胞
21) END IF
22) END WHILE
23) UPDATE  $B, M(T)$ 
24) IF  $M(T)$  中元胞满足式(5)
25) 将其保留在  $B$  中
26) ELSE
27) 从  $B$  中移除
28) RETURN  $B$ 
29) END

```

的边缘约束条件确定邻域节点为 $\{t_1, t_2, \dots, t_j, j \in [1, 8]\}$. 设每个节点的感知半径为 R_p , 其范围为 $R_{\min} < R_p < R_{\max}$, R_{\min} 为节点可控的最小感知半径, R_{\max} 为节点可控的最大感知半径. R_{\min} 和 R_{\max} 定义如下:

$$R_{\min} = \min(r_{n,j}) \quad (7)$$

$$R_{\max} = \max(r_{n,j}) \quad (8)$$

其中, $r_{n,j}$ 为节点 d_n 到其第 j 个邻域节点 t_j 的距离.

此时, 网络已完成邻域关系确认, 每个网络节点最多具有 8 个邻域节点. 首先采用三角模糊函数定义邻域节点数量的取值区间, 即 $\text{PRI}=[0.8 \ 0.9 \ 1]$, $\text{INT}=[0.4 \ 0.6 \ 0.8]$, $\text{GEN}=[0 \ 0.2 \ 0.4]$; 其次, 利用邻域关系节点数量将每个网络节点分为 3 个经历阶段, 即初始阶段, 中期阶段及深入阶段. 当 $\text{PRI}=[0.8 \ 0.9 \ 1]$ 时, 该节点的邻域节点数量为 6~8 个, 其处在初始阶段; 当 $\text{INT}=[0.4 \ 0.6 \ 0.8]$ 时, 该节点的邻域节点数量为 3~6

个, 其处在中期阶段; 当 $\text{GEN}=[0 \ 0.2 \ 0.4]$ 时, 该节点的邻域节点数量为 0~3 个, 其处在深入阶段.

每个阶段的节点感知半径设置如下.

在初始阶段, 由于节点能量消耗较少, 网络中没有失效节点, 且节点分布密度较为均匀, 网络处在全连通状态, 所以此时所有节点通信用过程中的感知半径均选择最小感知半径 R_{\min} 可到达的邻域节点进行通信. 因此, 在该阶段节点感知半径设置为

$$R_p = R_{\min} \quad (9)$$

在中期阶段, 网络进行大规模信息交换及传输, 此时, 网络节点的连通状态相较于初始阶段开始下降, 此时的感知半径设置如式(10)所示:

$$\begin{cases} R_p = R_{\max}, & \omega_1 R_{\max} \leq r_{n,j} \leq R_{\max} \\ R_p = R_{\text{mid}}, & \omega_2 R_{\min} < r_{n,j} < \omega_1 R_{\max} \\ R_p = R_{\min}, & R_{\min} \leq r_{n,j} \leq \omega_2 R_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

其中 ω_1 和 ω_2 为半径设置权重系数, $0 < \omega_1 < 1$, $1 < \omega_2 < 2$, R_{mid} 为两节点距离处于中间距离范围时采用的半径设置值.

在深入阶段, 网络经过长时间运行, 失效网络节点的数量大规模出现, 网络连通度较差, 此时所有节点通信用过程中的感知半径均选择最大感知半径 R_{\max} 进行通信. 因此, 在该阶段节点感知半径设置为

$$R_p = R_{\max} \quad (11)$$

3.3 数据转发选择

对于 WSNs 覆盖算法来说, 首要的目的是收集目标区域的信息, 然后将采集到的信息通过源节点传输到目标节点. 本文的覆盖控制算法在静态拓扑环境下, 动态地调整半径, 以尽量减少由于覆盖空洞产生的数据缺失现象. 拓扑结构建立后, 数据转发选择是否有效对网络覆盖能力产生重要影响. 因此, 本节主要研究在区域划分和拓扑控制完成后, 如何通过数据转发选择提高网络覆盖效率.

假定源节点和目的节点间通信链路的路径选择集合如下:

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\} \quad (12)$$

在元胞节点优先级为 $\text{IC} > \text{TC} > \text{CC}$ 的前提下, 如何选择最优的通信路由由 3 个因素决定: 剩余能量、时间延迟及历史转发概率. 现做出如下定义.

