

基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法

张晶^{1,2,3†}, 罗施章¹, 付谱平¹

(1. 昆明理工大学 1 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省人工智能重点实验室, 云南 昆明 650500;
3. 云南鼎润科技服务有限公司, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对传统以及各种经改进的 3D-DVHop 算法对未知节点定位误差较大, 且未对定位成本进行实质性降低的问题, 提出一种基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法, 该算法引入虚拟力移动锚节点, 在降低定位成本的同时还可使锚节点移动路径遍历整个网络空间且不会进入网络空洞区域, 通过 RSSI 值辅助测距与三维跳距加权修正节点间跳数、跳距, 利用所有锚节点定位误差修正各未知节点估计坐标, 并结合最大似然估计法对邻居节点数不小于 3 的节点继续精化, 进一步降低定位误差。

关键词: 定位成本; 移动锚节点; 虚拟力; 3D-DVHop-ACR; 定位误差

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0323

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



3D-DVHop-ACR Localization Algorithm Based on Virtual Force Moving Anchor Nodes

Zhang Jing^{1,2,3†}, Luo Shizhang¹, Fu Puping¹

(1.School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Kunming 650500, China; 3.Yunnan Xiaorun Technology Service Co., Ltd, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional and various improved 3D-DVHop algorithms have large positioning errors for unknown nodes and do not substantially reduce the positioning cost, a 3D-DVHop-ACR Localization Algorithm Based on Virtual Force Moving Anchor Nodes is proposed. The algorithm introduces virtual force moving anchor nodes, which can reduce the positioning cost while enabling the anchor node moving path to traverse the entire network space and not enter the network void area. RSSI value assisted ranging and three-dimensional hop distance weighting are used to correct the hop number and hop distance between nodes. All anchor node positioning errors are used to correct the estimated coordinates of each unknown node. Combined with the maximum likelihood estimation method, nodes with neighbor nodes of not less than 3 are further refined to further reduce positioning error.

Keywords: positioning cost; mobile anchor node; virtual force; 3D-DVHop-ACR; positioning error

0 引言

伴随智能信息技术产业的发展, 在军工产业、工农业、城市生活、环境监测^[1] 等各大领域中无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的应用愈发重要, 如在军事领域中常将地雷模拟为网络节点, 自动构建雷区覆盖网络, 使雷区部署达到最优覆盖且便于在出现死亡节点 (失效地雷) 时实现雷区实时修复; 在农业领域中对区域气候以及农作物寄生虫进行监测, 结合所得监测数据进行实时分析决策, 有助于实现农作物产量增收及优质生长, 然而若想要利用无线传感器网络 (WSN) 的特性去解决各领域

中存在的问题, 则需先获知问题节点位置信息^[2], 方可对节点处的问题进行实时处理, 而获知问题节点的位置就涉及节点的定位算法。

在众多定位算法中, DV-Hop (Distance Vector Hop, DV-Hop)^[3] 定位算法因其无需测距使得定位成本较低的特点成为各应用领域的主流定位算法。

由于 DV-Hop 定位算法需利用多个锚节点定位剩余未知节点, 而锚节点数量的提升导致定位成本无法得到实质性降低, 且该算法在计算节点间跳数与跳距过程中存在较大误差, 影响节点间距离计算, 从而加大未知节点定位误差, 同时由于无线传感器

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-05-13.

基金项目: 云南省技术创新人才资助项目 (2019HB113), 云南省“万人计划”产业技术领军人才资助项目 (云发改人事 [2019]1096 号).

†通讯作者. E-mail: 1735335400@qq.com.

网络 (WSN) 的实际应用主要集中于三维空间中, 而空间维度的提升, 不仅会造成节点定位成本及计算复杂度的进一步增加还会导致节点定位误差的继续加大, 因此如何在三维空间中让节点定位成本得到实质性降低, 且进一步降低节点定位误差^[4] 是定位算法中需解决的主要问题。

本文针对 DV-Hop 定位算法对节点在三维空间中的定位需要用到多个锚节点导致节点定位成本无法得到实质性降低以及节点间跳数与跳距计算不准确导致节点定位误差加大的问题, 提出一种基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR^[5] (based on Anchor node error Correction and secondary Refinement, ACR) 定位算法。

该算法在对未知节点定位过程中只需投入极少数锚节点, 由各未知节点对锚节点的密集权重虚拟力引力的合力控制其移动路径, 不但能够极大程度降低定位成本, 还可在完全避免 (因锚节点移动路径由未知节点对其虚拟力引力的合力控制, 故锚节点在移动过程中始终存在引力, 当锚节点在某一区域内移动时, 该区域内始终存在未知节点) 锚节点进入无节点区域的同时达到与布置足够数量锚节点同样的覆盖效果甚至更优, 该算法还通过相邻节点间的接收信号强度指示 (Received Signal Strength Indication, RSSI) 值大小辅助测距设置相邻节点间跳数分级, 并构建各锚节点间跳数权值以精化其跳距, 使得由跳数与跳距乘积所求得距离值更为精确, 并根据该距离值构建含未知节点坐标参数的距离方程组求解所有节点 (包含锚节点) 估计坐标, 再由锚节点估计坐标与实际坐标求差值可求其坐标误差, 根据该坐标误差值结合各未知节点与所有锚节点间最小跳数构建的权值, 可计算出各未知节点坐标误差估计值, 根据该误差估计值以及各未知节点估计坐标值进行差值运算可求得经修正后估计坐标, 并对满足条件 (邻居节点数: $Q \geq 3$, 由于节点在三维空间^[6] 中坐标涉及 x 、 y 、 z 三个未知参数, 需至少与邻居节点间建立三个含未知参数的距离方程方可求解, 故需使邻居节点数 Q 满足条件: $Q \geq 3$) 的未知节点通过构建与邻居节点间的距离方程组进一步精化其坐标, 以求精后的坐标作为未知节点最终估计坐标。

