



异构无线传感器网络中继节点部署算法

马千里¹, 袁 易¹, 申朝晖²

(1. 山西大学 计算机与信息技术学院, 太原 030006; 2. 太原欧亚科技发展有限公司, 太原 030006)

摘 要: 针对无线传感器网络因节点多且密集造成的网络拥塞问题, 提出一种基于节点权重及边长的中继节点部署算法, 以减少网络节点部署数量。改进异构环境中中继节点部署方式, 利用两节点之间距离及节点性质计算边的权重, 按权重和边长对边进行排序, 采用最小生成树算法结合图增量理论改变中继节点加入条件, 并使用迭代方式依次加入中继节点, 从而减少相同环境下部署中继节点的数量。不同规模的仿真实验结果表明, 与 GA-RD、IWGA-RD 算法相比, 该算法所得网络中继节点部署数量更少且网络性能更好, 在大样本情况下其能显著降低网络负载和部署成本。

关键词: 无线传感器网络; 中继节点; 部署策略; 网络连通; 异构网络

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 马千里, 袁易, 申朝晖. 异构无线传感器网络中继节点部署算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 171-178.

英文引用格式: MA Qianli, YUAN Yi, SHEN Zhaohui. Relay node deployment algorithm in heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Engineering, 2020, 46(12): 171-178.

Relay Node Deployment Algorithm in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

MA Qianli¹, YUAN Yi¹, SHEN Zhaohui²

(1. School of Computer and Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Taiyuan Ouryear Science and Technology Development Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

[Abstract] To relieve the network congestion caused by the large number of nodes deployed in Wireless Sensor Networks(WSNs), this paper proposes a relay node deployment algorithm based on node weight and edge length to reduce the number of network nodes. The deployment mode of relay nodes is improved in heterogeneous environment. The edges are weighted based on the distance between two nodes and the properties of the nodes, and then are sorted according to their weight and side length. By using the Minimum Spanning Tree(MST) algorithm and the graph increment theory, the joining conditions of relay nodes are changed, and the relay nodes are added in an iterative manner to reduce the number of relay nodes in the same environment. Results of different scales of simulation experiments show that compared with GA-RD and IWGA-RD algorithm, the proposed algorithm has fewer relay nodes and better network performance. In the case of large sample, it can significantly reduce the network loads and deployment cost.

[Key words] Wireless Sensor Networks(WSNs); relay node; deployment strategy; network connectivity; heterogeneous networks

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0056264

0 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)由近千个传感器节点组成, 每个传感器节点由电池提供能量, 传感器节点通常部署于环境恶劣的地方, 这导致节点可能发生失效, 从而影响整个网络的连通质量^[1]。针对该问题, 在传感器节点网络

中引入中继节点, 传感器节点不再直接将信息发送给彼此, 而是先发送给中继节点, 然后中继节点再将信息发送给其他传感器节点, 进而实现网络信息的传递。这与引入 actor 节点使网络连通的无线传感器和执行器网络(Wireless Sensor and Actor Networks, WSANs)工作原理类似^[2]。actor 节点可移动且较 sensor 节点通信性能更好, 若传感器节点因意外或者

基金项目: 山西省自然科学基金(201701D121054)。

作者简介: 马千里(1969—), 女, 副教授、博士, 主研方向为传感器网络、网络优化、服务发现; 袁 易, 硕士研究生; 申朝晖, 工程师。

收稿日期: 2019-10-12 修回日期: 2019-12-16 E-mail: mymq123@163.com

电量耗尽而失效, actor 节点可代替失效节点工作, 并能较好地适应网络的随机变化。根据相关部署策略引入中继节点的部署方案, 实质上与在异构网络中增加具有较高通信性能的 actor 节点类似。

LIN 等人^[3]最早在 WSNs 中添加中继节点, 将同构网络中加入最少中继节点的问题命名为最少数目斯坦纳点和有界边长的斯坦纳树问题 (Steiner Tree Problem with Minimum Number of Steiner Points and Bounded Edge Length, STP-MSPBEL) 并证明其为 NP 难问题, 在此基础上, 提出基于图增量的中继节点部署 GA-RD 算法。文献[4]对 GA-RD 算法进行改进, 提出基于权重图的 IWGA-RD 算法, 并证明该算法具有更好的近似比。算法的近似比和近似解反映了算法优化程度, 在改进算法部署时其可作为衡量算法能否减少节点数量和提高网络性能的参考指标。

目前, WSNs 中继节点数据传输包括自主收集、接收信息、携带信息后再发送等环节, 使全网数据吞吐量与传输量大幅提升。为满足传感器网络数据吞吐量和传输量的要求, 网络部署规模庞大且节点众多而密集, 在节点收发信息的瞬时易造成网络拥塞, 甚至导致网络瘫痪。因此, 减少传感器网络中继节点数量至关重要。本文在 IWGA-RD 算法的基础上进行改进, 提出一种基于节点权重与边长的 LWGA 算法, 通过对节点权重和边长的排序改进中继节点加入网络的优先级次序, 以选择传感器网络中节点数量更少的中继节点部署方式。

1 研究现状

无线传感器网络作为一种重要的网络技术, 将信息世界与人们日常生活紧密联系在一起, 实现了两者之间的交互。WSNs 以数据为中心, 其中传感器节点由感知、数据处理及存储、通信、供能单元构成^[5-6]。WSNs 技术与其应用场景关联密切, 不同场景的应用技术有较大差别。WSNs 因其大规模、自组织、高可靠性等特点被广泛应用于军事、医疗、环境等领域, 但是由于其存在节点能量易耗尽造成网络中断、存储空间有限等缺点, 因此研究人员将精力集中在 WSNs 有利特性的研究^[7-9]上。目前关于 WSNs 的研究方向为传感器的网络连通、网络节能^[10-11]以及网络覆盖^[12-14]等方面, 本文主要研究传感器网络环境下中继节点部署的网络连通问题。