定义4 节点剩余能量因子定义如式(13)所示:

$$E_i = \frac{1}{1 + \beta_i} \quad (13)$$

其中, E_i 为第 i 个节点剩余能量因子; β_i 为第 i 个节点剩余能量百分比, β_i 由式(14)计算得出, 即

$$\beta_i = \frac{E_{ic}}{E_f} \times 100\% \quad (14)$$

其中, E_{ic} 为第 i 个节点当前的剩余能量; E_f 为节点的满载能量, 即初始能量. 这里, 假设每个节点的满载能量是相同的, 即所有传感器节点都是同质的.

定义 5 通信路径的总时间延迟: 假设经过通信路径中每一节点所需时间延迟为 τ_i , 经过 n_p 个节点的通信路径总时间延迟为

$$T_d = \sum_{i=1}^{n_p} \tau_i \quad (15)$$

定义 6 节点历史转发概率为节点转发信息次数 x_i 与接收信息次数 x_r 的比值为

$$P_i = \frac{x_i}{x_r} \quad (16)$$

基于上述定义, 源节点到目标节点的所有路径节点选择函数为

$$\begin{aligned} f(L) &= \sum_{i=1}^k f(L_i) \\ &= \sum_{i=1}^k (\mathbf{W} \times \mathbf{I}_i) \\ &= \sum_{i=1}^k \left(\omega_e E_i + \omega_t \frac{1}{T_i} + \omega_p P_i \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中, \mathbf{W} 为权重矩阵; ω_e , ω_t 和 ω_p 分别表示能量因子权值、时间延迟权值及历史转发概率权值; \mathbf{I}_i 表示能量因子、时间延迟和历史转发概率的影响因素矩阵; k 为 L_i 路径上所历经的节点数量. 基于此, 通过感知机器学习对每条通信路径进行训练. 值得注意的是, 本文在 WSNs 每次执行时间同步周期的过程进行路径信息的更新训练, 即预设同步周期结束后, 进行数据转发选择训练, 最终确定最佳路径. 具体步骤如下.

步骤 1 初始化权重和阈值: 权重可以初始化为 0 或较小的随机值.

步骤 2 对于训练函数 $f(L_i)$ 中的每条通信路径, 对输入 \mathbf{I}_i 和所得输出执行如下计算.

(a) 计算实际通信路径输出值, 如式 (18) 所示:

$$f(L_i) = f(\mathbf{W} \times \mathbf{I}_i) = \omega_e E_i + \omega_t \frac{1}{T_i} + \omega_p P_i \quad (18)$$

(b) 更新权值 ω_i , 如式 (19) 所示:

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) + \mu [f_i(L_{\text{exp}}) - f(L_i)] I_i \quad (19)$$

其中, μ 为学习率, $f(L_{\text{exp}})$ 为经验期待输出, I_i 为权值所对应的影响因素.

步骤 3 重复迭代运算步骤 2, 直至迭代误差满足

$$\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z |f_i(L_{\text{exp}}) - f(L_i)| \leq \gamma \quad (20)$$

其中, γ 为指定的误差阈值; z 是样本集大小. 此时, 路径训练计算结束.

通过训练, 最终数据转发选择最佳路径可由下式

决定:

$$L_{\text{opt}} = \sup \{f(L_i), i \in (1, k)\} \quad (21)$$

CPCAT 算法在覆盖上动态地变换感知半径, 在部分节点失效时, 可以在小区域内利用拓扑控制重新组网. 其在传输路径上结合剩余能量因子、时间延迟和历史转发概率, 在保证最大限度网络连通时, 既降低了源节点到目标节点数据转发跳数, 又结合剩余能量因子达到能耗均衡的目的.

4 仿真实验

在 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 的二维仿真环境中随机布置 200 个 WSNs 节点, 最大源节点与目的节点通信对数量为 70, 通信频率 f 为 2.4 GHz, 两节点间距离为 d , 其他具体仿真参数设置如表 1 所示, 在此仿真条件下对覆盖控制算法的有效性进行验证. 本文将 CPCAT 算法与基于蚁群最小消耗的无线传感器网络覆盖控制 (Ant Colony Optimization based approach for Minimum Cost Coverage, ACO-MCC) 算法^[14] 和基于三角剖分的元胞遗传区域覆盖控制 (Cellular-genetic Regional Coverage Cooperative based on Triangle Subdivision, CRCCTS) 算法^[15] 进行比较. 其中, ACO-MCC 算法以降低能耗为最优目标, 可以在二维和三维环境转换, 而 CRCCTS 算法的拓扑结构也采用三角剖分形式. 所以, 从性能指标和研究方法方面, 本文所提算法与这 2 种算法进行比较, 具有较好的仿真实验依据. 将 3 种算法同时在表 1 所示的仿真环境下进行实验, 并从覆盖率、能量消耗、生命周期及时延等 4 个方面进行数据处理和分析.