1 传统 3D-DVHop 定位算法及各类改进定位算法

1.1 传统 3D-DVHop 定位算法

1.1.1 算法原理

由于 DV-Hop 定位算法的应用场景多为三维空间, 故传统 3D-DVHop 定位算法对未知节点的定位成本以及定位误差都会随着空间维度的增加而增加, 该算法对未知节点在三维空间中的坐标定位步骤如下:

①各无线传感器网络节点向以自身为中心、半径为 R 球体范围内相邻节点广播数据包, 直至各节点获知与其他节点间的最小跳数 $MINHops_{ij}$, 记录在各节点的路由向量表^[7] 中。

②各锚节点平均跳距 $AVEHop_i$ 可根据各锚节点坐标 (x_i, y_i, z_i) 、 (x_j, y_j, z_j) 与步骤①中各节点间 $MINHops_{ij}$ 值计算得出:

$$AVEHop_i = \frac{\sum_{j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{\sum_{j \neq i} MINHops_{ij}} \quad (1)$$

③未知节点与各锚节点间估计直线距离 $STRAIGHTdis_{ij}$ 可由步骤①中 $MINHops_{ij}$ 与步骤②中 $AVEHop_i$ 近似计算得:

$$STRAIGHTdis_{ij} = MINHops_{ij} \times AVEHop_i \quad (2)$$

④根据各锚节点坐标与步骤③中 $STRAIGHTdis_{ij}$, 构建含未知节点坐标参数的距离计算方程组, 结合矩阵运算求解各未知节点坐标参数矩阵^[8]。

1.1.2 问题描述

由于传统 3D-DVHop 定位算法^[9] 在计算 $MINHops_{ij}$ 值与 $AVEHop_i$ 值时存在误差从而会影响 $STRAIGHTdis_{ij}$ 值的计算, 导致节点定位误差^[10] 加大, 有以下问题需要改进:

问题 1: 跳数计算误差, 由于在计算相邻节点间 $MINHops_{ij}$ 值时, 未结合两者间距离值 ($DISTANCE$, DIS), 从而造成 $MINHops_{ij}$ 值的计算误差, 如图 1 所示。

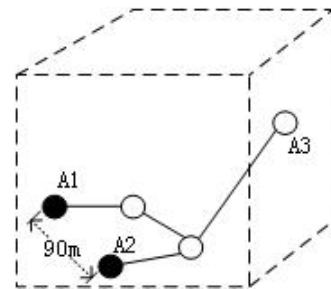


图 1 跳数计算误差示例图

图 1 中, A1、A2 均为锚节点, 故两点间空间直线距离可知, 若相邻节点^[11]间最小跳数以 1 计, 则 A1、A2 间 $MINHops_{ij}$ 值为 3, A2、A3 间 $MINHops_{ij}$ 值为 2, 由式 (1) 可知锚节点 A2 的 $AVEHop_i$ 值为 30m, 从而计算出 A2、A3 间直线距离为 60m, 与实际空间直线距离不符, 甚至小于 A1、A2 间距离。

问题 2: 跳距计算误差, 因计算锚节点 $AVEHop_i$ 值时会使用上述存在误差的 $MINHops_{ij}$, 且非相邻节点间路径并非直线^[12], 从而使得 $AVEHop_i$ 的计算产生较大误差, 造成未知节点坐标计算不准确, 如图 2 所示。

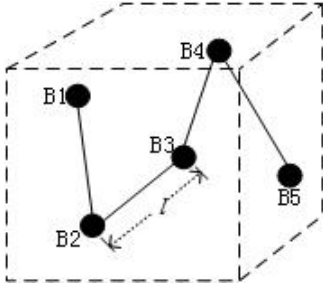


图 2 平均跳距计算误差示例图

图 2 中, B1、B2、B3、B4、B5 皆为锚节点, 由此计算可知 B3 与其余各节点间空间直线距离近似相等, 均设为 l , B3 与 B1、B2、B4、B5 间 $MINHops_{ij}$ 值分别为 2、1、1、2, 由式 (1) 可计算出锚节点 B3 $AVEHop_i$ 值为 $2l/3$, 由式 (2) 可计算得出 B2、B3 间的 $STRAIGHTdis_{ij}$ 值为 $2l/3$, 与实际直线距离不符, 因此需要对跳数、跳距计算进行改进, 以降低未知节点定位误差。

1.2 各类改进定位算法

1.2.1 算法改进原理

针对传统 3D-DVHop 定位算法中跳数与跳距计算不准确从而影响对未知节点定位的问题文献 [13] 提出了一种基于加权的三维 DV-Hop 定位算法^[13], 该算法根据各锚节点间最小跳数构建权值, 并结合该权值对各锚节点平均跳距进行加权计算, 从而降低对未知节点的平均定位误差; 文献 [14] 提出了一种节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法^[14], 该算法根据锚节点坐标方差进行区域划分, 并结合各区域内节点数占总节点数比例对网络平均跳距进行加权求解, 最后采用极大似然法估算未知节点位置, 从而达到降低未知节点平均定位误差的目的; 文献 [15] 提出了一种基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法^[15], 该算法首先利用各相邻节点 (两节点直接进行通信, 不经过任何中间节点) 间接接收与传输的 RSSI 值有所差异构建跳数权值, 其

中 RSSI 值计算方式如下:

由于 RSSI 值是通过接收信号的强度值计算节点间的距离, 故该方法只适用于直接进行通信的单跳相邻节点间距离估算, 若某一节点接收到与其距离为 d 处的相邻单跳节点传输的 RSSI 值为 $P_r(d)$, 接收参考距离 d_0 处节点传输的 RSSI 值为 $P_r(d_0)$, 则:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10\eta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

上式中 η 为路径损耗指数, X_σ 为高斯白噪声; 其次结合最小均方误差与无偏估计对结合式 (1) 所得各锚节点平均跳距 $AVEHop_i$ 进行优化处理, 得出经优化后的平均跳距 $OPAVEHop_i$, 即:

$$OPAVEHop_i = \frac{\sum_{j \neq i} (DIS_{ij} \times MINHops_{ij})}{\sum_{j \neq i} MINHops_{ij}^2} \quad (4)$$