研究人员从上世纪末就开始对在网络中添加中继节点进行研究。文献[3]所提 STP-MSPBEL 方案中最小 Steiner 树^[15]和最小生成树问题类似, 都是最短网络的一种解决方案, 但两者区别在于, 最小生成树网络是在给定的点集和边中寻求最短网络使网络连通, 而最小 Steiner 树网络允许在给定的点之外增加额外点使网络连通^[16]。

本文主要研究基于 Steiner 树的网络。在文献[3]的基础上, 研究人员对这类问题进行改进和优化。文献[17]基于文献[3]重新推导算法的近似比, 证明该算法的近似比为 4。文献[18]提出一种使网络达到 k -连通的中继节点部署算法。文献[19]证明使网络达到连通加入最少异构中继节点的问题仍为 NP 难问题, 并对文献[3]所提中继节点部署算法的近似比重新推导得到近似比为 7。文献[20]基于文献[19]提出结合约束部署区域的思想新算法, 将近似比降低到 2。上述算法均基于网络中节点为同构这一假设, 即要求加入的中继节点与已有节点具有相同的通信性能。而实际上无线传感器网络存在多种异构情况, 例如 XBee S_2 与 XBee S_2 Pro 射频模块均为 ZigBee 路由器的主要组成部分, 其采用相同的协议栈, 彼此之间可通信并组建网络。然而 XBee S_2 射频功率仅为 2 mW, 室外通信距离为 120 m, XBee S_2 Pro 射频功率为 63 mW, 室外通信距离长达 3 200 m, 其价格是 XBee S_2 的 3 倍以上。文献[4]将网络节点的通信性能进行区分, 在网络中加入中继节点使网络连通, 并通过减少后加入的中继节点数量降低网络能耗以节省网络成本。文献[21-22]研究由中继节点和传感器节点组成的异构网络, 在该网络中加入新中继节点, 从而由负载均衡和能量有效等方面优化网络性能。无线传感器网络中异构与同构的最大区别在于传感器节点之间的通信性能^[23], 因此同种算法在这 2 种网络中有明显差异, 且相关算法都需运用到图增量。考虑到同构场景的局限性, 本文针对异构场景下的节点部署问题展开研究。

2 网络模型与问题描述

文献[4]将 sensor 节点按照通信性能进行区分: 普通 sensor 节点为低性能节点, 命名为 S_1 ; 将高通信性能的 sensor 节点命名为 S_2 , 且 S_2 的通信半径大于 S_1 , 即 $R_{S_2} > R_{S_1}$ 。2 个节点之间通信半径由其中通信半径小的节点决定, 如图 1 所示 ($\text{dist}(S_1, S_2)$ 代表 S_1 和 S_2 之间的欧式距离, 三角形和圆形代表通信半径不同的传感器节点)。

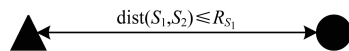


图 1 2 个节点之间的通信半径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of communication radius between two nodes

根据上述对不同节点通信半径的分析, 本文在 WSNs 中部署中继节点 (WSN-RELAY) 以实现网络连通性, 并对其进行形式化定义。

定义 1 在二维平面里, 给定无向图 $G = \langle V, E \rangle$, V 由 S_1 和 S_2 节点的集合 S_{S_1} 、 S_{S_2} 组成, 且这 2 个集合互不相交。 S_{relay} 为中继节点集合, 是整个算法的输出。边

集 E 中所有边的 2 个顶点均满足上述通信半径的约束,表示为:

$$E = \{e(i,j) \mid \text{dist}(i,j) \leq R_{S_2}, i \in S_{S_1} \& j \in S_{S_2}\} \cup \{e(i,j) \mid \text{dist}(i,j) \leq R_{S_1}, i \in S_{S_1} \parallel j \in S_{S_2}\} \quad (1)$$

新添加的边和节点构成 $G = \langle V, E \rangle$ 。将一定数量的中继节点部署在满足如上约束的无向图 G 中,求得 S_{relay} 并使 $|S_{\text{relay}}|$ 达到最小。WSN-RELAY 与文献[3]提出的 STP-MSPBEL 类似,且当 $R_{S_1} = R_{S_2}$ 时,等价于 STP-MSPBEL。由文献[3]中最小斯坦纳生成树问题的证明可知,本文所研究的问题为 NP 难问题,即研究如何部署节点使得 S_{relay} 的中继节点数量最小。解决该问题的方法包括传统 GA-RD 算法及由其改进的 IWGA-RD 算法,本文在 IWGA-RD 算法的基础上对节点优先级筛选方式进行优化。

1) GA-RD 算法

GA-RD 算法的主要思想是通过向森林 T 加入 $n-1$ 个边使 T 变成 1 棵树,从而实现整个网络的连通^[4]。输入 $G = \langle V, E \rangle$,先求出在未加入中继节点情况下已连通的边集 E ,初始化空的森林 T ,在保证不出现环的情况下从 E 挑选边加入 T 中,令 $E' = V \times V - E$,将其中的边按边长升序得到队列 Q ,再将 Q 中的边在不出现环的情况下加入 T 中,并加入中继节点使网络连通^[15]。

2) IWGA-RD 算法

IWGA-RD 算法是先计算出各边的权重,并将其按升序排列形成队列 Q 。与 GA-RD 算法类似, IWGA-RD 算法采用最小生成树算法求解图增量问题,再将 Q 中的元素利用迭代法依次加入森林 T 中,在 $e(i,j)$ 为 0 的边加入中继节点使网络连通,最后去掉多余的中继节点。

