

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210742

基于移动信标的水下无线传感器网络定位算法

宋跃才 林海涛 卞媛 肖丹妮
(海军工程大学电子工程学院 武汉 430030)

摘要: 针对现有水下无线传感器网络定位算法定位精度不足且无法适应水下多变的网络拓扑的问题,提出一种基于移动信标的水下无线传感器网络定位算法。首先通过 RSSI 测距定位和 DV-Hop 算法获取未知节点的大致分布情况,其次以未知节点定位覆盖率为目标函数,采用经过自适应惯性权重和柯西-t 扰动策略优化的改进秃鹰搜索算法迭代求解信标节点移动的最优位置,最后信标节点移动到最优位置再对未知节点进行重新定位。仿真结果表明,与对比算法相比,移动信标节点定位算法能有效提高未知节点定位精度,在网络拓扑变化时也能保持较高的定位精度且定位效果稳定。

关键词: 水下无线传感器网络;定位算法;移动信标;RSSI 测距定位;DV-Hop 算法;秃鹰搜索算法
中图分类号: TP212.9;TN929.5;TP18 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Localization algorithm for underwater wireless sensor networks based on mobile beacon

Song Yuecai Lin Haitao Bian Yuan Xiao Danni
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing underwater wireless sensor network positioning algorithm has insufficient positioning accuracy and cannot adapt to the underwater changeable network topology, an underwater wireless sensor network positioning algorithm based on mobile beacon is proposed. Firstly, RSSI ranging positioning and DV-Hop algorithm are used to obtain the approximate distribution of unknown nodes. Secondly, taking the positioning coverage rate of unknown nodes as the objective function, the improved bald eagle search algorithm optimized by adaptive inertia weight and Cauchy-t disturbance strategy is used to iteratively solve the optimal position of beacon node movement. Finally, the beacon node moves to the optimal position and then the unknown node is repositioned. The simulation results show that compared with the comparison algorithm, the mobile beacon node localization algorithm can effectively improve the positioning accuracy of unknown nodes, and can also maintain high positioning accuracy and stable positioning effect when the network topology changes.

Keywords: underwater wireless sensor networks; location algorithm; mobile beacon; RSSI ranging positioning; DV-Hop algorithm; falcon search algorithm

0 引言

近年来,随着各国对海洋权益的日益重视,水下无线传感器网络 (underwater wireless sensor networks, UWSNs) 也受到了越来越多的关注^[1]。水下无线传感网络在海洋环境保护、海底资源勘探、海洋生态监测、军事防御等领域具有广泛的应用前景,而这些应用的实现都离不开精确的节点位置信息^[2-3]。因此,作为水下无线传感器网络关键支撑技术之一的节点定位技术具有重要研究意义^[4]。

不同于陆地无线传感器网络,UWSNs 有许多特有的

约束特征,例如节点部署在三维空间内,且随海洋流运动具有一定的移动性^[5]。因此,传统的静态信标节点定位方式在水下有着较大的局限性,许多研究者提出利用移动信标辅助未知节点定位。文献[6]提出一种分层扫描移动模型,在获得较高定位精度的同时,降低网络成本,然而移动信标采用固定的路径遍历网络不够灵活且在网络拓扑动态变化的情况下定位性能差。文献[7]提出一种改进的布谷鸟搜索移动信标节点定位方法,可以在网络拓扑结构改变时保持对未知节点较高的定位精度,但是没有考虑在水下三维环境中的应用。文献[8]提出了一种基于方向决策的

收稿日期:2022-07-19

移动信标动态路径规划方法,克服了未知节点分布不均造成的路径冗长问题,但是节点定位覆盖率有待提高。

考虑以上问题,本文提出一种适用于水下环境的移动信标定位算法,首先通过 RSSI 测距定位和 DV-Hop 算法进行初步定位,然后利用改进的秃鹰搜索算法优化移动信标位置以便进行精确定位,不仅能适应动态的拓扑变化,而且能保证较高的定位精度。