最后结合最大似然估计法求解出未知节点坐标, 从而降低未知节点的平均定位误差。

1.2.2 问题描述

问题 1: 定位成本较高, 由于在定位过程中, 每个锚节点需配置相应全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 设备提供其实时坐标位置, 即: 实际投放锚节点数等于 GPS 设备数, 故实际投放锚节点所占比例 (p) 属算法定位成本^[16]的主要决定因素; 而上述各类改进算法在求解未知节点坐标过程中, 实际投入的锚节点所占比例 (p) 相较传统 3D-DVHop 定位算法未有任何变化, 故未对定位成本有实质性降低。

问题 2: 跳数、跳距修正方法待改进, 上述各类改进算法虽通过修正各节点间 $MINHops_{ij}$ 值、各锚节点 $AVEHop_i$ 值降低了未知节点与各锚节点间 $STRAIGHTdis_{ij}$ 值的计算误差, 但在对各节点间 $MINHops_{ij}$ 值修正过程中未结合相邻节点间距离值 (DIS) 进行分级修正, 无法提升修正结果的真实性, 且各锚节点 $AVEHop_i$ 值的计算未结合全局范围内各锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值进行加权求解, 从而无法兼顾当前局部范围内邻居节点与全局范围其他各节点间 $STRAIGHTdis_{ij}$ 值计算误差的降低。

问题 3: 未进一步精化未知节点坐标, 由于在应用最大似然估计法求得各未知节点估计坐标后, 上述各算法直接将其作为未知节点的最终估计坐标, 并未对其进行进一步修正以及精化, 故未知节点定位误差有待进一步降低。

针对上述问题, 本文提出一种基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法。

2 基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法

2.1 构建密集权重虚拟力模型对锚节点进行移动

由于需通过对极少数锚节点进行移动使得定位成本有实质性降低的同时达同等覆盖效果, 本文通过引入未知节点对锚节点的虚拟力引力移动锚节点, 移动过程中可完全避免锚节点进入网络空洞区域形成无效移动路径, 增加能耗; 虚拟力^[17]引力为矢量, 在未知节点通信半径 R 范围内, 其大小随锚节点与未知节点间距离的增大而减小, 其计算模型如图 3 所示:

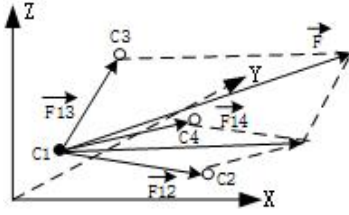


图 3 虚拟力计算示例图

图 3 中, 锚节点 c_1 在其通信范围内所受各未知节点 c_2, c_3, c_4 虚拟力引力大小分别为 F_{12}, F_{13}, F_{14} , 故按平行四边形合力计算法则对其所受各虚拟力作求和运算即可求得其虚拟力 $\vec{F}$, 即:

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} \quad (5)$$

式 (5) 中各未知节点对锚节点的虚拟力矢量具有大小和方向, 且对其值大小计算涉及各未知节点的密集权重加权, 未知节点密集权重可用于表示该节点区域的密集程度, 如图 4 所示:

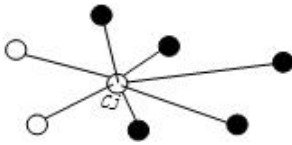


图 4 密集权重计算示例图

图 4 中, 未知节点 c_j 密集权重 M_j 的计算涉及其邻居节点个数 N 以及各邻居节点与其空间直线距离 DIS_{jn} , 即:

$$M_j = \frac{N^2}{\sum_{n=1}^N DIS_{jn}} \quad (6)$$

故锚节点 c_k 所受未知节点 c_j 的虚拟力引力 $\vec{F}_{kj}$ 为

$$\vec{F}_{kj} = (\omega_A \frac{M_j}{DIS_{kj}}, \alpha_{kj}) \quad (7)$$

式 (7) 中, α_{kj} 为未知节点 c_j 与锚节点 c_k 间的方

向角度, ω_A 为虚拟力引力系数, 由未知节点 c_j 接收来自移动锚节点的数据信息包 $VIRTUALbeacon_j$ 个数决定, 当 $VIRTUALbeacon_j \geq 3$ 时, 未知节点 c_j 满足定位条件, 无需移动锚节点继续提供位置信息, 故 ω_A 为 0, $VIRTUALbeacon_j < 3$ 时, 需继续接收位置信息, 其取值情况如下式:

$$\omega_A = \begin{cases} u, u \in (0, 1); VIRTUALbeacon_j = 1 \\ 1; VIRTUALbeacon_j = 2 \\ 0; VIRTUALbeacon_j \geq 3 \end{cases} \quad (8)$$

锚节点根据其通信半径 R 范围内所有未知节点对其施加虚拟力引力合力进行移动, 在降低未知节点定位成本、达到足够比例锚节点覆盖效果的同时, 还可完全避免锚节点移动进入无节点区域。

2.2 相邻节点间跳数分级以及各锚节点间平均跳距加权

因传统 3D-DVHop 定位算法在计算相邻节点间最小跳数时存在误差, 已通过图 1 进行分析例证, 且上述 1.2 节算法在修正过程中未结合相邻节点间 DIS 值, 故本文结合相邻节点间 DIS 值构建相邻节点间跳数分级^[18]并计算最小跳数, 提升跳数计算精度, 具体方法如下:

假设相邻节点间跳数共分为 m (正整数) 个等级, 则:

$$MINNOAHops_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{m}, 0 < DIS \leq \frac{1}{m} R \\ \frac{2}{m}; \frac{1}{m} R < DIS \leq \frac{2}{m} R \\ \vdots \\ \frac{k}{m}; \frac{k-1}{m} R < DIS \leq \frac{k}{m} R, \\ k = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