以下介绍本文所提 LWGA 算法中边的权重计算方法。由于 S_1 与 S_2 的通信性能不同,在 2 个 sensor 节点之间加入中继节点时,会考虑到该因素。假设 S_2 的通信性能与中继节点近似,则权重的计算存在以下 3 种情况:

1) 当 2 个 sensor 节点(设为 i, j)均为 S_1 时,所需中继节点数量与 2 个节点之间的距离 $\text{dist}(i, j)$ 和 S_1 的通信半径 R_{S_1} 有关。当 $\text{dist}(i, j) \leq R_{S_1}$ 时, i 与 j 均在对方的通信范围内,无需加入中继节点,网络本身为连通状态;当 $\text{dist}(i, j)$ 在 R_{S_1} 和 $2R_{S_1}$ 之间时(见图 2),需加入 1 个中继节点,该中继节点同时在 2 个节点的通信范围内,使得网络连通;当 $\text{dist}(i, j) > 2R_{S_1}$ 时(见图 3),在 2 个 sensor 节点各自通信范围的最远处(2 个节点通信范围以外)分别加入 1 个中继节点,计算该距离为 $\text{dist}(i, j) - 2R_{S_1}$,在此距离范围内需部署中继节点使得网络连通,2 个节点之间的权重计算公式如式(2)所示。

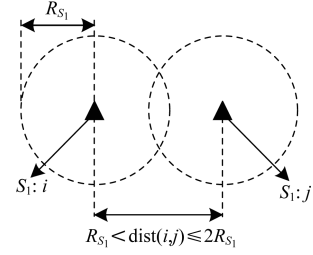


图 2 $\text{dist}(i, j) \in (R_{S_1}, 2R_{S_1})$ 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of $\text{dist}(i, j) \in (R_{S_1}, 2R_{S_1})$

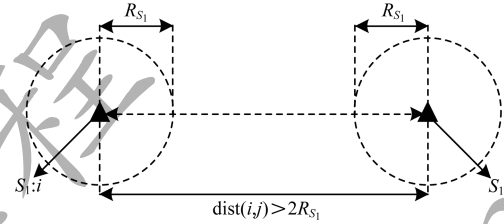


图 3 $\text{dist}(i, j) \in (2R_{S_1}, +\infty)$ 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of $\text{dist}(i, j) \in (2R_{S_1}, +\infty)$

$$w(e(i, j)) = \begin{cases} 0, & \text{dist}(i, j) \leq R_{S_1} \\ 1, & R_{S_1} < \text{dist}(i, j) \leq 2R_{S_1} \\ \text{dist}(i, j) - 2R_{S_1}, & \text{dist}(i, j) > 2R_{S_1} \end{cases} \quad (2)$$

2) 当 2 个 sensor 节点分别为 S_1 和 S_2 时,在 S_1 通信范围最远处部署 1 个中继节点,将该中继节点视为 S_2 ,其余节点的部署与 2 个 S_2 节点之间的距离有关(见图 4),2 个节点之间的权重计算公式如式(3)所示。

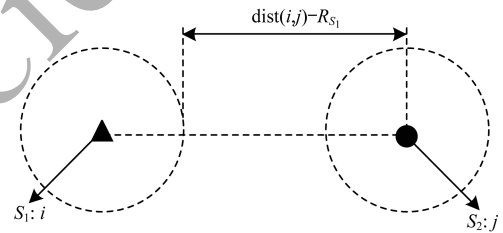


图 4 2 节点分别为 S_1 和 S_2 时权重分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of weight distribution when the two nodes are S_1 and S_2 respectively

$$w(e(i, j)) = \left\lfloor \frac{\text{dist}(i, j) - R_{S_1}}{R_{S_2}} \right\rfloor + 1 \quad (3)$$

3) 当 2 个 sensor 节点均为 S_2 时,其通信性能与加入的中继节点接近,其约束半径均为 R_{S_2} ,2 个节点之间需部署的中继节点数量仅与其间隔的距离有关,2 个节点之间的权重计算公式如式(4)所示。

$$w(e(i, j)) = \left\lfloor \frac{\text{dist}(i, j)}{R_{S_2}} \right\rfloor \quad (4)$$

2 个节点之间的权重 $w(e(i, j))$ 与这 2 个节点之间连通所需的中继节点数量有关,根据以上 3 种情况,可得出定义 2。

定义 2 假设 i, j 均为 sensor 节点, S_{s_1} 为 S_1 节点的集合, S_{s_2} 为 S_2 节点的集合。当 $i, j \in S_{s_1}$ 时, 2 个节点之间的权重如式(2)所示; 当 $i \in S_{s_1}, j \in S_{s_2}$ 时, 2 个节点之间的权重如式(3)所示; 当 $i, j \in S_{s_2}$ 时, 2 个节点之间的权重如式(4)所示。

3 算法描述

根据上述权重计算方法, 本文对传统 IWGA-RD 算法进行改进, 提出一种基于权重及边长的 LWGA 算法。

算法 1 LWGA 算法

输入 图 $G = \langle V, E \rangle$

输出 S_{relay} (中继节点集合)

1. 设 $n = |V|$ 且 $E' = V \times V - E$
2. 定义 1 个空的森林 T
3. 计算各边权重和边长, 并初始化 1 个权重和边长升序 (按权重排序, 若权重相同, 则按边长排序) 的队列 Q , 其包含 E' 中所有元素
4. WHILE T 中包含少于 $n-1$ 个边, DO
5. IF 边集 E 不等于空集
6. 取 E 中任意元素 $e(i, j)$, 并将其从 E 中清除
7. IF T 中加元素 $e(i, j)$ 后未出现回路
8. 在 T 中加入元素 $e(i, j)$
9. ELSE
10. 取 Q (Q 中元素为升序排列) 中第 1 个元素 $e(i, j)$, 将其从 Q 中清除
11. IF T 中加入元素 $e(i, j)$ 后未出现回路且 $w(e(i, j))$ 和 $\text{dist}(i, j)$ 均不为零
12. 将 $e(i, j)$ 加入 T , 并在 i, j 之间部署中继节点
13. END DO