表 1 仿真参数

参数	设置值
ω_1	0.8
ω_2	1.2
权重 \mathbf{W} 初始值	0
节点初始能量	1 J
传输能量消耗	45 nJ/(bit/m ²)
路径传输损耗	$0.2f^{0.3}d^{0.6}$ dB
信息帧长	4 000 bits
每轮采集的帧数	20
最大感知半径	20 m
最小感知半径	5 m
最大通信半径	40 m

4.1 覆盖率

覆盖率是衡量网络控制算法的评价指标, 它可以反应网络覆盖程度. 假设节点 i 的覆盖范围 C_i 是节点感知半径 R_p 的函数, 即

$$C_i = f(R_p) \quad (22)$$

则将覆盖率定义为监测区域中所有 n 个节点覆盖范围的并集与覆盖区域面积 A_s 的比值为

$$\eta = \frac{\bigcup_{i=1}^n C_i}{A_s} \quad (23)$$

根据式 (23), CPCAT 算法、ACO-MCC 算法和 CRCCTS 算法在覆盖率方面的性能指标如图 5 所示. CPCAT 算法由于采用改进的区域划分方法和拓扑控制策略,可实现最少节点覆盖最大区域,并且当节点失效引起网络空洞时,可及时恢复节点通信并重构网络拓扑. 从图 5 可以看出,随着节点数量的增加,相较于 ACO-MCC 算法和 CRCCTS 算法, CPCAT 算法的覆盖率分别提高了 34% 和 13%. 同时,本文还比较了传感半径变化时对覆盖率的影响,仿真结果如图 6 所示. 随着传感半径的增大,所有算法的覆盖率均得到提升,而本文所提 CPCAT 算法始终能保证最好的收敛性,当节点设置为最小传感半径,网络覆盖率达到 49%,当节点设置为最大传感半径时,网络覆盖率达到 95%.

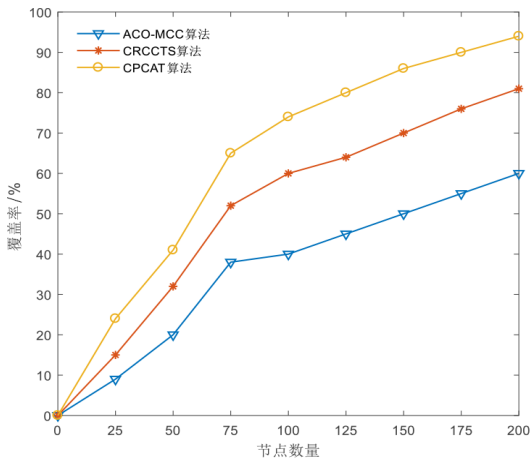


图 5 覆盖率比较

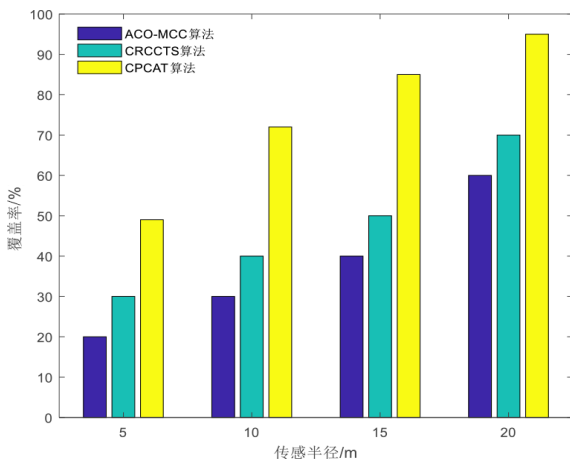


图 6 传感半径对覆盖率的影响

4.2 能量消耗

WSNs 通常节点能量受限,因此覆盖算法执行过程中节点的能量消耗决定了网络的生存周期. 根据 2.2 节所述通信模型,当其在自由空间中传播时,如果发射端与接收端在视距范围之内,则可用自由空间传播模型预测接收信号的强度. 假定节点 g 处在发送状态,与接收节点 v 之间的距离为 b ,则发送 l 位数据消耗的能量可表示为

$$E_{g \rightarrow v}(b) = l \cdot E_{\text{elect}} + l \cdot \epsilon_{fs} \cdot b^\alpha \quad (24)$$

