

文章编号:1671-5896(2026)04-0783-07

智能化区域无线网络双移动锚节点定位算法

王霞, 王和欣, 陈晓林

(泰山科学技术研究院 泰安市创新发展研究院, 山东 泰安 271000)

摘要: 针对现有移动锚节点定位方法在复杂网络环境下定位精度不足和能耗较高的问题, 提出智能化区域无线网络双移动锚节点定位算法。通过对网络连通度计算, 确保节点间能有效进行信息交互, 从而为定位操作提供快速的通信背景; 引入虚拟力推动移动锚节点朝向目标位置移动, 能准确估计移动锚节点的轨迹和位置。同时, 为降低移动锚节点在虚拟力引力推动过程中的能量消耗, 利用 DASCAN (Dual-mobile Anchor node Scanning and Coordination Algorithm) 算法进行双移动锚节点的路径规划, 并采用加权质心算法估算目标未知节点的大致位置, 通过鲸鱼优化算法进一步提升定位精度。实验结果表明, 所提方法的路径跟踪结果与实际路径较为吻合, 可以精确接收到未知节点的全部位置信息, 具有较高的定位精度, 并且在定位过程中的能量消耗保持在 0.25 以内, 进一步证明了所提方法可以有效提高节点定位的精度和可行性。该方法能保证网络节点定位覆盖率, 且具有较高的定位精度和效率。

关键词: 节点定位; 通信过程设计; 虚拟力; 加权质心算法; 鲸鱼优化算法

中图分类号: TP202

文献标志码: A

Dual Mobile Anchor Node Location Algorithm of Intelligent Regional Wireless Network

WANG Xia, WANG Hexin, CHEN Xiaolin

(Tai'an Innovation and Development Research Institute, Taishan Institute of Science and Technology, Tai'an 271000, China)

Abstract: To solve the problems of insufficient positioning accuracy and high energy consumption of existing mobile anchor node positioning methods in complex network environments, an intelligent dual mobile anchor node positioning algorithm for regional wireless networks is proposed. By calculating network connectivity, it ensures effective information exchange between nodes, providing a fast communication background for positioning operations. In this context, introducing virtual force to push the moving anchor node towards the target position can more accurately estimate the trajectory and position of the moving anchor node. In order to reduce the energy consumption of mobile anchor nodes during the process of virtual force attraction, the DASCAN (Dual mobile Anchor Node Scanning and Coordination Algorithm) algorithm is used for path planning of dual mobile anchor nodes, and the weighted centroid algorithm is used to estimate the approximate position of the target unknown node. The whale optimization algorithm is further used to improve the positioning accuracy. The experimental results show that the path tracking results of the proposed method are in good agreement with the actual path, and can accurately receive all the position information of unknown nodes, with high positioning accuracy. The energy consumption during the positioning process remains within 0.25, further proving that the proposed method can effectively improve the accuracy and feasibility of node positioning. This method can ensure the coverage of

收稿日期: 2024-02-10

基金项目: 泰安市科技创新发展基金资助项目(2022GX036)

作者简介: 王霞(1979—), 女, 山东泰安人, 泰山科学技术研究院副研究员, 主要从事技术推广应用、计算机与科学技术、智能化和科技情报信息技术研究, (Tel) 86-13615480016 (E-mail) qbs009@163.com; 通讯作者: 王和欣(1975—), 男, 山东泰安人, 泰山科学技术研究院助理研究员, 主要从事机械工程研究, (Tel) 86-13287347766 (E-mail) whx345@163.com。

network node positioning and has high positioning accuracy and efficiency.

Key words: node positioning; communication process design; virtual force; weighted centroid algorithm; whale optimization algorithm

0 引 言

智能化区域无线网络是通过利用智能化技术和无线通信技术^[1],实现区域范围内的无线网络覆盖和管理的一种先进网络系统。在工厂、仓库、医院等具有广泛的应用前景。因此,保证无线网络的可靠性和稳定性变得非常关键。而在智能化区域无线网络中引入移动锚节点作为定位参考点,并充分利用其移动灵活性、多样性和冗余性,提供更准确、可靠的定位结果,可以提高智能化区域无线网络的可靠性。为此,人们对高精度、高可靠性的无线网络双移动锚节点定位方法进行了许多研究。