LWGA 算法先通过式(1)~式(3)计算出 G 中各边的权重, 再按权重升序排序, 并将权重相同的边按边长升序排序, 得到最终排序。LWGA 算法的第 11 行中采用最小生成树算法求解权重图增量问题, 然后找出 Q 中最小权重和边长的边加入森林 T , 若待加入边的权重或边长大于零, 则表示该边需加入中继节点使其连通。

定理 1 LWGA 算法在 $[0, w(E_{k+1})]$ 区间收敛。

证明 LWGA 算法在 $[0, w(E_{k+1})]$ 区间收敛证明如下:

设该算法初始点集合为 I_0 , I_k 是 I_0 增加 k 个节点后的点集, 部署后的节点集合由 S_{relay} 变为 S_{relay}^k , S_{relay}^k 为 k 次添加过程中所需的中继节点集合。按照式(1)~式(3)计算得到最小权重及边长的生成树并记为 $\text{LWT}(I_{k+1}, E_{k+1})$ 。因为至少存在 1 个边 $e(i, j)$, 其权重大于零, 所以必须部署 1 个新中继节点 R 。根据上述中继节点部署规则, 由于节点 i 与新中继节点 R 都在对方的通信范围内, 因此这 2 个节点之间的权重 $w(e(i, j))$ 为 0, 由式(1)~式(3)计算可知以下等式成立:

$$\sum w(E_k) - 1 = \sum (E_k - e(i, j)) + w(e(i, j)) + w(e(r, j)) \quad (5)$$

当部署第 $k+1$ 个节点时, 对应的最小权重及边长生成树为 $\text{LWT}(I_{k+1}, E_{k+1})$ 。连通 I_{k+1} 的 1 棵树为 $E_k + e(i, r) + e(r, j) - e(i, j)$, 则有:

$$\sum w(E_{k+1}) \leq \sum (E_k - e(i, j)) + w(e(i, r)) + w(e(r, j)) \quad (6)$$

由上述可知, 每部署 1 个中继节点, LWT 上的权重之和就减 1, 当部署 k 个中继节点时, $\text{LWT}(I_k, E_k)$ 的权重必然为定值, 因此, LWGA 算法在 $[0, w(E_{k+1})]$ 区间收敛, 证毕。

设 $k_{\text{lwga}} = |S_{\text{relay}}|$, $k_{\text{iwga}} = |S_{\text{lwga}}|$, 在未部署节点前存在 $\sum w(I_0) = k_{\text{iwga}}$, 其中, k_{iwga} 为采用 IWGA-RD 算法得到的中继节点数量。与 IWGA-RD 算法相比, 由于 LWGA 算法在权重相同的情况下按边长依次升序排列, 在增加节点时多了 1 个更优的筛选条件, 因此其每部署 1 个新中继节点, 在生成树边长相同的情况下权重之和就比 IWGA-RD 算法减少 1, 最终所得权重之和 $\sum w(I_n)$ 必然小于 k_{iwga} , 由此可知 LWGA 算法部署的中继节点数量不超过 IWGA-RD 算法, 从而得出结论: LWGA 算法的近似解小于 IWGA-RD 算法, 即 $k_{\text{lwga}} \leq k_{\text{iwga}}$, 说明采用 LWGA 算法部署的中继节点更少。

4 实验结果与分析

为验证采用 LWGA 算法部署传感器网络时所需中继节点数量的情况, 本文使用 MATLAB 软件进行仿真实验。将低通信性能节点 S_1 的半径 R_{s_1} 固定为 30 m, 可变参数为低通信性能节点 S_1 的数量 (N_{s_1})、高通信性能节点 S_2 的数量 (N_{s_2}) 及半径。图 5 为某次部署节点前后的节点随机拓扑情况, 区域中已有方形节点为随机部署。图 5(a) 为部署节点前的节点随机拓扑情况 (有 10 个高性能节点、100 个低性能节点), 其中节点位置、节点之间是否连通均为随机; 图 5(b) 为部署节点后的节点随机拓扑情况, 圆形节点为后加入的中继节点。

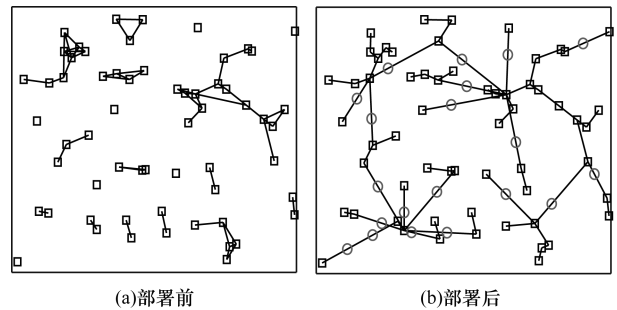


图 5 部署节点前后的节点随机拓扑情况

Fig. 5 Random topology of nodes before and after node deployment

4.1 小规模仿真实验

以 300 m × 300 m 正方形区域作为实验区域, 通过调整可变参数大小, 观测所需中继节点的数量, 取

100 次随机观测结果的平均值作为实验结果, 并将 LWGA 算法得到的结果与 GA-RD、IWGA-RD 算法进行对比, 实验参数设置如表 1 所示, 其中“—”代表自变量。

表 1 小规模仿真实验参数设置

Table 1 Parameter setting of small scale simulation experiment

实验序号	S_1 通信半径/m	S_2 通信半径/m	S_1 数量	S_2 数量
1	30	—	100	10
2	30	60	150	—
3	30	60	—	10