其中, E_{elect} 是每比特数据的发射能耗,设定 $E_{\text{elect}} = 50 \text{ nJ/bit}$; ϵ_{fs} 是传输 1 位数据可实现的误码率能量消耗,设定 $\epsilon_{fs} = 10 \text{ nJ/(bit/m}^2)$; l 为帧长, b 为两节点间的传输距离, α 为自由空间模型的传输路径损耗指数. 当节点 g 处在接收状态时,与发送节点 v 距离 b 时接收 l 位数据消耗的能量为

$$E_{g \leftarrow v}(b) = l \cdot E_{\text{elect}} \quad (25)$$

因此,一次发送和接收 l 位数据消耗的总能量为

$$E_{\text{total}} = E_{g \rightarrow v}(b) + E_{g \leftarrow v}(b) \quad (26)$$

仿真实验随机选取 0~70 对节点进行通信,每一次增加通信对数,迭代 1 000 次并取平均值,能量消耗指标如图 7 所示. CPCAT 算法在感知半径动态处理,并基于剩余能量因子和元胞自动机的最优路径思想,在数据转发路径选择上优势明显,且一次端到端数据转发过程中参与通信的节点数量较少,其通信消耗能量明显低于其他 2 种算法. 由图 7 可以看出,当通信对数达到 70 时,在能量消耗上, CPCAT 算法相较于 ACO-MCC 算法节省 2.5 J,相较于 CRCCTS 算法节省 2.25 J. 同时,本文还比较了传感半径变化时对于网络能耗的影响,仿真结果如图 8 所示. 随着传感半径的增大,所有算法的网络能耗均增大,而本文所提 CPCAT 算法始终能保证高效的能量均衡,当节点设置为最小传感半径时,能量消耗为 0.45 J,当节点设置为最大传感半径时,能量消耗为 1.6 J.

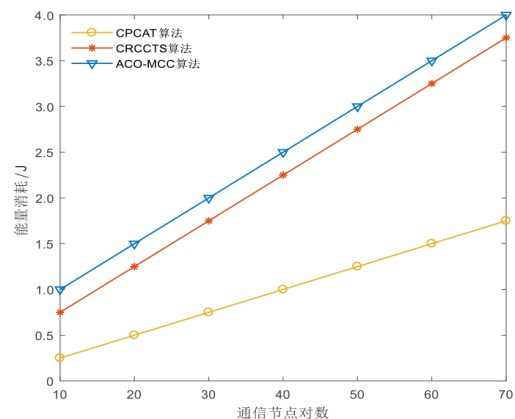


图 7 能量消耗比较

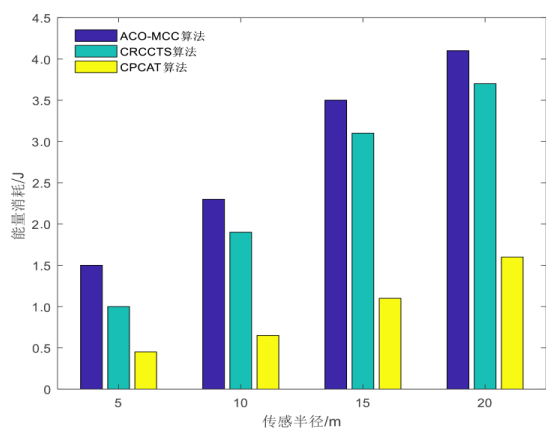


图8 传感半径对能量消耗的影响

4.3 生命周期

网络生命周期能够更直观地显示出网络覆盖拓扑的效率情况。随着节点感知和通信的不断进行,网络中节点不断失效。因此,网络生命周期可看作WSNs执行轮数与剩余节点数量之间的关系。仿真固定每轮随机35对源节点和目标节点进行通信,生命周期的性能指标如图9所示。