1 水声 RSSI 模型

在水下无线传感器网络中,数据在物理层传输媒介为声信号,声波传输速度与电磁波传输速度差距很大,因此陆地上的电磁波测距模型并不适用于水下,为此引入 Urlick^[9] 传播模型:

$$A(d, f) = 10\gamma \lg d + \alpha^{(f)} d + \xi^{(d, f)} \quad (1)$$

$A(d, f)$ 表示以频率为 f 的信号在水声信道中传输距离为 d 时所产生的衰减; γ 为路径衰减指数; $\xi^{(d, f)}$ 为声信号传播异常值; $\alpha^{(f)}$ 为介质吸收系数,频率从 100 Hz~1 MHz 时,常用经验公式 Thorps^[10] 表示:

$$\alpha^{(f)} = (0.11f^2)/(1+f^2) + (44f^2)/(4 \cdot 100 + f^2) + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

由此,可以求得目标节点从第 i 个信标节点接收到的信号功率 P_i :

$$P_i = P_0 - 10\gamma \lg(d_i/d_0) - \alpha^{(f)}(d_i - d_0) + n_i^f \quad (3)$$

其中, P_0 为使用频率 f 在参考距离 d_0 处的接收功率, d_0 一般设置为 1 m; n_i^f 通常认为其为简单地独立同分布的零均值高斯随机变量, $n_i^f \sim N(0, \sigma_i^2)$ 。 σ_i 大小取决于环境因素,一般为 4~12 dB 之间。

因此,由式(4)可得 d_0 为 1 m 时的测距模型:

$$d_i = 10^{\frac{P_0 - P_i + \alpha^f d_i}{10\gamma}} \cdot 10^{\frac{\alpha^f d_i}{10\gamma}} \quad (4)$$

2 移动信标节点定位算法

移动信标节点定位算法分为初步定位和精确定位两步。

2.1 初步定位

初步定位是通过 RSSI 测距定位^[11] 与 DV-Hop 算法^[12] 相结合,对未知节点进行定位,目的是使移动信标获取网络中未知节点的大致分布情况,为精确定位做准备。

1) RSSI 测距定位

在网络中,信标节点会广播包含自身位置信息的数据包,未知节点接收到来自其通信半径内信标节点的信号后,可利用 RSSI 测距模型求出与信标节点距离。在三维空间中,当一个未知节点接收到 4 个或 4 个以上不同信标节点的信号即为可定位节点,可采用最小二乘法进行定位。

2) DV-Hop 算法定位

经过 RSSI 测距定位后,将已定位的未知节点升级为临时信标节点,与移动信标组成新的信标节点集合。采用

DV-Hop 算法对剩余未定位节点进行粗略定位。

DV-Hop 算法定位过程主要分为如下 3 个阶段:

(1) 计算最小跳数

每个信标节点均会广播包含自身坐标信息和跳数值为 0 信息的数据包,节点接收到数据包后将跳数值加一后转发给邻居节点,自身仅保存含各锚节点最小跳数值的分组信息。

(2) 估计未知节点与信标节点之间的距离

广播结束后,根据第 1 阶段坐标和最小跳数信息采用式(5)求各信标节点平均跳距。

$$Hopsize_i = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{\sum_{i \neq j} hop_{ij}} \quad (5)$$

式中: $Hopsize_i$ 为锚节点 i 到其余各锚节点的平均跳距, hop_{ij} 为锚节点 i 与 j 之间最小跳数, (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) 分别为锚节点 i 与 j 的坐标

然后可由跳数和平均跳距信息,计算未知节点 i 和信标节点 p 之间的估计距离。公式如下:

$$d_{pi} = hop_{pi} \times Hopsize_i \quad (6)$$

(3) 计算未知节点坐标

计算出未知节点与锚节点距离后可由极大似然法求得未知节点坐标。

2.2 精确定位

经过初步定位移动信标已获取网络中未知节点的大致位置信息,在此基础上利用改进秃鹰搜索算法优化求解移动信标最优位置,进一步提高节点定位精度。

1) 秃鹰搜索算法

秃鹰搜索(bald eagle search, BES)算法^[14] 是模仿秃鹰捕食鱼类等生物的启发式算法。秃鹰的狩猎过程分为 3 个阶段。第 1 阶段为选择阶段,即选择猎物数量最多的捕食区域;第 2 阶段为搜索阶段,即在选定捕食空间游走搜寻猎物;第 3 阶段为俯冲捕食阶段,即俯冲至目标猎物处。