宋玲等^[2]利用无线网络中一跳范围内的普通节点和锚节点作为临时锚点进行定位,并建立初始的节点采样区域。通过结合重采样方法和改进的蒙特卡洛节点定位方法,在该区域内实施低成本定位。但该方法面对大量的锚节点进行参考定位时,会增加系统复杂性和部署成本,限制了算法的可行性和可扩展性,从而降低了节点的定位效率。赵丽芬等^[3]提出了一种节点定位方法。首先,通过对节点进行弧度处理并引入节点椭圆定位机制,将直线路径拆分为椭圆弧度边长。其次,利用锚节点坐标已知性修正待定位节点的信息。最后,通过基于椭圆纵半径跳数的动态测距优化机制,有效降低节点间的拓扑跳数。但其在对多路径进行弧度处理时,需要注意处理过程中的精度损失问题,以避免定位距离产生偏移。Prateek 等^[4]采用一种限制发射机锚节点移位在直线上的方法,借助锚-目标几何形状减轻镜像节点和发射机节点的影响。通过推导无摄动和摄动情况下的信号模型,并利用多静态技术从所有可能链路中提取信息,实现了对位置信息损失的减轻。但其在复杂的网络拓扑和目标节点分布情况下,将发射机锚节点的位移限制在一条直线上可能会导致节点定位范围和准确度的限制,影响节点定位的精度和可行性。

加权质心算法是一种基于位置信息的定位算法,通过计算移动锚节点的质心位置实现定位。鲸鱼优化算法是一种元启发式优化算法。应用鲸鱼优化算法帮助寻找最优的移动锚节点位置组合,可以最大程度地改善定位结果。加权质心算法和鲸鱼优化算法都旨在提高定位精度和可靠性。因此,笔者利用上述2种方法构建智能化区域无线网络双移动锚节点定位算法。

1 网络连通度计算

在定位算法中,移动锚节点需要与其他节点进行通信,以获取周围节点的位置信息或将自己的位置信息传递给其他节点。由于信号传播可能受多径效应、阻塞和衰减等非视距影响,使其在室内或复杂环境中,节点间的网络连通程度较低,影响节点间的信息交互。因此在智能化区域无线网络中,通过智能化区域无线网络锚节点和普通节点的网络连通度计算,确保节点间能有效进行信息交互,从而实现快速定位操作。

预设智能化区域无线网络中所有节点经历一个邻居发现过程并各自广播一条自身是否被定位的消息,用一个“未定位邻居列表” $\{\text{unloc_nb_num}, \text{nb_id1}, \text{nb_id2}, \dots\}$ 描述,其中 $\{\text{unloc_nb_num}\}$ 表示未定位邻居的数量, $\{\text{nb_id1}, \text{nb_id2}, \dots\}$ 表示其邻居 id 集合。

在锚节点移动过程中会产生信标,该信标能引入新的位置信息,一些未定位节点可通过其计算自身位置,进而生成新定位状态。新定位节点的每一跳邻居节点会将该节点的 id 从未定位邻居列表中删除,此时 $\{\text{loc_nb_num}-1\}$,并向新节点回复最新的 $\{\text{unloc_nb_num}\}$ 信息。

锚节点的作用是维护边缘列表和探索列表,若 $\{\text{unloc_nb_num}\} \neq 0$ 则为边缘节点,进而组成边缘列表。则边缘列表中的边缘点为

$$B = \left\{ \begin{array}{c} \text{node_id}, \\ \text{cal}(x), \text{cal}(y), \\ \text{NFP}(x), \text{NFP}(y), \\ \text{unloc_nb_num} \end{array} \right\}, \tag{1}$$

其中 $\text{cal}(x), \text{cal}(y)$ 表示计算出的节点坐标; NFP 用于判断智能化区域中尚未访问的局部区域。

探索列表用于记录所有探索点,每个探索点存储的是未定位节点在其通信范围内所接收到的某个信标发出点的位置。

探索点如下:

$$S = \left\{ \begin{array}{c} \text{node_id}, \\ \text{ref_beacon}(x), \text{ref_beacon}(y) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

其中 ref_beacon 表示未定位节点接收到的第1个信标的信标发出点位置。

为体现无线网络锚节点的性能,需要通过节点度衡量网络连通度^[5],如下:

$$\delta = \frac{B_{\max} S_{\max} V_{\text{links}}}{V_{\text{nodes}}}, \quad (3)$$