在实验区域随机部署 100 个低通信性能节点 S_1 及 10 个高通信性能节点 S_2 , 在改变 S_2 通信半径 R_{S_2} 的情况下, 对比 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法所需中继节点的数量, 结果如图 6 所示 (1 号实验)。可以看出: 当 R_{S_2} 为 30 m 时, GA-RD 算法与 IWGA-RD 算法所需中继节点数量相同, LWGA 算法所需中继节点数量最少; 当 R_{S_2} 为 30 m ~ 50 m 时, GA-RD 算法所需中继节点数量略有下降, LWGA 算法和 IWGA-RD 算法所需中继节点数量降幅明显; 当 R_{S_2} 大于 50 m 时, GA-RD 算法所需中继节点数量几乎不变, LWGA 算法和 IWGA-RD 算法所需中继节点数量保持下降; 当 R_{S_2} 为 50 m ~ 130 m 时, IWGA-RD 算法所需中继节点数量较 GA-RD 算法减少约 25%, 而 LWGA 算法所需中继节点数量较 IWGA-RD 算法减少约 30%, 故 LWGA 算法的性能优于另外 2 种算法; 当 R_{S_2} 大于 90 m 时, IWGA-RD、LWGA 与 GA-RD 算法所需中继节点数量保持上述趋势且差距更明显。

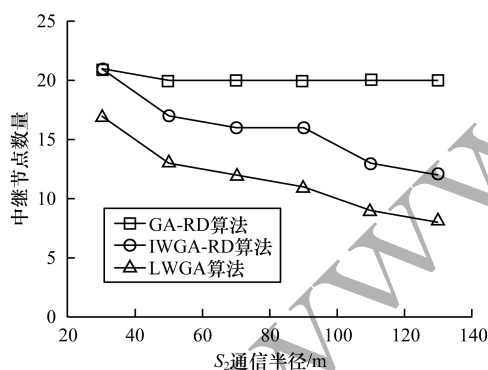


图 6 S_2 通信半径与中继节点数量关系曲线 1

Fig. 6 Relationship curve 1 between the communication radius of S_2 and the number of relay nodes

在实验区域部署 150 个低通信性能节点 S_1 , 将高通信性能节点 S_2 半径设置为 60 m, 在改变 S_2 数量的情况下, 对比 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法在解决 WSN-RELAY 问题时所需中继节点的数量, 结果如图 7 所示 (2 号实验)。可以看出: 当 S_2 数量小于 5 时, GA-RD、IWGA-RD 算法所需中继节点数

量接近, LWGA 算法较这 2 种算法所需中继节点数量减少约 25%; 当 S_2 数量大于 5 时, GA-RD 算法所需中继节点数量先不变再下降, IWGA-RD、LWGA 算法所需中继节点数量均逐渐减少, 且 LWGA 算法所需中继节点数量较 IWGA-RD 算法减少约 30%; 当 S_2 数量为 20 ~ 25 时, LWGA 算法所需中继节点数量仍低于 IWGA-RD 算法且趋于恒定。因此, 当 S_2 数量为 0 ~ 25 时, LWGA 算法所需中继节点数量较 GA-RD、IWGA-RD 算法更少, LWGA 算法性能更优。

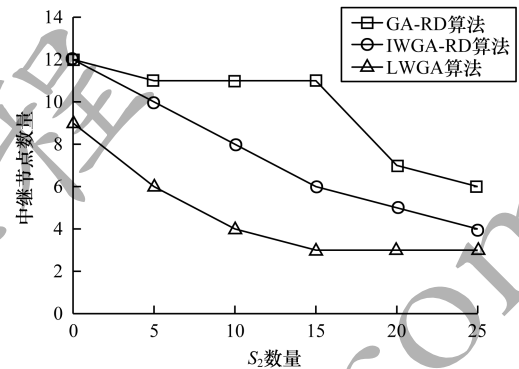


图 7 S_2 数量与中继节点数量关系曲线 1

Fig. 7 Relationship curve 1 between the number of S_2 and relay nodes

在实验区域部署 10 个高通信性能节点 S_2 , 将中继节点和 S_2 的通信半径 R_{S_2} 设置为 60 m, 通过改变低性能节点 S_1 的数量, 观测 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法在解决 WSN-RELAY 问题时所需中继节点的数量, 结果如图 8 所示 (3 号实验)。可以看出: 当 S_1 数量为 80 时, 3 种算法所需中继节点数量大致相同; 随着 S_1 数量的增加, 3 种算法所需中继节点数量均出现下降, IWGA-RD 算法所需中继节点数量较 GA-RD 算法减少约 10%, LWGA 算法所需中继节点数量较 IWGA-RD 算法减少约 20%; 当 S_1 数量为 180 时, 3 种算法所需中继节点数量几乎相同。因此, 当 S_1 数量为 80 ~ 180 时, LWGA 算法较 GA-RD、IWGA-RD 算法性能更优。

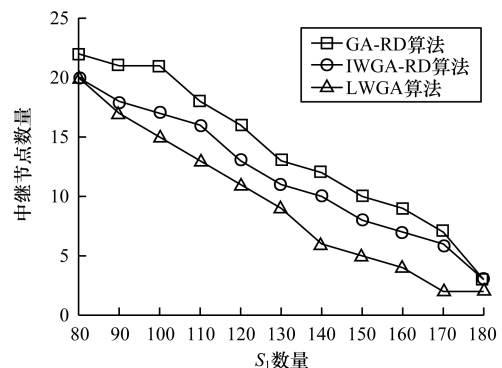


图 8 S_1 数量与中继节点数量关系曲线 1

Fig. 8 Relationship curve 1 between the number of S_1 and relay nodes

4.2 大规模仿真实验

以 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 正方形区域作为实验区域,通过调整可变参数大小,观测所需中继节点的数量,取 100 次随机观测结果的平均值作为实验结果,并将 LWGA 算法得到的结果与 GA-RD、IWGA-RD 算法进行对比,实验参数设置如表 2 所示,其中“—”代表自变量。