(1) 选择阶段

秃鹰在搜索空间选择最佳捕食区域的行为在数学上可由式(7)表示。

$$P_{i, new} = P_{best} + \alpha \times r \times (P_{mean} - P_i) \quad (7)$$

式中: P_{best} 为当前秃鹰搜索的最佳搜索位置; α 为控制位置变化的参数,取值为(1.5, 2); r 为(0, 1)的随机数; P_{mean} 为上一次搜索结束后秃鹰的平均分布位置; P_i 为第 i 只秃鹰位置。

(2) 搜索阶段

秃鹰选定了最佳捕食区域后,会在螺旋空间内朝不同方向移动,从而快速搜寻到目标猎物位置。螺旋飞行的数学模型采用极坐标方程进行表示,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \theta(i) = \alpha \times \pi \times rand \\ r(i) = \theta(i) + R \times rand \\ xr(i) = r(i) \times \sin(\theta(i)) \\ yr(i) = r(i) \times \cos(\theta(i)) \\ x(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)} \\ y(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)} \end{cases} \quad (8)$$

式中： α 和 R 均为控制螺旋飞行轨迹参数，取值分别为 $(0, 5)$ 和 $(0.5, 2)$ ； $\theta(i)$ 和 $r(i)$ 分别为螺旋方程的极角和极径； $x(i)$ 与 $y(i)$ 表示在极坐标中秃鹰的位置，取值均为 $(-1, 1)$ 。

在搜索阶段，秃鹰位置更新可由下式表示：

$$P_{i,new} = P_i + x(i) \times (P_i - P_{mean}) + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) \quad (9)$$

(3) 俯冲捕食阶段

在搜索空间内寻找到了最佳捕食目标后，秃鹰会向目标猎物快速摆动，种群内其他个体也会快速向目标位置移动俯冲捕食，该运动状态也可采用极坐标描述，如下：

$$\begin{cases} \theta(i) = \alpha \times \pi \times rand \\ r(i) = \theta(i) \\ xr(i) = r(i) \times \sinh(\theta(i)) \\ yr(i) = r(i) \times \cosh(\theta(i)) \\ x_1(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)} \\ y_1(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)} \end{cases} \quad (10)$$

在俯冲捕食阶段，秃鹰位置更新可由下式表示：

$$\begin{cases} \delta_x = x_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{mean}) \\ \delta_y = y_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{mean}) \\ P_{i,new} = rand \times P_{best} + \delta_x + \delta_y \end{cases} \quad (11)$$

式中： c_1, c_2 为秃鹰向最佳位置的运动强度，取值为 $[1, 2]$ 。

2) 改进秃鹰搜索算法

BES 算法具有较强的全局搜索能力，但是局部搜索能力不足，从而导致寻优解的搜索精度较低。此外，秃鹰选择搜索空间是利用前一阶段所获得的信息确定下一次搜索空间，当秃鹰群体在上一次迭代中陷入局部最优，那么接下来便无法跳出局部最优。因此，为提高秃鹰搜索算法寻优精度与跳出局部最优状态的能力，本文提出了一种改进秃鹰搜索(improved bald eagle search, IBES)算法，通过引入自适应惯性权重和柯西-t 扰动策略进行优化。

(1) 自适应惯性权重

为平衡秃鹰搜索算法全局搜索和局部搜索能力，受粒子群算法^[15]启发，在搜索阶段引入自适应惯性权重 w 。如式(12)所示。

$$w(t) = w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times e^{-\frac{t}{T}} \quad (12)$$

式中： w_{max}, w_{min} 分别为权重的最大值和最小值； t 为当前迭代次数； T 为最大迭代次数。前期 w 较大，算法全局搜

索能力较强，可以搜索较大的区域；后期 w 较小，算法局部搜索能力较强，可围绕最优解进行精细搜索，提高算法收敛速度。引入惯性权重因子后，搜索阶段秃鹰的位置更新表达式如下：

$$P_{i,new} = w(t) \times P_i + x(i) \times (w(t) \times P_i - P_{mean}) + y(i) \times (w(t) \times P_i - P_{i+1}) \quad (13)$$