其中 V_{links} 表示智能化区域无线网络中的总连接数; V_{nodes} 表示其总节点数。当网络的节点度为 δ 时,表示每个节点需要执行2次广播和 $(\delta+2)$ 次单播。综上完成智能化区域无线网络锚节点和普通节点的网络连通度计算,并将其作为双移动锚节点定位的基础环境。

2 双移动锚节点定位

2.1 虚拟力引力计算

在动态网络环境中,节点间的连接可能会随时间变化而改变,其可能导致连接的短暂或不稳定。因此,仅依靠较高的网络连通度可能无法全面反映网络的实际连接状态。而在双移动锚节点定位中,移动锚节点的位置也需要进行估计和预测。通过引入虚拟力计算,可根据节点间的相互作用和物理模型,计算移动锚节点的运动轨迹,并进一步预测移动锚节点的位置。这可以更好地协调移动锚节点与其他节点的定位,提高整个定位系统的精度和可靠性。

智能化区域无线网络双移动锚节点定位的实质是仅需要两个锚节点移动实现目标节点的定位,且使定位成本有效降低的同时达到同等覆盖效果,降低网络能耗,并使锚节点移动在含有有效路径的网络区域内。所提方法在上述通信环境基础上,通过引入未知节点对锚节点实施的虚拟力引力移动锚节点,使锚节点按其设定的范围移动。

虚拟力引力^[6]是存在于未知节点通信半径 R 范围内的矢量,双移动锚节点和未知节点间的距离越大,虚拟力越小,其计算模型如图1所示。

图1中, F_{13}, F_{14}, F_{15} 表示通信范围内锚节点 c_1 受未知节点 c_3, c_4, c_5 虚拟力的引力大小,通过平行四边形合力计算法求和各虚拟力后即可获取其整体虚拟力 F , 即 $F = F_{13} + F_{14} + F_{15}$ 。

为确定节点在无线网络待定位区域的密集程度,需要计算每个未知节点 c_j 的密集权重^[7], 则有

$$M_j = \sum_{\alpha=1}^A \frac{\delta \alpha^2}{d_j}, \quad (4)$$

其中 $A = (1, 2, 3, \dots, \alpha)$ 表示智能化区域无线网络未知节点区域内邻居节点个数; d_j 表示每个邻居节点与其空间直线距离。

引入虚拟力引力系数 w , 得到总虚拟力引力 F :

$$F = \frac{w \sin \theta_{kj} M_j}{d_j}, \quad (5)$$

其中 θ_{kj} 表示锚节点 c_{k1}, c_{k2} 和未知节点 c_j 间的方向角度,其通过 c_j 接收到的锚节点数据信息包 v_j 的个数确定。如果 $v_j \geq 3$, 则 c_j 符合条件,不需要移动锚节点提供位置信息;如果 $w=0$ 且 $v_j < 3$, 则需要继续接收位置信息。通过虚拟力引力计算,可以推动移动锚节点向目标位置移动,并更准确地估计移动锚节点的轨迹和位置,以此提升目标未知节点定位精度。

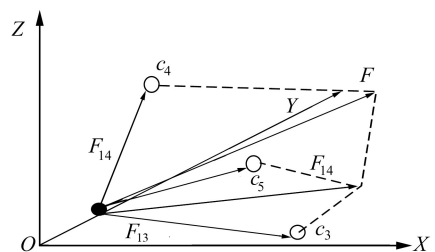


图1 虚拟力计算

Fig. 1 Virtual force calculation

2.2 锚节点路径规划

由于移动锚节点在虚拟力引力的推动过程中需要消耗能量进行移动,因此设计一种双移动锚节点协作的路径规划算法 DASCAN (Dual-mobile Anchor node Scanning and Coordination Algorithm)^[8]。DASCAN 算法尽可能地减少对虚拟锚节点的使用。通过合理的路径规划,可以避免不必要的虚拟锚节点产生,进一步降低能耗,并提高网络的效率和可靠性。