CPCAT算法在路径选择上消耗能量较少,后期基于剩余能量因子决定通信路径,虽然路径变长,但是致使部分高能量节点加入通信,达到了能量均衡的作用,而其余2类算法的节点能耗高于CPCAT算法,并缺乏良好的路径安排,处于中心位置的节点可能持续通信,加快能量消耗,导致节点过早失效。从图9可以看出,ACO-MCC算法经过300轮的执行周期后,所有节点全部失效;CRCCTS算法经过350轮后节点全部失效;而CPCAT算法可以达到400轮次的执行周期,表现出较好的生命周期持续性。

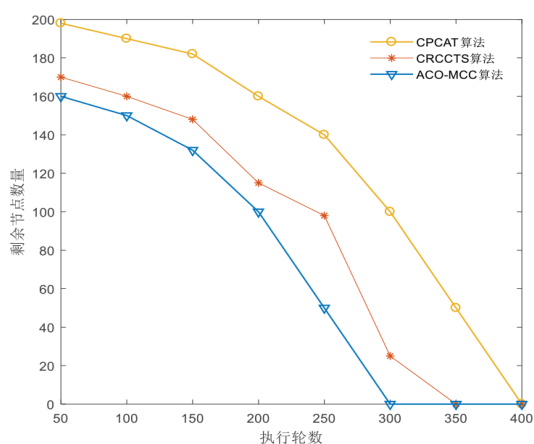


图9 网络生命周期比较

4.4 时延

降低网络延迟是众多WSNs应用的关键指标要求,低时延的WSNs可以保证网络的覆盖精确性。仿真实验同样随机选取0~70对节点进行通信,随机选择部分节点

间断性占据通信链路,干扰过程数据转发。图10是随着通信对数的增加,3种算法整体网络时延的比较。CPCAT算法在跳跃路径的优化上,将时延作为重要影响因素,在权重训练的帮助下,可以以相对最优时延的节点作为下一跳转发节点。从图10可以看出,在时延性能指标方面,当通信节点对数为70时,CPCAT算法相较于ACO-MCC算法最高下降1.18 s,相较于CRCCTS算法最高下降0.25 s,表现出较好的实时性。同时,本文还比较了传感半径变化时对网络时间延迟的影响,仿真结果如图11所示。随着传感半径的增大,所有算法的时间延迟均降低,而本文所提CPCAT算法始终能保持较高的时间传递效率,当节点设置为最小传感半径时,时间延迟为4.1 s,当节点设置为最大传感半径时,时间延迟为0.5 s。

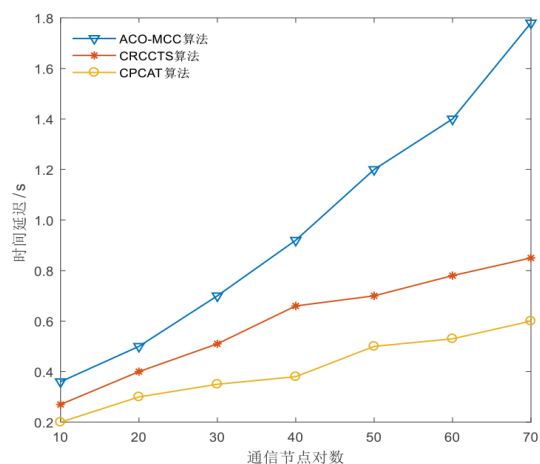


图10 时延比较

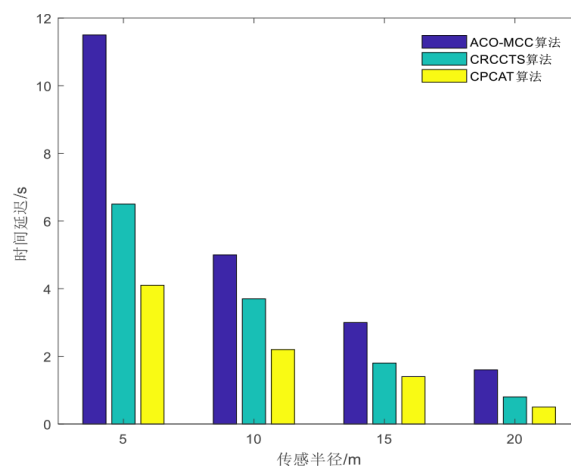


图11 传感半径对时间延迟的影响

5 结论

本文所提到的CPCAT算法采用改进的Delaunay三角剖分进行区域划分,通过邻域确认及感知半径设置维护网络拓扑控制,并将收集到的信息基于感知机器学习思想计算最佳路径进行数据转发。CPCAT算法

相较于 ACO-MCC 算法和 CRCCTS 算法能够实现较高覆盖率,并兼顾了能量均衡和时延降低的特性.从仿真结果上来看,CRCCTS 算法表现出良好的性能.后续将会加强对感知半径的自由调控,减少覆盖冗余,并加入移动节点,更好地完成数据转发过程,利用动静结合的思想解决面向 6G 及物联网应用的覆盖空洞和孤点问题.从目前来看,针对于静态拓扑的 CPCAT 算法实时性较好,生命周期较长,覆盖率较高,能够很好地被应用于静态拓扑 WSNs 的相关领域.