(2) 柯西-t 扰动策略

在秃鹰搜索算法后期迭代中，随着秃鹰逐渐接近最优解，种群多样性逐渐下降，进而易陷入局部最优。为此引入柯西-t 扰动策略，对搜索阶段最优秃鹰个体进行扰动，提高算法跳出局部最优的可能性。引入柯西-t 扰动策略后秃鹰的位置更新表达式如下：

$$\begin{cases} P_{new,best} = P_{best} \times [1 + \lambda_1 \text{Cauchy}(0, 1) + \lambda_2 t(T)] \\ \lambda_1 = 1 - \left(\frac{t}{T}\right)^2 \\ \lambda_2 = \left(\frac{t}{T}\right)^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\text{Cauchy}(0, 1)$ 是服从柯西分布的随机数，柯西分布具有良好的扰动能力^[16]； $t(T)$ 为以最大迭代次数 T 为自由度的 t 分布随机数， t 分布在自由度低时类似柯西分布扰动能力强，在自由度高时类似高斯分布局部搜索能力强^[17]； λ_1, λ_2 均为随迭代次数变化的动态控制参数，迭代前期 λ_1 较大，柯西扰动占比大，能较大范围对秃鹰个体位置进行扰动，提高全局搜索能力，迭代后期 λ_2 较大， t 扰动占比大，有利于在最优个体附近搜索，提高局部搜索能力。

3) 适应度函数

节点定位覆盖率是网络中已定位的未知节点占全部未知节点的百分比。在移动信标节点定位算法中，RSSI 测距定位阶段的节点定位覆盖率影响着网络节点定位精度，节点定位覆盖率越高定位精度也会越高，因此将 RSSI 测距定位的节点定位覆盖率作为适应度函数优化信标节点位置。具体设计如下：

$$fitness = \frac{\sum_{i=1}^B a(i)}{B} \quad (15)$$

$$a(i) = \begin{cases} 1 & S_i \geq 4 \\ 0 & S_i < 4 \end{cases} \quad (16)$$

式中： $fitness$ 为 RSSI 测距定位时的节点定位覆盖率； B 为网络中未知节点总数； S_i 为未知节点通信范围内信标节点个数； $a(i)$ 用于判定未知节点 i 是否能被定位，未知节点 i 通信范围内信标节点个数大于等于 4 则记为“1”，否则记为“0”。

4) 定位算法步骤

步骤(1)将移动信标随机部署在网络中，信标节点向邻居节点广播包含自身坐标信息的数据包。

步骤(2)未知节点接收通信范围内信标节点信号，并统

计接收到来自不同信标节点的信号数并采用 RSSI 测距法求出与相应信标节点的距离。

步骤(3)未知节点接收到来自不同信标节点的信号数大于等于 4 个时判定为可定位节点,采用最小二乘法定位,并升级为临时信标节点。

步骤(4)移动信标节点与临时信标节点组成新的信标集合,采用 DV-Hop 算法对剩余未定位节点进行粗略定位,从而获取网络中所有未知节点大致分布情况。

步骤(5)基于未知节点大致分布情况,调用改进秃鹰搜索算法求解移动信标最优位置。

步骤(6)移动信标移动至步骤(5)所求的最优位置,对未知节点进行精确定位。

步骤(7)统计所有未知节点定位结果。

3 实验仿真与分析

3.1 实验参数与评价指标

为验证本文算法的定位性能,现将本文算法与文献[7]算法在 MATLAB R2018b 上进行仿真对比实验。实验参数如表 1 所示,为避免实验偶然性,实验循环进行 30 次,数据取均值,并采用式(17)节点平均定位误差作为评价指标。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2}}{N \times R} \quad (17)$$

式中: N 为未知节点个数, R 为通信半径, (x_i, y_i, z_i) 、 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ 分别为未知节点真实位置坐标和计算所得位置坐标。

表 1 实验参数表

实验参数	数值
仿真区域大小/m ³	100×100×100
未知节点个数	200
锚节点个数	10~40
通信半径/m	20~40
种群数目	50
迭代次数	200
ω_{max}	0.9
ω_{min}	0.4

3.2 信标节点对网络的影响

1) 信标节点通信半径对网络的影响

当网络中未知节点总数为 200,信标节点数为 30,计算信标节点通信半径从 20 m 递增至 40 m 时信标节点移动前后的 RSSI 测距时的定位覆盖率和定位误差,对比关系分别如图 1、2 所示。仿真结果显示,节点定位覆盖率随着通信半径增大而减小,节点定位误差随着通信半径增大而减小,这是由于通信半径增大,网络连通性更好,RSSI 测距定