为确保虚拟锚节点部署的合理性,将智能化区域无线网络监视区域实施网格状划分^[9],划分 $n+1$ 行作为网格纵向上等间距表示,编号为 $0,1,2,\dots,n$ 行,各行间距等分为 h ;划分 $m+1$ 列作为横向上等间距表示,编号为 $0,1,2,\dots,m$ 列,各行间距为 l 。由此得到无线网络区域划分和虚拟锚节点的部署结果,如图2所示。

DASCAN 方法对奇数行和偶数行采用的部署方法不同,从图2可看出,奇数行和偶数行中的虚拟锚节点为 $W, U, \Delta W_{p,q}, W_{p,q+1}, U_{p+1,q}$ 和 $\Delta W_{p,q}, W_{p,q+1}, U_{p-1,q}$ 为一个等边三角形, $p \in n, q \in m, h = \frac{\sqrt{3}}{2}d$ 。以等边三角形中心为坐标原点 $(0,0)$,即可得到虚拟锚节点坐标为 $\psi = (p \times d, q \times h)$ 。

通过上述方式, DASCAN 算法可确定虚拟锚节点的初始位置以及与其他节点间的相互作用,从而为定位系统提供准确信息,并确保多个移动锚节点能有效合作,提高系统的整体性能和效果。

2.3 节点位置估计定位

路径规划可以缩小移动锚节点的移动范围,减少能量消耗和路径长度。但未知节点的实际位置可能由测量误差、信号衰减等因素导致定位结果出现偏差。因此,在双移动锚节点定位阶段,采用加权质心算法和鲸鱼优化算法。加权质心算法通过计算多个移动锚节点的加权平均值估算未知节点位置,其中权重根据移动锚节点与未知节点间的距离等因素进行确定。而鲸鱼优化算法则模拟鲸鱼觅食行为优化搜索,以寻找近似最优解,并更准确地估算未知节点坐标。

采用加权质心算法^[10-11]估算未知节点位置,设 N_v 为双移动锚节点在智能化无线网络区域部署产生的虚拟锚节点数量;虚拟锚节点列表 Z_i 由未知节点 $R_i (i=1, \dots, N_v)$ 维护,将虚拟锚节点 ψ 的信标信息发送到 R_i ,并将 ψ 的坐标 $(p \times d, q \times h)$ 信号强度传送到 Z_i 中,选择信号强度较强的前两个虚拟锚节点 ψ_1, ψ_2 ,利用加权质心算法估计未知节点位置:

$$(\hat{x}'_i, \hat{y}'_i) = Fe_{\psi} \xi_j (p \times d, q \times h), \quad (6)$$

其中 ξ_j 表示加权因子; e_{ψ} 表示虚拟锚节点 ψ 间的定位误差, $e_{\psi_{\max}}$ 表示所有可定位节点的定位误差最大值。

确定鲸鱼优化算法的搜索空间 P_i :

$$P_i = [\hat{x}'_i - e_{\psi_{\max}}] \times [\hat{y}'_i - e_{\psi_{\max}}]. \quad (7)$$

在二维的智能化区域无线网络中,第 i 个未知节点和虚拟锚节点 ψ 的估计距离平均误差为

$$e_{p_i} = \sqrt{(x_i - p \times d)^2 + (y_i - q \times h)^2}, \quad (8)$$

其中 (x_i, y_i) 表示传感节点 R_i 的实际位置。

根据式(8)得到目标函数如下:

$$R_{\text{end}} = \frac{e_{p_i} \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}{N_i}, \quad (9)$$

其中 N_i 表示 R_i 能接收到的信标信息数。最后在 P_i 中随机生成鲸鱼种群,并根据上述目标函数估算定位 R_{end} 的最终坐标,采用鲸鱼优化算法^[12]对双移动锚节点定位精度实施优化主要通过下述3个阶段完成。

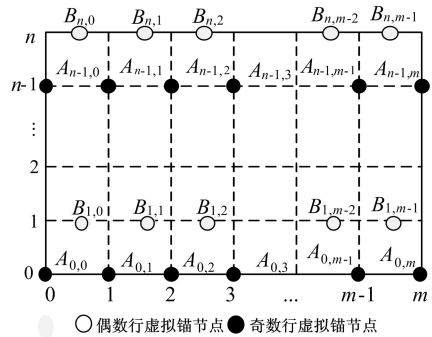


图2 部署区域划分及虚拟锚节点位置

Fig. 2 Deployment area division and virtual anchor node location

1) 狩猎阶段。设无线网络双移动锚节点定位的最优解为算法的目标猎物,其余鲸鱼个体会向当前适应度最高的鲸鱼位置移动,设迭代次数为 t ,当前鲸鱼位置向量为 $\mathbf{X}(t)$,则有

$$\mathbf{X}(t) = R_{\text{end}}ta(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2), \tag{10}$$