表 2 大规模仿真实验参数设置
Table 2 Parameter setting of big scale simulation experiment

实验序号	S_1 通信半径/m	S_2 通信半径/m	S_1 数量	S_2 数量
4	30	—	200	20
5	30	60	200	—
6	30	60	—	20

在实验区域随机部署 200 个低通信性能节点 S_1 及 20 个高通信性能节点 S_2 ,由于中继节点半径仅为实验区域边长的 6%,因此大规模实验环境下需部署更多中继节点。在改变 S_2 通信半径 R_{S_2} 的情况下,对比 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法所需中继节点的数量,结果如图 9 所示(4 号实验)。可以看出:当 R_{S_2} 不断增加时,3 种算法所需中继节点数量均出现下降;当 R_{S_2} 为 60 m ~ 120 m 时,3 种算法所需中继节点数量降幅较大;当 R_{S_2} 大于 120 m 时,3 种算法所需中继节点数量降幅趋于平缓;当 R_{S_2} 相同时,IWGA-RD 算法所需中继节点数量较 GA-RD 算法减少约 10%,LWGA 算法所需中继节点数量较 IWGA-RD 算法减少约 10%。因此,LWGA 算法性能要优于 IWGA-RD、GA-RD 算法。

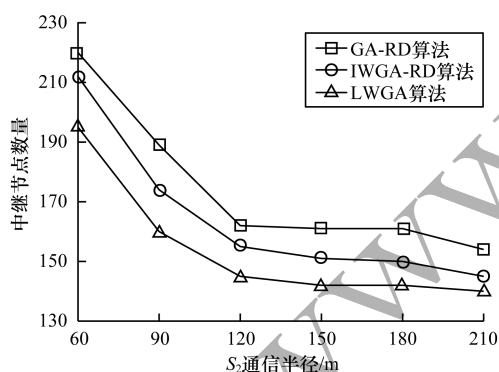


图 9 S_2 通信半径与中继节点数量关系曲线 2

Fig. 9 Relationship curve 2 between the communication radius of S_2 and the number of relay nodes

在实验区域部署 200 个低通信性能节点 S_1 ,将高通信性能节点 S_2 半径设置为 60 m,在改变 S_2 数量的情况下,对比 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法在解决 WSN-RELAY 问题时所需中继节点的数量,结果如图 10 所示(5 号实验)。可以看出:随着 S_2 数量的增加,3 种算法所需中继节点数量都出现下降且

降幅较小;当 S_2 数量达到 60 时,IWGA-RD、LWGA 算法所需中继节点数量接近;当 S_2 数量为 20 ~ 60 时,IWGA-RD 算法所需中继节点数量较 GA-RD 算法减少约 15%,LWGA 算法所需中继节点数量较 IWGA-RD 算法减少约 10%。

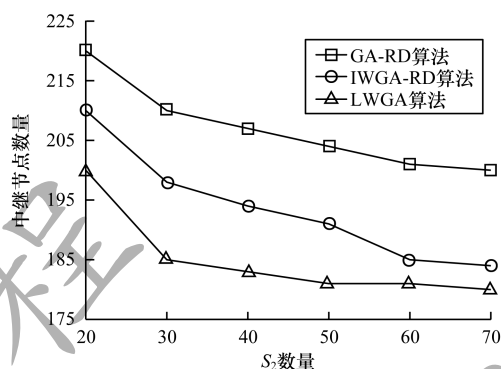


图 10 S_2 数量与中继节点数量关系曲线 2

Fig. 10 Relationship curve 2 between the number of S_2 and relay nodes

在实验区域部署 20 个高通信性能节点 S_2 ,将中继节点和 S_2 的通信半径 R_{S_2} 设置为 60 m,通过改变低性能节点 S_1 的数量,观测 GA-RD、IWGA-RD 及 LWGA 算法在解决 WSN-RELAY 问题时所需中继节点的数量,结果如图 11 所示(6 号实验)。可以看出:随着 S_1 数量增加,3 种算法所需中继节点数量出现递增,IWGA-RD 算法所需中继节点数量较 GA-RD 算法减少 5% ~ 10%,LWGA 算法所需节点数量较 IWGA-RD 算法减少 5% ~ 10%,LWGA 算法性能最优。由于节点半径与实验区域边长相差较大,因此造成上述实验结果与小规模环境下的变化规律有差异。

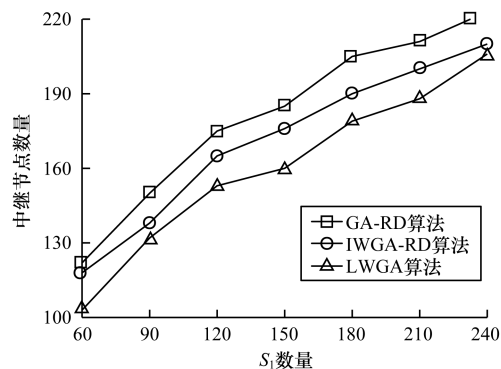


图 11 S_1 数量与中继节点数量关系曲线 2

Fig. 11 Relationship curve 2 between the number of S_1 and relay nodes

4.3 假设检验与实验结论

4.3.1 假设检验

由于 IWGA-RD 算法基于 GA-RD 算法改进得到,因此只需验证 LWGA 算法优于 IWGA-RD 算法,

即可得证其优于 GA-RD 算法。为从统计学角度更好地说明 LWGA 算法的优异性能,以下通过假设检验^[24]来验证 LWGA 算法与 IWGA-RD 算法之间的显著差异,从而证明本文实验结果的可靠性。