位时所能定位节点数增加,节点定位覆盖率提高,从而降低了定位误差。由图 1 可以看出通过信标节点移动后可有效提高 RSSI 测距时的定位覆盖率,本文算法效果最好,较文献[7]算法和移动前节点定位覆盖率平均提高了 4.0%、19.9%。从图 2 可以看出信标移动后的定位误差是远小于移动前的定位误差,说明在不同的通信半径下移动信标的定位性能都是优于固定信标的,且本文算法效果最好,定位误差较文献[7]算法和移动前平均降低了 2.1%、10.1%。

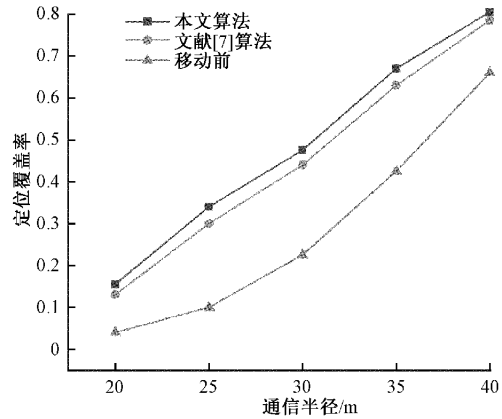


图 1 通信半径与定位覆盖率的关系

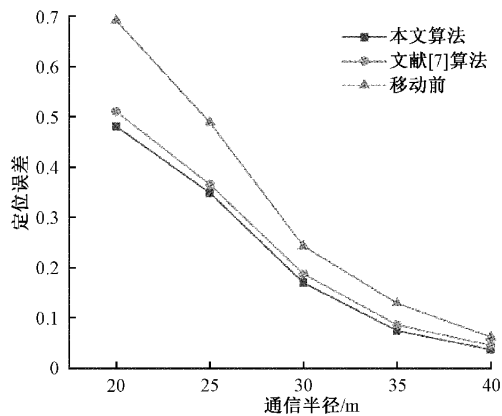


图 2 通信半径与定位误差的关系

2) 信标节点数量对网络的影响

当网络中未知节点总数为 200,节点通信半径为 30 m,计算信标节点数从 10 递增至 40 时信标节点移动前后的定位覆盖率和定位误差,对比关系分别如图 3、4 所示。仿真结果显示,节点定位覆盖率随着信标节点数增大而减小,节点定位误差随着信标节点数增大而减小,这是由于信标节点数增多网络中已知的位置信息增多,从而更多的未知节点可通过 RSSI 测距定位,提高节点定位覆盖率,从而降低定位误差。由图 3、4 可知,在信标节点变化过程中,本文算法的节点定位覆盖率始终保持领先,较文献[7]算法和移动前平均提高了 2.3%、25.5%,定位误差始终小于文献[7]算法和移动前定位误差,平均降低了 2.0%、5.3%。