参考文献

- [1] VIKASH, MISHRA L, VARMA S. Middleware technologies for smart wireless sensor networks towards Internet of Things: A comparative review[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 116(3): 1539-1574.
- [2] AWOYEMI B S, ALFA A S, MAHARAJ B T. Network restoration in wireless sensor networks for next-generation applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(18): 8352-8363.
- [3] GUO J, JAFARKHANI H. Movement-efficient sensor deployment in wireless sensor networks with limited communication range[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(7): 3469-3484.
- [4] 石拓, 李建中, 高宏. 多等级通信半径的无源传感器网络中的覆盖问题[J]. *软件学报*, 2021, 32(8): 2580-2596.
SHI T, LI J Z, GAO H. Coverage problem in battery-free sensor networks with multi-level communication radius[J]. *Journal of Software*, 2021, 32(8): 2580-2596. (in Chinese)
- [5] SO-IN C, NGUYEN T G, NGUYEN N G. An efficient coverage hole-healing algorithm for area-coverage improvements in mobile sensor networks[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, 12(3): 541-552.
- [6] HASSAN M Y, HUSSAIN F, CHOUDHURY S. Connectivity preserving obstacle avoidance localized motion planning algorithms for mobile wireless sensor networks[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, 12(3): 647-659.
- [7] MUHAMMAD Z, ROY A, CHANG W A, et al. A novel random scheduling algorithm based on subregions coverage for SET K-cover problem in wireless sensor networks [J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2018, 12(6): 2658-2679.
- [8] ZHU F, WANG W H. A coverage optimization method for WSNs based on the improved weed algorithm[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(17): 5869.
- [9] YAO Y D, LI Y, XIE D Y, et al. Coverage enhancement strategy for WSNs based on virtual force-directed ant lion optimization algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 19611-19622.
- [10] YANG Q Q, HE S B, LI J K, et al. Energy-efficient probabilistic area coverage in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(1): 367-377.
- [11] SAHOO P K, SHEU J P, HSIEH K Y. Target tracking and boundary node selection algorithms of wireless sensor networks for Internet services[J]. *Information Sciences*, 2013, 230: 21-38.
- [12] KESHMIRI H, BAKHSHI H. A new 2-phase optimization-based guaranteed connected target coverage for wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7472-7486.
- [13] ELHABYAN R, SHI W, ST-HILAIRE M. Coverage protocols for wireless sensor networks: Review and future directions[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2019, 21(1): 45-60.
- [14] QASIM T, ZIA M, MINHAS Q A, et al. An ant colony optimization based approach for minimum cost coverage on 3-D grid in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(6): 1140-1143.
- [15] 刘大鵬, 陈桂芬, 王义君. 自组织网络区域覆盖协作控制算法[J]. *兵工学报*, 2020, 41(6): 1131-1139.
LIU D K, CHEN G F, WANG Y J. Regional coverage cooperative control algorithm for ad hoc networks[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 1131-1139. (in Chinese)

作者简介



王义君 男,1984年11月出生,内蒙古通辽人.长春理工大学电子信息工程学院副教授.主要研究方向为5G/6G移动通信、物联网及无线传感器网络等.
E-mail: wangyijun@cust.edu.cn



陈忠野 男,1995年4月出生,黑龙江鸡西人.长春理工大学电子信息工程学院硕士研究生.主要研究方向为人工智能及无线传感器网络.

缪瑞新 男,1995年9月出生,吉林长春人.吉林大学仪器科学与电气工程学院博士研究生.主要研究方向为单边核磁共振系统.

宋忠炎 男,1995年11月出生,黑龙江牡丹江人.长春理工大学电子信息工程学院硕士研究生.主要研究方向为大规模无线 MIMO 技术.