利用式 (9) 结合式 (3) 中 RSSI 计算方法, 将相邻节点间距离关系转换为接收信号指示强度之间的关系, 即:

$$\begin{aligned} P_r(d_0) - 10\eta \lg \left(\frac{kR}{md_0} \right) + X_\sigma &\leq P_r(d) \\ &< P_r(d_0) - 10\eta \lg \left(\frac{(k+1)R}{md_0} \right) + X_\sigma \end{aligned} \quad (10)$$

若相邻节点间 RSSI 值满足式 (10) 中大小关系, 则相邻节点间最小跳数 $MINNOAHops_{ij}$ 值为: $MINNOAHops_{ij} = \frac{k}{m}$, 各锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值为: $MINHops_{ij} = \sum MINNOAHops_{ij}$, 根据式 (1) 方法并结合上述经修正后的各锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值以及锚节点坐标可求解出锚节点 i, j 间平均跳距 $AVEHop_{ij}$ 值:

$$AVEHop_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{MINHops_{ij}} \quad (11)$$

再根据待求锚节点与其他锚节点间距离值大小

差异赋予不同权值进行加权求精, 权值为:

$$W_{ij} = \frac{MINHops_{ij}^{-1}}{\sum_{i \neq j} MINHops_{ij}^{-1}} \quad (12)$$

从而求得锚节点 i 经加权^[19] 后的平均跳距 $AVEHop_i$, 即:

$$AVEHop_i = \sum_{i \neq j} W_{ij} AVEHop_{ij} \quad (13)$$

结合式 (13) 中的 $AVEHop_i$ 值与经修正的未知节点与各锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值, 采用式 (2) 方法可求得未知节点与各锚节点间 $STRAIGHTdis_{ij}$ (此处为 d_n) 值, 根据该值构建含未知节点坐标参数的距离方程组, 结合矩阵运算求解各未知节点坐标参数矩阵, 即:

$$\begin{cases} (x_1 - \hat{x})^2 + (y_1 - \hat{y})^2 + (z_1 - \hat{z})^2 = d_1^2 \\ (x_2 - \hat{x})^2 + (y_2 - \hat{y})^2 + (z_2 - \hat{z})^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x_n - \hat{x})^2 + (y_n - \hat{y})^2 + (z_n - \hat{z})^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (14)$$

对式 (14) 中前 $n-1$ 个方程式分别与最后一个方程式作求差运算, 再构建未知节点估计坐标求解矩阵: $X = (A^T A)^{-1} A^T b$, 求得未知节点估计坐标, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) & 2(z_1 - z_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) & 2(z_2 - z_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) & 2(z_{n-1} - z_n) \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + z_1^2 - z_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 + z_2^2 - z_n^2 + d_n^2 - d_2^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + z_{n-1}^2 - z_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

本节方法首先通过对相邻节点间 $MINNOAHops_{ij}$ 值进行分级处理, 再结合锚节点坐标及经修正后节点间 $MINHops_{ij}$ 值求解各锚节点间的 $AVEHop_{ij}$ 值, 最后对所得 $AVEHop_{ij}$ 值进行加权求精处理, 以降低未知节点与各锚节点间 d_n 值的计算误差, 从而降低未知节点定位误差。

2.3 进一步精化各未知节点坐标

为避免因各区域节点密度差异较大, 而影响未知节点坐标修正, 可利用各锚节点坐标误差 $(e_{x_i}, e_{y_i}, e_{z_i})$ 计算各未知节点坐标误差, 在 2.2 中应用最大似然估计法求解未知节点坐标的同时, 计算出各锚节点的估计坐标 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$, 从而计算出锚节点 i 的坐标误差, 即:

$$(e_{x_i}, e_{y_i}, e_{z_i}) = (\hat{x}_i - x_i, \hat{y}_i - y_i, \hat{z}_i - z_i) \quad (15)$$

未知节点 k 根据各锚节点 $(e_{x_i}, e_{y_i}, e_{z_i}) (i = 1 \cdots n)$ 值, 结合各节点间经修正后的 $MINHops_{ki}$

值, 构建跳数权重 w_{ki} , 计算得自身估计坐标误差^[20] $(\hat{e}_{x_k}, \hat{e}_{y_k}, \hat{e}_{z_k})$, 即:

$$(\hat{e}_{x_k}, \hat{e}_{y_k}, \hat{e}_{z_k}) = \sum_{i=1}^n w_{ki} (e_{x_i}, e_{y_i}, e_{z_i}) \quad (16)$$

$$w_{ki} = \frac{1/MINHops_{ki}^2}{\sum_{i=1}^n 1/MINHops_{ki}^2} \quad (17)$$

结合上式中求得的坐标误差 $(\hat{e}_{x_k}, \hat{e}_{y_k}, \hat{e}_{z_k})$ 可求解得未知节点 k 精化后的估计坐标 $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k)$, 即:

$$(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k) = (\hat{x} - \hat{e}_{x_k}, \hat{y} - \hat{e}_{y_k}, \hat{z} - \hat{e}_{z_k}) \quad (18)$$

利用锚节点定位误差对所有未知节点坐标修正后, 再对满足条件 ($Q \geq 3$) 的未知节点通过构建与邻居节点间的距离 (d) 方程组进一步精化其坐标, 以求精后的坐标作为未知节点最终估计坐标: $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k)$, 其他未知节点 ($Q < 3$) 保留原有经修正后的坐标值, 相邻节点间距离 d 可根据式 (3) 中 RSSI 值计算方法求得。

本文算法具体实施步骤如下:

①预先设定极少数量的锚节点, 各锚节点结合密集权重以及矢量求和规则计算其通信范围内所有未知节点对其虚拟力引力的合力^[21], 并根据合力大小与方向进行移动。

②各锚节点移动至各通信位置时, 均以自身为中心, 向半径为 R 的球体范围内与其相邻的所有节点 (包含锚节点与未知节点) 广播数据信息包, 各节点接收到信息后通过跳数分级对相邻节点间 $MINNOAHops_{ij}$ 进行修正, 并将修正后的 $MINNOAHops_{ij}$ 储存在自身路由信息表中, 并继续向相邻节点进行广播。