设 H_0 表示 LWGA 算法与 IWGA-RD 算法在不同条件下所需中继节点数量无显著差异, H_1 表示 LWGA 算法与 IWGA-RD 算法在不同条件下所需中继节点数量有显著差异 (H_0 : 原假设, H_1 : 备择假设)。将统计量设置为不同条件下 IWGA-RD、LWGA 算法再次分别进行 100 次随机实验所需中继节点数量,显著水平 α 设置为 0.05,实验样本出现的概率记为 p 。假设检验的原理是根据实验样本统计量的大小及其分布确定检验假设成立可能性概率 p 的大小并进行判断:若 $p > \alpha$,说明 α 所取水准不显著,在 H_0 条件下出现的数据样本不是小概率事件, H_0 假设正确,则拒绝 H_1 假设,接受 H_0 假设,即认为差别很可能是由抽样误差造成的,在统计上不成立;若 $p \leq \alpha$,说明所取 α 水准显著,在 H_0 条件下出现的数据样本是小概率事件, H_0 假设错误,则拒绝 H_0 假设,接受 H_1 假设,即认为此差别很可能是实验因素不同造成的,故在统计上成立。表 3 ~ 表 5 为表 1、表 2 中 6 组实验经假设检验所得 p 值。由表 3 可知,6 组实验的 p 值均满足 $p < \alpha$,因此设立的备择假设 H_1 成立,即:LWGA 算法与 IWGA-RD 算法所需中继节点数量有显著差异,因此本文实验样本结果具有可靠性,在统计上成立。

表 3 不同 S_2 通信半径下实验 1 和实验 4 的 p 值
Table 3 p values of Experiment 1 and Experiment 4 under different communication radius of S_2

实验 1 的 p 值	实验 4 的 p 值
$1.924 4 \times 10^{-9} (R_{s_2} = 30)$	$8.566 1 \times 10^{-6} (R_{s_2} = 60)$
$1.904 1 \times 10^{-8} (R_{s_2} = 50)$	$2.816 9 \times 10^{-7} (R_{s_2} = 90)$
$1.525 5 \times 10^{-11} (R_{s_2} = 70)$	$5.816 1 \times 10^{-7} (R_{s_2} = 120)$
$7.811 8 \times 10^{-9} (R_{s_2} = 90)$	$3.459 2 \times 10^{-5} (R_{s_2} = 150)$
$2.104 8 \times 10^{-5} (R_{s_2} = 110)$	$9.800 0 \times 10^{-3} (R_{s_2} = 180)$
$3.430 8 \times 10^{-7} (R_{s_2} = 130)$	$2.457 8 \times 10^{-4} (R_{s_2} = 210)$

表 4 不同 S_2 数量下实验 2 和实验 5 的 p 值
Table 4 p values of Experiment 2 and Experiment 5 under different numbers of S_2

实验 2 的 p 值	实验 5 的 p 值
$1.775 2 \times 10^{-6} (N_{s_2} = 0)$	$2.298 6 \times 10^{-5} (N_{s_2} = 20)$
$2.249 1 \times 10^{-7} (N_{s_2} = 5)$	$3.259 8 \times 10^{-5} (N_{s_2} = 30)$
$2.232 6 \times 10^{-7} (N_{s_2} = 10)$	$2.598 7 \times 10^{-9} (N_{s_2} = 40)$
$1.584 2 \times 10^{-6} (N_{s_2} = 15)$	$5.256 9 \times 10^{-4} (N_{s_2} = 50)$
$1.902 9 \times 10^{-7} (N_{s_2} = 20)$	$3.600 0 \times 10^{-3} (N_{s_2} = 60)$
$3.200 0 \times 10^{-3} (N_{s_2} = 25)$	$1.700 0 \times 10^{-3} (N_{s_2} = 70)$

表 5 不同 S_1 数量下实验 3 和实验 6 的 p 值
Table 5 p values of Experiment 3 and Experiment 6 under different numbers of S_1

实验 3 的 p 值	实验 6 的 p 值
$4.779 0 \times 10^{-4} (N_{s_1} = 80)$	$2.900 0 \times 10^{-3} (N_{s_1} = 60)$
$8.900 0 \times 10^{-3} (N_{s_1} = 100)$	$3.256 9 \times 10^{-6} (N_{s_1} = 90)$
$7.300 0 \times 10^{-3} (N_{s_1} = 120)$	$5.231 5 \times 10^{-7} (N_{s_1} = 120)$
$1.955 7 \times 10^{-6} (N_{s_1} = 140)$	$2.361 5 \times 10^{-9} (N_{s_1} = 150)$
$2.320 8 \times 10^{-4} (N_{s_1} = 160)$	$6.800 0 \times 10^{-3} (N_{s_1} = 180)$
$8.388 0 \times 10^{-5} (N_{s_1} = 180)$	$2.598 7 \times 10^{-7} (N_{s_1} = 210)$

4.3.2 实验结论

由上述实验结果可知,在相同的实验场景下,与 GA-RD、IWGA-RD 算法相比,LWGA 算法可减少所需中继节点的数量,能有效降低网络负载与部署成本,具有更好的网络性能。由实验结果分析可知,在某些条件固定的情况下,LWGA 算法在自变量改变的部分区间内呈现出一定优势,但超过临界值后,3 种算法的性能接近。根据文献[25]对节点负载数据的相关分析,当自变量为节点数量时,在实验区域内部署节点数量越大,各节点承担的数据包越多,当低性能节点数量增加时,整个网络负载随之升高,因此 3 种算法性能在某些条件下近似。当改变性能节点通信半径和高性能节点数量后,3 种算法的实验结果差异趋于明显,这是因为高通信性能节点的通信半径与中继节点接近,是低性能节点通信半径的 2 倍甚至更多,改变其相关参数对整个网络影响较大,因此 LWGA 算法在节省中继节点数量上的效果也更显著。综上所述,LWGA 算法优于 GA-RD、IWGA-RD 算法,可得到更好的网络性能。