其中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 表示属于 $[0,1]$ 范围内的随机向量。

2) 猎食阶段。鲸鱼在猎食阶段会通过缩小包围圈和沿螺旋状路径吐气泡驱赶猎物。在寻求到目标大致区域后,可通过该阶段缩小待定位未知节点的搜索范围,减少锚节点能耗,如下:

$$D = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)|, \tag{11}$$

其中 $\mathbf{C}$ 表示 $[0,2]$ 范围内随机值组成的向量,同时也表示随机权重; $\mathbf{X}^*$ 表示最佳鲸鱼位置向量。

3) 猎物搜索阶段。猎物搜索阶段即节点最佳节点位置定位的迭代过程,确定搜索范围后,该阶段 a 的值会缩减到 0,则鲸鱼向最优个体搜索移动;反之则随机移动,该过程如下:

$$\mathbf{X}(t + 1) = D\mathbf{X}_{\text{rand}}(t), \tag{12}$$

其中 $\mathbf{X}_{\text{rand}}$ 表示随机选择的鲸鱼位置向量。通过上述方式使鲸鱼对目标猎物实施全局搜索,即两个锚节点的最优路径,可以有效避免局部最优,实现目标未知节点的精确定位。

3 实验与分析

3.1 实验设置

为验证智能化区域无线网络双移动锚节点定位算法的整体有效性,需要对其进行实验测试。

实验测试环境参数设置:智能化区域无线网络待定位范围为 120 m×120 m,双移动锚节点按规定好的规划路径移动,移动步长为 10 m,网络节点的通信半径为 20 m,目标未知节点数量为 100 个,并随机分布在待定位区域。无线网络双移动锚节点在中间节点间的移动方式如图 3 所示。实验相关参数设置如表 1 所示。

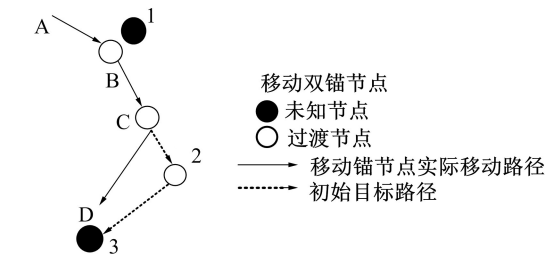


图 3 无线网络双移动锚节点的移动方式
Fig. 3 Mobile mode of dual mobile anchor nodes in wireless networks

表 1 实验参数设置

Tab. 1 Experimental parameter settings

参数名称	参数值设置	参数名称	参数值设置
移动锚节点数量/个	5	繁殖概率	0.6
移动频率	每 10 s 更新一次位置	迁徙速度	5
路径规划策略	基于虚拟力引力计算的移动路径规划	最大迭代次数	100

3.2 结果与分析

从节点运动轨迹跟踪、节点定位结果以及定位耗能 3 个方面对比所提方法和文献[2-3]方法的性能。

1) 节点运动轨迹跟踪。考虑实际环境中目标未知节点的无规律运动特性,在测试环境下,给出 3 种方法定位跟踪某两个不同移动速度的移动节点轨迹跟踪效果,结果如图 4 所示。

分析图 4 可知,当节点移动轨迹不规律时,所提方法的路径跟踪结果与实际路径依然比较吻合,这是因为所提方法采用加权质心算法和鲸鱼优化算法相结合的方式,大大提升了定位的精度和实时性;而文献[2-3]方法存在较多的误跟踪情况,说明在复杂的网络条件下其节点定位效果会受到较大影响。

2) 节点定位效果。在网络待定位区域内,随机挑选 25 个目标未知节点,测试 3 种方法的定位精度,方法定位结果与真实节点位置间的连线用于描述定位误差,得到的不同定位结果如图 5 所示。