③各节点会经不同路径接收到来自同一锚节点数据信息包, 仅保留自身与锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值最小的数据包, 并利用各锚节点间 $MINHops_{ij}$ 值与结合式 (1) 方法计算出各锚节点间 $AVEHop_{ij}$ 值, 并结合该值对各锚节点 $AVEHop_{ij}$ 值加权求精, 并将求精后的 $AVEHop_{ij}$ 值继续进行广播。

④根据步骤②中经修正后的各未知节点与锚节点间 $MINHops_{ki}$ 、锚节点与锚节点间 $MINHops_{ij}$ 、步骤③中经加权求精的锚节点 $AVEHop_{ij}$ 值, 结合式 (2) 方法可计算出各未知节点与锚节点、锚节点与锚节点间的 $STRAIGHTdis_{ki}$ 、 $STRAIGHTdis_{ij}$ 估计值, 并采用最大似然估计法构建含未知参数坐标的距离方程组, 求解所有节点 (包括锚节点) 的估计坐标 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 、 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ 。

⑤根据式 (15) 中计算方法可知各锚节点坐标误差 $(e_{x_i}, e_{y_i}, e_{z_i})$, 再由各未知节点与各锚节点间 $MINHops_{ki}$ 值构建跳数权重 w_{ki} , 结合式 (16)、(18) 计算方法, 得各未知节点 $(\hat{e}_{x_k}, \hat{e}_{y_k}, \hat{e}_{z_k})$ 值, 以及其经修正后的 $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k)$ 值。

⑥对步骤⑤中满足条件 $(Q \geq 3)$ 的未知节点通过构建与邻居节点间的距离 (d) 方程组进一步精化其坐标, 以求精后的坐标值作为未知节点最终 $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k)$ 值, 其他未知节点 $(Q < 3)$ 保留⑤中经修正后坐标值。

3 算法仿真及实验结果分析

3.1 评价指标

本文以传统 3D-DVHop 定位算法 (以下简称: 3D-DVHop)、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法 (以下简称: 3DW-DVHop)、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法 (以下简称: 3DPHW-DVHop)、基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法 (以下简称: 3DHWHD-DVHop)、基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法 (以下简称: 3D-DVHop-ACR) 五类算法对未知节点定位误差的平均值 ($ErrEvg$)、实际投放锚节点比例 (p) 作为衡量各类算法优劣的指标, 若平均定位误差 ($ErrEvg$) 与实际投放锚节点比例 (p) 越低, 则定位更为精确, 定位成本越低。

在对未知节点定位过程中, 所投放的实际锚节点数即为所需 GPS 装置数, 因此可通过统计各算法中实际投放锚节点比例 p 对比分析各算法定位成本。且本文所提算法通过移动锚节点在各通信位置发送数据信息包, 从而达到与实验结果中设定锚节点比例 V 相同覆盖效果甚至更优, 故其实际投放锚节点比例 p 与实验结果中的锚节点比例 V 不等。

为体现实验结果的真实性以及可靠性, 以所有 (共 N 个) 未知节点的 $ErrEvg$ 值作为算法优劣指标, 结合其实际坐标值 (x_k, y_k, z_k) , $ErrEvg$ 计算如下:

$$ErrEvg = \frac{\sum_{k=1}^N \sqrt{(\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2 + (\hat{z}_k - z_k)^2}}{N \times R} \quad (19)$$

3.2 仿真环境及参数设置

使用 matlab2016a 版作为实验仿真软件, 在一定范围的三维区域中, 当设定无线传感器网络节点总数 (S) 为 1000, 节点的初始通信半径 R 为 60m, 实际投放锚节点比例 (p) 占比节点总数 (S) 的 1% 时, 构建相应实验仿真场景, 如图 5 所示:

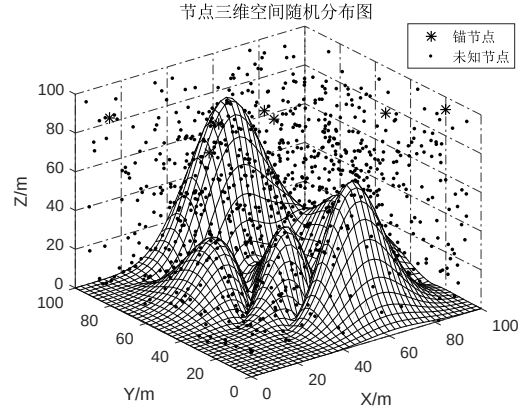


图5 随机节点分布图

设置各算法程序运行次数为 100, 并通过设定不同的锚节点比例 V 、节点通信半径 R 、节点总数 S , 对比分析三种算法对未知节点 $ErrEvg$ 值在不同条件 (V 、 R 、 S) 下分别随 V 、 R 以及 S 的变化情况, 从而得出结论。

3.3 实验仿真结果及分析

3.3.1 各算法定位成本对比

由于实验分析中会统计在不同条件 (V 、 R 、 S) 下所有未知节点的值分别随锚节点比例 V 、节点通信半径 R 、节点总数 S 的变化情况, 故可通过统计在不同实验条件 (R 、 S) 下各算法实际投放锚节点比例 (p) 进行定位成本对比, 因对比指标为所占比例而非数量, 故节点总数 S 可不变, 实验统计结果如下:

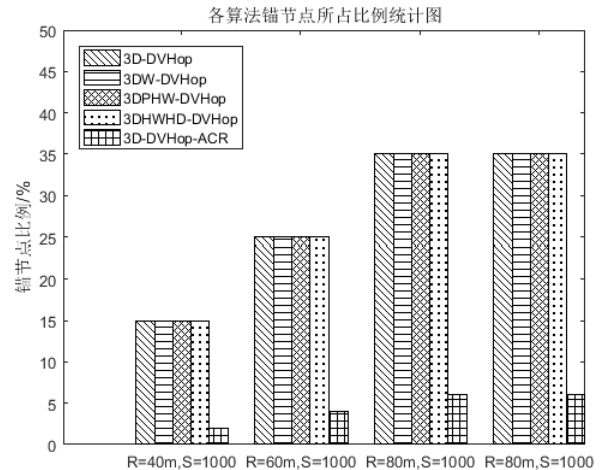


图6 实际投放锚节点比例 (p) 统计图

根据图 6 中对各算法实际投放锚节点比例 (p) 统计结果可知, 当实验条件为: $R=40m$ 、 $S=1000$ 时, 各算法实际投放锚节点比例 (p) 皆为本次统计中最小值, 3D-DVHop、3DW-DVHop、3DPHW-DVHop、3DHWHD-DVHop、3D-DVHop-ACR 算法实际投放

锚节点比例 (p) 分别为: 15%、15%、15%、15%、2%, 由此 3D-DVHop-ACR 定位算法相较前四种算法定位成本降低 13%, 当实验条件为: $R=80\text{m}$ 、 $S=1000$ 时, 各算法实际投放锚节点比例 (p) 皆为本次统计中最大值, 3D-DVHop、3DW-DVHop、3DPHW-DVHop、3DHWHD-DVHop、3D-DVHop-ACR 算法实际投放锚节点比例 (p) 分别为: 45%、45%、45%、45%、8%, 由此 3D-DVHop-ACR 定位算法相较前四种算法定位成本降低 37%, 因此本文所提基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法相较传统 3D-DVHop 定位算法、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法、基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法, 其定位成本降低 13%-37%, 对未知节点定位成本有实质性降低。

3.3.2 各算法所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 对比

(1)、在上述图 5 所示三维空间区域中, 分别在不同实验条件 ($R=40\text{m}$ 、 $S=400$, $R=60\text{m}$ 、 $S=600$, $R=80\text{m}$ 、 $S=800$, $R=80\text{m}$ 、 $S=1000$) 下, 计算并统计各算法未知节点在不同锚节点比例 (V) 下的 $ErrEvg$ 值, 统计情况如下:

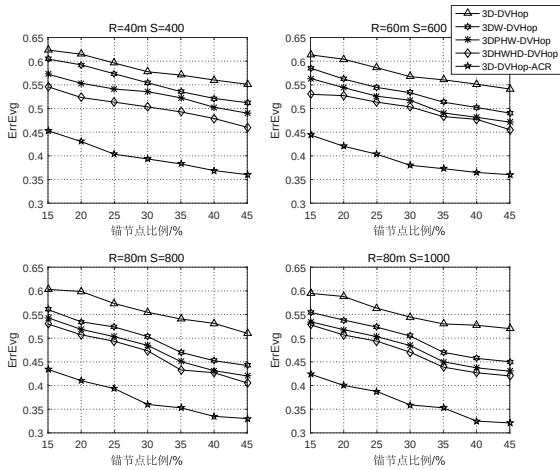


图 7 平均定位误差随锚节点比例变化折线图

由图 7 中实验统计结果知, 3D-DVHop、3DW-DVHop、3DPHW-DVHop、3DHWHD-DVHop、3D-DVHop-ACR 算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均随锚节点比例 (V) 的增加而下降, 且当 $R=40\text{m}$ 、 $S=400$ 、 $V=15\%$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最大值, 分别为: 0.6234、0.6045、0.5723、0.5460、0.4531, 当 $R=80\text{m}$ 、 $S=1000$ 、 $V=45\%$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最小值, 分别为: 0.5203、0.4516、0.4327、0.4204、0.3210; 各算

法误差区间分别为: [0.5203, 0.6234]、[0.4516, 0.6045]、[0.4327, 0.5723]、[0.4204, 0.5460]、[0.3210, 0.4531], 相较而言, 3D-DVHop-ACR 算法对所有未知节点平均定位误差处于低误差区间内。

故本文所提基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法相较传统 3D-DVHop 定位算法、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法、经跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法, 其 $ErrEvg$ 值下降 0.0672-0.3024 (将前四类算法误差区间上限值中最大数值与 3D-DVHop-ACR 算法误差区间下限值的差值作为上限, 将前四类算法误差区间下限值或统计折线结果图中最接近 3D-DVHop-ACR 算法误差区间上限值且高于该上限值的数值与该上限值的差值作为下限, 实验比较结果下同), 对节点定位误差有显著降低。

(2)、在上述图 5 所示三维空间区域中, 分别在不同实验条件 ($R=40\text{m}$ 、 $V=15\%$, $R=60\text{m}$ 、 $V=25\%$, $R=80\text{m}$ 、 $V=35\%$, $R=80\text{m}$ 、 $V=45\%$) 下, 计算并统计各算法未知节点在不同节点总数 (S) 下的 $ErrEvg$ 值, 统计结果如下:

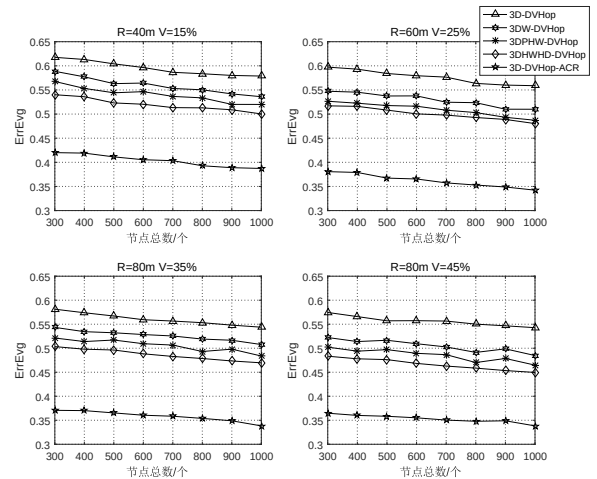


图 8 平均定位误差随节点总数变化折线图

由图 8 中实验统计结果知, 3D-DVHop、3DW-DVHop、3DPHW-DVHop、3DHWHD-DVHop、3D-DVHop-ACR 算法中未知节点 $ErrEvg$ 值均随 S 的增加而下降, 但下降趋势极小, 且当 $R=40\text{m}$ 、 $V=15\%$ 、 $S=300$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最大值, 分别为: 0.6176、0.5886、0.5676、0.5401、0.4201, 当 $R=80\text{m}$ 、 $V=45\%$ 、 $S=1000$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最小值, 分别为: 0.5428、0.4896、0.4648、0.4496、0.3383; 各算法