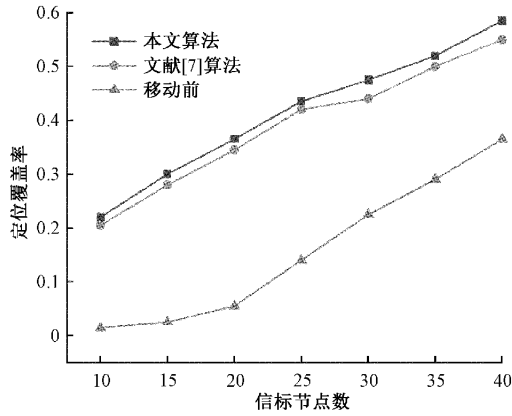


图 3 信标节点数与定位覆盖率的关系

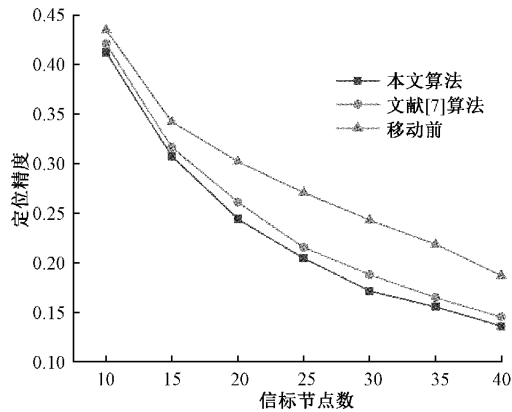


图 4 信标节点数与定位误差的关系

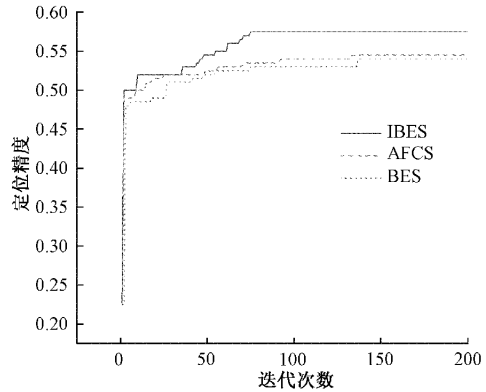


图 5 定位覆盖率与迭代次数关系

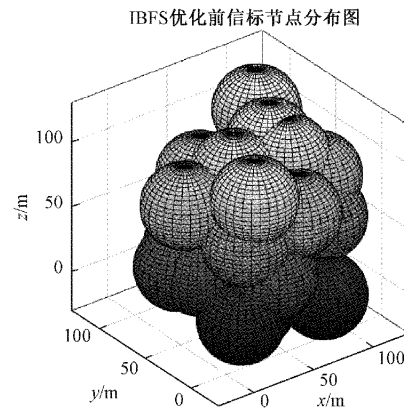


图 6 移动前信标节点分布图

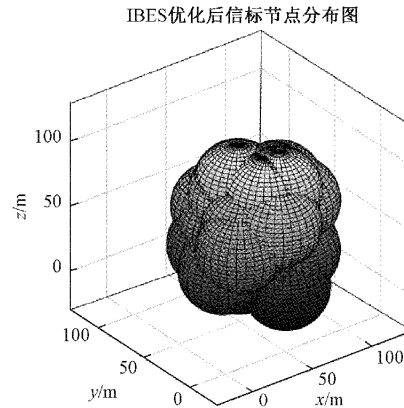


图 7 移动后信标节点分布图

3.3 改进算法性能验证

1) 改进算法对 RSSI 测距定位覆盖率影响

当网络中未知节点数为 200, 信标节点数为 30, 通信半径为 30 m, 采用 IBES、BES 和文献[7]中的改进布谷鸟算法 AFCS 分别优化移动信标位置时的定位覆盖率与迭代次数关系如图 5 所示。由图 5 可以看出 BES 经过 137 次迭代达到最优覆盖率 54%, AFCS 经过 133 次迭代达到最优覆盖率 54.5%, 而 IBES 仅仅经过 75 次迭代便达最优覆盖率 57.5%, 可见 IBES 较另外两种算法有着更高的求解精度和更快的收敛速度。

2) 改进算法对节点分布的影响

采用 IBES 优化前信标节点分布如图 6 所示, 采用 IBES 优化后信标节点分布如图 7 所示, 对比两图可以看出采用 IBES 优化后信标节点分布更集中, 且通信范围都在目标区域内, 而优化前信标节点分布较散乱且目标区域边界附近的节点通信范围已经超出了目标区域, 造成了资源浪费, 从而导致节点定位覆盖率较低。

3) 改进算法优化耗时分析

当网络中未知节点数为 200, 信标节点数为 30, 通信半径为 30 m, 采用 IBES、BES 和 AFCS 算法分别优化移动信标位置的耗时对比结果如表 2 所示, 结果取 100 次实验平

均值。由表 2 可以发现, IBES 算法和 BES 算法的耗时仅相差 0.006 2 s, 差距可以忽略不计, 这是由于 IBES 算法仅在 BES 基础上加入了惯性权重和扰动策略, 并未改变算法复杂度, 而 AFCS 算法在布谷鸟算法的基础上以串行混合方式加入了鱼群觅食因子, 提高了算法复杂度, 故耗时较高。

3.4 网络拓扑变化适应性验证

当网络中未知节点数为 200, 信标节点数为 30, 通信半径为 30 m, 改变网络拓扑, 比较采用移动信标定位和采用

表2 算法耗时对比表

算法	IBES	BES	AFCS
执行时间/s	5.182 4	5.176 2	8.452 9

固定信标定位的定位误差,对比图如图8所示。仿真结果显示,在不同网络拓扑中,采用移动信标定位误差处于15.7%~17.2%之间,采用固定信标定位误差处于24.3%~28.9%之间。由此可见,在网络拓扑发生改变时,采用移动信标定位,定位精度更高且定位效果稳定。