从图 5 可看出,所提方法能精确地接收到 50 个未知节点的全部位置信息,具有较高的定位精度;文献[2]方法出现的误差较大,近 30% 的目标节点未被准确定位;文献[3]方法的误差比文献[2]低,出现孤立区域,存在未被定位的节点。由此可见所提方法能保持清晰和精确的节点定位结果,提升网络性能。

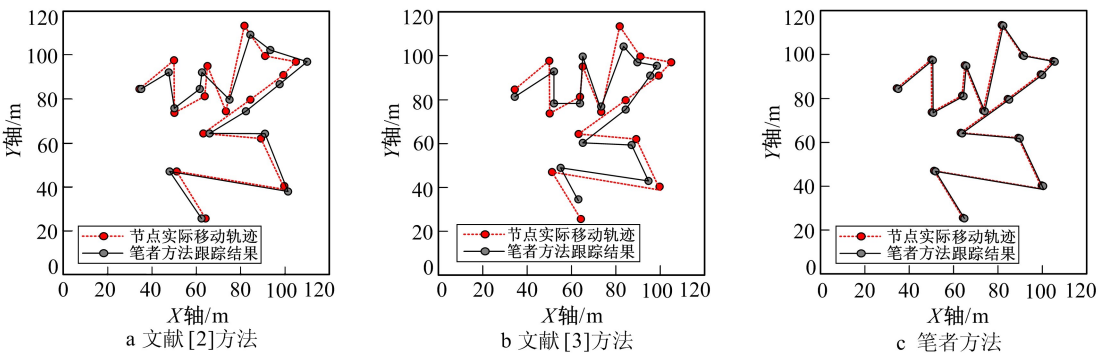


图4 移动路径定位对比结果

Fig. 4 Comparison results of mobile path location

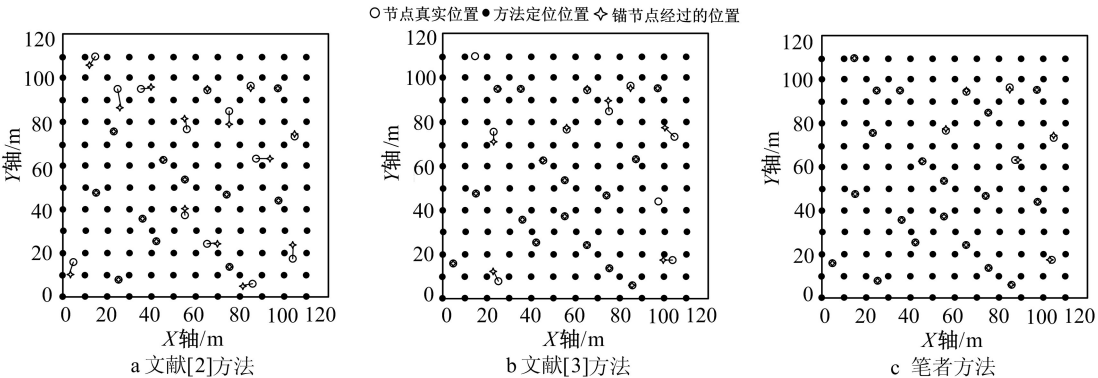


图5 不同方法节点定位对比

Fig. 5 Comparison of node localization using different methods

3) 定位耗能。定位耗能主要衡量定位算法在特定网络区域内工作时所用的能量,耗能越高说明该方法的工作效率越差。实验在测试网络区域内,不断提高锚节点的信息密度,并测试上述3种方法的节点定位耗能情况,具体统计结果如表2所示。

表2 不同方法定位耗能

Tab. 2 Different methods for locating energy consumption

移动弧段 长度/m	定位耗能			移动弧段 长度/m	定位耗能		
	笔者方法	文献[2]方法	文献[3]方法		笔者方法	文献[2]方法	文献[3]方法
5	0.03	0.45	0.52	30	0.15	0.54	0.65
10	0.05	0.48	0.57	35	0.16	0.61	0.68
15	0.08	0.49	0.59	40	0.17	0.65	0.71
20	0.10	0.52	0.62	45	0.22	0.68	0.75
25	0.12	0.53	0.63	50	0.23	0.72	0.76