误差区间分别为: [0.5428, 0.6176]、[0.4896, 0.5886]、[0.4648, 0.5676]、[0.4496, 0.5401]、[0.3383, 0.4201], 相较而言, 3D-DVHop-ACR 算法对所有未知节点平均定位误差仍处于较低误差值区间范围内。

故本文所提基于密集权重虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法相较传统 3D-DVHop 定位算法、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法、基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法, 其 $ErrEvg$ 值下降 0.0295-0.2973, 对节点定位误差有显著降低, 且节点总数 (S) 不属影响未知节点定位误差的关键因素。

(3)、同样在上述图 5 所示三维空间区域中, 分别在不同实验条件 ($V=15\%$ 、 $S=400$, $V=25\%$ 、 $S=600$, $V=35\%$ 、 $S=800$, $V=45\%$ 、 $S=1000$) 下, 计算并统计各算法未知节点在不同节点通信半径 (R) 下的 $ErrEvg$ 值, 统计情况如下:

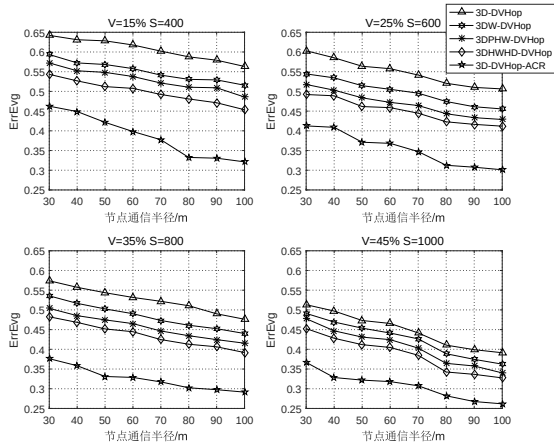


图 9 平均定位误差随锚节点比例变化折线图

由图 9 中实验统计结果知, 3D-DVHop、3DW-DVHop、3DPHW-DVHop、3DHWHD-DVHop、3D-DVHop-ACR 算法未知节点 $ErrEvg$ 均随节点通信半径 (R) 的增加而下降, 且当 $V=15\%$ 、 $S=400$ 、 $R=30\text{m}$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最大值, 分别为: 0.6422、0.5936、0.5722、0.5433、0.4625, 当 $V=45\%$ 、 $S=1000$ 、 $R=100\text{m}$ 时, 各算法对所有未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 均为本次实验统计最小值, 分别为: 0.3913、0.3624、0.3401、0.3275、0.2617; 各算法误差区间分别为: [0.3913, 0.6422]、[0.3624, 0.5936]、[0.3401, 0.5722]、[0.3275, 0.5433]、[0.2617, 0.4625], 相较前四类算法, 3D-DVHop-ACR 算法对所有未知节点平均定位误差还是处于较低误差值区间范围内, 且区间长度较长。

故本文所提基于虚拟力移动锚节点的 3D-

DVHop-ACR 定位算法相较传统 3D-DVHop 定位算法、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法、基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法, 其 $ErrEvg$ 值下降 0.0138-0.3805, 对节点定位误差有显著降低。

3.3.3 3D-DVHop-ACR 算法计算复杂度

3D-DVHop-ACR 算法中所涉及的问题规模大小与节点总数 S 相关, 而算法中基本语句迭代次数由未知节点数量 N 决定, 故可令频度函数 $T(S)$ 为: $T(S)=(I-V)S$, 再将频度函数中 $T(S)$ 所有未知变量全部换成未知因子 τ , 即 $T(\tau)=\tau-\tau^2$, 当 τ 趋于无穷大时, $\exists$ 函数 $f(\tau)$ 使得:

$$\exists f(\tau), \text{ 使 } \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{T(\tau)}{f(\tau)} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{\tau - \tau^2}{\tau^2} = c \neq 0$$

c 为常数, 则 $f(\tau)$ 为 $T(\tau)$ 同数量级函数, 故算法时间复杂度 $O(f(\tau))$ 为: $O(\tau^2)$ 。

4 结 论

本文提出了一种基于虚拟力移动锚节点的 3D-DVHop-ACR 定位算法, 该算法通过引入虚拟力对锚节点进行移动降低算法的实际投放锚节点比例 (p), 并结合跳数分级与跳距加权以及误差修正与二次求精降低算法对未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$), 通过对各类算法进行对比实验表明: 本文算法对未知点定位成本以及对未知节点平均定位误差 ($ErrEvg$) 相较传统 3D-DVHop 定位算法、基于加权的三维 DV-Hop 定位算法、节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法、基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法确有显著降低。

参考文献 (References)

- [1] LUO Xiaoyuan, ZHONG Wenjing, LI Xiaolei, GUAN Xinping. Rigid graph-based three-dimension localization algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(05): 927-936.
- [2] Pengcheng ZHU, Bingqian XU, Jiamin LI, Dongming WANG. Joint utility optimization for wireless sensor networks with energy harvesting and cooperation[J]. Science China (Information Sciences), 2020, 63(02): 146-159.
- [3] Kim W, Park J, Kim H J, et al. A multi-class classification approach for target localization in wireless sensor networks[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 28(01): 323-329.
- [4] SHEN Shikai, YANG Bin, QIAN Kaiguo, SHE Yumei, WANG Wu. On Improved DV-Hop Localization Algorithm for Accurate Node Localization in Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(03): 658-666.