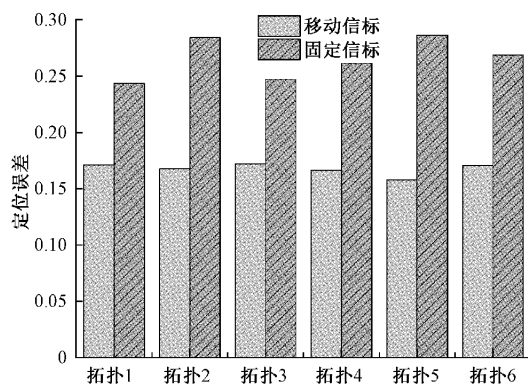


图8 定位误差与网络拓扑的关系

4 结 论

本文提出了一种基于移动信标的水下无线传感器网络定位方法。该算法以RSSI测距定位时的未知节点定位覆盖率为目标函数,通过RSSI测距定位、DV-Hop算法和基于IBES算法的移动信标节点定位两个定位阶段,提高对未知节点的定位精度。在IBES算法中引入自适应惯性权重全局提高算法开发和局部探索能力和柯西-t扰动策略防止算法过早收敛陷入局部最优。仿真结果表明,本文算法在网络拓扑变化时可以通过移动信标实现对未知节点高效且稳定的定位。

参考文献

- [1] 向劲松,胡东洋,李长萍.水下光无线传感器网络的连接性分析与定位技术[J].光通信技术,2021,45(4):1-6.
- [2] 刘浩然,覃玉华,邓玉静,等.基于双层修正无迹卡尔曼的水下节点定位算法[J].仪器仪表学报,2020,41(3):142-149.
- [3] ULLAH I, LIU Y, SU X, et al. Efficient and accurate target localization in underwater environment[J]. IEEE Access, 2019, 7: 101415-101426.
- [4] HU K, SONG X, SUN Z, et al. Localization based on MAP and PSO for drifting-restricted underwater acoustic sensor networks[J]. Sensors, 2019, DOI: 10.3390/s19010071.
- [5] 张美燕,蔡文郁,王成才.非合作信标条件下水下无线传感网可靠定位技术[J].传感技术学报,2020,33(1):

- 134-139.
- [6] LIN Y, TAO H, TU Y, et al. A node self-localization algorithm with a mobile anchor node in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 43773-43780.
- [7] 荆夏磊,乔学工.一种改进的布谷鸟搜索移动信标节点定位方法[J].山西大学学报(自然科学版),2019,42(1):125-132.
- [8] 高美凤,刘洋.基于方向决策的移动锚节点动态路径规划方法[J].传感技术学报,2018,31(6):932-936.
- [9] 严若茂.基于RSS的水下传感器网络定位算法研究[D].武汉:武汉科技大学,2021.
- [10] CHANG S, LI Y, HE Y, et al. Target localization in underwater acoustic sensor networks using RSS measurements[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2):225.
- [11] SUN Y, YUAN Y, XU Q, et al. A mobile anchor node assisted RSSI localization scheme in underwater wireless sensor networks [J]. Sensors, 2019, DOI: 10.3390/s19204369.
- [12] 宋晓东,孙丽君,陈天飞. DV-Hop 优化算法的性能分析与比较[J].电子测量与仪器学报,2019,33(5):125-133.
- [13] 王磊,刘晶晶,齐俊艳,等.基于测距修正及改进鲸鱼优化的 DV-HOP 定位算法[J].仪表技术与传感器,2022(2):116-121,126.
- [14] ALSATTAR H A, ZAIDAN A A, ZAIDAN B B. Novel meta-heuristic bald eagle search optimisation algorithm[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(3): 2237-2264.
- [15] 康婷,魏胜非.基于混沌粒子群与 Taylor 算法的协同定位算法研究[J].仪表技术与传感器,2019(1):118-121.
- [16] 邱晓红,徐聪.改进差分进化算法优化多值属性系统诊断策略[J].电子测量技术,2022,45(10):148-154.
- [17] 郑婷婷,刘升,叶旭.自适应 t 分布与动态边界策略改进的算术优化算法[J].计算机应用研究,2022,39(5):1410-1414.

作者简介

宋跃才,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络路由协议与定位技术。

E-mail:1049514135@qq.com

林海涛(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为信息网络管理与规划。

E-mail:figure2015@163.com

卞媛,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:2365728070@qq.com

肖丹妮,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:zz302615581@qq.com