5 结束语

为了用尽量少的中继节点解决 WSNs 网络拥塞问题,本文提出一种基于权重及边长的中继节点部署 LWGA 算法,在 IWGA-RD 算法的基础上按节点权重和边长对边进行排序,设定节点优先级依次迭代加入中继节点,以减少相同环境下部署中继节点的数量。仿真实验与假设检验结果表明,该算法较 GA-RD、IWGA-RD 算法所需中继节点更少,具有更好的网络性能。后续将用尽量少的中继节点实现网络负载平衡,以解决无线传感器网络耗能不均匀的问题。

参考文献

- [1] TANG J,HAO B,SEN A. Relay node placement in large scale wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2006,29(4):490-501.
- [2] FU Qi. Research on the coordination mechanism between Sensor and Actor in WSNs [D]. Changsha: University of National Defense Science and Technology,2006. (in Chinese)

- 符琦. WSNs 中 Sensor 与 Actor 协调机制的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [3] LIN Guohui, XUE Guoliang. Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length [J]. Information Processing Letters, 1999, 69(2): 53-57.
- [4] CHE Nan, LI Zhijun, JIANG Shouxu. The deployment of relay nodes in heterogeneous wireless networks algorithm[J]. Journal of Computer Science, 2016, 39(5): 905-918. (in Chinese)
车楠, 李治军, 姜守旭. 异构无线网络中 Relay 节点部署算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 905-918.
- [5] YAGOUTA A B, JABBERI M, GOUISSEM B B. Impact of sink mobility on quality of service performance and energy consumption in wireless sensor network with cluster based routing protocols [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Systems and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 32-37.
- [6] MAZUMDAR N, ROY S, NAYAK S. A survey on clustering approaches for wireless sensor networks[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Data Science and Business Analytics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 52-58.
- [7] DORJI U. Electronic nose based wireless sensor network for soil monitoring in precision farming system [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Knowledge and Smart Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 125-132.
- [8] DEBNATH S, HOSSAIN A. Network coverage in interference limited wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 109(1): 139-153.
- [9] GUIJARRO L, VIDAL J R, PLA V, et al. Wireless sensor network-based service provision: a three-sided market model [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Network and Service Management. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 88-95.
- [10] MARQUES B, RICARDO M. Energy-efficient node selection in application-driven WSN [J]. Wireless Networks, 2017, 23(3): 889-918.
- [11] BENGHENI A, DIDI F, BAMBRIK I. EEM-EHWSN: enhanced energy management scheme in energy harvesting wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2019, 25(6): 3029-3046.
- [12] MOHAMED S M, HAMZA H S, SAROIT I A. Coverage in Mobile Wireless Sensor Networks (M-WSN): a survey [J]. Computer Communications, 2017, 110(9): 133-150.
- [13] WEI Wei, SUN Zeyu, SONG Houbing, et al. Energy balance-based steerable arguments coverage method in WSNs[EB/OL]. [2019-08-25]. https://www.researchgate.net/publication/315463935_Energy_Balance-Based_Steerable_Arguments_Coverage_Method_in_WSNs.
- [14] LIU Zhiliang, SONG Sanhua. A awakening scheduling approach for wireless sensor networks partial coverage [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(5): 786-791. (in Chinese)
刘直良, 宋三华. 基于 WSNs 的部分覆盖应用的节点唤醒机制[J]. 传感技术学报, 2018, 31(5): 786-791.
- [15] YUE Minyi. Steiner tree problem and its generalization [J]. Science, 2002, 54(6): 3-6. (in Chinese)
越民义. 斯坦纳树问题及其推广 [J]. 科学, 2002, 54(6): 3-6.
- [16] CHEN Hongsheng, SHI Ke. Wireless sensor network connectivity restoration based on quadrilateral Steiner tree [J]. Journal of Computer Science, 2014, 37(2): 457-469. (in Chinese)
陈洪生, 石柯. 基于四边形斯坦纳树的无线传感器网络连通恢复 [J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 457-469.
- [17] CHEN Donghui, DU Dingzhu, HU Xiaodong, et al. Approximations for Steiner trees with minimum number of Steiner points [J]. Theoretical Computer Science, 2001, 262(1): 83-99.
- [18] BREDIN J L, DEMAINE E D, HAJIAGHAYI M, et al. Deploying sensor networks with guaranteed capacity and fault tolerance [C]//Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad-hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM Press, 2005: 62-68.
- [19] LLOYD E L, XUE G L. Relay node placement in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(1): 134-138.
- [20] MAO Xufei, MIAO Xin, HE Yuan, et al. CitySee: urban CO₂ monitoring with sensors [C]//Proceedings of IEEE Infocom 2012. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1611-1619.
- [21] HAN X F, CAO X, LLOYD E L, et al. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(5): 643-656.
- [22] XU K N, HASSANEIN H, TAKAHARA G, et al. Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2): 145-159.
- [23] KASHYAP A, KHULLER S, SHAYMAN M. Relay placement for higher order connectivity in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 101-107.
- [24] ROBINSON J A. Probability and statistics for engineers and scientists [J]. Technometrics, 1990, 32(3): 348-349.
- [25] CHE Nan. Research on node layout in wireless sensor network environment [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012. (in Chinese)
车楠. 无线传感器网络环境中节点布置问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

编辑 宋 圆