- [5] Chen H, Gao F, Martins M, et al. Accurate and Efficient Node Localization for Mobile Sensor Networks[J]. Mobile Networks & Applications, 2013, 18(01):141-147
- [6] Duo ZHANG, Mei-qin LIU, Sen-lin ZHANG, Zhen FAN, Qun-fei ZHANG. Mutual-information based weighted fusion for target tracking in underwater wireless sensor networks[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2018, 19(04):544-556.
- [7] Wen-yan CUI, Xiang-ru MENG, Bin-feng YANG, Huan-huan YANG, Zhi-yuan ZHAO. An efficient lossy link localization approach for wireless sensor networks[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(05):689-707.
- [8] 谢浩. 无线传感器网络 DV-Hop 定位算法的研究与改进 [D]. 华南理工大学, 2017. (Hao Xie. Research and Improvement of DV-Hop Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks [D]. South China University of Technology, 2017.)
- [9] 刘春生, 单洪, 王斌, 黄郡. 基于 Bregman 散度的无线传感器网络定位 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2019, 53(08):1525-1535. (Liu Chunsheng, Shan Hong, Wang Bin, Huang Jun. Localization of Wireless Sensor Networks Based on Bregman Divergence [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2019, 53(08):1525-1535.)
- [10] 尹雨晴, 高守婉, 王小旗, 牛强. 基于随机游走的无线传感器网络节点定位方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(02):75-80. (Yin Yuqing, Gao Shou Wan, Wang Xiaoqi, Niu Qiang. Node Localization Method for Wireless Sensor Networks Based on Random Walk [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(02):75-80.)
- [11] 王小平, 罗军, 沈昌祥. 无线传感器网络定位理论和算法 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(03):353-363. (Wang Xiaoping, Luo Jun, Shen Changxiang. Localization Theory and Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. Computer Research and Development, 2011, 48(03):353-363.)
- [12] 刘锋, 张翰, 杨骥. 一种基于加权处理的无线传感器网络平均跳距离估计算法 [J]. 电子与信息学报, 2008(05):1222-1225. (Liu Feng, Han Zhang, Yang Ji. An average hop distance estimation algorithm for wireless sensor networks based on weighted processing [J]. Journal of Electronics and Information, 2008(05):1222-1225.)
- [13] 李琳, 赵可, 林志贵, 王鹏. 基于加权的三维 DV-Hop 定位算法 [J]. 控制工程, 2015, 22(04):761-764. (Lin Li, Zhao Ke, Lin Zhigui, Wang Peng. Weighted 3D DV-Hop localization algorithm [J]. Control Engineering, 2015, 22(04):761-764.)
- [14] 张伯泉, 王瑞成. 节点分区与平均跳数加权的三维 DV-Hop 定位算法 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(12):240-243+257. (Zhang Boquan, Wang Ruicheng. Node partition and average hop weighted 3D DV-Hop localization algorithm [J]. Computer Engineering and Application, 2018, 54(12):240-243+257.)
- [15] 张晶, 罗施章, 付鑫, 保峻嵘, 徐亮. 基于跳数加权与跳距优化的 3D-DVHop 定位算法 [J/OL]. 控制工程: 1-7 [2020-04-22]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20190372>. (Zhang Jing, Luo Shizhang, Fu Xin, Bao Junrong, Liang Xu. 3D-DVHop Location Algorithm Based on Hop Weight and Hop Distance Optimization [J/OL]. Control Engineering: 1-7 [2020-04-22]. [HTTPS://DOI.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20190372](https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20190372).)
- [16] 刘影, 钱志鸿. 基于网络连通性的移动锚节点定位算法 [J]. 通信学报, 2017, 38(04):149-157. (Liu Ying, Qian Zhihong. Mobile Anchor Node Localization Algorithm Based on Network Connectivity [J]. Journal of Communications, 2017, 38(04):149-157.)
- [17] 蒲石. 无线传感器网络节点定位与移动锚节点路径规划 [D]. 华东理工大学, 2014. (Pu Shi. Node Localization and Mobile Anchor Node Path Planning in Wireless Sensor Networks [D]. East China University of Technology, 2014.)
- [18] 黄越洋, 井元伟, 张嗣瀛, 石元博. 基于样本均值和中位值的粒子群优化定位算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(07):913-917. (Huang Yueyang, Jing Yuanwei, Zhang Siying, Shi Yuanbo. Particle Swarm Optimization Localization Algorithm Based on Sample Mean and Median [J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition), 2018, 39(07):913-917.)
- [19] 苗春雨, 陈丽娜, 吴建军, 周家庆, 冯旭杭. 无线传感器网络节点位置验证框架 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(06):1231-1243. (Miao Chunyu, Chen Lina, Wu Jianjun, Zhou Jiaqing, Feng Xuhang. Node Location Verification Framework for Wireless Sensor Networks [J]. Computer Research and Development, 2019, 56(06):1231-1243.)
- [20] 任克强, 潘翠敏. RSSI 模型参数动态修正的协作定位算法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(02):97-102. (Ren Keqiang, Pan Cuimin. Cooperative localization algorithm for dynamic modification of RSSI model parameters [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(02):97-102.)
- [21] 张亚明, 史浩山, 陈客松, 程伟. 一种改进的无线传感器网络优化定位算法 [J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(03):357-362. (Zhang Yaming, Shi Haoshan, Chen Kesong, Cheng Wei. An Improved Optimal Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2015, 44(03):357-362.)

作者简介

张晶 (1974—), 男, 教授, 博士 (博导), 从事信息物理融合系统等研究, E-mail: 1735335400@qq.com;

罗施章 (1994—), 男, 硕士研究生, 从事无线传感器网络、信息物理融合系统的研究, E-mail: 1040470262@qq.com.

付谱平 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事信息物理融合系统的研究, E-mail: 1294502579@qq.com.