分析表2可知,当双锚节点移动弧段长度增加时,3种方法的定位耗能均随之增加。文献[2]方法的定位耗能在0.75以内,文献[3]方法的定位耗能在0.80以内。相比较,所提方法的节点耗能较小,保持在0.25以内,说明所提方法适用于不同要求的场合,可满足大多智能化区域无线网络应用的需求。

4 结 语

高精度、低成本、适应性强的智能化区域无线网络锚节点定位是目前物联网发展阶段较为重要的研究目标,因此笔者提出了智能化区域无线网络双移动锚节点定位算法。实验结果表明,所提方法的路径跟踪结果与实际路径吻合度较高,且能精确地接收到未知节点的全部位置信息,具有较高的定位精度,节点耗能较小。表明所提方法具有较强的实际应用效果。

参考文献:

[1]魏丽英,杨立华. 智能化无线通信信道安全容量控制仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 230-233,238.
WEI L Y, YANG L H. Simulation of Security Capacity Control of Intelligent Wireless Communication Channel [J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 230-233,238.

[2]宋玲,姜小玉,黄晓冬. 基于临时锚节点的改进蒙特卡罗节点定位算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 89-94.
SONG L, JIANG X Y, HUANG X D. Improved Monte Carlo Node Localization Algorithm Based on Temporary Anchor Nodes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 89-94.

[3]赵丽芬,申毅,田波,等. 基于双焦点离心测距的移动无线传感网定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(2): 338-345.
ZHAO L F, SHEN Y, TIAN B, et al. A Mobile Wireless Sensor Network Location Algorithm Based on Dual Focus Centrifuge Distance Measurement [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(2): 338-345.

[4]PRATEEK, ARYA R, VERMA A K. Non-Coherent Localization with Geometric Topology of Wireless Sensor Network under Target and Anchor Nodeperturbations [J]. Wireless Networks, 2021, 27(3): 2271-2286.

[5]肖旭,阿依古丽马木提. 两类网络的2-限制连通度[J]. 数学进展, 2022, 51(2): 275-282.
XIAO X, AYIGULI MAMUTI. 2-Restricted Connectivity of Two Types of Networks [J]. Progress in Mathematics, 2022, 51(2): 275-282.

[6]曲强,苏利杰,李国旗,等. 基于引力模型的中国三大城市群物流网络演变格局研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(5): 45-52.
QU Q, SU L J, LI G Q, et al. Research on the Evolution Pattern of Logistics Networks in China's Three Major Urban Agglomerations Based on Gravity Model [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(5): 45-52.

[7]田志宏,赵金东,李绍凯,等. 基于节点权重的DPoS共识算法[J]. 应用科学学报, 2022, 40(4): 639-652.
TIAN Z H, ZHAO J D, LI S K, et al. DPoS Consensus Algorithm Based on Node Weights [J]. Journal of Applied Science, 2022, 40(4): 639-652.

[8]刘苏,黄纯,侯帅帅,等. 基于DDTW距离与DBSCAN算法的户变关系识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 71-77.
LIU S, HUANG C, HOU S S, et al. Household Transformer Relationship Recognition Method Based on DDTW Distance and DBSCAN Algorithm [J]. Power System Automation, 2021, 45(18): 71-77.

[9]高松,赵静波. 提升源网荷储多元协同的虚拟化网格划分方法[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(2): 262-270.
GAO S, ZHAO J B. A Virtual Grid Partitioning Method for Enhancing Multivariate Collaboration of Source Network, Load Storage [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2023, 47(2): 262-270.

[10]朱春华,杨锦民. 一种基于加权质心的TOF与TDOA联合定位算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 50-55.
ZHU C H, YANG J M. A Weighted Centroid Based TOF and TDOA Joint Localization Algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition), 2023, 44(3): 50-55.

[11]刘利,张德生,肖燕婷. 基于隶属度的模糊加权 k 近质心近邻算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(7): 122-129.
LIU L, ZHANG D S, XIAO Y T. Fuzzy Weighted k -Nearby Centroid Nearby Neighbor Algorithm Based on Membership Degree [J]. Computer Engineering, 2022, 48(7): 122-129.

[12]许德刚,王再庆,郭奕欣,等. 鲸鱼优化算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(2): 328-336.
XU D G, WANG Z Q, GUO Y X, et al. A Review of Whale Optimization Algorithms [J]. Computer Application Research, 2023, 40(2): 328-336.

(责任编辑:刘东亮)